

SIRGAS en el Contexto del Marco de Referencia Geodésico Global (GGRF): Evolución, Alcances y Perspectivas

SIRGAS in Global Geodetic Reference Frame (GGRF) Context: Evolution, Scope and Perspectives

Víctor J. Cioce, *Presidente SIRGAS-GTI, LUZ*, William A. Martínez, *Presidente de SIRGAS, ANM*, María V. Mackern, *Vicepresidenta de SIRGAS, UNCuyo, UMaza*, Roberto Pérez Rodino, *Presidente SIRGAS-GTII, UDELAR*, Silvio R. de Freitas, *Presidente SIRGAS-GTIII, UFPR*

Resumen— SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas) es la Sub-comisión 1.3b de la IAG (International Association of Geodesy) y Grupo de Trabajo del IPGH (Instituto Panamericano de Geografía e Historia), y es el encargado de la densificación y mantenimiento continental del ITRF (International Terrestrial Reference Frame), incorporando en épocas más recientes la tarea de definir y establecer un sistema vertical de referencia basado en alturas elipsoidales como componente geométrica y en números geopotenciales (referidos a un valor W_0 global convencional) como componente física. Es adoptado por 20 países de la región, incluyendo a Venezuela, y constituye la infraestructura que brinda soporte a todo proceso de adquisición, tratamiento e interpretación de datos e información geoespacial con carácter tanto científico como técnico, necesario para una amplia gama de tareas que van desde el posicionamiento geodésico hasta el estudio del Sistema Tierra. Es una extensa red de operación continua GNSS (Global Navigation Satellite Systems) quien provee en primer término, productos geodésicos altamente confiables, consistentes y consecuentes con la resolución A/RES/69/266 aprobada por la ONU (Organización de las Naciones Unidas) en relación al Marco de Referencia Geodésico Global para el desarrollo sostenible (GGRF, Global Geodetic Reference Frame). En este sentido, se brinda una panorámica de SIRGAS como parte de esta importante iniciativa mundial.

Palabras clave—GGRF, marco de referencia geodésico, Naciones Unidas, SIRGAS.

Abstract—SIRGAS (Geocentric Reference System for the Americas) is Sub-commission 1.3b of IAG (International Association of Geodesy) and Working Group of (PAIGH) Pan-American Institute for Geography and History, it is responsible for continental densification and maintenance of ITRF (International Terrestrial Reference Frame) including recently a vertical reference system definition and realization based on ellipsoidal heights for geometric component and geopotential

numbers (referred to a global W_0 conventional value) for physics component. SIRGAS is adopted by 20 countries in the region been Venezuela one of them, and establishes infrastructure for supporting every process related to acquisition, manipulation and interpretation of geospatial data and information with scientific and technical purposes, needed for a wide spectrum of tasks from geodetic positioning to Earth System study. By an extensive GNSS (Global Navigation Satellite Systems) network it is providing geodetic products with high accuracy, consistent and consequents with United Nations (UN) resolution A/RES/69/266 approved for realize a GGRF (Global Geodetic Reference Frame) for sustainable development. In this sense, a review of SIRGAS as an important component of this global initiative is presented.

Index terms—GGRF, geodetic reference frame, United Nations, SIRGAS.

I. INTRODUCCIÓN

UNA de las tareas primarias de la geodesia, como disciplina integradora de las geociencias, es la definición, establecimiento y mantenimiento de los sistemas y marcos de referencia imprescindibles, en primer lugar, para garantizar la obtención de resultados consistentes y compatibles a partir de las diferentes técnicas de adquisición geodésica y las estrategias de estimación comúnmente implementadas [1], también constituyen la base para la observación y cuantificación de procesos en el Sistema Tierra, el estudio de la rotación terrestre, el cálculo de órbitas satelitales, posicionamiento, navegación, mantenimiento de las escalas de tiempo, levantamientos geoespaciales y trabajos de ingeniería.

El conjunto de postulados, estándares, constantes, modelos (físicos y matemáticos) y demás elementos que definen un sistema de referencia, y que en consecuencia proporcionan un determinado sistema de coordenadas, son dados por

Artículo entregado para revisión en julio de 2017 a la Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales (ABAE) en el marco del II Congreso Venezolano de Tecnología Espacial (II CVTE).

V. J. Cioce, Presidente Grupo de Trabajo I (Sistema de Referencia) de SIRGAS. Universidad del Zulia (LUZ). Maracaibo, Venezuela. E-mail: vcioce@fing.luz.edu.ve

W. A. Martínez, Presidente de SIRGAS. Agencia Nacional de Minería. Bogotá, Colombia.

M. V. Mackern, Vicepresidente de SIRGAS. Universidad Nacional de Cuyo; Universidad Juan Agustín Maza. Mendoza, Argentina.

R. Pérez Rodino, Presidente Grupo de Trabajo II (Ámbito Nacional) de SIRGAS. Universidad de la República (UDELAR). Montevideo, Uruguay.

S. R. de Freitas, Presidente Grupo de Trabajo III (Datum Vertical) de SIRGAS. Universidade Federal do Paraná (UFPR). Curitiba, Brasil.

convención. En el ámbito geodésico, geofísico y astronómico es el IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) quien provee los dos sistemas de referencia aceptados por estas comunidades: uno geocéntrico cartesiano, fijo a la Tierra y que co-rotata con ella, denominado ITRS (International Terrestrial Reference System); el otro baricéntrico fijo en el espacio e inercial, siendo este el ICRS (International Celestial Reference System). Los marcos de referencia que materializan a cada uno, ITRF (International Terrestrial Reference Frame) e ICRF (International Celestial Reference Frame), también son ofrecidos como productos del IERS.

