

Evidencia geodésica del sismo de Mw 7.0 de abril de 2012 a lo largo de un transecto Pacífico-Golfo de California, península de Baja California, México.

Carlos E. Reinoza¹, Elvia Ramón¹, Andrés Navarro¹, Luis Yegres¹, Franck A. Audemard M.^{1,2},
Alejandro González-Ortega¹

¹División de Ciencias de La Tierra, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, CP.22860, México.

²Departamento de Geología, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Venezuela.

E-mail: reinoza@cicese.mx

Resumen

Desde finales de 2022, revisitamos algunos sitios de observación del Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés) en la parte central de la península de Baja California. De los 10 sitios medidos, 8 contaban con mediciones previas en 2009; los dos sitios restantes LOL0 y RSJ0 fueron recién instalados y medidos por primera vez como parte de este trabajo. Para llevar a cabo las observaciones, se realizaron mejoramientos importantes en materia de almacenamiento y alimentación, con el fin de alargar la vida útil de receptores geodésicos obsoletos. El objetivo de las nuevas campañas GPS es calcular la tasa de desplazamiento en mm a^{-1} para cada uno de estos sitios y resolver algunas interrogantes en términos de deformación de la denominada "Microplaca de Baja California" (MBC) para esta zona en particular. Sin preverlo, luego del procesamiento e integración de los resultados de 2009 y 2022 se observó un gradiente de desplazamiento decreciente NE-SO en cinco sitios de medición distribuidos a lo largo de un perfil al oeste y perpendicular a la falla Salsipuedes (Sistema de fallas de Guaymas-SFG); estructura aparentemente responsable del sismo de Mw 7.0 del 12 de abril de 2012. Si bien, estudios previos indican que el 90% del movimiento relativo entre las placas Norteamérica y Pacífico es acomodado por las fallas que cruzan el Golfo de California, y que la deformación interna se ha observado en los sitios más cercanos a las fallas que cruzan el Golfo; los valores de velocidad obtenidos para los sitios más cercanos a la falla Salsipuedes son mucho más altos de lo esperado. Con base en todo esto, inferimos que el sismo del 2012 pudo haber generado desplazamiento cosísmico y posiblemente postsísmico, afectando algunas localidades cercanas como posiblemente lo evidencian algunos de nuestros sitios de medición. Se espera reocupar los vértices próximamente, con el fin de ofrecer más luces sobre el comportamiento del SFG así como de la falla Tosco-Abreojos en la costa pacífica.

Palabras clave: GNSS, desplazamiento cosísmico, Sistema de fallas de Guaymas, Vizcaíno, Sismo.

Introducción

La idea de un límite de placas transformante como un simple alineamiento es una asunción o sobre-simplificación en tectónica de placas. De allí, que el concepto de zonas complejas, activas y de considerable ancho como límite (Plate Boundary Zone-PBZ), son más usuales y cercanos a la realidad (Audemard, 2014; Mann & Burke, 1984; Reinoza *et al.*, 2020). El límite de placas Pacífico-Norteamérica

en el sur de California y noroeste de México ha sido estudiado validando muy bien su carácter de una extensa zona de deformación y con presencia de varios bloques (McCaffrey, 2005; Meade & Hager, 2005). Por otro lado, la península de Baja California es uno de los mejores ejemplos de translación de un bloque tectónico a lo largo de un límite de placas divergente (Umhoefer & Dorsey, 1997). Las diferencias de movimiento relativo entre Baja California y la placa del Pacífico se han reportado

por diversos autores (Dixon *et al.*, 2000; Fletcher & Munguía, 2000; Gonzalez-Garcia *et al.*, 2003; Michaud *et al.*, 2004) y recientemente se han llevado a cabo estudios de geodesia espacial (GPS) pero con nuevas interpretaciones acerca de las fuerzas que controlan esta variación en la tasa de movimiento (Plattner *et al.*, 2007). A pesar de los diferentes esfuerzos desde posicionar equipos como distanciómetros electrónicos en la década de los ochenta (Lesage *et al.*, 1988) hasta receptores GPS/GNNS en las tres últimas décadas en la península de Baja California, hay una zona considerable entre las latitudes 26.5°N y 30.5°N (exceptuando las latitudes 28°-29°N aproximadamente) donde no se han realizado mediciones geodésicas. Desde CICESE, los esfuerzos de los últimos años han estado más enfocados en densificar las redes geodésicas del Norte de Baja California (González-Ortega *et al.*, 2018; REGNOM, 2017); en parte por las consecuencias del terremoto Mw 7.2 El Mayor-Cucapah de abril de 2010. Más aún, la parte central de la península se caracteriza por su difícil acceso, las condiciones y escasez de la vialidad, la lejanía a centros poblados importantes, hacen que se requieran recursos económicos importantes al momento de emprender un proyecto de adquisición de datos en estas zonas poco pobladas. No obstante, desde 2019 se planteó la necesidad de retomar los estudios hacia la parte central de la península, y de allí, que a finales de 2022, revisitamos algunos monumentos de mediciones GPS/GNSS previamente ocupados durante el 2009 por una cooperación germano-estadounidense con apoyo técnico del CICESE (Plattner *et al.*, 2015; Malservisi, 2011b, 2011a); pero de los cuales, al menos en seis sitios no se conocen vectores de velocidad calculados.

