

## **RED GEODÉSICA NACIONAL Y LA TRANSFORMACIÓN A SIRGAS-CHILE, REALIZACIÓN DE 2013.0 A 2016.0 PARA CARTOGRAFÍA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.**

### **SIRGAS-CHILE TRANSFORMATION PARAMETERS FROM 2013 TO 2016 OF THE NATIONAL GEODETIC NETWORK FOR CARTOGRAPHIC APPLICATIONS.**

Sr. Juan Carlos Báez<sup>1</sup>, Sr. Henry Montecino Castro<sup>2</sup>, Sr. Sergio Rozas Bornes<sup>3</sup>, Sr. Ignacio Parada Pichuante<sup>3</sup>, Sr. Claudio Reyes Norambuena<sup>3</sup>

#### **RESUMEN**

El Instituto Geográfico Militar (IGM) es la institución encargada de la mantención y actualización del marco de referencia geodésico oficial del país, llamado Red Geodésica Nacional RGN SIRGAS-Chile. Debido a la ubicación sobre la subducción de dos placas tectónicas, Chile presenta importantes desplazamientos y deformaciones temporales sobre la corteza, los cuales, implican deformación de la RGN. Lo anterior conlleva a que las coordenadas calculadas y ajustadas a una determinada época pierdan precisión, situación que impacta los proyectos y bases de datos geográficas utilizados por los usuarios de estos productos. En respuesta a esta problemática, el IGM monitorea estos desplazamientos y ajusta una nueva época de referencia, entregando nuevas coordenadas a los vértices. Para llevar la información desde una época de referencia a otra, se requiere una metodología que haga posible el cambio, minimizando la distorsión de ésta. De esta manera, se calculan parámetros de transformación con el modelo de Helmert 7 parámetros, los cuales son aplicables en los Sistemas de Información Geográfica para actualizar el marco de referencia sin perjuicio de la información contenida. Esta solución satisface el requerimiento principalmente en SIG y soluciones cartográficas, otorgando solución a lo requerido por el IDE-Chile.

Palabras claves: Red Geodésica Nacional, Instituto Geográfico Militar, Parámetros de transformación, marcos de referencia.

#### **ABSTRACT**

The Military Geographic Institute (IGM) is the institution responsible for maintaining and updating the official geodesic reference framework of Chile, called the National Geodesic Network RGN SIRGAS-Chile. Due to the location upon the subduction zone of two tectonic plates, Chile presents important temporary displacements and deformation on the crust, which imply deformation on the RGN. The above means that the coordinates calculated and adjusted for a particular epoch lose accuracy, situation that impacts the projects and geographic databases used by the users of these products. In response to this issue, the IGM monitors these displacements and adjusts to a new reference epoch, providing new coordinates to the vertices. In order to shift the information from one reference epoch to another, a methodology is needed that makes possible this change, minimizing it being distorted. In this way, the transformation parameters are calculated with Helmert methodologies 7 parameters, which are applicable in Geographic Information Systems in order to update the reference framework without damaging the information contained. This solution satisfies the requirements, mainly in the contexts of GIS and cartographic solutions, providing the solution required by the SDI of Chile.

Keywords: National Geodetic Network, Military Geographic Institute, transformation parameters, reference frameworks.

---

<sup>1</sup> Centro Sismológico Nacional

<sup>2</sup> Universidad de Concepción

<sup>3</sup> Instituto Geográfico Militar

Fecha de recepción: 03 de agosto de 2021.

Fecha de aprobación: 30 de Octubre de 2021.

