

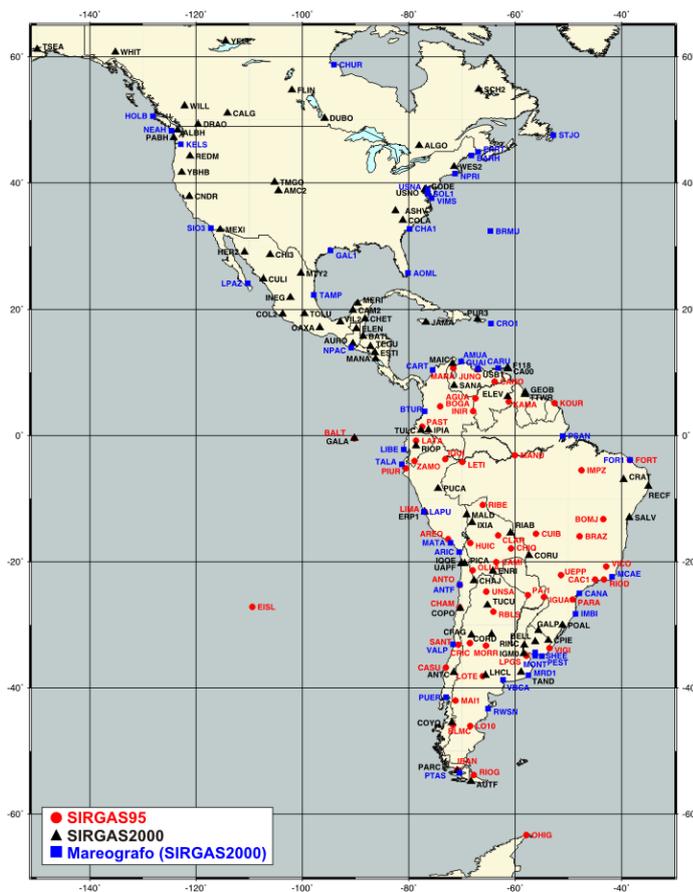
## Resumen

El Marco de Referencia Geodésico Nacional (MARGEN) de Bolivia está conformado por una red GPS de operación continua de 8 estaciones, una red GPS semi-continua de 9 estaciones y una red GPS pasiva de 125 vértices. Durante el mes de marzo de 2010 se adelantó una campaña GPS con el propósito de vincular directamente las estaciones semi-continuas con las continuas y éstas a su vez con el marco de referencia continental SIRGAS. Los resultados presentados en este reporte son los obtenidos del procesamiento adelantado por el DGFI (*Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut*) dentro de las actividades del Grupo de Trabajo II de SIRGAS (SIRGAS-GTII: Datum Geocéntrico). La estrategia de análisis aplicada se basa en el método de diferencias dobles (*doubles differences*), apoyado en las siguientes características de procesamiento: 1) Se introducen como valores conocidos las órbitas satelitales, los parámetros de orientación terrestre y las correcciones a los relojes de los satélites calculados por el IGS (*International GNSS Service*) en sus combinaciones semanales; 2) Las variaciones de los centros de fase de las antenas GPS utilizadas en la ocupación de la red son corregidas aplicando los valores absolutos publicados por el IGS; 3) Las ambigüedades de las ondas L1 y L2 se determinan mediante la estrategia QIF (*quasi ionosphere free*), incluyendo modelos ionosféricos *a priori*; 4) Los movimientos periódicos generados por la carga oceánica sobre las estaciones son reducidos de acuerdo con el modelo de mareas oceánicas FES2004; 5) El retardo causado por la refracción troposférica (componente húmeda de la troposfera) se estima dentro del ajuste de la red a intervalos de dos horas. 6) En el cálculo de la red se incluyen 27 estaciones SIRGAS-CON (red SIRGAS de operación continua) para definir el datum geodésico de la red MARGEN y validar las coordenadas obtenidas. Este procedimiento es aplicado para calcular soluciones libres de las estaciones ocupadas en un mismo día (subredes diarias). Posteriormente, las ecuaciones normales obtenidas son combinadas en una solución integral que incluye todas las estaciones y todos los días de observación. El datum geodésico se define introduciendo como valores conocidos las coordenadas de una selección de estaciones SIRGAS-CON. El análisis completo de la red se adelanta con el software Bernese V. 5.0. Las coordenadas definitivas de la red están dadas en el marco de referencia SIRGAS (equivalente al IGS05, realización IGS del ITRF2005) para la época 2010.2, por ello la red se identifica como MARGEN-SIRGAS. La precisión de las coordenadas finales se estima en torno a  $\pm 1,6$  mm para la componente horizontal y  $\pm 4,5$  mm para la vertical. El reporte concluye con algunas recomendaciones para la utilización práctica de las coordenadas de referencia de la red MARGEN-SIRGAS.

## 1. Introducción

El uso de técnicas apoyadas en satélites para la determinación de coordenadas o trayectorias de navegación sobre la superficie terrestre demanda la utilización de sistemas de referencia que permitan la relación directa entre la posición de los satélites y las coordenadas de los puntos terrestres. En el caso específico del posicionamiento o navegación con técnicas GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), las coordenadas o trayectorias determinadas sobre la superficie de la Tierra están asociadas al mismo sistema de referencia en el que se expresan las efemérides de los satélites GNSS (GPS, GLONASS y próximamente GALILEO). Actualmente, dicho sistema es el Sistema Internacional de Referencia Terrestre (ITRS: *International Terrestrial Reference System*, IERS 2004), el cual es materializado por una red global de estaciones geodésicas con posiciones y velocidades (cambio de las posiciones a través del tiempo) altamente precisas. Esta red se conoce como Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF: *International Terrestrial Reference Frame*). Desde 1988 se calculan

regularmente soluciones del ITRF; en cada nueva solución se incluye un mayor número de observaciones, las cuales a su vez son de mayor calidad, haciendo que las posiciones y velocidades de las estaciones de referencia sean más precisas, ver por ejemplo ITRF2000 (Altamimi et al., 2002), ITRF2005 (Altamimi et al., 2007), ITRF2008 ([http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF\\_solutions/2008/ITRF2008.php](http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008/ITRF2008.php)). La densificación del ITRF en América Latina y El Caribe es el marco de referencia regional SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para Las Américas), el cual a su vez es extendido o densificado en los países de la región mediante las redes nacionales de referencia asociadas a SIRGAS (Sánchez and Brunini, 2009). El uso adecuado de técnicas GNSS en Latinoamérica y en El Caribe requiere, por tanto, de la utilización simultánea de SIRGAS como marco de referencia (Brunini et al. 2010).