En este trabajo, además de incluir el procesamiento de datos adquiridos en 2009 y 2022, se incluyen detalles de la instalación de dos nuevos sitios de observación geodésica GPS/GNSS (RSJ0 y LOL0) y una propuesta de adecuación de instrumental de observación geodésica. Adicionalmente, se presentan secciones de resultados, discusión y

conclusiones preliminares donde se incluyen en el análisis: velocidades simuladas con base en el modelo de movimientos de placas ITRF2014 y un vector de velocidad de la estación IAGX con el fin de ampliar la discusión. En líneas generales, el objetivo de las nuevas campañas GPS es calcular la tasa de desplazamiento en mm a⁻¹ para cada uno de estos sitios y resolver algunas interrogantes en términos de deformación de la denominada “Microplaca de Baja California” (MBC) para esta zona en particular (Figura 1).

Recopilación de datos GPS

Entre el 7 y el 18 de noviembre de 2022, se ocuparon 10 sitios con receptores doble frecuencia GPS y antenas geodésicas choke-ring, logrando observaciones de hasta 120 horas continuas (cinco días continuos) para la mayoría de los sitios con intervalos de muestreo de 15 s y una máscara de elevación de 0°. Detalles de la duración de las observaciones se muestran en la Tabla 1. Se realizó una adecuación de los receptores con mejoras en almacenamiento y alimentación eléctrica que se describe en una sección más adelante. Del total de sitios, 8 habían sido ocupados en el año 2009; el par restante, corresponden a nuevos sitios de medición instalados siguiendo la metodología de utilizar “spits” o adaptadores de metal embutidos (Reinoza, 2015; Reinoza *et al.*, 2017) en afloramientos rocosos (sitio LOL0) o en monumentos de concreto (sitio RSJ0). La metodología sugiere que se realicen perforaciones de aproximadamente 1 ¼ pulgada y 10 cm de profundidad con el propósito de insertar y posteriormente pegar los adaptadores de acero inoxidable utilizando pegamento especial tipo epoxy, cuidando la verticalidad de estos mediante el uso de un nivel circular (Figura 2). En algunos casos se puede requerir el uso de una base nivelante para corregir la verticalidad de la instalación.

Las estaciones medidas durante el año 2009 (SANF, PROG, SV3A, PURI y ARCO) tienen datos disponibles previos y posterior al sismo de Mw 6.9 (Castro *et al.*, 2011) del 3 de septiembre de 2009 en el Canal

de Ballenas; aunque en el procesamiento solo se utilizaron los datos adquiridos posteriores a este evento. Los sitios SANF, PROG y SV3A se midieron durante 4 días continuos en septiembre de 2009 y las estaciones ARCO y PURI por 4 días continuos en diciembre del mismo año. El resto de las estaciones

(BTAP, PCLY y PEUG) a unos 200 km de distancia de la estación SANF, solo tenían datos disponibles de tres a cinco días continuos de medición adquiridos en mayo de 2009. Los datos disponibles muestran tasas de muestreo de 15 s (Tabla 1).

