



Monitoreo del movimiento de la corteza terrestre asociado a sismos mediante observaciones GPS en el Golfo de California*

Rosendo Romero-Andrade**

Manuel Edwiges Trejo-Soto***

Alonso Alejandro Arellano-Baeza****

Juan Luis Cabanillas-Zavala*****

Recibido: 13/03/2019 • Aceptado: 09/07/2020

<https://doi.org/10.22395/riium.v20n39a6>

Resumen

La distribución de velocidades entre las placas del Pacífico y de Norteamérica, así como su posible relación con los sismos ocurridos en la zona del Golfo de California en México ha sido estudiada mediante mediciones continuas GPS en el periodo 2010-2016. Los datos GPS fueron procesados con GAMIT/GLOBK para estimar la posición y velocidad de las estaciones continuas. El análisis posterior ha mostrado que el movimiento relativo promedio entre las placas de Pacífico y de Norteamérica es consistente con estudios anteriores, estimando en 40 mm/año en la dirección norte y 30 mm/año en la dirección oeste, con un valor absoluto de 50 mm/año. Se presenta una posible relación entre los cambios repentinos en la velocidad asociados con los eventos cosísmicos y una tendencia que indica que la probabilidad de que se presente un sismo de magnitud $M_w \geq 5.0$ crece con el aumento de la velocidad relativa entre las placas.

Palabras clave: GPS; placas de Pacífico y de Norteamérica; movimiento relativo; sismicidad; eventos cosísmicos.

* Manuscrito derivado de una investigación terminada.

** Doctor en Ciencias de la Información. Autonomous University of Sinaloa. Circuito Interior OrienteSN, Cd Universitaria, Privada del Real, 80040 Culiacán Rosales, Sin. México. Correo electrónico: r.romero11@info.uas.edu.mx Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3786-0576>

*** Ph. D. in Applied geodesy. Grupo de Investigación de Geodesia. Autonomous University of Sinaloa. Torre de Rectoría. Blvd. Miguel Tamayo Espinosa de los Monteros 2358. Desarrollo Urbano 3 Ríos, edificio 4. CP 80020. Correo electrónico: mtrejosoto@uas.edu.mx Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5028-2849>

**** Ph. D. in Remote Sensing. Universidad de Santiago de Chile. Av Libertador Bernardo O'Higgins, Estación Central, Región Metropolitana, Chile. Correo electrónico:alonso.arellano@usach.cl Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4404-3403>

***** Maestro en Ciencias en Geofísica. Autonomous University of Sinaloa. Circuito Interior Oriente SN, Cd Universitaria, Privada del Real, 80040 Culiacán Rosales, Sin. México. Correo electrónico: jcabanillaszavala@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9911-0717>

Monitoring of Earth's Crust Movements Associated to Earthquakes through GPS Observations in the Gulf of California

Abstract

The distribution of the velocities of the Pacific and North American plates and their possible alteration by earthquakes has been studied using the GPS continuous measurements in the lapse from 2010 to 2016. The GPS data were processed with GAMIT/GLOBK to estimate the position and velocity of the continuous stations. Subsequent analysis has shown that the average relative movement between the Pacific and North American plates is consistent with previous studies, estimating 7.33 mm/year for the north component, and -9.50 mm/year for the east component with an absolute value of 500 mm/yr. A possible relationship between sudden changes in velocity associated with coseismic events and a trend indicates that the probability of having an earthquake of magnitude $M_w \geq 5.0$ increases with an increase of the relative velocity between plates is presented.

Keywords: GNSS; Pacific and North American plates; relative motion; seismicity; coseismic events.

INTRODUCCIÓN

A nivel global se produce una gran actividad sísmica originada principalmente por vulcanismo e interacción de las placas tectónicas, siendo de mayor intensidad en sus límites. México por su parte, se encuentra en una zona de interacción de cinco placas tectónicas; las placas de Rivera y Cocos subducen a la placa de Norteamérica a lo largo de la Trinchera Mesoamericana [1-2], la placa del Caribe que comprende parte del Estado de Chiapas y que está en contacto con la placa de Norteamérica por un límite transformante donde, además, es influenciada en su límite oeste por la subducción de la placa de Cocos [3]. En este sentido, la mayor parte del territorio mexicano se mueve conjuntamente con la placa de Norteamérica [1]; a su vez, la zona norte de México (donde se localiza la Península de Baja California que forma parte de la placa del Pacífico), se encuentra delimitada con la placa de Norteamérica en un sistema de fallas transtensionales.

El Golfo de California es considerado una zona de alta actividad sísmica y de continua deformación tectónica debido a la interacción entre las placas del Pacífico y de Norteamérica [4-5]. En la actualidad existen varios trabajos orientados a la prospección del Golfo de California desde un punto de vista puramente sismológico [5-8], sin embargo, la constante evolución y mejora de las técnicas de monitoreo basadas en los Sistemas de Navegación Global por Satélite (GNSS) abre nuevas oportunidades para el estudio del comportamiento de la corteza terrestre en las zonas sísmicas [9-11]. Dada esta condición, a nivel mundial se han implementado diversas metodologías con el fin de monitorear con precisión las deformaciones de la superficie terrestre y su posible prospección como lo son: alteraciones en la ionósfera como precursor sísmico [12], análisis de lineamientos vistos en imágenes satelitales como precursor sísmico [13] y estudios de deformación de la corteza con técnicas satelitales [14,15], donde este último incluye trabajos dedicados al análisis de la deformación y la determinación de la velocidad de las placas en el Golfo de California [1, 16-17].

En particular, se ha establecido que la sismicidad en esta región se debe en gran parte a la combinación del movimiento de la placa de Norteamérica y el efecto elástico de acoplamiento por fricción a lo largo de la zona de subducción de México y las fallas en el Golfo de California [1].

En el presente trabajo se analiza el movimiento de las placas tectónicas que delimitan en el Golfo de California y su posible relación con los sismos registrados en la zona durante el periodo 2010-2016, estimando el movimiento cortical con datos de 23 estaciones GPS (Sistema de Posicionamiento Global) de monitoreo continuo (CGPS) pertenecientes a diferentes redes GNSS de libre acceso como lo son: Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) de México (<http://geoweb2.inegi.org.mx/rgna/>),

“Continuously Operating Reference Station” (CORS) (https://www.ngs.noaa.gov/CORS_Map/), “University Navstar Consortium” (Unavco) (<http://www.unavco.org/data/gps-gnss/data-access-methods>), e “International GNSS Service” (IGS) (<http://igs.org/network>).

1. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1 Área de estudio

El Golfo de California se extiende por aproximadamente 1300 km y está situado en el límite tectónico entre las placas del Pacífico y de Norteamérica, donde se produce una transición estructural oceánica a continental [18] y se encuentra un sistema de fallas transtensionales con movimiento relativo horizontal dextral (direccional derecho). En este sentido, según Nagy y Stock [19], esta región se rige por fallas oblicuas en el norte y fallas transformantes en el sur. Previos estudios han mostrado que el movimiento relativo entre ambas placas es de aproximadamente 46 mm/año [16, 20], lo cual genera vulcanismo, zonas con potencial geotérmico, fallas de deslizamiento y actividad sísmica superficial constante [4-5,21]. Según Castro et al., [4], las fallas transformantes en la zona entre las cuencas Delfín y Carmen han generado el 60% de los sismos en el límite de placas con una magnitud $M_w \geq 6.0$. La mayor parte de los sismos se distribuyen espacialmente en dirección NO-SE a lo largo del eje del Golfo de California [5]. Según la base de datos del “Global Centroid-Moment-Tensor” (CMT) [22] y el Servicio Sismológico Nacional (SSN) (<http://www.ssn.unam.mx/>), en esta zona durante el periodo 2010-2016 han ocurrido más de 20 sismos con magnitud $M_w \geq 5.0$ (tabla 1).

Tabla 1. Sismos con magnitud $M_w \geq 5.0$, registrados en el Golfo de Baja California. *Criterio de búsqueda en el Catálogo CMT: fecha de inicio 2010/01/01, fecha final: 2016/12/31. $24 \leq lat \leq 28$, $-115 \leq lon \leq -105$, $5 \leq M_w \leq 10$.*

Fecha	Hora, minuto y segundo	Ubicación (lat, long) (°)	Profundidad (km)	Magnitud (Mw)
2010/10/20	4:9:47.85	24.54 -109.10	10.0	5.9
2010/10/20	4:15:38.02	24.47 -109.14	10.0	5.7
2010/10/20	6:58:18.38	24.47 -109.02	10.0	5.8
2010/10/21	17:53:19.92	24.69 -109.16	14.2	6.7
2010/10/25	10:6:16.85	24.59 -109.20	22.5	5.1
2010/12/04	23:56:26.63	25.42 -109.90	13.4	5.0
2011/01/03	18:11:25.87	25.91 -110.56	31.4	5.0
2011/01/12	2:38:13.51	27.01 -111.41	17.2	5.0
2011/03/12	13:26:2.14	25.21 -109.82	20.6	5.6
2011/03/12	14:11:3.91	25.32 -109.74	12.0	5.4
2011/03/12	17:13:4.52	25.38 -109.69	12.0	5.2

Fecha	Hora, minuto y segundo	Ubicación (lat, long) (°)	Profundidad (km)	Magnitud (Mw)
2011/03/12	20:16:58.31	25.33 -109.46	21.4	5.0
2011/03/13	8:35:37.32	25.33 -109.52	25.7	5.0
2011/04/20	18:21:46.16	27.54 -111.31	19.8	5.0
2011/04/26	21:10:26.41	27.47 -111.49	8.7	5.4
2011/05/24	19:1:42.55	27.58 -111.56	18.8	5.1
2011/07/26	17:44:22.73	25.10 -109.53	17.5	6.0
2011/07/26	19:40:25.29	24.96 -109.53	23.5	5.1
2011/12/04	15:35:37.92	26.01 -111.81	12.0	5.2
2012/04/06	3:27:42.72	23.95 -108.79	23.4	5.3
2012/08/02	22:13:18.70	25.00 -109.39	21.1	5.0
2012/09/25	23:45:27.37	24.67 -110.17	12.0	6.3
2012/09/26	0:17:56.95	24.63 -110.25	18.6	5.3
2012/09/28	15:24:54.77	24.84 -110.25	19.1	5.1
2012/10/08	6:26:25.04	25.17 -109.73	19.7	6.0
2013/01/13	16:28:27.84	25.89 -110.10	18.4	5.7
2013/01/13	17:50:14.87	25.77 -110.13	22.9	5.4
2013/06/11	14:7:47.05	24.16 -108.79	18.7	5.2
2013/09/21	12:16:14.10	27.79 -105.77	13.2	5.3
2013/09/21	12:42:15.59	27.83 -105.73	25.4	5.1
2013/10/19	17:55:3.66	26.09 -110.32	9.4	6.6
2014/07/12	21:11:22.83	24.11 -108.84	36.6	5
2014/07/22	6:50:31.21	26.06 -110.20	21.5	5.1
2014/08/10	18:46:20.56	27.64 -111.60	15.3	5.5
2014/12/25	6:45:43.53	24.42 -109.08	18.0	5.2
2015/08/07	4:35:4.47	24.07 -108.91	18.1	5.4
2015/08/07	5:53:57.67	24.15 -108.56	12.0	5.3
2015/08/07	6:52:21.09	24.03 -108.80	13.4	5.2
2015/09/13	7:40:39.66	25.07 -109.29	18.3	5.3
2015/09/13	7:57:38.16	25.11 -109.25	20.0	5.6
2015/09/13	8:14:16.43	25.14 -109.43	14.9	6.6
2015/09/13	15:4:58.94	24.90 -109.32	15.0	5.2
2015/09/26	13:47:52.37	23.93 -108.97	19.0	5
2016/10/13	3:55:12.71	25.48 -109.74	16.5	5.3

Fuente: elaboración propia.

1.2 Datos GPS

Los datos de las estaciones GNSS utilizadas en este trabajo (figura 1) muestran diferentes intervalos de registro por lo que fue necesario editar los ficheros RINEX (*Receiver Independent Exchange*) [23] llevándolos a un intervalo de muestreo de 30 segundos (ya que las estaciones tienen diferentes intervalos de observación), así

mismo, se deshabilitaron las constelaciones Glonass y Galileo (debido a las diferentes capacidades de las estaciones de recibir constelaciones distintas a GPS); lo anterior fue llevado a cabo mediante el *software* TEQC (“Translate>Edit\QualityCheck”) [24] con el fin de evitar inconsistencias en el procesamiento.