## INTRODUCCIÓN

Chile está posicionado en el cinturón de fuego del Pacífico, lo que lo expone a permanentes deformaciones producto de las placas tectónicas y sus consecuencias. Debido a esta dinámica, los marcos de referencia en Chile se deforman con el paso del tiempo. La solución que ha adoptado el Instituto Geográfico Militar (IGM), es aprovechar el potencial que ofrecen las Estaciones de Referencia de Monitoreo Continuo (CORS) y la medición temporal de vértices distribuidos en terreno para realizar cálculos y ajustes a una nueva época de referencia, que actualice las coordenadas en función de estos desplazamientos. Debido a lo anterior, el IGM actualiza las coordenadas de la Red Geodésica Nacional (RGN SIRGAS-Chile) cada vez que las deformaciones sean significativas, información que se obtiene del monitoreo de las estaciones de operación continua, materializando una nueva época de referencia para los usuarios. Las épocas que han sido calculadas hasta la fecha son 2002.0, 2010.5, 2013.0 y 2016.0, lo que conlleva un problema a los usuarios, ya que sus bases cartográficas deben ser actualizadas a la nueva época oficial cada vez que el IGM la actualiza.

En consecuencia, nace la necesidad de proporcionar los parámetros de transformación y establecer una metodología que permita el cambio de coordenadas entre épocas de referencia, para que los trabajos desarrollados puedan ser actualizados y estar alineados con el marco de referencia oficial.

Por lo tanto, se requiere transformar las coordenadas cartesianas geocéntricas entre las realizaciones de SIRGAS-Chile 2013.0 a 2016.0, con el fin de permitir la migración en los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Además, que esta transformación mantenga el vínculo que posee el marco de referencia SIRGAS – Chile con el ITRF2008.

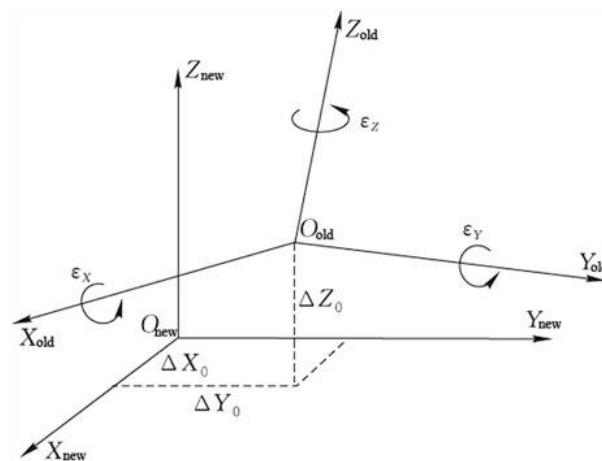
Si bien esto representa una solución estática para un problema cinemático, la estrategia está siendo evaluada conforme a la metodología utilizada en las realizaciones de ITRF 2008, 2014 y en la nueva realización de ITRF2020 (Altamimi et al., 2011; 2014; 2020). En cada una de estas realizaciones de ITRF se han incluido sistemáticamente las correcciones de la red de estaciones por los movimientos, lineales, co-sísmicos, post-sísmicos y

estacionales, mostrando que la metodología propuesta por ITRF reemplaza a las soluciones estáticas por estas aproximaciones cinemáticas.

## REALIZACIÓN

Para transformar coordenadas en los SIG, existe una herramienta útil y ampliamente utilizada, la cual consiste en introducir parámetros para convertir una capa desde un marco de referencia a otro. En general, el modelo utilizado para realizar la transformación, es Helmert 7 (Hofmann-Wellenhof & Moritz, 2005), la geometría general de la transformación es mostrada en la figura 1.

Figura 1; Transformación entre sistemas de coordenadas Cartesianos



Fuente: Lu et al., 2014.