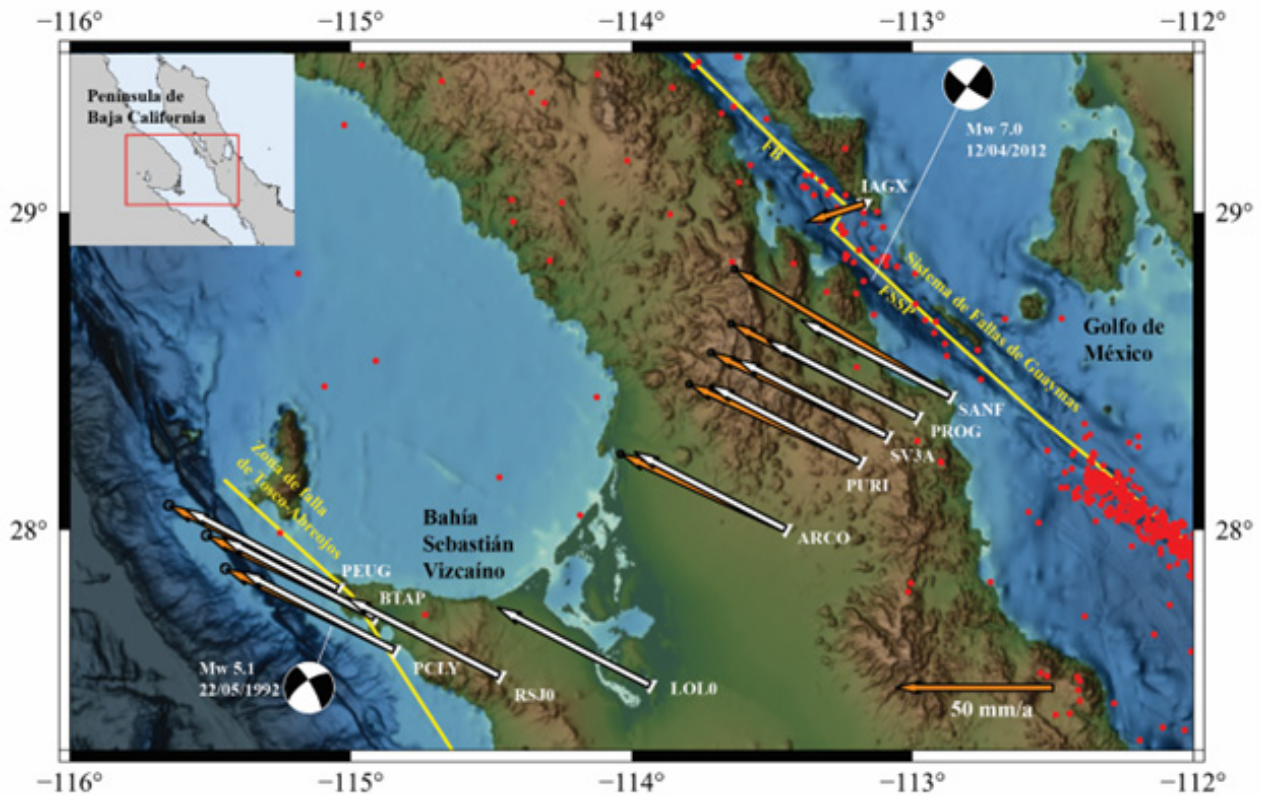


Figura 1. Velocidades observadas (flechas naranjas) expresadas en el marco de referencia ITRF2014. El vector IAGX, procesado en REGNOM está expresado en la realización IGb14. Las velocidades simuladas (flechas blancas) se representan con base en el modelo de movimiento de placas ITRF2014 (Altamimi et al., 2016). Adicionalmente, se muestra la distribución de la sismicidad desde octubre, 1995 hasta septiembre, 2023 (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), 1980), mecanismos focales del sismo Mw 5.3 de 1992 (Michaud et al., 2005) y del evento Mw 7.0 de 2012 (Liu et al., 2015). FB: falla Ballenas. FSSP: falla Salsipuedes.

Tabla 1. Estaciones medidas con sus respectivos días de ocupación durante 2009 y 2022 utilizados en este estudio.

Estación	Long (grados)	Latitud (grados)	Ocupación 2009*	Ocupación 2022
ARCO	-113.455	28.003	338-341	313-316
BTAP	-114.916	27.725	128-130	317-322
LOLO**	-113.937	27.509		320-322
PCLY	-114.847	27.620	128-132	317-322
PEUG	-115.048	27.816	128-130	317-320
PROG	-112.987	28.358	268-271	312-315
PURI	-113.189	28.216	338-340	312-316
RSJO**	-114.473	27.538		318-322
SANF	-112.868	28.423	268-271	311-315
SV3A	-113.094	28.297	268-271	312-316

* (Rocco Malservisi, 2011b, 2011a)

**Las estaciones LOLO y RSJO solo tienen una campaña de adquisición y no se incluyeron en el procesamiento.



Figura 2. Antena geodésica choke-ring sujeta por medio de una extensión al adaptador en acero inoxidable para piezas con rosca de 5/8"-11. (Manufactura: Laboratorio de Metalmecánica – CICESE) en el vértice LOLO.

Estrategias de procesamiento

Para el procesamiento se utilizó el programa Bernese 5.2 (Dach *et al.*, 2015) con el fin de proveer una nueva solución en el marco de referencia ITRF2014, siguiendo una estrategia de doble-diferencia utilizada en estudios previos (Ávila-Barrientos *et al.*, 2021; Jouanne *et al.*, 2011; Reinoza *et al.*, 2015; Reinoza *et al.*, 2020) y utilizando modelos de desplazamientos absolutos del centro de fase a la antena, así como órbitas precisas finales del IGS (International GNSS Service; Beutler *et al.*, 1999) y parámetros de rotación terrestre IGS. La influencia de las mareas oceánicas sobre la posición se estimó utilizando el modelo de mareas oceánicas FES2004 (Lyard *et al.*, 2006) mediante la herramienta disponible en internet de Hans-Georg Scherneck (<http://holt.oso.chalmers.se/loading/>) Para determinar las ambigüedades, coordenadas y desviaciones troposféricas, la estrategia sigue: (a) el análisis inicial de ionósfera-libre con cálculo de residuales, (b) análisis de residuales, (c) resolución de ambigüedades de banda ancha basado en código con todas las líneas base (Melbourne, 1985; Wübbena, 1985) utilizando archivos DCB, (d) resolución de ambigüedades banda ancha (L5) basado en la fase para líneas base < 200 km y cálculo de la solución libre de ionósfera con la introducción de las ambigüedades resultantes, (e) resolución de ambigüedades sin resolver previamente para líneas base < 2000 km utilizando la estrategia de resolución de cuasi ionósfera libre, (f) resolución de ambigüedades directas L1/L2 para líneas base < 20 km y (g) cálculo de las ecuaciones normales. Las soluciones diarias GPS se transformaron en el marco de referencia ITRF2014 con una solución Helmert de seis parámetros utilizando estaciones IGS como sitios de referencia (BILL, BLYT, DHLG, GUAT, INEG, MDO1, MERI, PALX, PIE1, SCIP, TNHM, USMX y VNDP) y por su parte, las ecuaciones normales diarias son analizadas en conjunto para determinar coordenadas y velocidades (archivos de salida .CRD y .VEL).