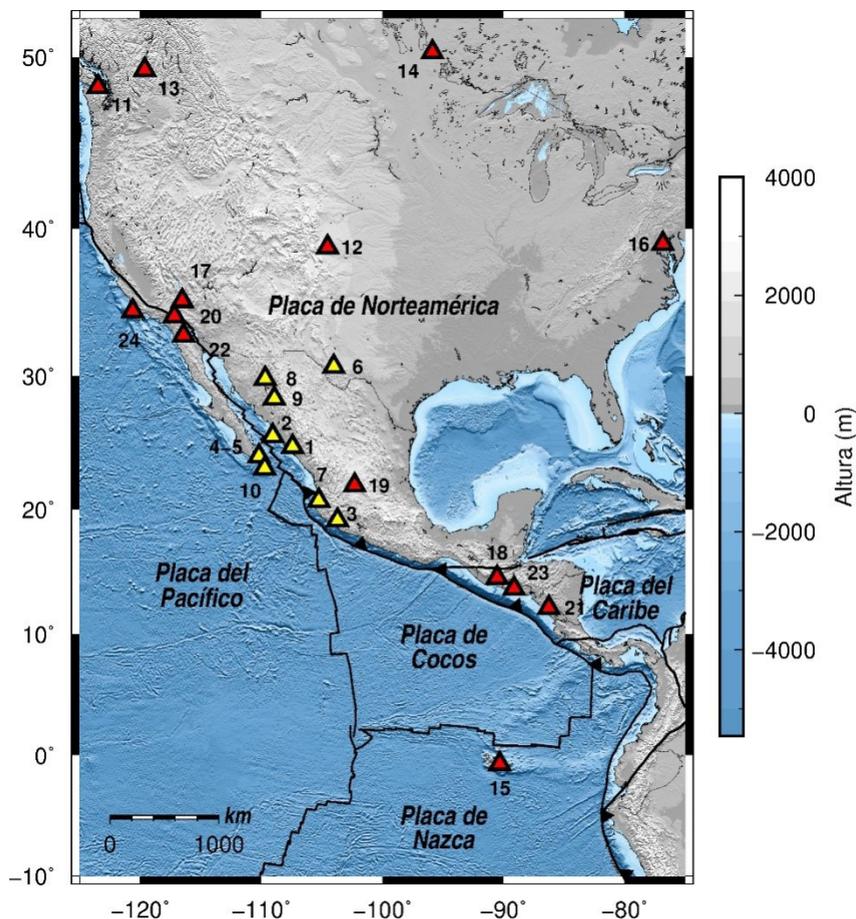


Figura 1. Ubicación de estaciones continuas GNSS utilizadas para el marco de referencia (triángulos rojos) y para la estimación de velocidad (triángulos amarillos). Numeración acorde a tabla 2. Imagen a color con relieve sombreado extraído del Modelo Relieve Global de ETOPO1 [25]. Figura creada mediante el *software* Generic Mapping Tools (GMT) [26].

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 2 se presenta el nombre de las estaciones consideradas como referencia y las analizadas junto a los días usados para cada solución. Con base en lo anterior, se utilizaron 9 estaciones de libre acceso en la zona de estudio con al menos 2.5 años de mediciones para evitar sesgos en la estimación de la velocidad [27]. La mayoría de

las estaciones operaron durante todo el periodo de estudio; sin embargo, para el caso de LPAZ y TNTB, que no cumplen con el criterio anterior, fueron analizadas de igual forma para efectos de correlacionar efectos sísmicos, debido a la disponibilidad de datos de estaciones continuas al momento de realizar la experimentación.

Por otra parte, para la definición del marco de referencia se utilizaron 14 estaciones de la red internacional IGS, de las cuales dos estaciones cuentan con un periodo de actividad entre 3.5 y 5 años de mediciones y el resto con más de 6 años, esto con el fin de introducir el *datum* a las estaciones analizadas.

Tabla 2. Estaciones CGPS analizadas.

Estación GNSS	Año inicial (AI) de los datos GPS	Año final (AF) de los datos GPS	Días en la solución	Tiempo estimado (AI-AF)	Red GNSS
1-CULC	2010.0	2016.997267760	2470	6.99726776	RGNA
2-TNTB	2015.084931507	2016.997267760	694	1.912336253	UNAVCO
3-COL2	2010.0	2016.997267760	2541	6.99726776	CORS
4-IPAZ	2012.677595629	2016.986338798	1510	4.308743169	CORS/RGNA
5-LPAZ	2010.0	2012.081967213	730	2.081967213	CORS/RGNA
6-MDO1	2010.0	2013.939726028	1431	3.939726028	CORS/IGS
7-MPR1	2010.0	2016.997267760	2514	6.99726776	CORS
8-USMX	2014.260273973	2016.997267760	1000	2.736993787	UNAVCO
9-YESX	2010.0	2016.997267760	1083	6.99726776	CORS
10-MSD1	2010.0	2016.997267760	2314	6.99726776	CORS
Estaciones usadas para el marco de referencia					
11-ALBH	2010.0	2016.997267760	2549	6.99726776	IGS
12-AMC2	2010.0	2016.997267760	2541	6.99726776	IGS
13-DRAO	2010.0	2016.997267760	2554	6.99726776	IGS
14-DUBO	2010.049315069	2016.997267760	2519	6.947952691	IGS
15-GLPS	2010.0	2016.997267760	1359	6.99726776	IGS
16-GODE	2010.0	2016.997267760	2489	6.99726776	IGS
17-GOLD	2010.0	2016.997267760	2535	6.99726776	IGS
18-GUAT	2010.0	2016.997267760	2420	6.99726776	IGS
19-INEG	2010.0	2016.997267760	2538	6.99726776	IGS
20-JPLM	2010.0	2016.997267760	2475	6.99726776	IGS
21-MANA	2010.0	2016.997267760	2537	6.99726776	IGS
22-MONP	2010.0	2016.997267760	2547	6.99726776	IGS
23-SSIA	2010.0	2016.997267760	1665	6.99726776	IGS
24-VNDP	2010.0	2016.997267760	2231	6.99726776	IGS

Fuente: elaboración propia.

