

DINÁMICA DE PLACAS TECTÓNICAS (2011-2023): DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES Y EVENTOS SÍSMICOS REGISTRADOS EN ESTACIONES (GNSS) DE BOLIVIA Y CHILE

PLATE TECTONIC DYNAMICS (2011-2023):
HORIZONTAL DISPLACEMENTS AND SEISMIC EVENTS RECORDED AT GNSS STATIONS IN BOLIVIA AND CHILE

Lucia Adiva Vega Gonzales*

RESUMEN

El estudio analiza desplazamientos horizontales registrados entre 2011 y 2023 en cuatro estaciones GNSS de operación continua (BLPZ, CMBM, IACR y SCRZ) del marco de referencia SIRGAS-CON en Bolivia y Chile, sobre datos de posiciones semanales, procesados mediante el sistema de referencia IGS20 campaña SIRGAS-Repro2.

Los resultados muestran un desplazamiento significativo ocurrido en la estación IACR (Arica) en 2014, coincidiendo con el sismo de Iquique, que evidencia la influencia de eventos sísmicos en los cambios geodinámicos de las placas tectónicas de los sectores en observación.

PALABRAS CLAVE: Sistema Global de Navegación por Satélite GNSS, Geodesia, desplazamientos horizontales, SIRGAS-CON, tectónica, análisis geodinámico.

History of the article: Received: 11/11/2024. Style review: 15/11/2024. Accepted: 29/11/2024.

ABSTRACT

The study analyzes horizontal displacements recorded between 2011 and 2023 at four continuously operating GNSS stations (BLPZ, CMBM, IACR and SCRZ) of the SIRGAS-CON reference frame in Bolivia and Chile, on weekly position data, processed using the IGS20 reference system SIRGAS-Repro2 campaign.

The results show a significant displacement that occurred at the IACR station (Arica) in 2014, coinciding with the Iquique earthquake, which shows the influence of seismic events on the geodynamic changes of the tectonic plates of the sectors under observation.

KEYWORDS: Global Navigation Satellite System GNSS, Geodesy, horizontal displacements, SIRGAS-CON, tectonics, geodynamic analysis.

RESUMO

O estudo analisa os deslocamentos horizontais registrados entre 2011 e 2023 em quatro estações GNSS em operação contínua (BLPZ, CMBM, IACR e SCRZ) do referencial SIRGAS-CON na Bolívia e no Chile, em dados de posição semanais, processados usando o sistema de referência IGS20 SIRGAS-Campanha Repro2.

Os resultados mostram um deslocamento significativo ocorrido na estação IACR (Arica) em 2014, coincidindo com o terremoto de Iquique, o que mostra a influência dos eventos sísmicos nas mudanças geodinâmicas das placas tectônicas nas áreas em observação.

PALABRAS-CHAVE: Sistema Global de Navegação por Satélite GNSS, Geodésia, deslocamentos horizontais, SIRGAS-CON, tectônica, análise geodinâmica.

INTRODUCCIÓN:

La geodesia como la ciencia que estudia la forma y dimensiones de la Tierra, así como su campo gravitatorio externo. Marca la superficie terrestre con puntos muy precisos que van determinando su posición. Esta función de la geodesia tiene la capacidad de monitorear diversos procesos geodinámicos entre los que destacan el desplazamiento de placas tectónicas de la litosfera que al asentarse sobre la astenosfera, (capa semiplástica, más caliente y débil), provoca el movimiento continuo de las placas constituyentes de la litosfera. [1]