En la figura 1 se pueden apreciar tres parámetros de traslación designados en forma de un vector ( $T$ ), un parámetro correspondiente a la escala ( $s$ ) y tres parámetros correspondientes a los ángulos de rotación ( $\kappa, \phi, \omega$ ). Se considera una rotación positiva cuando gira en sentido contrario a las agujas del reloj alrededor del eje. La fórmula general se puede escribir como:

$$X_{DL} = sR_{\kappa, \phi, \omega}X_{DG} + T \quad (1)$$

Donde  $R_{\kappa, \phi, \omega}$  ( $R_{\kappa}R_{\phi}R_{\omega}$ ) se consideran de la siguiente manera:

$$R_{\kappa}R_{\phi}R_{\omega} = \begin{bmatrix} \cos\kappa & \sin\kappa & 0 \\ -\sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & -\sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & \sin\omega \\ 0 & -\sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix}$$

Para este caso, como los marcos de referencia se diferencian solo por sus épocas, se asume que los ángulos de rotación son pequeños, y entonces, la matriz de rotación puede ser simplificada como:

$$R_{\kappa,\phi,\omega} = \begin{bmatrix} 1 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 1 \end{bmatrix}$$

Reescribiendo la ecuación (1):

$$X_{DL} = s \begin{bmatrix} 1 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 1 \end{bmatrix} X_{DG} + T$$

Ahora, considerando la unidad como valor aproximado para el factor escala, y la corrección como  $\Delta S$ , se tiene:

$$s = 1 + \Delta S$$

Reescribiendo la ecuación (1), en términos de matrices, se obtiene la matriz de similitud:

$$\begin{bmatrix} X_{DL} \\ Y_{DL} \\ Z_{DL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta T_X \\ \Delta T_Y \\ \Delta T_Z \end{bmatrix} + (1 + \Delta S) \begin{bmatrix} 1 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{DG} \\ Y_{DG} \\ Z_{DG} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Para utilizar la ecuación (2) y obtener los siete parámetros, es necesario conocer las coordenadas de vértices en común (mínimo 3 vértices) en ambos marcos de referencia, y luego aplicar un ajuste, típicamente por mínimos cuadrados.

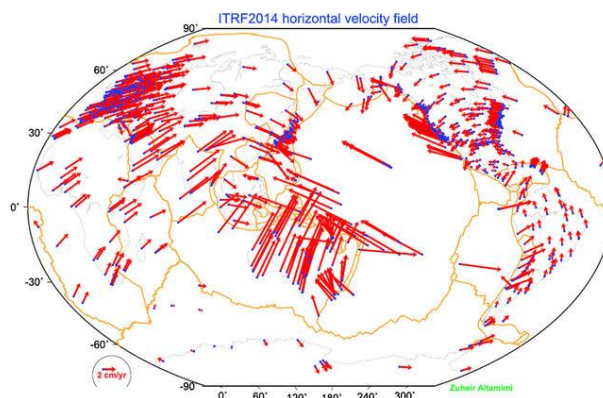
## VÍNCULO ENTRE LOS MARCOS DE REFERENCIA NACIONALES Y EL MARCO DE REFERENCIA INTERNACIONAL.

El Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS) está definido por un conjunto de convenciones y modelos necesarios para definir el origen, la escala, orientación y la evolución temporal de la Tierra, y su materialización se realiza a través del Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF).

El ITRF provee coordenadas de vértices monumentados en la superficie de la Tierra, como se aprecia en la figura 2, este marco es la referencia mundial oficial y entrega una referencia común para comparar observaciones y resultados desde diferentes partes del mundo. En la actualidad, el ITRF es obtenido desde soluciones de cuatro técnicas de la geodesia espacial, éstas: GNSS (Global Navigation Satellite System), VLBI (Very Long Baseline Interferometry), SLR (Satellite Laser Ranging) y DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite).

Al igual que la RGN, el ITRF actualiza su marco de referencia con nuevas coordenadas, incluyendo posición y velocidad. A la fecha se han calculado 11 realizaciones, la conexión entre estos marcos de referencia es principalmente, a través de los parámetros de transformación.