1.3 Procesado de datos GPS

El cálculo de velocidades de desplazamiento de las estaciones GNSS requiere establecer un marco de referencia, que consta de aquellas estaciones GNSS que sean lo suficientemente estables para garantizar una solución robusta. Para este fin, se utilizaron estaciones estables del IGS según las recomendaciones de [11] y [28], las cuales fueron inspeccionadas con el objetivo de evitar fuentes de posibles inconsistencias considerando: actualización de *software* y *firmware*, cambio de cables y cambio de antenas. Finalmente, basados en la época de las observaciones, las soluciones fueron referidas al ITRF08 [29] para los años comprendidos entre 2010 y 2015 conforme a los cambios y referidos a la placa de Norteamérica; para el año 2016, se hizo la referencia respecto al ITRF14 [30], para finalmente expresar la solución en el ITRF14.

El procesado de los datos GPS se llevó a cabo utilizando los parámetros y características expuestas en la tabla 3 mediante el *software* GAMIT/GLOBK versión 10.6 [31], el cual consiste en dos módulos: GAMIT que permite estimar un sistema tridimensional de coordenadas mínimamente constreñidas, utilizando órbitas precisas, modelos troposféricos, retardo ionosférico y parámetros de rotación; mientras que GLOBK permite estimar la velocidad de la estación con la implementación del filtro de Kalman, para, así, estimar la velocidad con GLOBK. Una vez estimadas las velocidades se llevó a cabo la inspección visual, eliminación de errores groseros (superando 3 veces la incertidumbre proveniente del procesado previo), ajustando la tendencia lineal y señales periódicas, esto fue realizado con TSVIEW [32].

Tabla 3. parámetros y características de procesamiento utilizados.

Preprocesado y tratamiento de los datos GPS	TEQC: intervalo de muestreo, edición de observables
Intervalo de muestreo y ángulo de elevación	30 s, 10°
Carga oceánica	FES2004
Marea terrestre sólida	IERS03
Órbitas	Precisas finales de <i>Scripps Orbit and Permanent Array (Sopac)</i>
Calibración de antena	IGS08
Observable	Doble diferencia, combinación libre de ionósfera de L1 y L2 en la fase portadora.

Fuente: elaboración propia.

2. RESULTADOS

Los resultados son presentados en la tabla 4 y las figuras 2-4, en ellas se representan las variaciones en la posición obtenida al descontar los valores correspondientes al desplazamiento con la velocidad promedio. En este sentido, se expresa la velocidad promedio estimada de la estación “CULC” en 7.33 y -9.50 mm/año para la componente norte

y este respectivamente, lo cual implica un desplazamiento hacia el noroeste; así mismo, se estimó la velocidad para el resto de las estaciones (tabla 2 y figura 5).

De acuerdo con los valores obtenidos en las estaciones ubicadas en la Península de Baja California (ubicada sobre la placa del Pacífico), se puede observar un desplazamiento en dirección noroeste con una velocidad de aproximadamente 55 mm/año, mientras que la placa de Norteamérica presenta una velocidad de 12 mm/año hacia el sureste. Esto hace que el movimiento relativo entre placas sea de 30 mm/año en la dirección norte y 40 mm/año en la dirección oeste, dando el valor absoluto es cercano a 50 mm/año.

Los resultados son comparables a los reportados en Plattner et al., [16]; donde se demuestra que el movimiento relativo de la placa del Pacífico y de Norteamérica es de aproximadamente 43-47 mm/año en dirección noroeste calculadas con estaciones episódicas. Estas velocidades superan la velocidad promedio de un movimiento relativo entre ambas placas, lo cual indica que no está completamente unida a la placa del Pacífico.

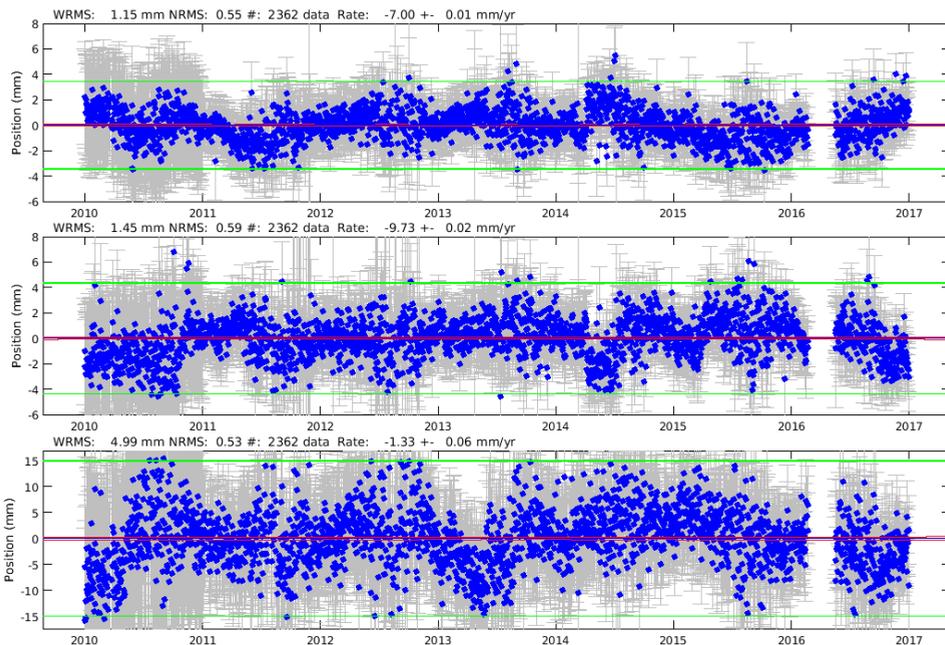


Figura 2. Series temporales de posiciones (n, e, u) de CULC ajustadas. Puntos azules: Posiciones diarias respecto a la posición de referencia en sus tres componentes neu. De arriba hacia abajo: norte, este y vertical. Líneas rojas: corresponden a las incertidumbres realistas ($\pm 1\sigma$) estimadas. Líneas verdes: error medio cuadrático ponderado de cada componente en mm (± 3 la dispersión).

Fuente: elaboración propia.