Se procesaron ocho sitios de medición, con excepción de RSJO y LOL0, que solo cuentan con una campaña de ocupación reciente en 2022. Sin embargo, se obtuvieron las velocidades simuladas para estas dos estaciones (Figura 1) con base en el modelo de movimiento de placas ITRF2014 (Altamimi *et al.*, 2016). El programa BERNESE subestima los errores de las coordenadas diarias debido a errores sistemáticos o parámetros modelados erróneamente que no se incluyen en el error formal (Hugentobler *et al.*, 2001). Para obtener un error estimado realista, se ajustaron los errores formales de las velocidades multiplicando por un factor de 10. Aunque el ITRF2014 introduce una innovación con la corrección para Deformación Post-Sísmica (PSD, por sus siglas en inglés), se seleccionaron solo estaciones de referencia sin correcciones PSD para derivar velocidades lineales de nuestra serie de ecuaciones diarias normales (Dach & Fridez, 2019). Las velocidades expresadas en el marco de referencia ITRF2014 se muestran en la Figura 1.

Adecuación del instrumental de observación geodésica

Los kits de campaña GPS/GNSS son ideales para llevar a cabo adquisiciones de datos de varios días, semanas e incluso meses. Los componentes básicos son el receptor y antena geodésica, la unidad de alimentación eléctrica y la unidad de almacenamiento de datos. Se decidió actualizar un conjunto de receptores GPS Ashtech Micro-Z que desde hace años ya mostraban signos de obsolescencia. La memoria original del receptor Ashtech Micro-Z no es extraíble y tiene una capacidad de 80MB; con la limitación de descarga de datos a un protocolo de transferencia ZMODEM que puede durar horas. Por otro lado, los receptores no cuentan con la funcionalidad de transmitir datos vía Internet. Debido a todo esto, se trabajó en la adaptación de una microcomputadora Raspberry Pi 4B (RPi4B) que permite la descarga diaria de datos, por lo que se desarrolló un código automático para

la descarga y borrado diario en el receptor con el fin de liberar la memoria interna del mismo. Con esta facilidad, el paso siguiente era adecuar un gabinete con todos los equipos y conexiones, de manera que el receptor-antena geodésica, micro-computador (almacenamiento) y baterías-celdas solares (alimentación eléctrica) actuaran como una unidad autónoma (Figura 3). La implementación de estos gabinetes transportables permite la instalación y desinstalación de forma rápida en el campo, así como en una reducción importante en el espacio requerido para su traslado. Los gabinetes o “case” pueden ser camuflajeados, son resistentes y significativamente menos costosos que otros tipos de estaciones GPS/GNSS. En el diseño se incluyó una capa de etilvinilacetato (EVA por sus siglas en inglés) para aislar la temperatura dentro del gabinete.

La tendencia de las adquisiciones de datos GPS/GNSS es incrementar la frecuencia de la tasa de muestreo y aumentar el tiempo de almacenamiento de los datos in situ, sin requerir la descarga continua por parte del operador como se ha mencionado previamente. Los microcomputadores RPi4B están programados para almacenar y enviar datos generados por el receptor GPS/GNSS. Básicamente el procedimiento llevado a cabo por el microcomputador es: (1) comunicarse cada hora con el receptor a través del puerto serial (RS232) preguntando si existe un archivo en la memoria, (2) en caso de existir, éste es descargado en la memoria de almacenamiento (espacio libre inicial 21 GB) y subsecuentemente el archivo es borrado dejando todo el espacio de almacenamiento libre en el receptor. (3) En el caso de contar con servicio de internet, los datos pueden ser enviados al servidor de la Red Geodésica del Noroeste de México (REGNOM).