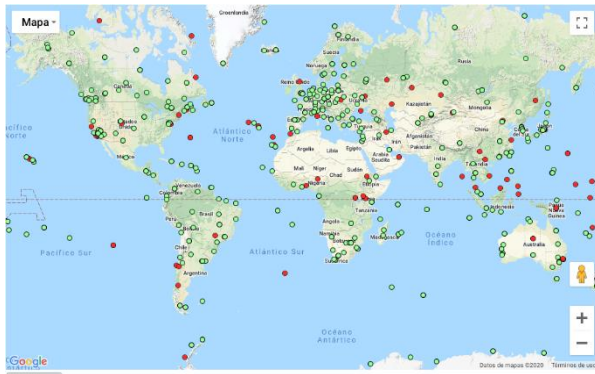
Figura 2; ITRF2014-última realización, coordenadas + velocidades.



Fuente: Altamimi et al., 2016.

El servicio que se encarga de la gestión de datos GNSS para la materialización del ITRS/ITRF es el Servicio GNSS Internacional (IGS), el cual cuenta con una densificación importante de estaciones (aproximadamente 506) alrededor del Globo (figura 3). Este servicio, proporciona datos, productos y servicios GNSS en apoyo del marco de referencia terrestre, observación e investigación de la Tierra; posicionamiento, navegación y cronometraje; y otras aplicaciones que benefician a la ciencia y la sociedad (Kouba, 2009).

Figura 3; Densificación de la red GNSS del IGS.



Fuente: IGS NETWORK, igs.org.

Estos datos y coordenadas son base para la vinculación de muchos marcos de referencia a nivel global incluyendo el Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS), el cual es el marco de referencia regional, base para la RGN.

De esta manera, la RGN se vincula a estos marcos a través de la información que estos proveen, alineándose a la referencia global.

Tanto las realizaciones de la RGN 2013.0 como la 2016.0 están vinculadas al ITRF 2008 a través de la densificación del IGS y SIRGAS (IGb08 y SIRGAS-CON), los cuales proveen las coordenadas base que se utilizan en el ajuste final. Estas estaciones están estratégicamente seleccionadas alrededor de Chile para brindarle la mejor estabilidad y homogeneidad, reduciendo la deformación que se pueda producir al introducir la referencia.

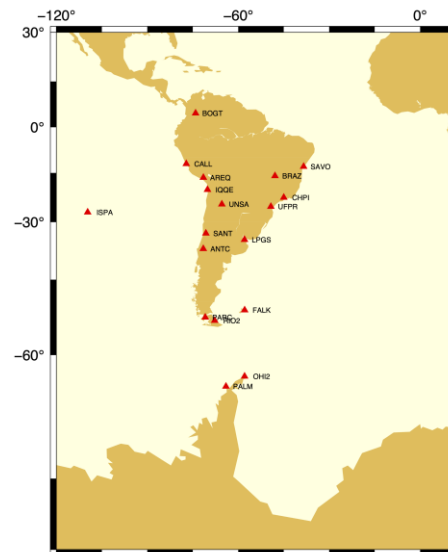
Para realizar la estimación de parámetros de transformación, se utilizó un set de coordenadas en 2013.0 y en 2016.0 (Ecuación 2), las estaciones elegidas son indicadas en la figura 4.

### DEFORMACIÓN DE LA RED GEODÉSICA NACIONAL SIRGAS-CHILE.

Antes de realizar el cálculo de parámetros, se analiza la distribución de las estaciones, y se realizan las diferencias de coordenadas entre estaciones comunes de ambas realizaciones, esto con propósitos de detectar efectos sistemáticos, y anomalías (p.ej, estaciones afectadas por deformaciones sísmicas). Se seleccionan aquellas que muestran diferencias estables en el sentido de la regla de 3-sigmas.

En la figura 5 se puede apreciar, a la izquierda, una buena distribución de estaciones semipermanentes y continuas, y a la derecha, se observa deformaciones significativas, indicando desplazamientos de las coordenadas principalmente debido a los terremotos de Pisagua

Figura 4; Estaciones IGS y SIRGAS para el ajuste de la RGN.