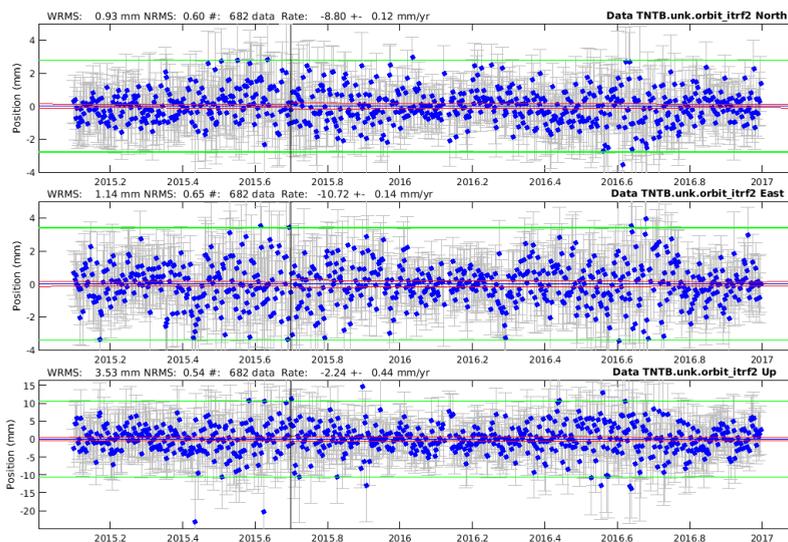


Figura 3. Series temporales de posiciones (n, e, u) de TNTB ajustadas. *Puntos azules: Posiciones diarias respecto a la posición de referencia en sus tres componentes neu. De arriba hacia abajo: norte, este y vertical. Líneas rojas: corresponden a las incertidumbres realistas ($\pm 1\sigma$) estimadas. Líneas verdes: error medio cuadrático ponderado de cada componente en mm (± 3 la dispersión).*

Fuente: elaboración propia.

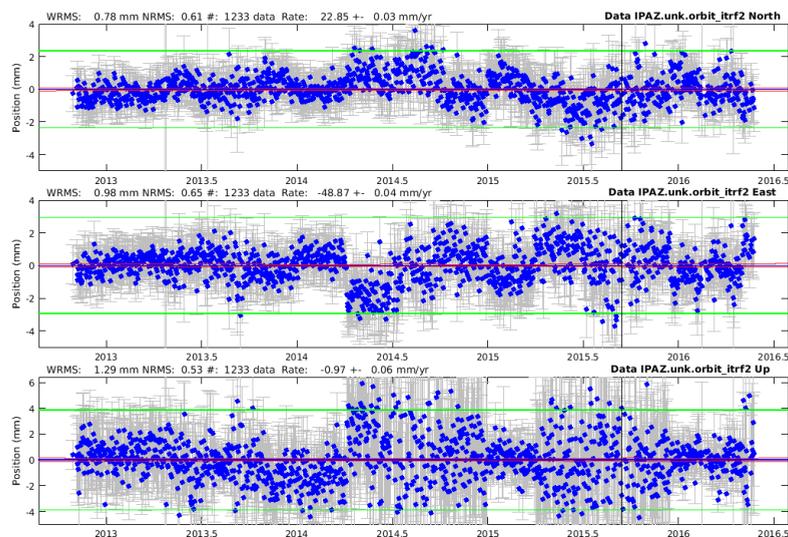


Figura 4. Series temporales de posiciones (n, e, u) de IPAZ ajustadas. *Puntos azules: Posiciones diarias respecto a la posición de referencia en sus tres componentes neu. De arriba hacia abajo: norte, este y vertical. Líneas rojas: corresponden a las incertidumbres realistas ($\pm 1\sigma$) estimadas. Líneas verdes: error medio cuadrático ponderado de cada componente en mm (± 3 la dispersión).*

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Estimación de las velocidades residuales con respecto al marco de referencia ITRF14 de la placa de Norteamérica.

Sitio	Coordenadas		Velocidades		Sigmas		Correlación N-E
	Longitud	Latitud	Este (mm/año)	Norte (mm/año)	Sigma Este (mm/año) ±	Sigma Norte (mm/año) ±	
COL2	256.29812	19.24444	-3.62	0.17	0.02	0.02	-0.099
MDO1	255.98501	30.68051	-14.83	-9.30	0.11	0.07	-0.144
MPR1	254.75080	20.67900	-8.17	-4.91	0.02	0.02	-0.105
CULC	252.58740	24.79508	-9.50	-7.33	0.03	0.02	0.154
YESX	251.08036	28.37834	-9.41	-8.01	0.13	0.12	0.034
TNTB	250.94727	25.60586	-8.50	-10.09	0.12	0.11	0.022
USMX	250.31895	29.82165	-8.68	-7.35	0.09	0.08	0.044
MSD1	250.28235	23.16045	-51.23	22.18	0.02	0.03	0.345
LPAZ	249.68065	24.13880	-49.93	24.24	0.29	0.27	0.043
IPAZ	249.66925	24.14527	-48.58	22.38	0.05	0.05	0.061

Fuente: elaboración propia.

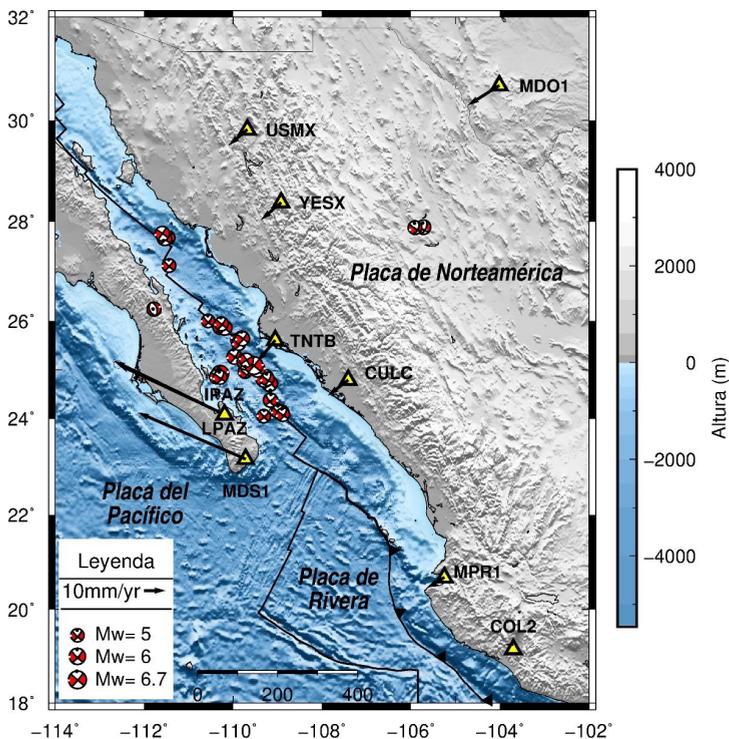


Figura 5. Campo de velocidad obtenido a través de la estimación de las velocidades residuales con respecto al marco de referencia ITRF14 de la placa de Norteamérica creada a partir de la tabla 2 con un intervalo de confianza de 95 %. Imagen a color con relieve sombreado extraído del Modelo Relieve Global de ETOPO1 [25].