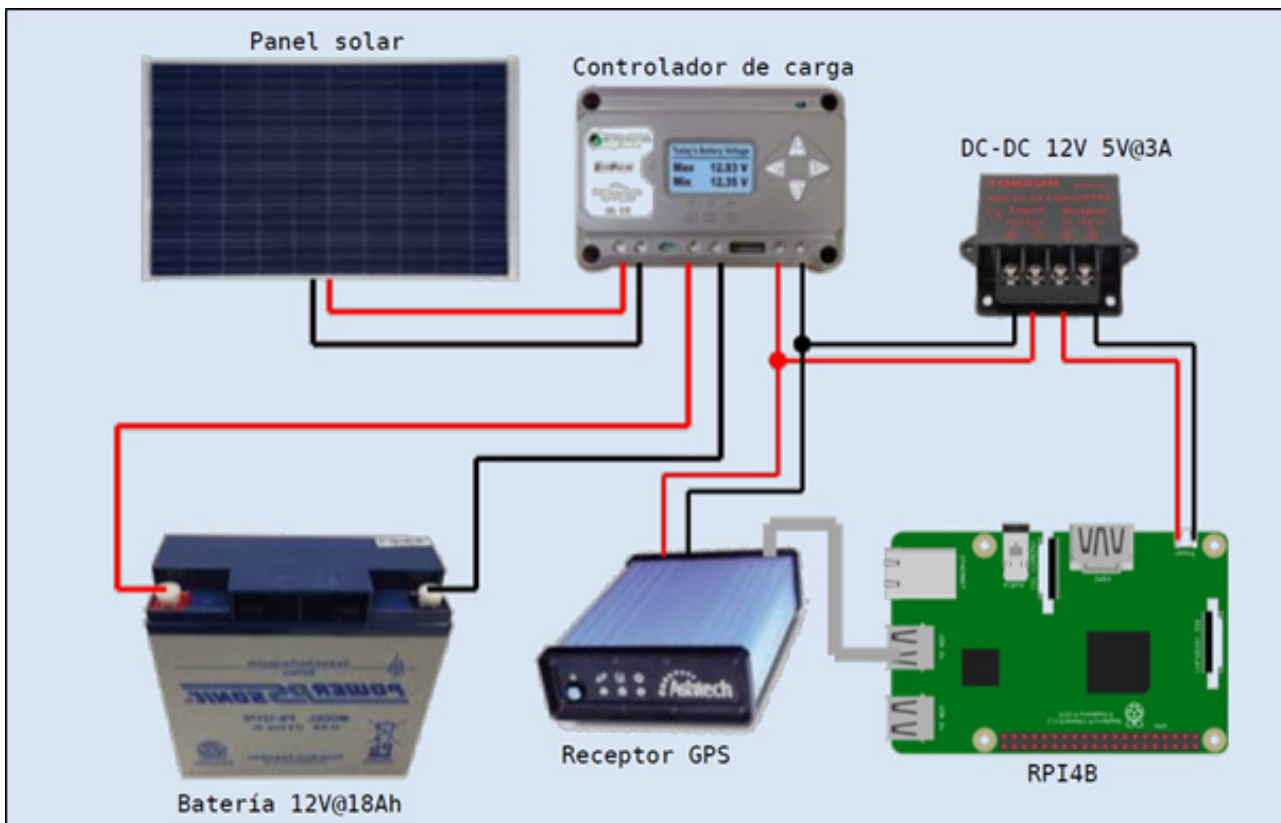


Figura 3. Diagrama de la conexión receptor geodésico - RPi4B, que incluye las baterías de 12V@18Ah, convertidor DC-DC 12V a 5V@3A, controlador de carga y panel solar.

Para el uso del programa principal es necesario instalar Raspbian en el microprocesador RPi4B, seguidamente actualizar los paquetes Raspbian, y montar el puerto serial y consola serial en las preferencias Raspberry. Y, por último, instalar el ftp, zmodem, minicom, bklid, y paquetes de extracción (eject). Cuando todos los paquetes y programas están ya instalados el siguiente paso consiste en conectar la RPi4B mediante un convertidor USB-serial. La microcomputadora cuenta con un puerto USB, mientras que el receptor Ashtech Micro-Z cuenta con un puerto RS232. El receptor geodésico es alimentado con 12V y la RPi4B con 5V; por lo que se hace necesario utilizar un convertidor DC-DC 12V a 5V@3A (Figura 3). El código que permite la descarga y eliminación de archivos del receptor es escrito en Python (.py); y es ejecutado cada hora a través de un comando Unix que crea una tabla o lista de comandos (crontab). En caso de contar con servicio de Internet, el programa envía los datos al FTP de REGNOM a través de una función hecha en bash y ejecutada también a partir de un crontab.

En lo que respecta a la alimentación eléctrica, se incluye una celda solar de 100 vatios, con dos baterías o acumuladores de 12V@18Ah, que permitiesen el funcionamiento de todo el equipo durante todo el día y la noche, evitando así la visita a la estación por parte del operador para el recambio de baterías.