A la fecha, estos sistemas/marcos de referencia cuentan con altos niveles de calidad (10^{-9} o mejor), lo que en buena medida ha sido posible gracias al incremento en la precisión y exactitud de las observaciones geodésicas, en esencia del VLBI (Very Long Base-line Interferometry), SLR (Satellite Laser Ranging), GNSS (Global Navigation Satellite Systems) y DORIS (Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite). También han sido consecuencia de la demanda actual de resultados más confiables que permitan una mejor representación geoespacial del entorno con miras al desarrollo sustentable, y el entendimiento de procesos propios del Sistema Tierra para la mitigación de riesgos naturales y adaptación al cambio global.

Por tal motivo, esta temática trasciende al campo de la geodesia al punto de involucrar a la sociedad en general. En este sentido, la ONU (Organización de las Naciones Unidas) resolvió promover las acciones necesarias para la consolidación e implementación práctica de un Marco de Referencia Geodésico Global (GGRF por sus siglas en inglés) y el rol desempeñado en la región durante los últimos años por SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas) ha resultado fundamental para el logro de las metas formuladas en términos del establecimiento, consolidación e implementación del GGRF.

II. LA INTEGRACIÓN REGIONAL Y GLOBAL A TRAVÉS DE SIRGAS

SIRGAS surge en 1993 como un proyecto de cooperación internacional entre países suramericanos ante la necesidad de establecer en la región un marco de referencia compatible con las novedosas técnicas de posicionamiento satelital del momento, como el GPS (Global Positioning System). Tales esfuerzos lograron ser tangibles en 1995 cuando es ejecutada la primera campaña de observaciones GPS sobre 58 estaciones distribuidas en América del Sur, experiencia que se repite en el año 2000 extendiéndose a Norte y Centroamérica para sumar 184 estaciones a la red geodésica más precisa desde ese entonces hasta el presente gracias a los avances tecnológicos y científicos que sustentan su permanencia.

Las iniciativas para el aprovechamiento del marco de referencia SIRGAS también comenzaron desde 1995 cuando los países de la región encaminaron acciones para su adopción y consecuente transición de los datums clásicos al geocéntrico. En el caso de Venezuela, de manera simultánea a la campaña SIRGAS95 también se efectuó la campaña REGVEN 1995 (Red Geocéntrica de Venezuela 1995), como densificación de

la red continental en el país. Luego, en 1999 se oficializa el datum SIRGAS-REGVEN según Gaceta Oficial No. 36 653.

El éxito temprano de SIRGAS contó desde el inicio con el apoyo de la IAG (International Association of Geodesy), el IPGH (Instituto Panamericano de Geografía e Historia) y el DGFI-TUM (Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut der Technisches Universität München). Es en el año 2001 cuando la ONU recomienda su adopción como marco de referencia oficial para todos los países del continente durante la celebración de la 7^{ma} Conferencia Cartográfica de las Américas.

La organización representa así un componente de la Comisión 1 (Reference Frames) de la IAG a través de la Subcomisión 1.3 (Regional Reference Frames), responsable del Marco de Referencia Regional para Sur y Centro América (1.3b Regional Reference Frame for South and Central America). Además, se desempeña como un grupo de trabajo de la Comisión de Cartografía del IPGH y ofrece apoyo permanente al Comité Regional de las Naciones Unidas sobre la Gestión de Información Geoespacial para Las Américas (UN-GGIM: Américas).

Se trata entonces, de una comunidad técnica y científica que ha venido procurando de manera coordinada: (1) proveer a la región de un marco de referencia geodésico (geométrico y físico) altamente confiable y consistente a nivel global; (2) implementar y mantener la infraestructura de datos espaciales de la región basada en SIRGAS como capa fundamental, y (3) medir y modelar efectos del cambio global en su área de influencia [2] [3]. Las diferentes acciones encaminadas al logro de estas metas son responsabilidad de tres Grupos de Trabajo cuya interacción armónica bajo la estructura organizativa mostrada en la Fig. 1, rinde frutos de manera sostenida, estos son:

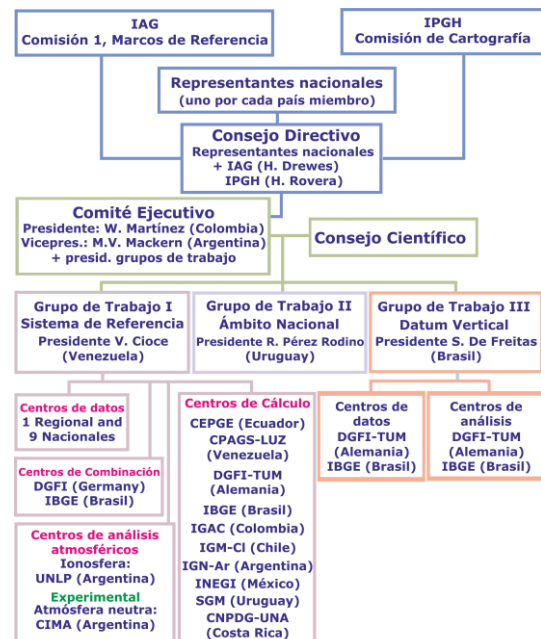


Fig. 1. Estructura organizativa de SIRGAS.

a. SIRGAS-GTI (Sistema de Referencia), coordina las actividades dedicadas a la materialización de SIRGAS a través

del establecimiento y procesamiento de la red GNSS de operación continua que brinda a la comunidad de usuarios productos fundamentales para satisfacer necesidades vinculadas al posicionamiento, navegación, cartografía, estudios atmosféricos y geodinámicos.

b. SIRGAS-GTII (Ámbito Nacional), responsable de promover la adopción de SIRGAS como datum geodésico en todos los países latinoamericanos y caribeños, mediante densificaciones nacionales de la red continental, y también de optimizar su uso en aquellos países que lo han adoptado.

c. SIRGAS-GTIII (Datum Vertical), dedicado a la definición y materialización de un sistema unificado de referencia vertical, conformado por componentes geométricas (alturas elipsoidales) y físicas (números geopotenciales) dadas respecto a una misma superficie equipotencial de carácter global en plena concordancia con el IHRIS (International Height Reference System).