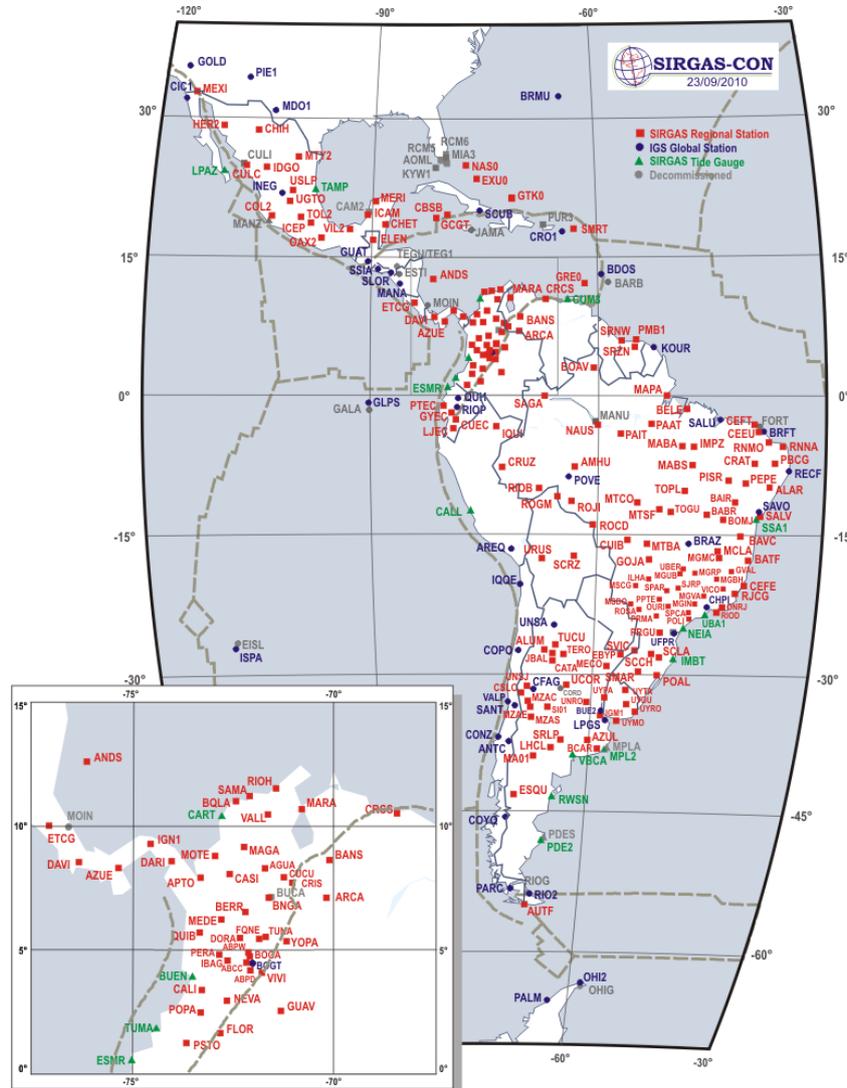


**Figura 1.** Realizaciones SIRGAS95 y SIRGAS2000. En la campaña SIRGAS de 1995 se ocuparon las estaciones bolivianas: Camiri (CAMI), Clara (CLAR), Huichurata (HUIC), Ollague (OLLA), Riberalta (RIBE) y San Juan de Chiquitos (CHIQ). En la campaña SIRGAS de 2000 se agregaron las estaciones: Entre Río (ENRI), Ixiamas (IXIA) y RIA-BE (RIAB).

El Instituto Geográfico Militar (IGM), en su calidad de entidad responsable de las redes de referencia en Bolivia, ha participado activamente en el establecimiento y mantenimiento de SIRGAS. Inicialmente, contribuyó en las campañas GPS continentales llevadas a cabo para el establecimiento de SIRGAS. En la primera campaña en mayo de 1995 (llamada SIRGAS95) se ocuparon 6 estaciones bolivianas 10 días continuos, las cuales fueron procesadas en conjunto con las demás de América del Sur (en total 58). Las coordenadas de estas estaciones están dadas en el ITRF94, época 1995.4 (SIRGAS 1997). Posteriormente, en mayo de 2000, las 58 estaciones de 1995 volvieron a ser medidas con el propósito de conocer el cambio de sus coordenadas a través del tiempo. Es esa oportunidad, el IGM estableció tres estaciones adicionales, quedando Bolivia con 9 estaciones SIRGAS fundamentales (Figura 1). En esta campaña (llamada SIRGAS2000) la red suramericana se extendió a El Caribe, Centro- y Norteamérica e incluyó en total 184 puntos.

Las coordenadas finales de las estaciones SIRGAS2000 están dadas en el ITRF2000, época 2000.4 (Drewes et al. 2005). Actualmente, SIRGAS es materializado por una red de estaciones de operación continua (SIRGAS-CON), que permite el seguimiento permanente del marco de referencia y que ha ido reemplazando las realizaciones SIRGAS95 y SIRGAS2000. La principal ventaja de SIRGAS-CON es que sus coordenadas se determinan semana a semana con respecto al ITRF, posibilitando la detección inmediata de cambios o deformaciones del marco de referencia y aumentando la precisión de las coordenadas de referencia en levantamientos GPS (Brunini et al. 2010). La red SIRGAS-CON está

compuesta por más de 230 estaciones, de las cuales 47 pertenecen a la red global del IGS y las restantes materializan los marcos de referencia nacionales (Figura 2).



**Figura 2.** Red SIRGAS de operación continua (SIRGAS-CON). Incluye las estaciones bolivianas Santacruz (SCRZ) y Oruro (URUS).

Con base en las estaciones SIRGAS95, el IGM inició la determinación del Marco de Referencia Geodésico Nacional (MARGEN). Las primeras actividades estuvieron orientadas al desarrollo de campañas GPS que permitieran 1) densificar la red SIRGAS en el país y, 2) determinar parámetros de transformación entre SIRGAS y la red geodésica antigua (referida al datum PSAD56: Preliminary South American Datum 1956). Hoy por hoy, MARGEN está conformado por una red GPS de operación continua de 8 estaciones, una red GPS semi-continua de 9 estaciones y una red GPS pasiva de 125 vértices. 7 estaciones de la red de operación continua han sido instaladas dentro del desarrollo del proyecto CAP (Central Andes Project, e.g. Bevis et al. 1999, Kendrick et al. 1999, 2003). En la actualidad, las estaciones bolivianas SCRZ y URUS están incluidas en SIRGAS-CON.