Resultados a lo largo del perfil San Francisquito-península Vizcaíno

El campo de velocidades observadas (Figura 1) hacia el oeste de la falla Salsipuedes (Sistema de fallas de Guaymas-SFG) muestra un gradiente de desplazamiento decreciente NE-SO en los primeros cinco sitios de medición (SANF, PROG, SV3A, PURI y ARCO). Se calcularon las velocidades en la componente N50°O (rumbo del SFG) y a partir de la comparación de éstas, se encontró una variación de aproximadamente 23 mm a⁻¹ entre los vértices SANF y ARCO, distanciados unos 75 km entre sí. Esta tasa de desplazamiento decrece ≈0.3 mm

por cada km hacia el SO, como se evidencia en los tres vértices intermedios (PROG, SV3A y PURI). Hacia la península de Vizcaíno (costa Pacífico) las velocidades observadas de las estaciones PEUG, BTAP y PCLY muestran un azimut de ≈296° muy similar al azimut del resto de vértices que varía entre 294.5° y 300°, y aumentan en magnitud ligeramente con respecto al vértice ARCO. Entre ellos, los vértices PEUG, BTAP y PCLY muestran diferencias en sus magnitudes de velocidad de 0.3-0.5 mm a⁻¹. Adicionalmente, como se muestra en la Figura 1 se calcularon las velocidades simuladas para los 10 sitios que conforman el perfil San Francisquito-península Vizcaíno con base en el modelo de movimiento de placas ITRF2014 (Altamimi et al., 2016), y se incluye la velocidad del sitio IAGX, una estación de monitoreo continuo procesada en REGNOM y expresada en la realización IGB14.

Discusión y conclusiones preliminares

En los modelos de movimiento de placas (e.g., ITRF2014-Altamimi et al., 2016; GSRM v2.1-Kreemer et al., 2014) las velocidades absolutas en la placa Pacífico presentan un sentido de movimiento NO, que claramente contrasta con el sentido SO del vector IAGX, de lado este al SFG, y que definitivamente marca una transición dentro de esta compleja zona de deformación entre las placas Norteamérica y Pacífico. Lo esperado, es que las velocidades en la placa Pacífico se incrementen de este a oeste a partir del Golfo de California; e incluso si se precisa hablar en términos de la MBC, esta microplaca se desplaza más lento que la placa Pacífico teniendo como límite entre éstas la zona de cizalla de Baja California (Plattner et al., 2007). Sin embargo, los valores de velocidad obtenidos para los sitios más cercanos a la falla Salsipuedes son mucho más altos de lo esperado (Figura 1). Si revisamos la actividad reciente entre 2009 y 2022, nos encontramos con el sismo de Mw 7.0 del 12 de abril de 2012, el sismo de magnitud ≥ 7 más reciente y el primero después de 60 años en el Golfo de California; y que precisamente estaría

asociado a la falla Salsipuedes (Plattner *et al.*, 2015; FSSP en Figura 1), la estructura más cercana a los vértices observados y calculados en este trabajo. Se infiere que el sismo del 2012 pudo haber tenido un desplazamiento cosísmico importante afectando algunas localidades cercanas como lo evidencian algunos de nuestros sitios de medición. Esta zona está prácticamente deshabitada, de allí que no existan mayores reportes sobre daños asociados con este sismo.

Aunque estudios previos indican que el 90% del movimiento relativo entre las placas Norteamérica y Pacífico es acomodado por el Golfo de California, y que la deformación interna se ha observado en los sitios más cercanos a las fallas que cruzan el Golfo de California, no se puede perder de vista seguir analizando las posibles diferencias que existen entre las velocidades de los sitios observados en la península de Vizcaíno. Es actualmente muy arriesgado aseverar que la diferencia en velocidades entre los vértices PEUG, BTAP y PCLY sean debidos a la actividad de alguna estructura del sistema de falla Tosco-Abreojos; y en parte porque la diferencia está dentro del error de las observaciones. En todo caso y muy a pesar de que esta falla sea considerada como el límite transformante entre las placas Pacífico y Norteamérica hasta el Plioceno temprano; la actividad sísmica reciente, algunos rasgos geomorfológicos y las evidencias geodésicas soportan la idea de un sistema lateral derecho activo.

Con estos resultados preliminares, esperamos reocupar los sitios de medición próximamente con el fin de calcular una tasa de movimiento intersísmico reciente, posterior a la deformación cosísmica y postsísmica del evento de 2012. Suponiendo que la tasa de desplazamiento intersísmica es la característica de la falla Salsipuedes, se podrá obtener una estimación de las componentes cosísmica y post-sísmica del sismo Mw 7.0 de 2012, y con estos resultados a partir de un enfoque de modelado a seleccionar, se podrá estimar el deslizamiento a lo largo de la

dislocación en profundidad y de esta forma realizar una mejor correlación de la geometría de la falla y el proceso de ruptura (Liu *et al.*, 2015). También está planteado reocupar los sitios ubicados en la península de Vizcaíno, así como los sitios LOL0 y RSJO, lo que permitiría evaluar la acumulación de la deformación intersísmica de estructuras del sistema de falla Tosco-Abreojos en la costa Pacífico. Finalmente, con el conjunto completo de datos se podrá construir un perfil de velocidades observadas que cruce la parte central de la península de Baja California, desde el Golfo de California hasta la costa Pacífico.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dra. Xóchitl Torres y al Dr. René Vázquez con sus valiosos comentarios y sugerencias. Gracias al M.C. Ignacio García Meza por facilitar el valor de velocidad de la estación IAGX, resultado en el marco de su tesis doctoral. Agradecemos el apoyo logístico del personal académico, técnico y administrativo de CICESE que nos apoyaron en todas las actividades; así como a la comunidad y propietarios en los sitios de medición. Este trabajo es una contribución al proyecto CONAHCYT CF-194151.