Con el aporte tecnológico y actualización permanente del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS Global Navigation Satellite System). La información obtenida a través de los ITRS¹ e ITRF² ha establecido un sistema geocéntrico (donde el origen de las coordenadas está ubicado en el centro de masas de la Tierra incluyendo los océanos y la atmósfera), mejorando la precisión horizontal³, ampliando la densidad de datos, y permitiendo la obtención de mediciones tanto esporádicas como en tiempo real, entre otros avances [3]. La información general y específica que proporcionan las estaciones que transmiten la información GNSS, distribuidas a nivel mundial, regional y local, hacen posible determinar el desplazamiento de placas tectónicas [4], a través del modelo VEMOS que se encarga de registrar estos fenómenos sísmicos promedio anuales para determinados períodos de tiempo. [5]

¹ ITRS: International Terrestrial Reference System (Sistema de Referencia Internacional Terrestre), es el conjunto de preceptos y convenciones junto con el modelado necesario para definir el origen, la escala, la orientación y la evolución en el tiempo de un Sistema de Referencia Terrestre Convencional (CTRS), conformado por un elipsoide de referencia y un punto origen del sistema de coordenadas cartesianas (XYZ). [2]

² Los ITRF International Terrestrial Reference Frame (Marcos de Referencia Internacional Terrestre), materializan un ITRS sobre la superficie terrestre, estableciendo para cada punto una tripleta de coordenadas". [2]

³ Cambio de escala de longitud de centímetros (cm) a milímetros (mm).

En consecuencia, el presente trabajo hace referencia al seguimiento y estudio de la geodinámica de placas tectónicas (origen sudamericana) y su correlación con eventos sísmicos registrados en tres estaciones GNSS de Bolivia (La Paz, Cochabamba y Santa Cruz) y una estación de Chile (Arica) para el periodo 2011 a 2022.

Los desplazamientos registrados entre estas estaciones resaltan efectos directos de la subducción de la placa de Nazca y Sudamericana (Arica), mientras que en las estaciones de La Paz, y Cochabamba reflejan la compresión y levantamiento andino; en contraste con Santa Cruz que presenta movimientos más estables y menores deformaciones tectónicas. [6], [7]

DESARROLLO

La posición de las cuatro estaciones GNSS de operación continua ITRF SIRGAS-CON, se muestran en la tabla 1.

Tabla 1
Estaciones GNSS-ITRF -SIRGAS-CON

ID Estación Lugar/País	Posición Aproximada (ITRF 2020)		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
BLPZ La Paz/Bolivia	2275960.350	-5681183.750	-1804179.070
CMBM/ Cochabamba/Bolivia	2451888.566	-5574673.177	-1897657.140
IACR Arica/Chile	2036608.500	-5698319.800	-2008830.900
SCRZ Santa Cruz/ Bolivia	2743005.924	-5420745.291	-1937117.112

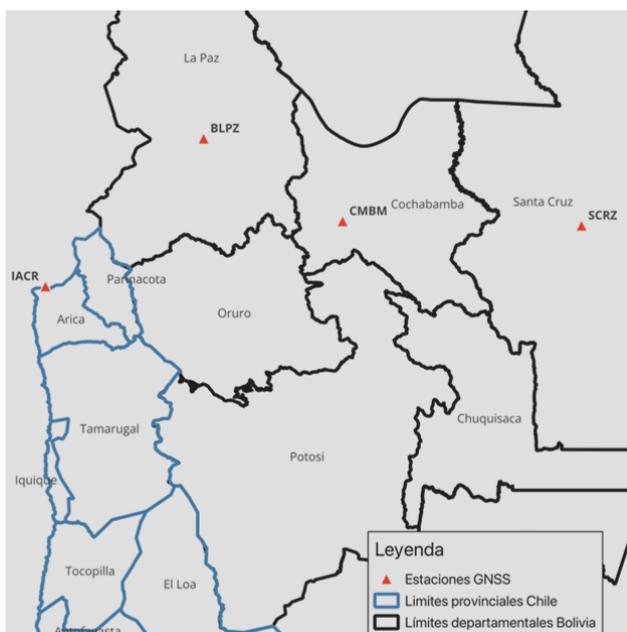
Fuente: Información extraída del mapa de estaciones de operación continua SIRGAS