Fuente: propia.

2014 e Illapel 2015, lo que induce a una dispersión en los resultados.

Se requiere filtrar las estaciones que serán incluidas en la estimación de parámetros de transformación. Para evitar mayor dispersión, se consideran solo aquellas estaciones que obtienen el vínculo con SIRGAS e IGS. En la tabla 1 se evidencia la alta dispersión obtenida tras analizar las diferencias entre las materializaciones.

Parámetro	$\Delta X$ (m)	$\Delta Y$ (m)	$\Delta Z$ (m)
$\bar{x}$	0,010	-0,175	-0,106
$\sigma$	0,240	0,329	0,250

Tabla 1; Media y desviación estándar en las componentes X, Y y Z, usando la totalidad de las estaciones de la RGN.

Fuente: propia

Al analizar las estaciones que se usaron para el enlace entre la realización nacional y global, los resultados son los siguientes:

Parámetro	$\Delta X$ (m)	$\Delta Y$ (m)	$\Delta Z$ (m)
$\bar{x}$	0,006	0,030	-0,031
$\sigma$	0,142	0,050	0,016

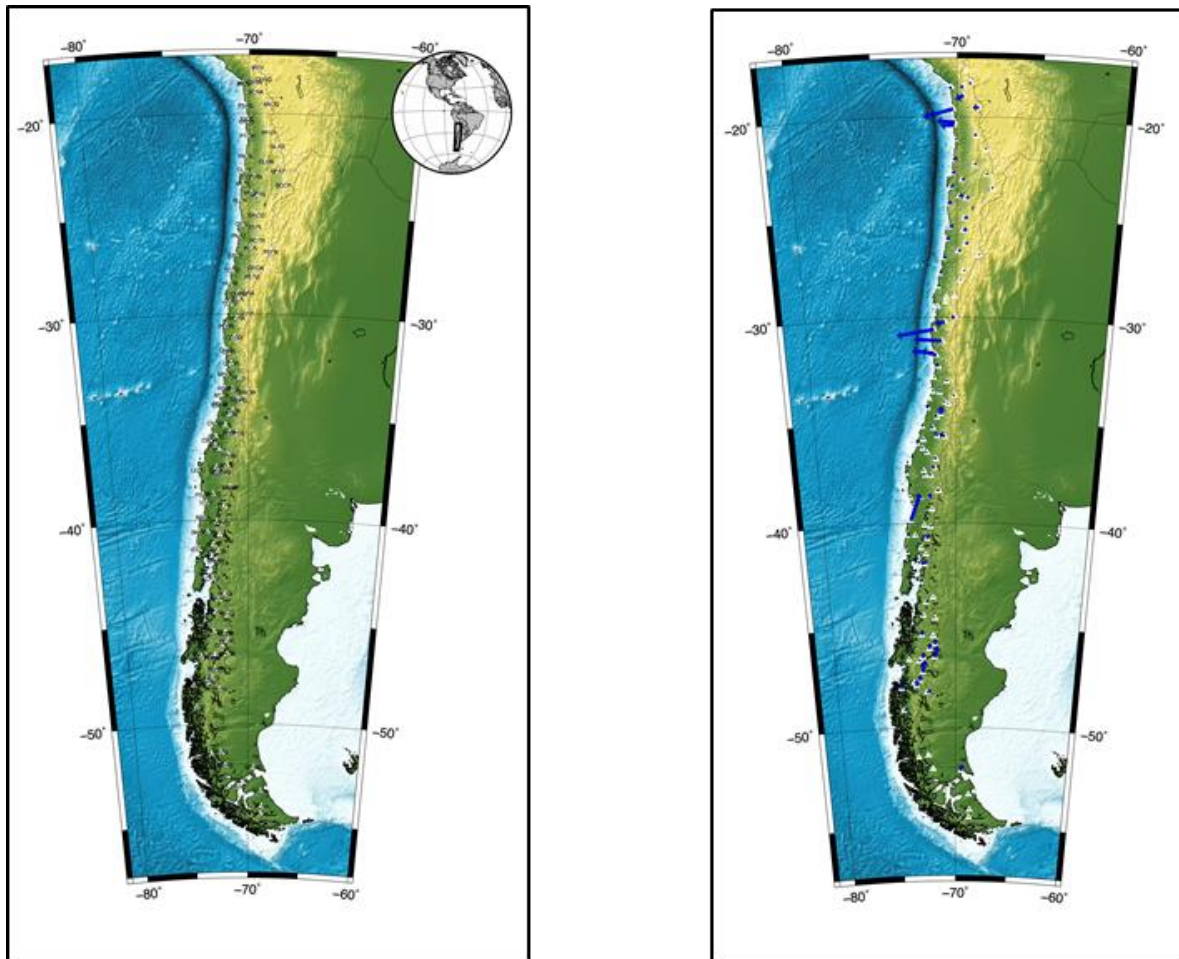
Tabla 2; Media y dispersión usando las estaciones de enlace.