Fuente: Figura creada mediante el software Generic Mapping Tools (GMT) [26].

2.1 Efectos de los sismos en las series temporales

Como se mencionó con anterioridad, el Golfo de California es una zona altamente sísmica ya que se localiza en un sistema de fallas transtensionales generando una deformación asociada al movimiento lateral derecho y expansión del lecho marino. También existe un efecto elástico de acoplamiento por fricción a lo largo de la zona de subducción de México en el Golfo de California [1].

En las series temporales se pueden identificar cambios bruscos o saltos asociados a fuertes sismos, ya que las estaciones se encuentran cerca del epicentro y este desplazamiento puede ser estimado [33]. Por ejemplo, uno de los sismos de magnitud $M_w=6.6$ que ocurrió el 13 de septiembre de 2015 captado por la estación TNTB (ver figura 3) que se encuentra a 96 km del epicentro. En esta estación el sismo provocó un salto en la serie de -2.22 ± 0.14 mm, 1.82 ± 0.18 mm, y -0.17 ± 0.55 mm en las componentes norte, este y vertical respectivamente. Sin embargo, otra estación relativamente cercana CULC no registró un salto cosísmico. Por otra parte, el sismo se presentó a 114 km de la estación IPAZ, lo cual provocó un salto en la serie temporal de 0.21 ± 0.09 mm en la componente norte, -1.72 ± 0.11 mm en el componente este y 0.49 ± 0.14 mm en la componente vertical (figura 4).

2.2 Posible relación entre la variación en la velocidad relativa del movimiento de las placas y los sismos

Se realizó el análisis del movimiento relativo de las estaciones CGPS MDS1 y CULC situadas en la placa del Pacífico y de Norteamérica respectivamente, siendo estas las estaciones localizadas en las cercanías del Golfo de California con mayor tiempo de medición. Para ello, los datos de cada estación (que representan una diferencia entre la posición observada y su posición de referencia NEU para cada componente norte (dN) y componente este (dE)), son promediados cada 0.025 fracciones de año, es decir, cada 9 días aproximadamente. La figura 5 muestra las diferencias entre las posiciones promedio de ambas estaciones en las direcciones norte y este (primeros dos gráficos), además, la magnitud de los sismos que se presentaron en ese tiempo (tercer gráfico).

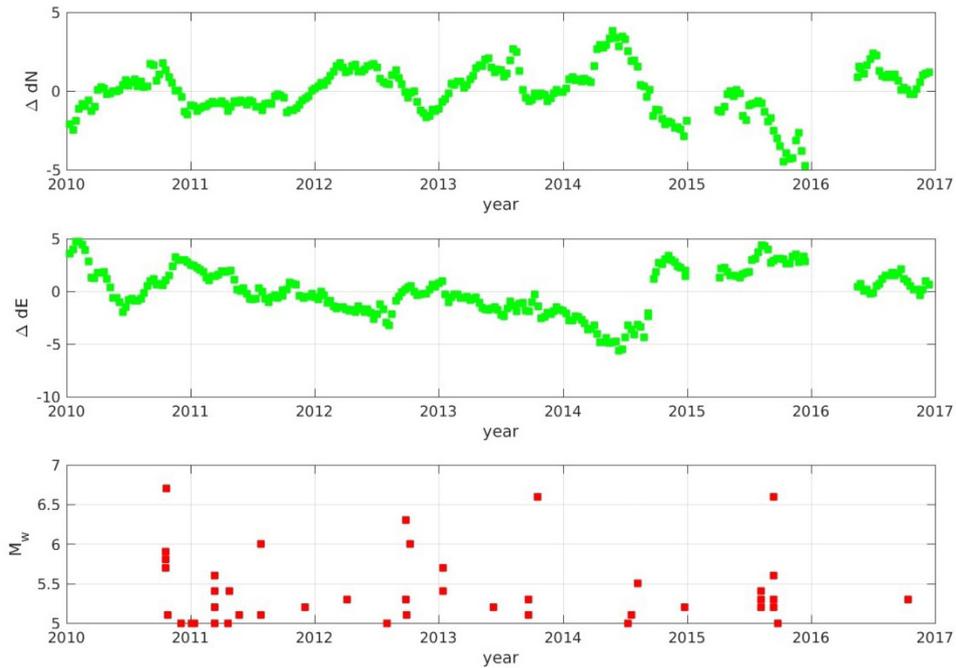


Figura 5. Cambio de la diferencia en la posición entre las estaciones "CULC" y "MDS1". Las series dN y dE para cada estación han sido promediadas y restadas una de la otra, eliminando posteriormente la velocidad promedio entre las placas. El tercer gráfico representa la magnitud ($M_w \geq 5.0$) del sismo observado en el Golfo de Baja California.

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se calcula la diferencia entre los valores promedios obtenidos anteriormente entre dos estaciones con tiempos de observación comunes. De esta diferencia se removió la tendencia principal correspondiente a la velocidad relativa promedio entre placas, esto fue restado con una constante para que las variaciones restantes partieran desde cero. En otras palabras, las series en los primeros gráficos (figura 5), representan un aumento o disminución de la distancia entre dos estaciones en el sistema de referencia tomando como partida el cero. En este sentido, las placas no se separan a una velocidad constante, y sería interesante analizar si existe alguna relación entre la velocidad de movimiento relativo y los sismos.