Un nutrido grupo de personas que hacen vida en más de cincuenta entes gubernamentales, académicos y de investigación, de veinte países de la región, constituyen la activa red social que voluntariamente brinda su apoyo desinteresado a favor de promover y desarrollar la geodesia continental. Por ello, SIRGAS representa uno de los mejores ejemplos de cooperación e integración latinoamericana [4], gozando de reconocimiento mundial luego de más de dos décadas de presencia en la región.

III. EL SISTEMA Y MARCO DE REFERENCIA SIRGAS

Por definición, SIRGAS es un sistema de referencia idéntico al ITRS caracterizado por ser geocéntrico cartesiano con origen en el centro de masas de la Tierra (incluyendo océanos y atmósfera). La orientación de sus ejes sigue la convención del BIH (Bureau International de l'Heure) para la época 1984.0, es decir: eje X apunta a la dirección del meridiano de Greenwich, el eje Z está situado en dirección al polo medio de rotación terrestre y el eje Y es perpendicular a ambos formando un sistema de mano derecha. Además, asume al metro como unidad de longitud dado por el BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) y su elipsoide asociado es el GRS80. Mayores detalles pueden encontrarse en [5]. El acceso al ITRS solo es posible a través de su materialización, esta corresponde al ITRF.

En el caso de Latinoamérica y El Caribe, SIRGAS representa la densificación regional del ITRF, que en sus inicios vino dada por un arreglo pasivo de estaciones GPS ocupadas durante las campañas de 1995 y 2000, y hoy en día, por un conjunto de 417 estaciones de operación continua GNSS con capacidad de rastreo GPS y GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) que conforman la SIRGAS-Continuously Operating Network (SIRGAS-CON), consolidada a cabalidad desde 2005. La Fig. 2 muestra la cobertura actual de la red. El marco de referencia continental se hace consistente con el ITRF gracias al procesamiento a intervalos semanales de sus observaciones siguiendo las más recientes convenciones del IERS en cuanto al tratamiento de observaciones geodésicas [5], los estándares que al efecto son ofrecidos por el IGS (International GNSS Service) y los

criterios diseñados por el SIRGAS-GTI para el análisis de la red [6].

La cantidad de estaciones incluidas a SIRGAS-CON ha experimentado un incremento progresivo durante la última década atendiendo a las necesidades de cada país miembro de modernizar su infraestructura geodésica, pasando de redes pasivas a redes continuas. Esta situación desde un punto de vista operativo, justifica [7]:

a. La instalación de los diez Centros de Análisis SIRGAS, como por ejemplo el Centro de Procesamiento y Análisis GNSS SIRGAS de la Universidad del Zulia (CPAGS-LUZ), operativo en la ciudad de Maracaibo, Venezuela, desde 2008, responsables de efectuar el procesamiento coordinado de subconjuntos de estaciones asignados por el SIRGAS-GTI.

b. La división de SIRGAS-CON en dos arreglos: SIRGAS-CON-C, de cobertura continental, que representa la densificación primaria del ITRF en la región con estaciones que han sido elegidas por su estabilidad, ubicación y funcionamiento de manera que se garanticen la consistencia, perdurabilidad y precisión del marco de referencia a través del tiempo, y SIRGAS-CON-D, que agrupa a las densificaciones nacionales de la red continental y provee acceso al marco de referencia en los niveles nacional y local. Ambos arreglos comparten sus características, lo cual ofrece consistencia en cuanto a las condiciones de operatividad y calidad en sus coordenadas semanales.

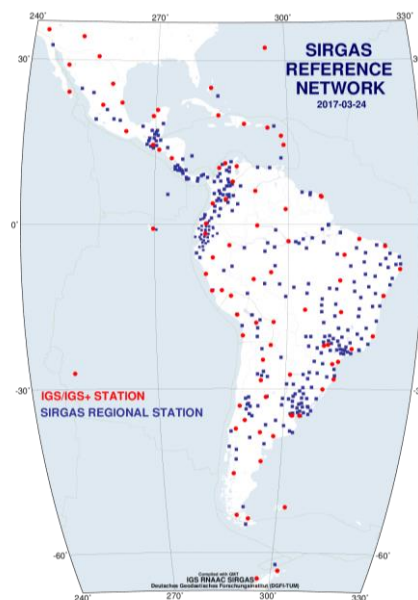


Fig. 2. Red SIRGAS de operación continua, SIRGAS-CON.

Solo la red SIRGAS-CON-C es procesada por el DGFI-TUM (Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut der Technischen Universität München) como Centro de Análisis Asociado al IGS (IGS-RNAAC-SIR, IGS Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS), cuya solución conforma parte del poliedro global del IGS [8]. Los centros locales están a cargo de la red SIRGAS-CON-D.

La calidad con la que se estiman cada semana las coordenadas de las estaciones SIRGAS-CON, luego de la combinación de las soluciones individuales consignadas por cada Centro de Análisis SIRGAS, está en el orden de ± 1 mm

para las componentes horizontales y ± 3 mm para la vertical, esto luego de aplicar rigurosos controles con los que se evalúa su consistencia interna y externa, de manera que toda aplicación técnica o científica que requiera posición geodésica actualizada, de alta exactitud y vinculada al ITRF vigente, i.e. ITRF2014 [9], queda satisfecha gracias a la operatividad de esta red GNSS continua. Al contar con calidad suficiente como para detectar cambios casi imperceptibles en las coordenadas de las estaciones, el cálculo semanal de la red es justificado e imprescindible para mantener el marco actualizado y consistente con el sistema que representa.