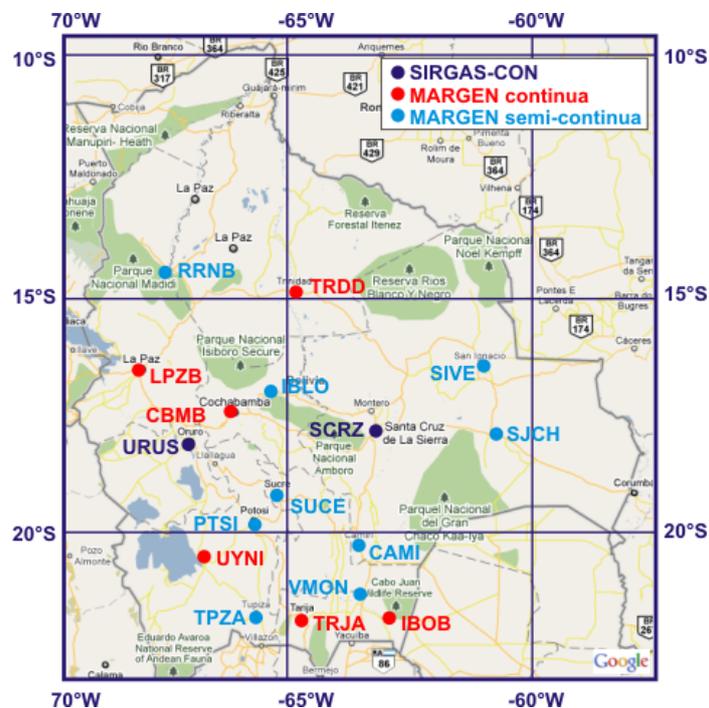
La red GPS semi-continua de MARGEN está formada por 9 puntos materializados siguiendo los estándares para estaciones continuas, pero son ocupados con GPS periódicamente, mientras que es

posible proveerlos de equipos permanentemente. Por último, la red pasiva de MARGEN sirve de densificación de las redes de operación continua y semi-continua.

Con el objetivo de actualizar las coordenadas de MARGEN, en marzo de 2010 se llevó a cabo una campaña GPS que incluyó las 9 estaciones semi-continuas y permitió su vinculación directa a las estaciones MARGEN de operación continua y al marco de referencia SIRGAS-CON. Este trabajo presenta el procesamiento de las observaciones correspondientes, el cual ha sido llevado a cabo por el DGFI en el ámbito de las actividades del Grupo de Trabajo II de SIRGAS (Datum Geocéntrico), a cargo de apoyar las iniciativas nacionales relacionadas con la densificación y uso de SIRGAS.

## 2. Mediciones GPS

Las mediciones de MARGEN, incluyendo el mantenimiento de las estaciones de operación continua, están a cargo del Departamento de Geodesia del IGM. Las estaciones MARGEN de operación continua (Figura 3) están provistas de equipos TRIMBLE (receptor NETRS, antena TRM41249.00) y adelantan mediciones a intervalos de 15 segundos. 10 estaciones de red MARGEN semi-continua (Figura 3) fueron ocupadas con equipos TOPCON (receptor, TPS GB-1000, antena TPSPG\_A1) y la restante con equipos LEICA (receptor ATX900, antena LEIATX900GG). Todas ellas registraron observaciones a intervalos de 15 segundos entre el 1 y el 31 de marzo de 2010. A excepción de las estaciones de operación continua que midieron ininterrumpidamente, las otras fueron ocupadas durante periodos de tiempo diferentes, algunas de ellas durante 5, otras durante 7, 13 o 18 días. Los Anexos 1 y 2 muestran los tiempos de ocupación en cada estación, así como los equipos utilizados.



**Figura 3.** Marco de Referencia Geodésico Nacional (MARGEN) de Bolivia. Incluye 8 estaciones de operación continua (2 de ellas SIRGAS-CON) y 9 estaciones semi-continuas.

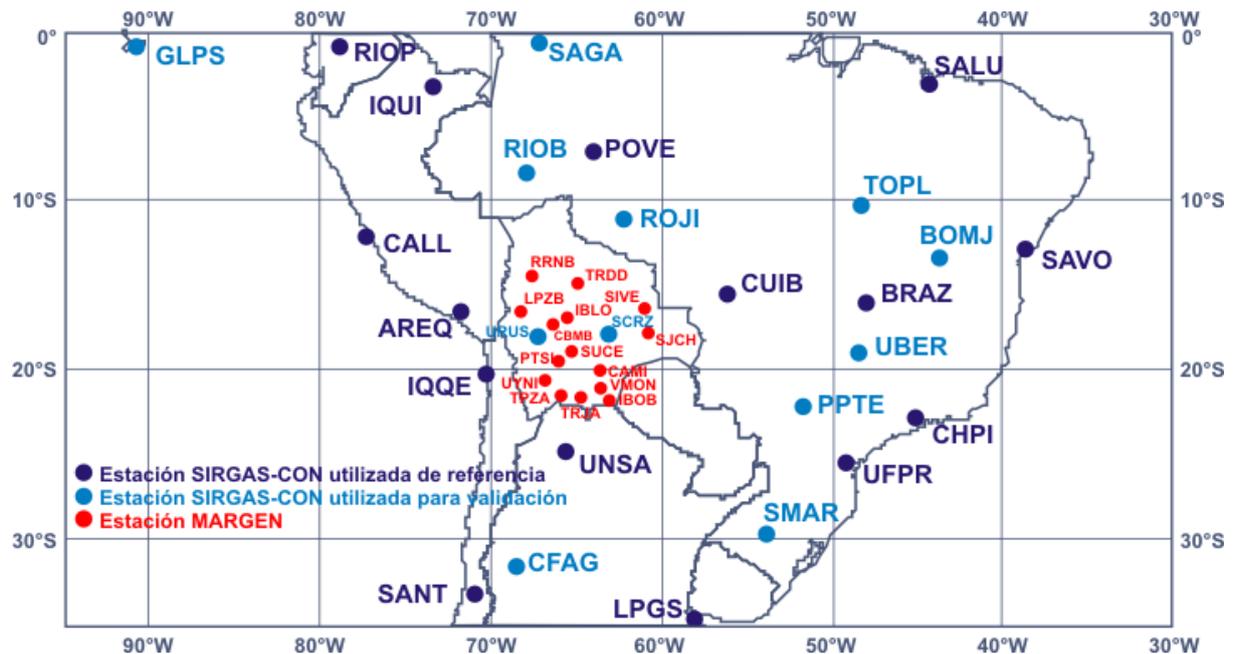
La integración de MARGEN en el marco continental SIRGAS se garantiza a través de su procesamiento simultáneo con estaciones de la red SIRGAS-CON, las cuales a su vez, sirven de estaciones de referencia para el ajuste final de la red. De esta manera, así como SIRGAS es la densificación

continental del ITRF, MARGEN es la densificación nacional de SIRGAS en Bolivia. De acuerdo con esto, en el procesamiento de MARGEN se incluyeron 27 estaciones de la red SIRGAS-CON (Figura 4) con mediciones disponibles para el mismo período de ocupación de MARGEN, es decir entre el 1 y el 31 de marzo de 2010. Dado que el ajuste de los puntos MARGEN se apoya en estaciones y coordenadas SIRGAS, esta red se denomina MARGEN-SIRGAS.