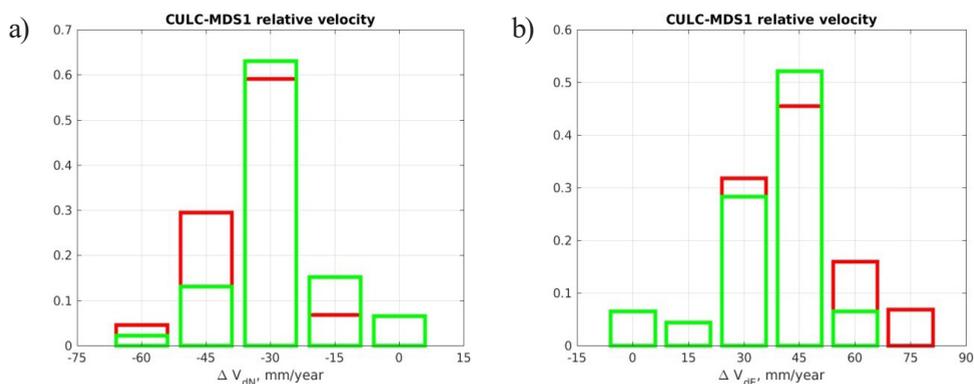


Figura 6. Distribución de velocidades de movimiento relativo entre las estaciones "CULC" y "MDS1" calculadas cada 55 días (verde) y 55 días antes del sismo (rojo): (a) componente norte, (b) componente este.

Fuente: elaboración propia.

Con este propósito se realizó el cálculo de la velocidad de movimiento relativo para dos situaciones. En el primer caso se calculó la velocidad promedio en intervalos de 55 días para el periodo de 2010-2016. En el segundo caso se calculó para intervalo de 55 días anteriores a los sismos listados en la tabla 1. En la figura 6 se muestran las distribuciones de velocidad del movimiento relativo en relación con la probabilidad de ocurrencia de un sismo; así mismo, la figura 6a muestra la distribución de la componente norte de la velocidad relativa para todos los intervalos (verde) y para los intervalos previos al sismo (rojo). La Figura 6b muestra las mismas distribuciones, para el componente este. Como se puede observar, en ambos casos la probabilidad de observar el sismo aumenta con la velocidad relativa.

3. CONCLUSIONES

El estudio de los movimientos de las placas tectónicas en el margen del Golfo de California ha mostrado que el movimiento relativo promedio entre la placa del Pacífico y Norteamérica, para el intervalo de tiempo entre los años 2010-2016, es consistente con lo reportado por [16] y se estimó en 40 mm/año en la dirección norte y 30 mm/año en la dirección oeste, resultando un valor absoluto de 50 mm/año. Además de los cambios bruscos en la velocidad asociados a eventos cosísmicos, se ha detectado la posible relación entre la velocidad relativa del movimiento de placas y los sismos, de modo que la probabilidad de tener un sismo de magnitud $M_w \geq 5$ sería mayor con el aumento de la velocidad relativa entre las placas. Evidentemente, la poca información de libre acceso de datos GNSS en la zona de estudio dificulta la búsqueda de indicios en la posible relación de la probabilidad de ocurrencia y la velocidad relativa. Sin

embargo, es posible asociar un posible comportamiento en función de la velocidad de las placas y ocurrencias de sismos.

Por otro lado, es importante señalar que se prueba que la península de Baja California no está completamente fija a la placa del Pacífico, lo cual fue determinado con estaciones de referencia continuas y no episódicas, dando como resultado velocidades similares mediante información reciente.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación fue financiada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), Proyecto Dicyt/Usach N° 091314AB, Proyectos Basales USA1555.35 Usach-Mecesup y Proyectos Basales USA1555.25 Usach-Mecesup. Agradecemos al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi) por proporcionar los datos de las estaciones GPS para llevar a cabo la Investigación. Al Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), por la licencia del *software* GAMIT/GLOBK. This material is based on data services provided by the Unavco Facility with support from the National Science Foundation (NSF) and National Aeronautics and Space Administration (NASA) under NSF Cooperative Agreement No. EAR-0735156.

REFERENCIAS

- [1] B. Marquez-Azua and C. DeMets, "Deformation of Mexico from continuous GPS from 1993 to 2008," *Geochemistry, Geophys. Geosystems*, vol. 10, no. 2, pp. 1–16, February 2009, doi: 10.1029/2008GC002278.
- [2] F. J. Núñez-Cornú *et al.*, "The Jalisco Seismic Accelerometric Telemetric Network (RESAJ)," *Seismol. Res. Lett.*, vol. 89, no. 2A, 2018, doi: 10.1785/0220170157.
- [3] J. Alonso-Henar, J. A. Álvarez-Gómez, and J. J. Martínez-Díaz, "Neogene-quaternary evolution from transpressional to transtensional tectonics in Northern Central America controlled by cocos: Caribbean subduction coupling change," *J. Iber. Geol.*, vol. 43, no. 3, pp. 519–538, 2017, doi: 10.1007/s41513-017-0034-2.
- [4] R. R. Castro, J. M. Stock, E. Hauksson, and R. W. Clayton, "Source Functions and Path Effects from Earthquakes in the Farallon Transform Fault Region, Gulf of California, Mexico that Occurred on October 2013," *Pure Appl. Geophys.*, vol. 174, no. 6, pp. 2239–2256, 2017, doi: 10.1007/s00024-016-1346-4.
- [5] H. E. Rodríguez-Lozoya *et al.*, "Attenuation of Coda Waves in the Central Region of the Gulf of California, México," *Geofísica Int.*, vol. 56, no. 2, pp. 137–145, 2017.
- [6] Y. Wu *et al.*, "Crustal deformation before the 2008 Wenchuan MS8.0 earthquake studied using GPS data," *J. Geodyn.*, vol. 85, pp. 11–23, 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2014.12.002>.