En este sentido, fenómenos geofísicos seculares, estacionales y eventuales son responsables de cambios en las coordenadas que desmejoran la calidad del marco de referencia. Un ejemplo representativo se ilustra en la Fig. 3 que muestra la serie de tiempo correspondiente a la posición de la estación Concepción (CONZ00CHL) ubicada en Chile. El efecto del sismo de magnitud 8.8 ocurrido en ese país el 27 de febrero de 2010, impactó el marco de referencia causando en ella un desplazamiento de 305.4 cm en dirección SW, mientras que otras 23 estaciones de la red se movieron más de 1.5 cm.

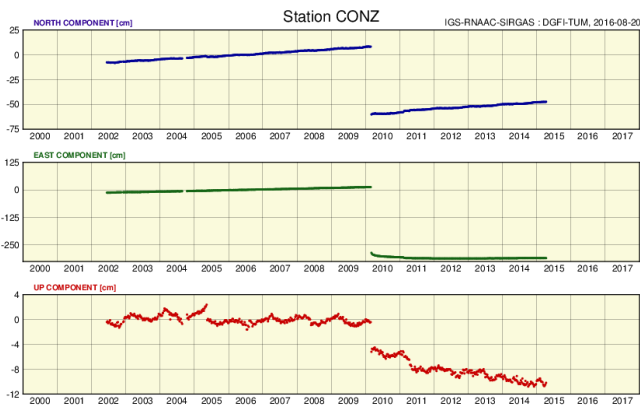


Fig. 3. Efecto del sismo en Chile de magnitud 8.8 sobre a estación SIRGAS-CON Concepción (CONZ00CHL).

Además de la influencia de este tipo de eventos, considerando que los países de la región adoptan a SIRGAS como marco de referencia asociado a una cierta época (e.g. SIRGAS95, consistente con ITRF94, época 1995.4 para el caso de Venezuela), se hace indispensable ofrecer a la comunidad de usuarios información necesaria (e.g. componentes de velocidad) para extrapolar en el tiempo las posiciones por ellos estimadas.

En consecuencia, SIRGAS evalúa la cinemática de la red continental para asegurar la compatibilidad de las coordenadas en el tiempo y la estabilidad del marco de referencia a largo plazo, lo que resulta de gran importancia considerando que existen en la región áreas de intensa actividad geodinámica causando apreciable deformación co-sísmica y post-sísmica que afecta su integridad, desmejorando la calidad nominal que es ofrecida [10]. De ahí que se generen soluciones multianuales en las que se considera la ocurrencia de discontinuidades en la posición de las estaciones debidas a desplazamientos sísmicos y cualquier otra causa de movimiento aparente como cambios en la configuración de las antenas receptoras GNSS.

La solución multianual más reciente cubre un periodo de cinco años (entre el 14.03.2010 a 11.04.2015) tomando las

observaciones GPS+GLONASS registradas después de los fuertes sismos ocurridos en Chile y México en 2010. La solución SIR15P01 ofrece coordenadas con calidad de ± 0.7 mm para la componente norte-sur, ± 0.9 mm para la componente este-oeste y ± 3.5 mm para la altura, y para sus correspondientes velocidades, de ± 0.5 mm/a en la componente norte-sur, ± 0.8 mm/a en la componente este-oeste y ± 1.6 mm/a en la componente vertical, referidas al ITRF2008/IGb08, época 2013.0. Partiendo de esta solución, fue posible actualizar el modelo de velocidades para SIRGAS, denominado Velocity Model for SIRGAS 2015 (VEMOS2015). Los vectores de desplazamiento se representan en la Fig. 4, mayores detalles pueden encontrarse en [11]. Una de las acciones previstas y contempladas dentro de las responsabilidades del SIRGAS-GTI, es la de procurar el reprocesamiento de los datos históricos de la red para generar una nueva solución multianual ahora referida al ITRF2014.

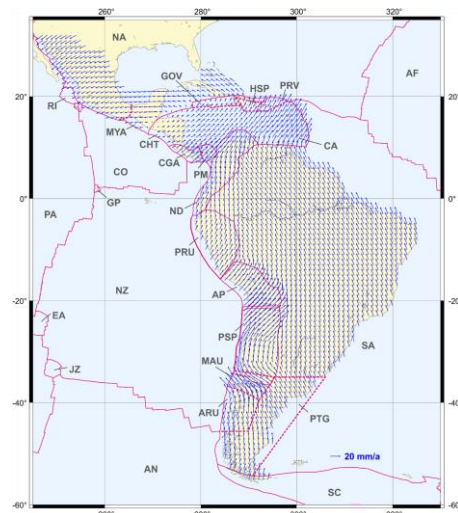


Fig. 4. Campo de velocidades VEMOS2015 [11].

Con la red SIRGAS de operación continua, también se ha comenzado a brindar alternativas que faciliten el acceso al marco de referencia a través de observaciones GNSS en Tiempo Real (GNSS-RT), actividades coordinadas por el SIRGAS-GTII, aprovechando las bondades tecnológicas a nivel instrumental de las que están disponiendo las nuevas estaciones que se incluyen a la red o bien, que se van sustituyendo al cabo de una vida útil. La alternativa explorada durante los últimos años viene dada por la implementación del protocolo NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol). Países como Brasil, con su Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS em tempo real (RBMC-IP) y Uruguay con su Red Geodésica Nacional Activa (REGNA) cuentan con amplia experiencia en la materia.

Desde un punto de vista científico, con el funcionamiento de SIRGAS-CON y su procesamiento a intervalos semanales, se promueven y desarrollan diversas investigaciones sobre aspectos vinculados con el estudio del Sistema Tierra. Destaca al respecto la monitorización de la ionosfera y de la atmosfera neutra mediante observaciones GNSS a cargo de dos Centros de Análisis conformados para tal fin, investigaciones en el área de la geodinámica, detección y cuantificación de movimientos no lineales asociados con fenómenos de carga atmosférica e

hidrológica, y el acercamiento de SIRGAS a otras técnicas de adquisición de la Geodesia Satelital como el VLBI y SLR.