Referencias

- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., & Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>
- Audemard, F. (2014). Active block tectonics in and around the Caribbean: A review. In M. Schmitz, F. Audemard, & F. Urbani (Eds.), *El Límite Noreste de la Placa Suramericana – Estructuras Litosféricas de la Superficie al Manto* (pp. 29–77). Universidad Central de Venezuela y FUNVISIS.

- Ávila-Barrientos, L., Cabral-Cano, E., Nava Pichardo, F. A., Reinoza, C. E., Salazar-Tlaczani, L., & Fernández-Torres, E. (2021). Surface deformation of Ceboruco volcano, Nayarit, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 418, 107338. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107338>
- Beutler, G., Rothacher, M., Schaer, S., Springer, T. A., Kouba, J., & Neilan, R. E. (1999). The International GPS Service (IGS): An interdisciplinary service in support of Earth sciences. *Advances in Space Research*, 23(4), 631–653. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1177\(99\)00160-X](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1177(99)00160-X)
- Castro, R. R., Valdes-Gonzalez, C., Shearer, P., Wong, V., Astiz, L., Vernon, F., Perez-Vertti, A., & Mendoza, A. (2011). The 3 August 2009 Mw 6.9 Canal de Ballenas Region, Gulf of California, Earthquake and Its Aftershocks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(3), 929–939. <https://doi.org/10.1785/0120100154>
- Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), E. B. C. M. (1980). Red Sísmica del Noroeste de México [Data set]. *International Federation of Digital Seismograph Networks*. <https://doi.org/https://doi.org/10.7914/SN/BC>
- Dach, R., & Fridez, P. (2019). Bernese GNSS Software Version 5.2, Tutorial Processing Example Introductory Course Terminal Session. *Astronomical Institute, University of Bern*.
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P., & Fridez, P. (2015). *Bernese GNSS Software Version 5.2*. Bern: University of Bern, Bern Open Publishing.
- Dixon, T. H., Farina, F., Demets, C., Suárez-Vidal, F., Fletcher, J. M., Márquez-Azúa, B., Miller, M. M., Sánchez, O. G., & Umhoefer, P. J. (2000). New Kinematic Models for Pacific-North America Motion from 3 Ma to Present, II: Evidence for a “Baja California shear zone.”
- Fletcher, J. M., & Munguía, L. (2000). Active continental rifting in southern Baja California, Mexico: Implications for plate motion partitioning and the transition to seafloor spreading in the Gulf of California. *Tectonics*, 19(6), 1107–1123. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/1999TC001131>
- Gonzalez-Garcia, J. J., Prawirodirdjo, L., Bock, Y., & Agnew, D. (2003). Guadalupe Island, Mexico as a new constraint for Pacific plate motion. *Geophysical Research Letters*, 30(16). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2003GL017732>
- González-Ortega, J. A., González-García, J. J., & Sandwell, D. T. (2018). Interseismic Velocity Field and Seismic Moment Release in Northern Baja California, Mexico. *Seismological Research Letters*, 89(2A), 526–533. <https://doi.org/10.1785/0220170133>
- Hugentobler, U., Schaer, S., Fridez, P., Beutler, G., Bock, H., Brockmann, E., Dach, R., Gurtner, W., Ineichen, D., Johnson, J., & others. (2001). *Bernese GPS software, version 4.2*.
- Jouanne, F., Audemard, F. A., Beck, C., Van Welden, A., Ollarves, R., & Reinoza, C. (2011). Present-day deformation along the El Pilar Fault in eastern Venezuela: Evidence of creep along a major transform boundary. *Journal of Geodynamics*, 51(5), 398–410. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2010.11.003>