De las 27 estaciones SIRGAS-CON seleccionadas, 15 son utilizadas como estaciones de referencia para la realización del datum de la red MARGEN-SIRGAS, mientras que las otras 12 son utilizadas para verificar la consistencia del ajuste (Figura 3).

Las mediciones de las estaciones SIRGAS-CON se obtuvieron de:

- los bancos de datos del Servicio Internacional GNSS (IGS: *International GNSS Service*, <http://www.igs.org/components/data.html>): AREQ, BRAZ, CFAG, CHP, GLPS, IQQE, LPGS, POVE, RIOP, SALU, SANT, SAVO, UFPR, UNSA;
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, Brasil): BOMJ, CUIB, PPTe, RIOB, ROJI, SAGA, SMAR, TOPL, UBER;
- Instituto Alemán de Investigaciones Geodésicas (DGFI): CALL, IQUI;
- Instituto Geográfico Militar de Bolivia: SCRZ, URUS



**Figura 4.** Estaciones SIRGAS-CON utilizadas para el ajuste de la red MARGEN. 15 estaciones fueron introducidas como de referencia, mientras que las 12 restantes sirvieron para validar los resultados obtenidos.

### 3. Preparación de los datos observados

A cada estación MARGEN se le asignó un código de 4 caracteres (Tabla 1) para su posterior identificación y nomenclatura dentro del ajuste de la red. Los datos de observación originales se transformaron al formato RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) y, dentro de las actividades del Grupo de Trabajo II de SIRGAS (SIRGAS-GTII: Datum Geocéntrico), éstos fueron transferidos al DGFI (Munich, Alemania) para su procesamiento con el software científico Bernese Versión 5.0 (Dach et al. 2007).

**Tabla 1.** Estaciones MARGEN y su designación en códigos de 4 caracteres

| CIUDADES               | DESIGNACION |
|------------------------|-------------|
| CAMIRI                 | CAMI        |
| COCHABAMBA             | CBMB        |
| IBUELO                 | IBLO        |
| IBIBOBO                | IBOB        |
| LA PAZ                 | LPZB        |
| POTOSI                 | PTSI        |
| RURRENABAQUE           | RRNB        |
| SANTA CRUZ             | SCRZ        |
| SAN IGNACIO DE VELASCO | SIVE        |
| SAN JOSE DE CHIQUITOS  | SJCH        |
| SUCRE                  | SUCE        |
| TUPIZA                 | TPZA        |
| TRINIDAD               | TRDD        |
| TARIJA                 | TRJA        |
| ORURO                  | URUS        |
| UYUNI                  | UYNI        |
| VILLAMONTES            | VMON        |

La depuración de la información comprendió los siguientes pasos:

- Verificación de los archivos según las convenciones RINEX;
- Unificación de los nombres de las estaciones y revisión del tipo de receptores y antenas utilizados;
- Control de las alturas de las antenas, en este caso, todas las estaciones fueron procesadas con una altura de 0,0 m. Esto indica que el punto de referencia mismo esa ubicado en el centro electrónico de las antenas utilizadas.

El Anexo 2 resume las principales características de la ocupación GPS de cada una de las estaciones de MARGEN-SIRGAS.

#### 4. Preprocesamiento de las observaciones

El preprocesamiento de los datos se efectuó de acuerdo con la siguiente descripción:

- Conversión de los datos del formato RINEX al formato binario del software Bernese V5.0;
- Cálculo de soluciones preliminares para cada estación, utilizando el código de las señales GPS para determinar la deriva del reloj de los receptores;
- Determinación de líneas de base (formación de diferencias dobles o *double differences*) a partir de la optimización de las observaciones entre pares de estaciones según el criterio de la mayor cantidad posible de mediciones simultáneas;
- Detección y corrección de saltos de ciclo (cycle slips) utilizando medidas de fase y combinando linealmente las frecuencias L1 y L2 en diferencias triples. Este paso incluye la determinación de las ambigüedades de L1 y L2 a través de la estrategia QIF (Dach et al. 2007). Para aumentar el porcentaje de las ambigüedades resueltas se utilizaron modelos a priori diarios de la ionosfera, que en este caso son los generados por el centro de procesamiento CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*, AIUB, Suiza, [www.aiub-download.unibe.ch/CODE](http://www.aiub-download.unibe.ch/CODE)).

## 5. Procesamiento final de los datos

Esta etapa se concentra en la formación de las ecuaciones de observación (relación entre incógnitas y mediciones) mediante la formulación matemática de modelos físicos, y su solución a través del cálculo de compensación por mínimos cuadrados para estimar las coordenadas definitivas de las estaciones. Este cálculo también se efectuó con el software Bernese V5.0 (Dach et al. 2007).

### 5.1 Modelos físicos y matemáticos

**Datos de partida:** Observaciones de fase de las ondas portadoras L1 y L2, corregidas por la deriva del reloj del receptor y por los saltos de ciclo identificados en el preprocesamiento.

- Intervalo de observación: 30 segundos
- Ángulo mínimo de observación: 3°

**Modelo de las ecuaciones de observación:** Diferencias dobles en combinación lineal L3, libre de efectos ionosféricos.

**Modelo de la troposfera:** La dispersión de las frecuencias L1 y L2 en la troposfera no puede determinarse a través de la combinación matemática de éstas, sino que es necesaria la aplicación de modelos físicos que permitan cuantificar el efecto correspondiente. En este caso se utilizó la combinación de dos modelos comunes en una formulación general, estimando sus parámetros reales a partir de las observaciones. El procedimiento correspondiente se resume en:

- a) La refracción troposférica en el cenit (generada principalmente por la componente seca de la troposfera) se determina según el modelo de Saastamoinen (1973);
- b) La refracción desde el cenit hasta el ángulo vertical de la observación analizada es interpolada con la mapping function de Niell (1996);
- c) Los valores obtenidos de los modelos aplicados en a) y b) son refinados mediante la estimación de un parámetro troposférico adicional para cada estación a intervalos de dos horas. Dicha estimación se hace dentro del ajuste de la red a partir de las observaciones mismas de las estaciones. Este refinamiento corresponde al retardo generado principalmente por la componente húmeda de la troposfera.

**Corrección de la variación del centro de fase de las antenas:** El centro de fase de las ondas L1 y L2 en las antenas receptoras no es fijo, sino que la observación registrada está referida a un punto intangible variable, que depende del ángulo vertical y del azimut con los que las señales son capturadas por la antena. Para mejorar la certidumbre de las posiciones determinadas, es necesario que las observaciones sean reducidas desde ese punto variable a un mismo punto común de referencia dentro de la antena. Esto es posible mediante la aplicación de correcciones a las variaciones de los centros de fase, las cuales se determinan mediante la calibración de las antenas GPS receptoras. En el presente análisis, para las antenas de las estaciones SIRGAS-CON y las antenas TRIMBLE TRM41249.00 y TOPCON TPSPG\_A1 se utilizan los valores publicados por el IGS en el modelo IGS05\_1604 (<http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general/>). Para la antena LEICA LEIATX900GG se utilizaron los valores proporcionados por la casa fabricante al IGM.