El mantenimiento del marco de referencia, las estrategias para su adecuada adopción y acceso, y el soporte a los estudios de procesos propios del cuerpo terrestre convergen en la infraestructura geodésica definida por SIRGAS siendo fundamental que toda la región se vea involucrada de la mejor manera posible en función de metas comunes que ahora han sido suscritas por las Naciones Unidas en función de las acciones encaminadas para el establecimiento del GGRF.

IV. AVANCES EN EL ESTABLECIMIENTO DEL DATUM VERTICAL

Con la red SIRGAS-CON la componente geométrica del sistema/marco de referencia geodésico continental, consistente con el ITRS/ITRF, es determinable y reproducible a nivel del milímetro. La componente física, es decir, aquella que guarda relación con magnitudes vinculadas al campo gravitatorio terrestre, cuya implementación viene dada a partir de la definición de una superficie de referencia vertical común, es un tópico que dentro de SIRGAS ha venido desarrollándose gracias a la conformación del SIRGAS-GTIII (Datum Vertical) en 1997, con la intención de ofrecer un sistema/marco de referencia geodésico integrado.

Además de las implicaciones científicas que tiene el logro de esta meta en función de los requerimientos actuales de un sistema y marco de referencia altamente preciso para el estudio del Sistema Tierra, un datum vertical unificado permitirá la combinación efectiva y consistente entre coordenadas verticales de uso común: alturas elipsoidales h , alturas ortométricas H (o normales H^N) y alturas geoidales N , lo que a la fecha, no es posible con la calidad deseada (cm o mejor).

Los aportes de SIRGAS en cuanto al establecimiento de una superficie de referencia vertical común para toda la región, siguen las directrices de la IAG en cuanto al IHRS (International Height Reference System) [12], dado en términos del geopotencial al asumir como coordenada vertical (física) primaria a los números geopotenciales (C_p) respecto a la superficie equipotencial del campo gravitatorio terrestre establecida por convención, cuyo valor es $W_0 = 62\ 636\ 853.4\ \text{m}^2\text{s}^{-2}$ [13], y con referencia espacial dada a partir de coordenadas geométricas acordes con el ITRF.

En este sentido, los avances recientes cubren una de las tareas que mayor tiempo demanda, esto es, la recuperación de los datos históricos correspondientes a las redes de nivelación de primer orden y de gravimetría, como elemento fundamental del nuevo sistema de referencia vertical, y su adecuación para la apropiada integración con magnitudes geométricas ya determinadas (alturas elipsoidales de las estaciones de referencia SIRGAS), modelos globales del geopotencial, registros mareográficos y datos altimétricos satelitales, todo esto en cumplimiento de la definición propia del IHRS.

La multiplicidad de datums verticales locales según el nivel medio del mar en mareógrafos de referencia de cada país de la región, representa una de las mayores dificultades. En total, hay 15 sistemas de referencia vertical clásicos (ver Fig. 5), incompatibles y con discrepancia entre sí a nivel del decímetro;

y por otra parte, también las deficiencias en el ajuste de las redes de nivelación que no consideran reducciones gravimétricas (i.e. las alturas no son ortométricas en sí), omiten cambios en la corteza terrestre y nivel medio del mar, carecen de interconexiones fronterizas, entre otras. Algunos países han procurado solventar dichas carencias al efectuar la revisión exhaustiva de sus bases de datos geodésicos, ejecutando nuevas campañas de nivelación y gravimetría (relativa y absoluta) y realizando el cálculo y ajuste de estas redes. Un ejemplo a destacar es Argentina, país que cuenta con un nuevo sistema vertical [14].



Fig. 5. Redes de nivelación geodésica en países de la región y mareógrafos de referencia.

El SIRGAS-GTIII, en base a la organización y tratamiento homogéneo de los datos asociados al sistema de referencia vertical, dirige sus acciones inmediatas al ajuste continental de las redes verticales en términos de números geopotenciales, la determinación de un modelo (cuasi)geoidal único para la región y la transformación/modernización de los sistemas de altura clásicos adoptados por los países miembros de la organización.

A mediano (largo) plazo, se espera que el marco de referencia vertical dado en el IHRS, pueda relacionarse con el ITRS y que las alturas físicas refieran a la misma superficie de referencia del mismo modo en el que las alturas geométricas (elipsoidales) refieren al mismo elipsoide gracias a su vinculación con el ITRF, lo que sin duda sigue requiriendo de grandes esfuerzos técnicos y de cooperación interinstitucional.

V. EL ROL DE SIRGAS DENTRO DEL GGRF

Las Naciones Unidas cuentan con un comité encargado para la Gestión Global de la Información Geoespacial (UN-GGIM), esta iniciativa busca hacer que la información geoespacial precisa, autorizada y confiable esté disponible para apoyar el desarrollo nacional, regional y global [15]. La capa fundamental de la infraestructura de datos espaciales que está siendo conformada, corresponde a la información geodésica que proporciona la referencia posicional consistente y unívoca

de cualquier elemento a ser representado.

De ahí que UN-GGIM conformase un grupo de trabajo dedicado al establecimiento del GGRF (Global Geodetic Reference Frame) como materialización del GGRS (Global Geodetic Reference System), indispensable para la generación de información geoespacial destinada al diseño de políticas para el desarrollo sostenible y la detección de los cambios que ocurren en el Sistema Tierra. En febrero de 2015, durante la Asamblea General de la ONU, se aprueba la resolución A/RES/69/266 para promover la conformación de este marco geodésico único e integral destinado a la representación espacio-temporal de la geometría, campo gravitatorio y orientación terrestre.