- [7] L. Munguía *et al.*, “Active Crustal Deformation in the Area of San Carlos, Baja California Sur, Mexico as Shown by Data of Local Earthquake Sequences,” *Pure Appl. Geophys.*, vol. 173, no. 10–11, pp. 3631–3644, 2016, doi: 10.1007/s00024-015-1217-4.
- [8] J. J. Chanes-Martínez, M. González-Escobar, F. Suárez-Vidal, and C. G. Gallardo-Mata, “Structural Geometry of a Sector of the Colorado River Delta, Baja California, Mexico, Based on Seismic Reflections,” *Pure Appl. Geophys.*, vol. 171, no. 7, pp. 1107–1127, 2014, doi: 10.1007/s00024-013-0729-z.
- [9] E. V. Ol’shanskaya and S. L. Shalimov, “On estimating the seismic energy of tsunamigenic earthquakes from the ionospheric response observed by GPS,” *Izv. Phys. Solid Earth*, vol. 51, no. 6, pp. 814–820, 2015, doi: 10.1134/s1069351315060087.
- [10] D. M. Filatov and A. A. Lyubushin, “Erratum to: ‘Assessment of seismic hazard of the Japanese islands based on fractal analysis of GPS time series,’” *Izv. Phys. Solid Earth*, vol. 53, no. 5, pp. 803–803, 2017, doi: 10.1134/s1069351317090014.
- [11] X. He *et al.*, “Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources,” *J. Geodyn.*, vol. 106, pp. 12–29, 2017, doi: 10.1016/j.jog.2017.01.004.
- [12] G. Sharma, P. K. Champati ray, S. Mohanty, and S. Kannaujiya, “Ionospheric TEC modelling for earthquakes precursors from GNSS data,” *Quat. Int.*, vol. 462, no. December, pp. 65–74, 2017, doi: 10.1016/j.quaint.2017.05.007.
- [13] A. A. Arellano-Baeza, R. V Garcia, and M. Trejo-Soto, “Use of high resolution satellite images for tracking of changes in the lineament structure, caused by earthquakes, situated nearly the Pacific coast of the North and South America,” *Publ. 36th COSPAR Sci. Assem. Held 16 - 23 July 2006, Beijing, China. Meet. Abstr. from CDROM, #1447*, 2006.
- [14] J. M. Cho, “Estimation of the crustal deformation caused by earthquake and its use in updating published coordinates of geodetic control points - A case study of the 2011 Tohoku Earthquake’s impact in South Korea,” *J. Korean Soc. Surv. Geod. Photogramm. Cartogr.*, vol. 33, no. 6, pp. 485–495, 2015, doi: 10.7848/ksgpc.2015.33.6.485.
- [15] L. Zhang *et al.*, “Fault network modeling of crustal deformation in California constrained using GPS and geologic observations,” *GPS Solut.*, vol. 13, no. 3, pp. 1–7, 2014, doi: 10.1134/S074204631301003X.
- [16] C. Plattner *et al.*, “New constraints on relative motion between the Pacific plate and Baja California microplate (Mexico) from GPS measurements,” *Geophys. J. Int.*, vol. 170, no. 3, pp. 1373–1380, 2007.
- [17] C. Plattner, H. Fattahi, R. Malservisi, F. Amelung, A. Verdecchia, and T. H. Dixon, “Earthquake cycle deformation at the Ballenas transform, Gulf of California, Mexico, from InSAR and GPS measurements,” *Eur. Sp. Agency, (Special Publ. ESA SP)*, vol. SP-731, no. March, 2015.

- [18] M. González-Escobar, C. Aguilar-Campos, F. Suarez-Vidal, and A. Martin-Barajas, "Geometry of the Wagner basin, upper Gulf of California based on seismic reflections," *Int. Geol. Rev.*, vol. 51, no. 2, pp. 133–144, 2009, doi: 10.1080/00206810802615124.
- [19] A. Nagy and M. Stock, "Structural controls on the continent-ocean transition in the northern Gulf of California," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 105, no. 1999, 2000, doi: <http://dx.doi.org/10.1029/1999JB900402>
- [20] C. DeMets, "A reappraisal of seafloor spreading lineations in the Gulf of California: Implications for the transfer of Baja California to the Pacific Plate and estimates of Pacific-North America Motion," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 22, no. 24, pp. 3545–3548, 1995, doi: 10.1029/95GL03323.
- [21] L. López-Pineda, C. J. Rebollar, and L. Quintanar, "Crustal thickness estimates for Baja California, Sonora, and Sinaloa, Mexico, using disperse surface waves," *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 112, no. 4, pp. 1–13, 2007, doi: 10.1029/2005JB003899.
- [22] G. Ekström, M. Nettles, and A. M. Dziewowski, "The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes," *Phys. Earth Planet. Inter.*, vol. 200–201, pp. 1–9, 2012, doi: 10.1016/j.pepi.2012.04.002.
- [23] W. Gurtner, "INNOVATION: RINEX THE RECEIVER INDEPENDENT EXCHANGE FORMAT," *GPS world*, vol. 5, no. 7, pp. 48–53, 1994.
- [24] L. Estey and S. Wier, *Teqc Tutorial: basics of Teqc use and Teqc products*, no. June. 2014.
- [25] NOAA, "ETOPO1 Global Relief Model," 2008. <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/> (accessed Jul. 20, 2017).
- [26] P. Wessel *et al.*, "The Generic Mapping Tools Version 6," *Geochemistry, Geophys. Geosystems*, vol. 20, no. 11, pp. 5556–5564, 2019, doi: 10.1029/2019GC008515.
- [27] G. Blewitt and D. Lavallée, "Effect of annual signals on geodetic velocity," *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 107, no. B7, 2002.
- [28] J. Garate *et al.*, "Topo-Iberia project: CGPS crustal velocity field in the Iberian Peninsula and Morocco," *GPS Solut.*, vol. 19, no. 2, pp. 287–295, 2015, doi: 10.1007/s10291-014-0387-3.
- [29] Z. Altamimi, X. Collilieux, and L. Métivier, "ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame," *J. Geod.*, vol. 85, no. 8, pp. 457–473, 2011.
- [30] Z. Altamimi, P. Rebischung, L. Métivier, and X. Collilieux, "ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions," *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 121, pp. 6109–6131, 2016.
- [31] T. A. Herring, R. W. King, and S. C. McClusky, "Introduction to GAMIT/GLOBK," *Massachusetts Inst. Technol. Cambridge, Massachusetts*, 2010.

- [32] S. M. Thomas Herring, "GAMIT/GLOBK Matlab Tools." Jan. 2014.
- [33] A. Santamaría-Gómez, M. N. Bouin, X. Collilieux, and G. Wöppelmann, "Correlated errors in GPS position time series: Implications for velocity estimates," *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 116, no. 1, pp. 1–14, 2011, doi: 10.1029/2010JB007701.