**Órbitas, correcciones de los relojes satelitales, reducciones a los centros de masa de los satélites:** Se utilizaron los valores calculados por el IGS (Dow et al. 2009) en sus soluciones semanales (<http://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/product/> ... *www*, siendo *www*= semana GPS).

**Orientación del sistema de referencia terrestre con respecto a las órbitas:** Por causa de la variación de la rotación terrestre, ésta cambia su orientación con respecto a las órbitas de los satélites. Dicho cambio afecta la posición de las estaciones terrestres con respecto a los satélites y por tanto, es necesario hacer la reducción correspondiente. Este efecto está descrito por los parámetros de orientación de la Tierra (Earth Rotation Parameters, ERP o Earth Orientation Parameters, EOP). En el presente estudio, se utilizaron los valores publicados por el IGS junto con las órbitas satelitales semanales (Dow et al. 2009).

**Efectos de la carga oceánica:** Los movimientos periódicos generados por la carga oceánica sobre las estaciones son reducidos de acuerdo con el modelo de mareas oceánicas FES2004 (Letellier 2004). Los valores correspondientes son proporcionados por M.S. Bos and H.-G. Scherneck a través de <http://129.16.208.24/loading/>.

## 5.2 Cálculo de compensación

El cálculo de compensación de las coordenadas finales de las estaciones se efectuó en dos pasos:

- Ajuste en red de las estaciones ocupadas en un mismo día (redes parciales diarias), y
- Combinación de las redes diarias entre sí y con las coordenadas de empalme (estaciones SIRGAS-CON) para vincular la red total al dátum geocéntrico.

El primer paso es un ajuste de las observaciones de cada día en forma de redes parciales. En este cálculo no se fija ninguna estación terrestre, sino que se introducen solamente las órbitas precisas de los satélites (dadas por IGS). Estas redes, llamadas "semilibres" presentan una alta consistencia interna, lo que significa que las líneas de base determinadas en su procesamiento son muy precisas, pero por no haberse incluido aún ninguna estación terrestre de referencia, la ubicación de la red con respecto al geocentro es desconocida, es decir las coordenadas geocéntricas [X, Y, Z] de sus estaciones aún no se han determinado. Este ajuste proporciona información sobre la precisión interna de cada día de observación, y la comparación de diferentes días entre sí permite una estimación de la precisión externa de las redes diarias. De esta manera, pueden encontrarse discrepancias en las observaciones e identificarse posibles errores groseros.

En el segundo paso, se acumulan las ecuaciones normales de cada día (redes parciales) y se determinan las incógnitas (coordenadas de las estaciones) a partir de una compensación por el método de los mínimos cuadrados. En este ajuste, el dátum geodésico se define a través de las coordenadas de una selección de estaciones SIRGAS-CON, que sirven de puntos fiduciales y permiten la vinculación de la red semilibre al marco geocéntrico SIRGAS/ITRF. Las coordenadas de referencia se introducen con un peso inversamente proporcional a la precisión interna de las mediciones, de modo que la consistencia interna (geometría de las líneas de base) de la red ajustada se mantenga a pesar de la restricción aplicada a las estaciones de referencia.

De las 27 estaciones SIRGAS-CON mencionadas en el ítem 2, 15 se seleccionaron como estaciones de empalme o fiduciales y las 12 restantes fueron determinadas (ajustadas) junto con

los puntos MARGEN. Las estaciones fiduciales (Figura 4) fueron seleccionadas con base en 1) su distribución geográfica, 2) su uso en la determinación de las órbitas satelitales del IGS (es decir, estaciones que también forman parte de la red global del IGS) y 3) su precisión en el ajuste semanal de la red SIRGAS-CON. Las 13 estaciones no utilizadas como fiduciales, permiten adelantar controles posteriores sobre la calidad de la red ajustada (ver ítem 6).

## 6. Resultados

Las coordenadas de las estaciones de referencia SIRGAS-CON utilizadas para el ajuste final de MARGEN-SIRGAS son los valores semanales determinados para la totalidad de red SIRGAS-CON (Figura 2) en la época media del periodo total de observación, es decir para la semana GPS 1575 (marzo 17 de 2010), que en decimales de año se expresa como 2010.2 (archivo sir10P1575.crd, [www.sirgas.org/index.php?id=153](http://www.sirgas.org/index.php?id=153)). Las coordenadas SIRGAS-CON (Brunini et al. 2010) están dadas en el marco de referencia IGS05 (<http://igscb.jpl.nasa.gov/network/refframe.html>), el cual equivale al ITRF2005, con la diferencia que las coordenadas del ITRF2005 han sido calculadas con correcciones relativas a las variaciones de los centros de fase de las antenas receptoras, mientras que las coordenadas del IGS05 incluyen las correcciones absolutas. Por esto, se acostumbra a decir que el IGS05 es una realización del ITRF2005. De acuerdo con los estándares del IGS, desde noviembre de 2006 deben utilizarse correcciones absolutas a las variaciones de los centros de fase y por tanto, las efemérides satelitales y las coordenadas de las estaciones terrestres se determinan en el IGS05.

Por lo anterior, el resultado del procesamiento final son las coordenadas de las estaciones MARGEN-SIRGAS referidas al marco continental geocéntrico SIRGAS equivalente al IGS05 (realización del ITRF2005) para la época 2010.2 (Anexo 3). Las precisiones de las coordenadas estimadas han sido derivadas del análisis de los errores medios cuadráticos obtenidos para cada estación al comparar las soluciones de las redes diarias parciales con la solución combinada final. En general, la posición horizontal de las estaciones presenta una precisión de  $\pm 1,6$  mm y la posición vertical de  $\pm 4,7$  mm. Como es de esperarse, la certidumbre en la posición horizontal es entre dos y tres veces mayor que en la posición vertical y, mientras menos tiempo se haya ocupado una estación, mayor es el error asociado a sus coordenadas.

Las coordenadas obtenidas directamente después del ajuste son coordenadas geocéntricas cartesianas [X, Y, Z], las cuales se convierten a elipsoidales [ $\varphi$ ,  $\lambda$ , h] utilizando el modelo GRS80 (*Geodetic Reference System*, 1980, Moritz 2000).