La tabla 2, describe los aspectos tectónicos del lugar donde están situadas las estaciones GNSS permanentes:

Tabla 2
Características sísmicas de los sitios donde se encuentran las estaciones

ESTACIÓN	CARACTERÍSTICAS TECTÓNICAS
BLPZ	La estación se encuentra en el altiplano del Departamento de La Paz, sobre este sector influye la compresión entre placas de Nazca y la de Sudamericana. Los desplazamientos registrados en la estación son menos pronunciados que en Arica, pero aún reflejan la actividad tectónica regional. Predominan deformaciones horizontales muy relacionadas con la formación del altiplano boliviano.
CMBM	En Cochabamba los desplazamientos observados son producidos tanto por la compresión andina como por la actividad tectónica local. Esta región se encuentra en una zona de transición entre el altiplano y tierras bajas, resultando en consecuencia una combinación de movimientos horizontales y verticales.
IACR	Asentada en la franja de subducción, donde la placa de Nazca se desliza debajo de la placa Sudamericana, el comportamiento de subducción hace que la estación IACR registre desplazamientos significativos debido a la convergencia tectónica. Los movimientos horizontales y verticales son comunes, marcados por eventos sísmicos y deformaciones acumuladas.
SCRZ	Santa Cruz se encuentra en tierras bajas orientales de Bolivia, lejos de la zona de subducción directa. Los desplazamientos en la estación SCRZ son más suaves y reflejan el movimiento de la intra placa y los ajustes isostáticos. Esta región muestra menos actividad tectónica en comparación con las zonas andinas y de subducción.

Fuente: Elaboración propia sobre información SIRGAS



Fuente: Información extraída del mapa de estaciones de operación continua SIRGAS

Figura 1: Ubicación estaciones permanentes analizadas

a) Datos de posiciones semanales

Los datos de posiciones semanales de las estaciones del ITRF SIRGAS, están en mayoría referidas a un marco de referencia IGS, este corresponde a un subconjunto de posiciones y velocidades ITRF (2020) para un conjunto de estaciones de referencia GNSS.

Para el análisis de información histórica de las cuatro estaciones de estudio, se consideraron los datos procesados por el DGF-TUM (Instituto Alemán de Investigaciones Geodésicas – por sus siglas en alemán), de las posiciones semanales de coordenadas cartesianas geocéntricas recuperadas de la campaña SIRGAS-Repro24 para el periodo 2000-01-02 y 2022-01-01.

b) Programas utilizados:

- Excel Microsoft 365 (Análisis estadístico de datos).
QField (Cartografía de las estaciones).
- Equipo Computacional: Procesador 2.8 GHz Intel Core i7 de cuatro núcleos. Memoria RAM de 16 GB 2133 MHz LPDDR3. Tarjeta de video Intel HD Graphics 630 1536 MB. Sistema operativo MacOS Ventura.

c) Propósito del estudio:

- Análisis de los desplazamientos horizontales para el periodo 2011–2023 de cuatro estaciones del marco de referencia SIRGAS – CON.

d) Procedimiento recolección de datos:

Para cada estación se realizó la descarga de datos de posiciones semanales (página oficial de SIRGAS), los archivos descargados con la extensión .XYZ, cuenta con los siguientes campos en su estructura de datos:

- Época (señala la fecha de sesión GNSS),
- Día Civil (indica el día en el que se realizó la observación en formato civil),
- Semana GPS,
- Marco de Referencia (IGS14 o IGS 20),
- ID de la estación,
- Coordenada X en m,
- Coordenada Y en m,
- Coordenada Z en m.

A partir de estos datos se inició el procesamiento de los mismos, para conocer el desplazamiento que tuvo cada punto en el periodo de una semana⁵.

e) Determinación del módulo de desplazamiento

La diferencia de coordenadas del mismo punto en un mismo eje, pero en un periodo de tiempo diferente (una semana) es considerado el desplazamiento o cambio de posición que tuvo la placa (ejes X e Y) respectivamente.