Se reconoce a la IAG como la organización responsable de sentar las bases científicas del GGRF, y este representa una de las metas del GGOS (Global Geodetic Observing System). Este marco de referencia debe ser común para identificar y describir todo proceso geodésico y geofísico en cualquier momento, de manera que el ITRF y el ICRF sean fundamentales para cubrir el aspecto geométrico, mientras que el IHRF, a la fecha en vías de desarrollo, completará el aspecto físico.

En este contexto, desde hace 24 años SIRGAS viene impulsando y promoviendo en la región todos aquellos elementos que hoy son considerados para efectos del GGRF, reconocimiento que se dio en 2014 al designar a SIRGAS como representante de las Américas dentro del grupo de trabajo respectivo del UN-GGIM [16].

SIRGAS como marco de referencia geodésico y como macrorred donde converge un numeroso recurso humano, de alto nivel técnico y científico, garantiza todo proceso que derive en la conformación y mantenimiento de la infraestructura geoespacial del continente de acuerdo a la descripción del GGRF dada a conocer por la IAG [17], en la que se prioriza satisfacer las exigentes demandas de información geoespacial más confiable por parte de la sociedad globalizada y tomadores de decisiones, de una manera consecuente con las metas de la Naciones Unidas para el desarrollo sustentable.

Siendo todo el conjunto de observaciones geodésicas la plataforma para la conformación del GGRF, es SIRGAS quien por un lado proporciona en la región un marco de referencia altamente preciso, consistente (mantiene su calidad en cualquier lugar) y estable (mantiene su calidad en cualquier momento) para el posicionamiento y navegación basado en técnicas geodésicas, la generación y manejo de información georreferenciada, aplicaciones en el campo de las geociencias, observación del Sistema Tierra y Cambio Global, apoyo a la gestión de riesgos, y más.

SIRGAS ofrece también un elevado volumen de datos geodésicos recolectados en todo el continente. La clave se encuentra en la red SIRGAS de operación continua, que ocupa un lugar específico en la jerarquía propia del control geodésico, ilustrada en la Fig. 6, por tanto, debe ser prioritario para los países de la región la instalación y/o adecuación de estaciones GNSS que cumplan condiciones para la incorporación y densificación del arreglo continental.

A diferencia de la mayoría de países de Suramérica, la situación de la infraestructura geodésica en Centroamérica y El

Caribe reflejada en la Fig. 7, en la que se aprecia dónde se encuentra la mayor concentración de estaciones de referencia, motiva a SIRGAS a dirigir acciones que permitan reforzar el marco de referencia en aquellas áreas que hoy en día presentan debilidades, ver e.g. [19], o bien, que impulsen la adopción de SIRGAS como datum geodésico en donde aún se siguen empleando datums clásicos. Estas metas han sido asumidas desde el SIRGAS-GTI y -GTII, ahora con un respaldo supranacional a través de la resolución emanada de las Naciones Unidas acerca del GGRF.

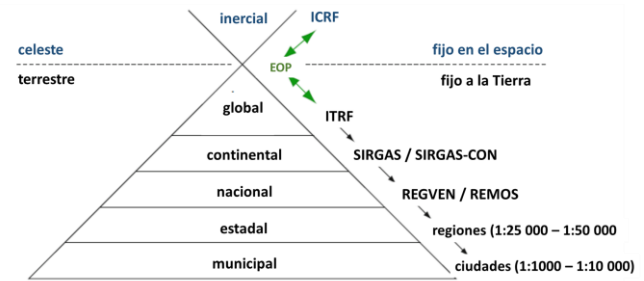


Fig. 6. Relación jerárquica entre marcos de referencia geodésicos [18].

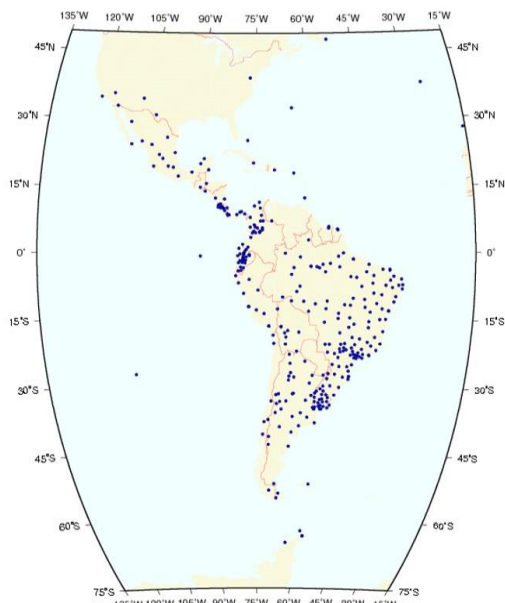


Fig. 7. Estaciones SIRGAS-CON con soluciones semanales.

Acciones como el soporte o asesoría técnica, resaltando las ventajas de adoptar a SIRGAS, así como recomendaciones para incorporar a la red continental las estaciones GNSS de funcionamiento continuo que existen en la zona de interés, instaladas por diferentes organismos nacionales o internacionales, son algunas de las actividades que se están llevando a cabo.

De hecho, la agenda elaborada por el grupo de trabajo GGRF del UN-GGIM insta a los países a ofrecer una infraestructura geodésica nacional más homogénea, y para ello la instalación de una mayor cantidad de estaciones (e.g. GNSS) es indispensable, así como la cooperación y transferencia tecnológica en los casos donde se amerite.

Y si bien la técnica GNSS resulta más accesible, en la región

SIRGAS no debe descartarse la instalación de observatorios geodésicos en donde diferentes técnicas geodésicas (geométricas y físicas) sean integradas; un ejemplo en la región es dado por el Observatorio Argentino-Alemán de Geodesia (AGGO por sus siglas en inglés; <http://www.aggo-conicet.gob.ar>).