La confiabilidad de los resultados obtenidos se verifica mediante:

- a) **Comparación con la solución semilibre de la red:** en este caso las líneas de base calculadas directamente dentro del ajuste semilibre de la red (ver ítem 5.2) son comparadas con las líneas de base derivadas de las coordenadas finales de las estaciones. Esta comparación permite verificar si se presentan deformaciones en la red al ser ajustada a marco de referencia SIRGAS. Los resultados obtenidos muestran residuales promedio de  $\pm 1,2$  mm en la componente horizontal y  $\pm 2,0$  mm en la componente vertical. Como estos valores son mucho menores que la precisión de las coordenadas finales ( $\pm 1,6$  mm para las horizontales y  $\pm 4,7$  mm para la altura), se consideran insignificantes y puede afirmarse que la

consistencia interna de la red se mantiene aún después de ser ajustada al marco continental SIRGAS.

- b) **Comparación con el marco de referencia continental SIRGAS:** como se mencionara en el ítem 5.2, 15 estaciones SIRGAS-CON han sido utilizadas como puntos de referencia en el ajuste de la red, mientras que 12 estaciones adicionales han sido determinadas (ajustadas) junto con los puntos MARGEN. La idea básica es comparar las coordenadas obtenidas en el ajuste de la red MARGEN-SIRGAS para esas 13 estaciones con sus valores equivalentes calculados dentro del procesamiento semanal de toda la red SIRGAS-CON (230 estaciones distribuidas en América Latina y El Caribe, Figura 2, archivo sir10P1575.crd en [www.sirgas.org/index.php?id=153](http://www.sirgas.org/index.php?id=153)). Los residuales obtenidos en esta comparación están al rededor de  $\pm 1,0$  mm en la componente horizontal y  $\pm 1,8$  mm en la componente vertical. Igual que en el caso anterior, éstos resultan insignificantes frente a la precisión de las coordenadas finales y por tanto puede afirmarse que la red nacional MARGEN-SIRGAS no presenta deformaciones relativas con respecto al marco continental SIRGAS.
- c) **Comparación con la red global del IGS:** las estaciones SIRGAS-CON procesadas simultáneamente con los puntos MARGEN incluyen 14 estaciones de la red global del IGS (Figura 4). Las coordenadas de esas estaciones obtenidas dentro del ajuste de MARGEN-SIRGAS son comparadas con las coordenadas calculadas dentro de la solución semanal de la red global del IGS (archivo igs10P1575.ssc, [ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/1575/](http://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/1575/)), de modo que se disponga de un estimativo sobre la consistencia entre esas dos redes. Los residuales obtenidos varían en torno a  $\pm 1,0$  mm en la componente horizontal y  $\pm 2,0$  mm en la componente vertical. Como en las dos comparaciones previas, estos valores son menores que la precisión de las coordenadas finales y por tanto se consideran insignificantes. Esto indica que la red nacional MARGEN-SIRGAS no presenta deformaciones relativas con respecto a la red global del IGS. La tabla 2 resume los principales resultados estadísticos del ajuste.

**Tabla 2.** Precisión de las coordenadas MARGEN-SIRGAS y los resultados de su validación.

| Indicador  | N [mm] | E [mm] | h [mm] |
|--|--------|--------|--------|
| Error medio cuadrático de las coordenadas finales (derivado del análisis de repetibilidad al calcular la solución combinada de las redes diarias).                           | 1,6    | 1,6    | 4,7    |
| Residuales obtenidos de comparar la solución semi-libre de la red con las solución final ajustada a SIRGAS.  | 1,1    | 1,4    | 2,0    |
| Residuales obtenidos de comparar las coordenadas SIRGAS (sir10P1575.crd) con las obtenidas en el ajuste de MARGEN para las estaciones SIRGAS-CON de validación (ver fig. 4). | 0,8    | 1,2    | 1,8    |
| Residuales obtenidos de comparar las coordenadas de la red global IGS (igs10P1575.ssc) con las obtenidas en el ajuste de MARGEN.   | 1,2    | 0,8    | 2,0    |

## 7. Uso de MARGEN-SIRGAS como marco de referencia

Las coordenadas sobre la superficie de la Tierra varían en función del tiempo como consecuencia de los desplazamientos de las placas tectónicas, de las deformaciones de la corteza terrestre y de los movimientos abruptos causados por terremotos. En principio, la parte oeste de Bolivia se encuentra en la zona de deformación entre las placas Suramericana y Nazca, mientras que la parte oeste del país se encuentra sobre la placa Suramericana (Drewes, 2009). Solamente por el movimiento de esas dos placas, la posición de los vértices geodésicos en Bolivia puede variar de 2 a 4 cm por año. A esto

deben agregarse los posibles cambios causados por eventos sísmicos de envergadura: un par de ejemplos ilustrativos están dados por el terremoto de Arequipa (Perú) en julio de 2001 y el de Concepción (Chile) en febrero de 2010. En el primer caso, se detectaron movimientos de más de 60 cm, mientras que en el segundo, las coordenadas de los puntos de referencia de Argentina y Chile variaron entre 5 cm y 3,15 m (Sánchez et al. 2010). Por esto, las coordenadas de MARGEN-SIRGAS representan el promedio correspondiente al tiempo de medición y son válidas sólo para esa época, o sea para 2010.2. Su utilización como coordenadas de referencia en épocas diferentes, demanda su traslado a través del tiempo hasta el momento en que se adelantan las mediciones GPS. En otras palabras, para que las estaciones de MARGEN-SIRGAS mantengan su carácter de marco nacional de referencia y puedan ser utilizadas como puntos de apoyo en levantamientos GPS diferenciales de alta precisión, debe conocerse el cambio de sus coordenadas a través del tiempo (velocidades) con exactitudes enmarcadas en los requerimientos de la geodesia de referencia, es decir mejores que 1 mm/año. Para el efecto, es necesario que las estaciones semi-continuas sean convertidas en continuas y que éstas, junto con las otras 7 existentes, sean incluidas en el procesamiento semanal de la red SIRGAS-CON, de modo que se disponga de sus coordenadas precisas referidas al ITRF y que al término de dos años puedan determinarse sus velocidades siguiendo los estándares establecidos por Servicio Internacional de Rotación Terrestre y Sistemas de Referencia (IERS: *International Earth Rotation and Reference Systems Service*, [www.iers.org](http://www.iers.org)) IERS y el IGS.