Fuente: propia

En la tabla 2 se puede apreciar que la media disminuyó considerablemente, sin embargo, la dispersión sigue siendo alta, por lo que sigue existiendo una deformación considerable entre ambos marcos de referencia.

Para disminuir la deformación, se eliminaron las estaciones que se encontraban en zonas que sufrieron deformación entre los años 2013 y 2016.

Figura 5; Red Geodésica Nacional. Izquierda: distribución de las estaciones; derecha: deformación entre materializaciones 2013.0 y 2016.0.



Fuente: propia

En la tabla 3 se puede apreciar cómo se mantiene el promedio y disminuye la dispersión, lo que



permite estimar los parámetros finales con un set de estaciones sin compromiso de deformación para realizar el cálculo.

Parámetro	$\Delta X$ (m)	$\Delta Y$ (m)	$\Delta Z$ (m)
$\bar{x}$	-0,017	0,025	-0,031
$\sigma$	0,031	0,023	0,014

Tabla 3; Media y dispersión usando las estaciones de enlace sin incluir las zonas de deformación.

Fuente: propia

## RESULTADOS

Finalmente, después de analizar las deformaciones producidas entre 2013 y 2016, y obtener un juego de coordenadas libre de desplazamientos significativos, se estiman los parámetros finales para transformar de SIRGAS-Chile 2013.0 a 2016.0. Los parámetros obtenidos son mostrados en la tabla 4.

Parámetros	$s$	$\kappa$ (")	$\phi$ (")	$\omega$ (")	$T_X$ (m)	$T_Y$ (m)	$T_Z$ (m)
Valor	0,9999999994	0,001	0,001	0,000	0,013	-0,010	0,007
$\sigma$	0,0000000153	0,000	0,000	0,000	0,165	0,138	0,107

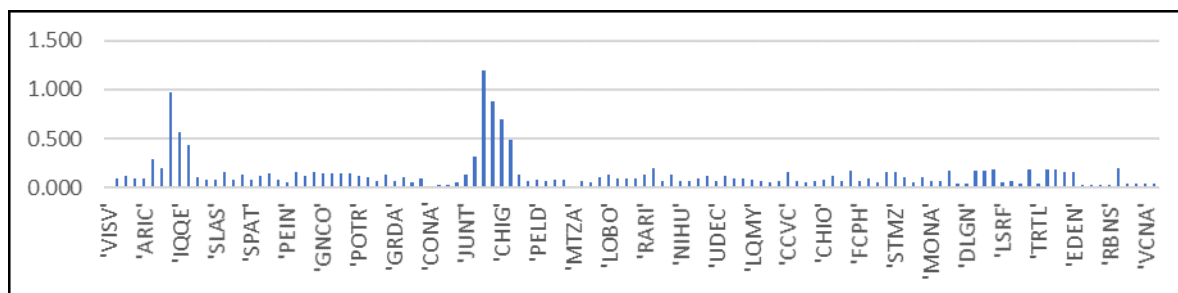
Tabla 4; Parámetros finales para transformar las coordenadas de la red geodésica nacional 2013.0 a 2016.0.