⁴ Los objetivos principales de esta campaña fueron el de realizar una evaluación de la calidad de los datos históricos GNSS de SIRGAS, además, de un análisis homogéneo de todos los datos existentes para referir todas las soluciones semanales al marco de referencia IGS14.

⁵ Los datos seleccionados de inicio, parten de 2011, ofreciendo datos completos para las cuatro estaciones de análisis.

$$\text{Desplazamiento } X = \Delta X = (X_f - X_0)$$

$$\text{Desplazamiento } Y = \Delta Y = (Y_f - Y_0)$$

La determinación del desplazamiento como un vector, a consecuencia del movimiento de las placas tectónicas viene dada por la siguiente ecuación:

$$\text{Módulo } XY = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2}$$

El módulo de desplazamiento es el primer paso para determinar el tamaño o distancia del desplazamiento en los puntos de las estaciones de operación durante un periodo de tiempo definido.

f) Análisis del módulo de desplazamiento en XY

La determinación del módulo XY, es la base para poder conocer el desplazamiento de las estaciones, para su determinación, se tomó en cuenta los datos descargados y se calculó el máximo desplazamiento que tuvo la estación en primera instancia para el periodo de siete días (una semana) y posteriormente para el periodo de un año, el diseño de campo se indica en la tabla 3.

Tabla 3
Diseño de campos base de datos para el análisis de datos

Estación		Época		Día Civil		Semana GPS	
$X_{(m)}$	$Y_{(m)}$	Despl. X	Despl. Y	Módulo XY			

Fuente: Elaboración propia

g) Resultados

Delimitados los campos para la base de datos, se alimentó la misma con información de datos de posiciones semanales de estaciones continuas del marco de referencia SIRGAS-CON, - sitio web oficial de SIRGAS -, el resumen de los datos se muestra en la tabla 4.

Tabla 4
Resumen de datos: fecha del primer y último dato, cantidad de datos semanales publicados

	BLPZ	CMBM	SCRZ	IACR
De	1/26/05	12/29/10	12/30/09	12/30/09
Hasta	4/17/24	4/17/24	4/17/24	4/17/24
Nº Datos	925	594	735	666

Fuente: Elaboración propia sobre información mapa de estaciones GNSS SIRGAS-CON

Para obtener una estructura de análisis de los datos históricos adecuados, se completaron datos faltantes por medio del promedio aritmético (periodo 2011-2023), estandarizando así, la misma cantidad de datos a ser analizados en las cuatro estaciones. Incorporados éstos en la base de datos, se determinaron los desplazamientos ΔX , ΔY y el módulo de desplazamiento XY semanal. Agrupando los datos de desplazamientos semanales por estaciones, se determinó en función a éstos, el máximo desplazamiento horizontal anual. Ver tabla 5.

Tabla 5
Resumen del módulo máximo desplazamiento horizontal cuatro estaciones GNSS

Desplazamiento horizontal (m)					
Año	BLPZ	CMBM	IACR	SCRZ	Máximo desplazamiento anual
2011	0,0115	0,0064	0,0057	0,0069	0,0115
2012	0,0068	0,0089	0,0131	0,0093	0,0131
2013	0,0061	0,0128	0,0077	0,0090	0,0128
2014	0,0114	0,0165	0,0815	0,0105	0,0815
2015	0,0081	0,0140	0,0065	0,0076	0,0140
2016	0,0080	0,0086	0,0104	0,0132	0,0132
2017	0,0077	0,0080	0,0132	0,0086	0,0132
2018	0,0086	0,0089	0,0137	0,0107	0,0137
2019	0,0076	0,0073	0,0065	0,0090	0,0090
2020	0,0074	0,0103	0,0106	0,0120	0,0120
2021	0,0060	0,0083	0,0072	0,0065	0,0083
2022	0,0082	0,0103	0,0070	0,0153	0,0153
2023	0,0065	0,0071	0,0055	0,0050	0,0071
Máximo desplazamiento, por estación (2011 - 2023)					