En general, se recomienda que los levantamientos GPS de alta precisión sean calculados de la siguiente forma:

- a) Las coordenadas de la estación base (o de referencia) deben estar dadas en la época de observación, en este punto se consideran dos casos:
  - i. Si la estación base es de operación continua y está incluida en la red SIRGAS-CON, se utilizan las posiciones semanales calculadas dentro del análisis de la red (archivos `siryyPwww.crd`, <http://www.sirgas.org/index.php?id=153>).
  - ii. Si la estación base es un monumento (no es de operación continua) o no está incluida en la red SIRGAS-CON, sus coordenadas  $[X, Y, Z]$  deben trasladarse de la época de referencia ( $t_0$ ) a la época de observación ( $t$ ) mediante la aplicación de velocidades  $[V_x, V_y, V_z]$ . Por ejemplo, si las mediciones GPS son efectuadas en enero de 2011, las coordenadas de la estación MARGEN-SIRGAS utilizada deben llevarse de  $t_0 = 2010.2$  a  $t = 2011.0$  mediante:

$$\begin{aligned}
 X(t) &= X(t_0) + (t - t_0) * V_x \\
 Y(t) &= Y(t_0) + (t - t_0) * V_y \\
 Z(t) &= Z(t_0) + (t - t_0) * V_z
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

- b) Como ya se mencionara, lo deseable es que las velocidades  $[V_x, V_y, V_z]$  de las estaciones de referencia puedan determinarse a partir de posicionamientos GPS repetitivos espaciados en el tiempo por más de dos años, o mejor aún, mediante estaciones de operación continua. Si dicha determinación no es posible, deben utilizarse las velocidades representadas por un modelo de deformación de la corteza terrestre. En el caso particular de SIRGAS, se dispone del modelo VEMOS (*Velocity Model for SIRGAS*), el cual ha sido calculado a partir de las coordenadas obtenidas en las diferentes campañas GPS de SIRGAS, de las velocidades estimadas en las soluciones multianuales de la red SIRGAS-CON y de diferentes proyectos

geodinámicos desarrollados en la región (Drewes and Heidbach, 2010). VEMOS se encuentra disponible en [www.sirgas.org](http://www.sirgas.org), sección Velocidades.

- c) Una vez las coordenadas de referencia se encuentran en la misma época en que se realizaron las mediciones GPS, se adelanta el procesamiento correspondiente utilizando efemérides precisas del IGS.
- d) Las coordenadas de los puntos nuevos deben reducirse a la época asociada al marco de referencia nacional, en el caso de Bolivia a 2010.2. Aquí se aplican a los puntos nuevos las mismas velocidades de la estación base (en sentido contrario), es decir para las estaciones SIRGAS-CON se usan las velocidades calculadas en la última solución multianual de la red (e.g. Seemüller et al. 2009); para los puntos monumentados se usan las mismas velocidades aplicadas en el ítem ii) del paso a). En todos los casos las coordenadas de los puntos nuevos deben almacenarse junto con los valores de velocidad utilizados para trasladarlas a la época de referencia y estas mismas velocidades deben aplicarse para llevar las coordenadas hacia adelante cuando los puntos nuevos sirvan de base en levantamientos GPS posteriores. Aquellos puntos cuyas velocidades no han sido derivadas de diferentes ocupaciones GPS (o de posicionamiento continuo), sino interpoladas a partir de cualquier modelo de deformación, no pueden clasificarse como estación de referencia.

## Referencias

- Altamimi, Z., Sillard, P., Boucher, C. (2002). ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications, *Journal of Geophysical Research*, 107, B10, Pag. 2214ff. doi:10.1029/2001JB000561.
- Altamimi, Z., Collilieux, X., Legrand, J., Garayt, B., Boucher, C. (2007). ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters, *Journal of Geophysical Research*, 112, B09401. doi:10.1029/2007JB004949.
- Bevis, M., E.C. Kendrick; R. Smalley; T. Herring; J. Godoy; F. Galban (1999). Crustal motion north and south of the Arica deflection: Comparing recent geodetic results from the Central Andes. In: *G3 Geochemistry; Geophysics; Geosystems*, (1) GC000011.
- Brunini, C., Sánchez, L., Drewes, H., Costa, S., Mackern, V., Martínez, W., Seemüller, W., da Silva, A. (2010). Improved analysis strategy and accessibility of the SIRGAS Reference Frame. In: Pacino, C. et al. (eds.): *Geodesy for Planet Earth, IAG Symposia*, Springer. (En imprenta).
- Dach, R., U. Hugentobler, P. Fridez, M. Meindl. (Eds.) (2007). *Bernese GPS Software Version 5.0 - Documentation*. Astronomical Institute, University of Berne, January, 640 Pp.
- Dow, J. M., Neilan, R., Gendt, G. (2005). The International GPS Service (IGS), Celebrating the 10th Anniversary and Looking to the Next Decade, *Adv. Space Res.*, 36(3), 320-326.
- Drewes, H., Kaniuth, K., Voelksen, C., Alves Costa, S.M., Souto Fortes, L.P. (2005). Results of the SIRGAS campaign 2000 and coordinates variations with respect to the 1995 South American geocentric reference frame. *Springer; IAG Symposia; Vol. 128: 32-37*.
- Drewes, H. (2009). The Actual Plate Kinematic and Crustal Deformation Model (APKIM2005) as basis for a non-rotation ITRF. *Springer. IAG Symposia, Vol. 134: 95-100*.

- Drewes, H., Heidbach, O. (2010). The 2009 horizontal velocity model for South America and the Caribbean. In: Pacino, C. et al. (eds.): *Geodesy for Planet Earth*, IAG Symposia, Springer. (En imprenta)
- IERS (2004). IERS Conventions (2003). IERS Technical Note 32, McCarthy, D., Petit, G. (eds.), Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt a.M.
- Kendrick, E., M. Bevis; R. Smalley (2003). The Nazca - South America Euler vector and its rate of change. In: *J. South Am. Earth Sciences*, (16) 125-131.
- Kendrick, E., M. Bevis; R.F. Smalley Jr.; O. Cifuentes; F. Galban (1999). Current rates of convergence across the Central Andes: Estimates from continuous GPS observations. In: *Geophys. Res. Lett.*, (26) 541-544.
- Letellier, T. (2004). Etude des ondes de marée sur les plateaux continentaux. Thèse doctorale, Université de Toulouse III, Ecole Doctorale des Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace, 237pp.
- Moritz, H. (2000). Geodetic Reference System 1980. *J. Geod.*, 74(1), pp. 128–162, doi:10.1007/S001900050278.
- Neill, A.E. (1996). Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelength. *J. Geophys. Res.* (101) 3227-3246.
- Saastamoinen, J. (1973). Contribution to the theory of atmospheric refraction. Part II: Refraction corrections in satellite geodesy. *Bull. Géod.* (107) 13-34.
- Sánchez, L., Brunini, C. (2009). Achievements and Challenges of SIRGAS. In: Drewes, H. (ed.): *Geodetic Reference Frames*, IAG Symposia, Vol. 134: 161-166, Springer.
- L. Sánchez, W. Seemüller, H. Drewes, L. Mateo, G. González, S. Costa, A. da Silva, J. Pampillón, W. Martínez, V. Cioce, D. Cisneros, S. Cimbaro (2010). Long-term stability of the SIRGAS Reference Frame and episodic station movements caused by the seismic activity in the SIRGAS region. Submitted to Z. Altamimi (Ed.). IAG Commission 1 Symposium on Reference Frames for Applications in Geosciences 2010 (REFAG2010). Marne-La-Vallée, France. October 4 - 8, 2010. IAG Symposia.
- Seemüller, W., M. Seitz, L. Sánchez, H. Drewes. (2009). The position and velocity solution SIR09P01 of the IGS Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS (IGS-RNAAC-SIR). DGFI Report No. 85, July 2009, Pp. 90.
- SIRGAS (1997). SIRGAS Final Report; Working Groups I and II IBGE, Rio de Janeiro; 96 pp.