Otra línea de acción de especial interés para SIRGAS y por ende, para el GGRF, va dirigida a cubrir su componente física a través del IHRS/IHRF y del IGRS/IGRF (International Gravity Reference System/Frame) según resolución de la IAG emanada en 2015 durante la Asamblea General de la IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics). Es probable que se trate del aspecto que mayor atención requiera pues definir un sistema de alturas unificado y consistente a nivel global demanda solventar las deficiencias e incompatibilidades entre los múltiples datums verticales locales, así como esfuerzos para implementar las novedosas teorías y procedimientos en los que se sustenta la idea dentro del GGRF para garantizar la relación unívoca entre la geometría del cuerpo terrestre con su campo gravitatorio.

SIRGAS ha dado inicio a las primeras acciones para definir el IHRF en la región, proponiendo e instando a los países a seleccionar las estaciones de referencia y efectuar las campañas gravimétricas y de nivelación correspondientes, considerando estaciones GNSS del marco de referencia geométrico, acción que a nivel mundial también está en proceso bajo las pautas de la IAG.

VI. COMENTARIOS FINALES

La demanda actual de datos e información geoespacial confiable y consistente, se ha convertido en el factor común para todos los ámbitos de la sociedad globalizada y en este sentido, es la geodesia la disciplina capaz de proveer insumos y herramientas fundamentales para brindar una infraestructura que permita cumplir tareas cotidianas como el posicionamiento o la navegación, pero también observar y modelar el Sistema Tierra. El conjunto de observaciones realizadas mediante las diferentes técnicas de adquisición geodésica y los sistemas y marcos de referencia, ambos elementos con vinculación intrínseca, juegan un rol protagónico para satisfacer dicha demanda.

En Latinoamérica y El Caribe, es SIRGAS la organización que durante las dos últimas décadas ha estado definiendo las bases de la geodesia continental, a través de un conjunto de acciones canalizadas por sus tres grupos de trabajo, y que se evidencian gracias al establecimiento y mantenimiento de un marco de referencia geodésico, de rasgos geométricos en principio, de alta precisión y compatible con el ITRF. Durante este tiempo, las iniciativas y tareas propias para la adopción y continuidad de SIRGAS en países de la región, así como la definición de la componente física del sistema/marco de referencia, también siguen su curso.

Es así como SIRGAS se caracteriza por ofrecer productos de interés técnico y científico para las geociencias en general, basadas en la operatividad de su red continua GNSS, y también por la cooperación y dinámica de trabajo que involucra un nutrido grupo de instituciones gubernamentales, académicas y

de investigación que conforma su invaluable recurso humano.

Gracias a la resolución de las Naciones Unidas A/RES/69/266, estos esfuerzos ahora se ven encaminados bajo una perspectiva geopolítica en miras del establecimiento de un sistema/marco de referencia global e integrado para el desarrollo sustentable, lo que otorga a SIRGAS mayor representatividad y pertinencia en la región, pues SIRGAS es el GGRS/GGRF del continente.

REFERENCIAS

- [1] M. Seitz, D. Angermann, M. Gerstl, M. Blossfeld, L. Sánchez, F. Seitz. "Geometrical reference systems", en: "Handbook of Geomathematics", 2nd Ed., W. Freeden, M.Z. Nashed, T. Sonar, Ed., Berlin, Alemania: Springer, 2015.
- [2] W. Martínez, M.V. Mackern, V. Cioce, R. Pérez R., S. de Freitas, "Reporte 2016 Boletín Informativo No. 21", Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas, 2017. [Online]. Disponible en: <http://www.sirgas.org>
- [3] M.V. Mackern, W. Martínez, V. Cioce, R. Pérez R., S. de Freitas. (2016). Reporte Anual SIRGAS 2015-2016. Quito, Ecuador. Simposio SIRGAS 2016. [Online]. Disponible en: <http://www.sirgas.org>
- [4] C. Brunini y L. Sánchez, "Geodetic reference frame for the Americas", GIM International, vol. 27, pp. 26-31, 2013.
- [5] G. Petit G. y B. Luzum, Ed, IERS Conventions 2010 Technical Note 36. Frankfurt a.M., Alemania: Verlag des Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2010.
- [6] SIRGAS, Guía para los Centros de Análisis SIRGAS, Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas, 2017. [Online]. Disponible en: <http://www.sirgas.org>
- [7] V. Cioce, S. Alves, M. Gende. (2016). Estado actual de la red SIRGAS-CON: Reporte del Grupo de Trabajo I. Quito, Ecuador. Simposio SIRGAS 2016. [Online]. Disponible en: <http://www.sirgas.org>
- [8] L. Sánchez, "SIRGAS Regional Network Associate Analysis Centre Technical Report 2016", en "IGS Technical Report 2016", A. Villiger y R. Dach, Ed. Astronomisches Institut Universität Bern, 2017. [Online]. Disponible en: <http://www.igs.org>
- [9] Z. Altamimi, P. Rebischung, L. Métivier, X. Collilieux, "ITRF2014: a new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions", Journal of Geophysical Research, Solid Earth, 2016, vol. 121, pp. 6109-6131, 2016, doi:10.1002/2016JB013098
- [10] L. Sánchez, W. Seemüller, H. Drewes, L. Mareo, G. González, A. da Silva, J. Pampillón, W. Martínez, V. Cioce, D. Cisneros, S. Cimbaro. "Long-term stability of the SIRGAS reference frame and episodic station movements caused by the seismic activity in the SIRGAS region", en: "Reference Frames for applications in geosciences", Z. Altamimi y X. Collilieux, Ed., IAG Symposia 138, Berlín, Alemania: Springer, 2013.
- [11] L. Sánchez y H. Drewes, "Crustal deformation and surface kinematics after the 2010 earthquakes in Latin America", Journal of Geodynamics, 2016, doi: 10.1016/j.jog.2016.06.005
- [12] J. Ihde, L. Sánchez, R. Barzaghi, H. Drewes., C. Foerste, T. Gruber, G. Liebsch, U. Marti, R. Pail, S. Sideris, "Definition and Proposed Realization of the International Height Reference System (IHRS)", Surveys in Geophysics, 2017, vol. 38, doi: 10.1007/s10712-017-9409-3
- [13] L. Sánchez, R. Cunderlík, N. Dayoub, K. Mikula, Z. Minarechová, Z. Šíma, V. Vátr, M. Vojtíšková, "A conventional value for the geoid reference potential W_0 ", Journal of Geodesy, 2016, vol. 90, 10.1007/s00190-016-0913-x
- [14] IGN, Red de Nivelación de la República Argentina, Instituto Geográfico Nacional, 2017. [Online]. <http://ramsac.ign.gob.ar>
- [15] W. Martínez. (2014). SIRGAS y el Grupo de Trabajo sobre el Marco de Referencia Geodésico Global para el Desarrollo Sostenible UN-GGIM: GGRF. La Paz, Bolivia. Simposio SIRGAS 2014. [Online]. Disponible en: <http://www.sirgas.org>
- [16] M.V. Mackern y W. Martínez. (2017). Geocentric Reference System for the Americas. Santiago de Chile, Chile. 4th Session UN-GGIM Americas. [Online]. Disponible en: <http://www.sirgas.org>
- [17] IAG, Description of the Global Geodetic Reference Frame, International Association of Geodesy, 2016. [Online]. Disponible en: <http://www.iag-aig.org>