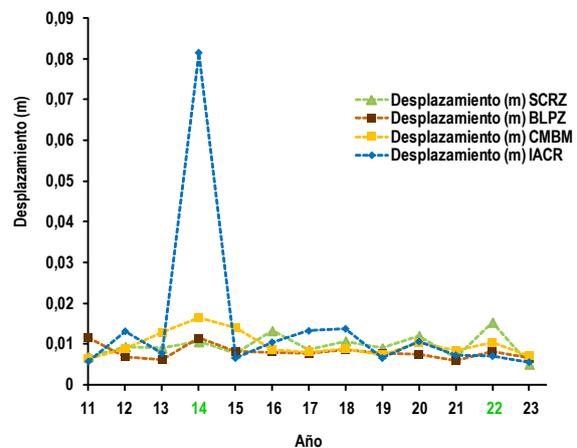
Fuente: Elaboración propia

En el periodo 2011 a 2023 El máximo desplazamiento horizontal (8 cm) fue registrado en la estación IACR (2014), esto debido al terremoto en Iquique (ver tabla 6), La actividad sísmica también tuvo repercusiones en las otras tres estaciones GNSS-SIRGAS-CON; en la figura 2 se muestra este comportamiento.

Tabla 6
Reporte final del terremoto en Iquique - Chile (4/1/14)

Sismo de Iquique 2014		
Fecha	4/01/14	
Epicentro	Latitud	-19,572°
	Longitud	-70,98°
Profundidad (km)	38,9	
Magnitud (Mw)	8,2	
Referencia geográfica	89 km al SO de Cuya	

Fuente: Elaboración propia, según informe técnico del Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile. [9]



Fuente: Elaboración propia sobre información mapa de estaciones GNSS SIRGAS-CON

Figura 2: Máximo desplazamiento horizontal (2011-2023) estaciones BLPZ, CMBM, IACR y SCRZ

g.1) Aspectos a resaltar figura 2:

- **Máximo desplazamiento en 2014:** La estación IACR (en azul) presenta un pico significativo en 2014, alcanzando un desplazamiento de aproximadamente (0,08 m). Este valor es notablemente mayor al de los otros años y estaciones, por el efecto del sismo de Iquique.
- **Estabilidad relativa en otros años:** Exceptuando el pico en 2014 para IACR, los desplazamientos en las otras estaciones (incluyendo BLPZ, CMBM y SCRZ) se mantienen en valores mucho menores, alrededor de (0,01 m) o menos. Esto indica que no hubo desplazamientos significativos durante el periodo de análisis.
- **Incremento en 2022:** Se observa un ligero aumento en los desplazamientos para las estaciones BLPZ y SCRZ.
- **Comparación entre estaciones:** BLPZ (en café) y CMBM (en amarillo) mantienen desplazamientos bajos y consistentes, sugiriendo estabilidad tectónica en sus ubicaciones. SCRZ (en verde) sigue una tendencia similar, aunque muestra ligeras fluctuaciones en comparación con BLPZ y CMBM.

La frecuencia de desplazamiento mensual del módulo XY en las cuatro estaciones se muestra en la tabla 7.