- Kreemer, C., Blewitt, G., & Klein, E. C. (2014). A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(10), 3849–3889. <https://doi.org/10.1002/2014GC005407>
- Lesage, P. H., Kasser, M., Pagarete, J., Ruegg, J. C., Ortlieb, L., Guerrero, J., Duch, N., Roldán, J., Castellanos, F., Montano, T., Rodríguez, J. L., & Calmus, T. (1988). Mediciones geodésicas de largas distancias: aplicación al estudio del movimiento de placas en el Golfo de California. *Geofísica Internacional*, 27(3), 351–377. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1988.27.3.1205>
- Liu, C., Zheng, Y., & Xiong, X. (2015). Focal mechanism and rupture process of the 2012 Mw 7.0 Santa Isabel, Mexico earthquake inverted by teleseismic data. *Journal of Earth Science*, 26(3), 384–390. <https://doi.org/10.1007/s12583-014-0503-x>
- Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., & Francis, O. (2006). Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, 56(5), 394–415. <https://doi.org/10.1007/s10236-006-0086-x>
- Malservisi, R. (2011a). Central Baja 2009 - Central Baja 2009 December. In GPS/GNSS Observations Dataset. The GAGE Facility operated by EarthScope Consortium. <https://doi.org/https://doi.org/10.7283/T58W3BMM>
- Malservisi, R. (2011b). Central Baja 2009 - Central Baja 2009 September. In GPS/GNSS Observations Dataset. The GAGE Facility operated by EarthScope Consortium. <https://doi.org/https://doi.org/10.7283/T5JD4V34>
- Mann, P., & Burke, K. (1984). Neotectonics of the Caribbean. *Reviews of Geophysics*, 22(4), 309–362. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/RG022i004p00309>
- McCaffrey, R. (2005). Block kinematics of the Pacific–North America plate boundary in the southwestern United States from inversion of GPS, seismological, and geologic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B7). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2004JB003307>
- Meade, B. J., & Hager, B. H. (2005). Block models of crustal motion in southern California constrained by GPS measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B3), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2004JB003209>
- Melbourne, W. G. (1985). The case for ranging in GPS based geodetic systems (pp. 373–386).
- Michaud, F., Calmus, T., Sosson, M., Royer, J.-Y., Bourgois, J., Chabert, A., Bigot-Cormier, F., Bandy, B., Mortera-Gutiérrez, C., & Dymont, J. (2005). La zona de falla Tosco-Abreojos: un sistema lateral derecho activo entre la placa Pacífico y la península de Baja California. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 57(1), 53–63. <https://doi.org/https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n1a3>
- Michaud, F., Sosson, M., Royer, J.-Y., Chabert, A., Bourgois, J., Calmus, T., Mortera, C., Bigot-Cormier, F., Bandy, W., Dymont, J., Pontoise, B., & Sichler, B. (2004). Motion partitioning between the Pacific plate, Baja California and the North America plate: The Tosco-Abreojos fault revisited. *Geophysical Research Letters*, 31(8). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2004GL019665>

- Plattner, C., Malservisi, R., Amelung, F., Dixon, T. H., Hackl, M., Verdecchia, A., Lonsdale, P., Suarez-Vidal, F., & Gonzalez-Garcia, J. (2015). Space geodetic observation of the deformation cycle across the Ballenas Transform, Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(8), 5843–5862. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2015JB011959>
- Plattner, C., Malservisi, R., Dixon, T. H., LaFemina, P., Sella, G. F., Fletcher, J., & Suarez-Vidal, F. (2007). New constraints on relative motion between the Pacific Plate and Baja California microplate (Mexico) from GPS measurements. *Geophysical Journal International*, 170(3), 1373–1380. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03494.x>
- REGNOM. (2017). Red Géodesica del Noroeste de México, Departamento de Sismología del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada. Baja California, México. <http://regnom.cicese.mx>
- Reinoza, C. E. (2015). Geodesy and Geodynamics. *Bol. Acad. C. Fís., Mat. y Nat.*, LXXV(1), 43–54.
- Reinoza, C. E., Audemard, F. A., Quintana, G., Pousse-Beltrán, L., Jouanne, F., López, R. J., & Moncada, J. A. (2017). Aplicación de la Geodesia Espacial en el Estudio de Fallas Activas en Venezuela. *II Congreso Venezolano de Tecnología Espacial*, 1–7.
- Reinoza, C. E., Audemard M, F. A., Jouanne, F., Pousse-Beltrán, L., & Beck, C. (2020). Strain calculations of active tectonic blocks in northeastern Venezuela from GNSS analysis. *Journal of South American Earth Sciences*, 102, 102661. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102661>
- Reinoza, C., Jouanne, F., Audemard, F. A., Schmitz, M., & Beck, C. (2015). Geodetic exploration of strain along the El Pilar Fault in northeastern Venezuela. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(3), 2014JB011483. <https://doi.org/10.1002/2014JB011483>
- Umhoefer, P. J., & Dorsey, R. J. (1997). Translation of terranes: Lessons from central Baja California, Mexico. *Geology*, 25(11), 1007–1010. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1997\)025<1007:TOTLFC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025<1007:TOTLFC>2.3.CO;2)
- Wübbena, G. (1985). Software Development for Geodetic Positioning with GPS Using TI 4100 Code and Carrier Measurements. In Goad C.C. (Ed.), *Proc. of First Int. sym. on Precise Position with GPS* (pp. 403–412).

Manuscrito recibido: 7 de noviembre de 2023

Recepción del manuscrito corregido: 14 de diciembre de 2023

Manuscrito aceptado: 15 de diciembre de 2023