Fuente: propia

Luego se aplicó estos parámetros a todas las coordenadas del marco RGN SIRGAS-Chile 2013.0 y como resultado se obtienen coordenadas transformadas en el marco RGN SIRGAS-Chile

2016.0. Estos resultados fueron comparados con el marco ajustado a la época 2016.0 entregando los resultados mostrados en la figura 6.

Figura 6; Comparación entre coordenadas RGN 2016.0 y coordenadas RGN 2013.0 con parámetros aplicados.



Fuente: propia

Se puede apreciar que las diferencias, en la mayor parte de Chile, son menores a los 20 centímetros. Sin embargo, hay zonas de deformación significativa, principalmente en las áreas de los terremotos de Pisagua 2014 e Illapel 2015, las que llegan hasta aproximadamente 1.2 metros.

## CONCLUSIONES

La RGN SIRGAS-Chile es la materialización del ITRF a través del ajuste de SIRGAS-CON a IGB08. Los parámetros de transformación calculados

permiten mantener el vínculo con ITRF, considerando que el sistema geodésico de referencia permanece fijo y solidario con el movimiento de La Tierra.

Es recomendable realizar la estimación de los parámetros de transformación con las estaciones que son utilizadas comúnmente en el ajuste de la red, y no utilizando todas las estaciones de la red chilena, ya que en algunas zonas del país, las

estaciones presentan movimientos provocados por terremotos y sus derivados.

Dadas las características tectónicas de Chile, el territorio continental se encuentra en constante deformación, ya sea por desplazamientos inter/co/post-sísmicos, por lo cual las deformaciones no son homogéneas a lo largo del territorio y no son constantes en el tiempo, lo que ocasiona que los modelos de velocidades en Chile tiendan a fallar.

Los parámetros estimados cumplen ampliamente con la solicitud de IDE-Chile para realizar cambio de una época de referencia a otra y viceversa en aplicaciones de SIG y mapas, ya que las diferencias logradas nos otorgan poder aplicar los parámetros hasta precisiones de cartografía y mapas de 1:5000. El procedimiento establecido es para la conversión de parámetros desde la 2013.0 a la 2016.0, pero puede ser escalable para obtener parámetros entre diversos marcos de referencia entregados por IGM.

Las zonas de mayor deformación, debido a los terremotos, puede ser modelada de mejor manera, para lo cual el IGM se encuentra trabajando para resolver estos efectos, utilizando la densa red de estaciones continuas que el país presenta.

## REFERENCIAS

ALTAMIMI Z., COLLILIEUX X., MÉTIVIER L., "ITRF2008: an improvement solution of the international terrestrial reference frame, *Journal of Geodesy*", Año 2011, DOI 10.1007/s00190-011-0444-4

ALTAMIMI Z., REBISCHUNG P., MÉTIVIER L., COLLILIEUX X., "ITRF2014: a new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear stations motions, *Journal of Geophysical research Solid Earth*", Año 2016, <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>

ALTAMIMI Z., REBISCHUNG P., COLLILIEUX X., MÉTIVIER L., CHANARD K., "Toward ITRF2020: Enhancing the Modelling of Nonlinear Station Motions, *AGU Fall Meeting*", Año 2020.

HOFMANN-WELLENHOF, B. & MORITZ, H. "Physical Geodesy, Springer Verla", Año 2005.

KOUBA, Jan. "A Guide to using international GNSS Service (IGS) Products". *Geodetic Survey Division Natural Resources Canada Ottawa*. Año 2009.