Tabla 7
Frecuencia de desplazamiento mensual (2011–2023) estaciones BLPZ, CMBM, AICR y SCRZ GNSS–SIRGAS–CON

Mes	Estaciones				TOTAL
	BLPZ	CMBM	IACR	SCRZ	
Enero	2	2	2	1	7
Febrero	0	2	3	2	7
Marzo	1	1	2	1	5
Abril	1	2	2	0	5
Mayo	2	0	0	1	3
Junio	0	1	0	0	1
Julio	0	0	0	1	1
Agosto	2	2	1	2	7
Septiembre	0	0	0	0	0
Octubre	2	1	0	0	3
Noviembre	1	1	0	3	5
Diciembre	2	1	3	2	8
TOTAL	13	13	13	13	52

Fuente: Elaboración propia

g.2) Aspectos a resaltar tabla 7:

- Los meses de enero, febrero, abril y diciembre destacan como los meses con mayor actividad, para el registro de la estación IACR, alcanzando tres eventos en febrero y en diciembre. La estación SCRZ también registra tres eventos en noviembre.
- Se observa también que febrero es un mes en el que todas las estaciones tuvieron desplazamientos importantes, especialmente IACR, lo cual podría relacionarse con un fenómeno estacional o geofísico particular.
- En el mes de diciembre también se presenta actividad para las estaciones de SCRZ e IACR, sugiriendo una tendencia hacia desplazamientos máximos a fin de año; en cambio, junio y julio muestran los valores más bajos, con solo un evento en las estaciones CMBM y SCRZ.
- BLPZ y CMBM muestran eventos distribuidos de manera uniforme durante el año, mientras que IACR y SCRZ tienen eventos más concentrados en meses específicos como febrero y diciembre.

CONCLUSIONES

El análisis y tratamiento de datos correspondiente a los desplazamientos de terreno que registraron estas cuatro estaciones permanentes GNSS–GPS en su cobertura a través de SIRGAS–CON para el periodo (2011–2023). Implementadas desplegando recursos tecnológicos complejos (antenas, receptores de señales satelitales, software y hardware de comunicación de alta sensibilidad) para efectuar mediciones geodésicas importantes, establecen que actualmente las estaciones GNSS permanentes se complementan con las estaciones de monitoreo sismológico; detectando a través de señales satelitales y redes de posicionamiento, desplazamientos horizontales de terreno, ocurridos principalmente por el movimiento entre las placas tectónicas internas de la Tierra.

Referencias bibliográficas:

- [1] SGM., 2017, Tectónica de placas. Gob.mx. <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Tectonica-de-placas.html> ,
- [2] Martínez, W., 2010, El Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas SIRGAS: Ejemplo de cooperación basado en GNSS. Sirgas.org. https://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Martinez_et-al_SIRGAS_Seminario_SCI_oct_2010.pdf,
- [3] García, A. D. A., 2008, Sistema GNSS. Uam.es. <http://arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20080125DavidGarcia.pdf>,
- [4] Choque, M. F. L., Mamani, G. H. A., 2018, Estimación del movimiento de la placa tectónica sudamericana en base a estaciones GNSS de operación continua de la red SIRGAS-CON en Bolivia. <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/19186>,
- [5] Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut der Technischen Universität München (DGFI-TUM). (sf). VEMOS velocity model. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut Der Technischen Universität München (DGFI-TUM). Recuperado el 2 de noviembre de 2024, de <https://www.sirgas.org/en/velocity-model/>,
- [6] Sánchez, L., Drewes, H., Kehm, A., Seitz, M., 2022, SIRGAS reference frame analysis at DGFI–TUM. *Journal of Geodetic Science*, 12(1), 92–119. <https://doi.org/10.1515/joqs-2022-0138>,
- [7] CSN. (2006). Preguntas Frecuentes. <http://www.csn.uchile.cl/sismologia/preguntas-frecuentes/>,
- [8] Yarvi, R., Liborio, E., 2015, Condicionamientos a la sismicidad en Bolivia. *Revista boliviana de física*, 26(26), 17–29. http://www.scielo.org/bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S156238232015000100003,
- [9] Centro Sismológico Nacional. (2014). *Informe Técnico terremoto de Iquique*. Semageomin.cl https://portalqeo.semageomin.cl/Informes_PDF/RTAR-002.pdf.

(*): Estudiante de último año, Licenciatura en Geodesia, Topografía y Geomática, Facultad de Tecnología–UMSA.