**Anexo 1.** Tiempos de ocupación GPS de las estaciones MARGEN procesadas dentro del ajuste MARGEN-SIRGAS.

| Estación       | Marzo, 2010 |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----------------|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                | 1           | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 |
| CAMI           |             |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| CBMB           |             |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| IBLO           |             |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| IBOB           |             |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| LPZB           |             |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| PTSI           |             |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| RRNB           |             |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| SCRZ 41801M001 |             |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| SIVE           |             |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| SJCH           |             |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| SUCE           |             |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| TPZA           |             |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| TRDD           |             |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| TRJA           |             |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| URUS 41802M001 |             |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| UYNI           |             |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| VMON           |             |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

**Anexo 2.** Equipos y alturas de antena utilizados en el procesamiento de MARGEN-SIRGAS.

| Estación       | Receptor      | Antena      | Cubierta | Altura de antena |
|----------------|---------------|-------------|----------|------------------|
| CAMI           | TPS GB-1000   | TPSPG_A1    | NONE     | 0,000            |
| CBMB           | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | NONE     | 0,000            |
| IBLO           | TPS GB-1000   | TPSPG_A1    | NONE     | 0,000            |
| IBOB           | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | NONE     | 0,000            |
| LPZB           | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | NONE     | 0,000            |
| PTSI           | LEICA ATX900  | LEIAR10     | NONE     | 0,000            |
| RRNB           | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | NONE     | 0,000            |
| SCRZ 41801M001 | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | NONE     | 0,000            |
| SIVE           | TPS GB-1000   | TPSPG_A1    | NONE     | 0,000            |
| SJCH           | TPS GB-1000   | TPSPG_A1    | NONE     | 0,000            |
| SUCE           | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | NONE     | 0,000            |
| TPZA           | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | NONE     | 0,000            |
| TRDD           | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | NONE     | 0,000            |
| TRJA           | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | NONE     | 0,000            |
| URUS 41802M001 | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | NONE     | 0,000            |
| UYNI           | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | NONE     | 0,000            |
| VMON           | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | NONE     | 0,000            |

**Anexo 3.** Coordenadas estimadas para los vértices del Marco de Referencia Geodésico Nacional de Bolivia: MARGEN-SIRGAS. Marco de referencia SIRGAS (IGS05), época 2010.2. Coordenadas elipsoidales asociadas al elipsoide GRS80.

| Estación       | Coordenadas geocéntricas |              |              |
|----------------|--------------------------|--------------|--------------|
|                | X [m]                    | Y [m]        | Z [m]        |
| CAMI           | 2672371,944              | -5367783,221 | -2169038,354 |
| CBMB           | 2451888,302              | -5574669,486 | -1897658,585 |
| IBLO           | 2544498,127              | -5546548,935 | -1850044,446 |
| IBOB           | 2695212,369              | -5288392,671 | -2327511,835 |
| LPZB           | 2275960,358              | -5681183,750 | -1804179,070 |
| PTSI           | 2470220,412              | -5484683,897 | -2125426,942 |
| RRNB           | 2362043,476              | -5708762,317 | -1580471,457 |
| SCRZ 41801M001 | 2743005,920              | -5420745,272 | -1937117,091 |
| SIVE           | 2972830,889              | -5351723,032 | -1784968,254 |
| SJCH           | 2967913,024              | -5298824,580 | -1942448,148 |
| SUCE           | 2521732,500              | -5483300,140 | -2064966,500 |
| TPZA           | 2442364,687              | -5416784,358 | -2318764,805 |
| TRDD           | 2617088,090              | -5584468,126 | -1621662,278 |
| TRJA           | 2535567,343              | -5368039,421 | -2328780,938 |
| URUS 41802M001 | 2361785,544              | -5595048,671 | -1954576,678 |
| UYNI           | 2353861,805              | -5498849,869 | -2217394,264 |
| VMON           | 2655117,509              | -5321515,654 | -2298286,147 |

| Estación       | Latitud |    |           |   | Longitud |    |           |   | h [m]    |
|----------------|---------|----|-----------|---|----------|----|-----------|---|----------|
|                | °       | '  | "         |   | °        | '  | "         |   |          |
| CAMI           | 20      | 0  | 36,710884 | S | 63       | 32 | 0,247502  | W | 820,539  |
| CBMB           | 17      | 24 | 59,729681 | S | 66       | 15 | 31,775176 | W | 2620,310 |
| IBLO           | 16      | 58 | 22,200313 | S | 65       | 21 | 23,576561 | W | 295,897  |
| IBOB           | 21      | 32 | 33,523684 | S | 62       | 59 | 40,130590 | W | 349,187  |
| LPZB           | 16      | 31 | 47,465568 | S | 68       | 10 | 5,814333  | W | 4090,652 |
| PTSI           | 19      | 34 | 52,825111 | S | 65       | 45 | 14,054337 | W | 3995,254 |
| RRNB           | 14      | 26 | 31,879263 | S | 67       | 31 | 20,298618 | W | 259,384  |
| SCRZ 41801M001 | 17      | 47 | 48,447814 | S | 63       | 9  | 34,826319 | W | 442,080  |
| SIVE           | 16      | 21 | 31,134587 | S | 60       | 56 | 53,691597 | W | 440,104  |
| SJCH           | 17      | 50 | 51,963995 | S | 60       | 44 | 47,297566 | W | 309,679  |
| SUCE           | 19      | 0  | 22,351475 | S | 65       | 18 | 9,432110  | W | 2969,974 |
| TPZA           | 21      | 26 | 53,338181 | S | 65       | 43 | 47,797542 | W | 3053,082 |
| TRDD           | 14      | 49 | 37,637334 | S | 64       | 53 | 25,713438 | W | 181,416  |
| TRJA           | 21      | 32 | 58,137910 | S | 64       | 42 | 59,469809 | W | 1887,179 |
| URUS 41802M001 | 17      | 57 | 10,082480 | S | 67       | 6  | 51,796813 | W | 3767,312 |
| UYNI           | 20      | 27 | 57,400609 | S | 66       | 49 | 33,446318 | W | 3709,928 |
| VMON           | 21      | 15 | 32,169564 | S | 63       | 29 | 0,787312  | W | 412,488  |