- [18] H. Hase, "Geodesy, Networks and Reference Systems", en "Encyclopedia of Solid Earth Geophysics", H. Gupta, Ed. Berlin, Alemania: Springer, 2011.
- [19] V. Cioce, E. Wildermann, G. Royero, M.F. Rincón, R. Morales, C. Reinoza, F. Audemard, L. Sánchez. (2015). Una alternativa para el mantenimiento del marco de referencia SIRGAS en Venezuela. Santo Domingo, Rep. Dominicana. Simposio SIRGAS 2015. [Online]. Disponible en: <http://www.sirgas.org>



Víctor Cioce. Es MSc. en Ingeniería Ambiental (2010), Ingeniero Geodesta (2007) y Agrimensor (2006) egresado de la Universidad del Zulia (LUZ) en Maracaibo, Venezuela. Actualmente se desempeña como Profesor Asociado e Investigador adscrito al Departamento de Geodesia Superior de la Escuela de Ingeniería Geodésica de LUZ (EIG-

LUZ), responsable de la Unidad Curricular Geodesia Satelital; sus áreas de interés son los sistemas y marcos de referencia geodésicos, fundamentos y aplicaciones del GNSS y estudios atmosféricos basados en técnicas geodésicas. Desde 2009 es el Coordinador del Centro de Procesamiento y Análisis GNSS SIRGAS de LUZ (CPAGS-LUZ), siendo desde 2015 Presidente del Grupo I (Sistema de Referencia) de SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas).



William Martínez. Tiene Maestría en Geografía obteniendo su título en 2015 por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia en Tunja, y recibió en 1993 su titulación como Ingeniero Catastral y Geodesta por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en Bogotá, Colombia. Es experto en las áreas de sistemas de referencia

geodésicos y manejo e integración de información geoespacial, desempeñándose entre 2003 a 2013 como Coordinador del Grupo de Geodesia del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Actualmente labora en condición de Experto, en la Agencia Nacional de Minería de Colombia y es miembro de la Iniciativa de las Naciones Unidas sobre Gestión Global de la Información Geoespacial UN-GGIM. Desde 2015 es Presidente de SIRGAS.



María V. Mackern. Obtuvo su grado de Doctora en Agrimensura por parte de la Universidad Nacional de Catamarca, Argentina, en el año 2003, siendo Ingeniera Agrimensora egresada de la Universidad Nacional de San Juan, Argentina. Se ha dedicado a la investigación sobre la materialización de sistemas de referencia mediante GNSS.

Entre 2008 y 2015 se desempeñó como Presidenta del SIRGAS-GTI y a partir de noviembre de 2015 asume la Vicepresidencia de SIRGAS. Desde 2002 es Profesora Titular de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Juan Agustín Maza y también es docente de la Universidad Nacional de Cuyo, ambas en Mendoza, Argentina. También es Investigadora Adjunta del CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas).



Roberto Pérez Rodino. Es Ingeniero Agrimensor egresado de la Universidad de la República (UDELAR) en Montevideo, Uruguay, donde también se desempeña como Profesor Titular en el Instituto de Agrimensura de la Facultad de Ingeniería. Cuenta con amplia experiencia en la

optimización de observaciones GNSS en Tiempo Real con base a soluciones RTK en red (NTRIP, VRS, MAX), siendo promotor del Proyecto SIRGAS Tiempo Real. Desde 2015 es el Presidente del Grupo de Trabajo II (Ámbito Nacional) de SIRGAS.



Silvio de Freitas. Es Doctor en Geofísica por la Universidade de São Paulo, en Brasil, título conferido en el año 2003, con Maestría en Ciencias Geodésicas y Licenciatura en Física, estos grados otorgados por la Universidade Federal do Paraná (UFPR) en Brasil. Cuenta con una destacada trayectoria en docencia e

investigación en dicha casa de estudios con énfasis en la Geodesia Física y Geodinámica (sistemas geodésicos de referencia, interacción océano-continente, gravimetría, mareas, datum vertical, altimetría satelital y otros tópicos), siendo actualmente Profesor Titular del Programa de Postgrado en Ciencias Geodésicas de la UFPR. Participa en SIRGAS desde 1997 y es Presidente del Grupo III (Datum Vertical) desde 2013.