

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL ESPACIO
FACULTAD DE INFORMÁTICA**



**CARACTERIZACIÓN GEODINÁMICA DE LAS
PLACAS PACÍFICO - NORTEAMERICANA EN EL
NOROESTE DE MÉXICO A TRAVÉS DE
OBSERVACIONES GPS**

TESIS

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN**

PRESENTA

DANIEL HERNÁNDEZ ANDRADE

DIRECTORES DE TESIS

DR. ROSENDO ROMERO ANDRADE

DR. MANUEL EDWIGES TREJO SOTO

Culiacán, Sinaloa, México 8 de septiembre de 2023



UAS-Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial Compartir Igual, 4.0 Internacional.





DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y ANTIPLAGIO

A través de la presente Yo: **Daniel Hernández Andrade**, con número de cuenta: **1978731-6** y alumno del Programa de **Maestría en Ciencias de la Información**, con sede en la Facultad de Informática Culiacán y Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio de la Universidad Autónoma de Sinaloa.

DECLARO QUE:

El trabajo de tesis que presento para su defensa y el cual se titula: **“CARACTERIZACIÓN GEODINÁMICA DE LAS PLACAS PACÍFICO - NORTEAMERICANA EN EL NOROESTE DE MÉXICO A TRAVÉS DE OBSERVACIONES GPS”**

- 1.- Es el resultado de un trabajo personal y constituye un documento original e inédito.
- 2.- Los documentos, artículos, informes, etc. Utilizados para la realización del trabajo están referenciados de forma clara, tanto en el texto principal como en el apartado de bibliografía de la presente tesis.
- 3.- Que las citas de las obras que aparecen reflejadas de forma literal y entre comillas, presentan clara especificación de la fuente (autor, año) d la que ha sido extraídas.
- 4.- Tengo conocimiento que no puedo asumir como propio el trabajo de tesis de otra persona, la copia de frases, párrafos e ideas de otro trabajo sin citar autoría, o cualquier otra acción de similares características conlleva a la realización fraudulenta del manuscrito de tesis y podrá implicar la suspensión del examen de grado en tanto no se corrija o bien la suspensión definitiva, esto acorde con el nivel en que se pudiese incurrir.
- 5.- Soy consciente de que pretender ser el autor de un trabajo, en parte o en su totalidad, escrito por otra persona constituye un delito con base en los artículos 424 y 427 del código penal federal, título vigesimosexto de los delitos en materia de derechos de autor en la República Mexicana.

Culiacán, Sinaloa a 07 de agosto de 2023


Daniel Hernández Andrade

Nombre y Firma del alumno



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
REPOSITORIO INSTITUCIONAL BUELNA

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Culiacán, Sinaloa, México el día 10 del mes de agosto del año 2023, el (la) que suscribe: C. Daniel Hernández Andrade alumno (a) del Programa de: Maestría en Ciencias de la Información con número de cuenta: 1978731-6, de la Unidad Académica: Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de: Dr. Rosendo Romero Andrade y Dr. Manuel Edwiges Trejo Soto y de acuerdo al artículo 27 de la Ley Federal de Derechos de Autor, cede los derechos del trabajo intitulado: "Caracterización Geodinámica de las Placas Pacífico - Norteamericana en el Noroeste de México a través de observaciones GPS", a la Universidad Autónoma de Sinaloa para su publicación, difusión, edición, reedición, traducción, compilación, distribución y explotación en medios impresos y digitales, con fines académicos y de investigación, la que será titular del mismo, en forma conjunta o separada con el autor.

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de ésta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

En apego al Art. 27 de la Ley Federal de Derechos de Autor Cedo el derecho de publicación, difusión, edición, reedición, traducción, compilación, distribución y explotación en medios impresos y digitales, con fines académicos y de investigación a la Universidad Autónoma de Sinaloa.

Daniel Hernández Andrade

Nombre completo y firma

«...todo está sujeto a las leyes más o menos conocidas: a la ciencia pertenece descubrirlas por medio de la observación y la experiencia ...»

Antonio Machado y Núñez

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

Resumen

Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN

CARACTERIZACIÓN GEODINÁMICA DE LAS PLACAS PACÍFICO -
NORTEAMERICANA EN EL NOROESTE DE MÉXICO A TRAVÉS DE OBSERVACIONES
GPS

DANIEL HERNÁNDEZ ANDRADE

El presente trabajo tiene por objeto de estudio analizar y caracterizar la interacción de las Placas Pacífico - Norteamericana en el Noroeste de México mediante observaciones geodésicas satelitales GPS de 33 estaciones de operación continua de libre acceso, con el fin de aportar al conocimiento cinemático de dicha interacción tectónica bajo la estimación actual de los correspondientes campos de velocidad y propuesta de modelo de velocidad cortical para el Noroeste de México, analizando 12 años de observaciones GPS del año 2010 al año 2021 procesando mediante software científico GAMIT/GLOBK. Los resultados muestran que la calidad de recepción de la señal en las bandas L1 y L2, es mejor en aquellas estaciones con actualizaciones recientes de hardware, software o firmware ajustándose a los estándares propuestos por el Servicio Internacional de GNSS (IGS), lo que representa estabilidad y continuidad de los datos generados en cada estación analizada. En este sentido el procesamiento en una sola red con 13 estaciones adicionales del IGS para la definición del marco de referencia ajustado al ITRF14, alcanzan los criterios de calidad de procesamiento con un porcentaje de resolución de ambigüedad del 95.4 % para carril ancho y 92 % para carril estrecho, con un error medio cuadrático normalizado (nrms) de 0.179 y raíz cuadrática media (rms) de los residuales de fase menor a los 10 mm lo que representa sitios con bajos niveles de ruido. Referente a las series temporales se ha identificado que modelar los efectos estacionales en estaciones con tiempo mínimo de operación (2.5 años) disminuyen las amplitudes anuales hasta un 60 % en la componente horizontal y 30 % en la vertical, mientras que los efectos estacionales en estaciones con tiempo de operación prolongado tienden a disminuir. Adicionalmente la inclusión de ruido blanco más ruido correlado temporalmente (ruido caminante aleatorio) permiten la estimación de incertidumbres realistas en el cálculo de la velocidad. Asimismo se han estimado los correspondientes campos de velocidad cortical relativos a cada placa tectónica, actualizando los desplazamientos

en el Noroeste de México, que para la Placa del Pacífico se obtuvo una velocidad de 44.73 mm/año en dirección Noroeste relativa a la Placa Norteamericana y una velocidad de 45.34 mm/año en dirección Sureste para la Placa Norteamericana relativa a la Placa del Pacífico. Finalmente se ha propuesto el modelo de velocidad cortical 2-D denominado **NW-MEXVEL** el cual se ha calculado bajo características de elasticidad típica definida por el coeficiente de Poisson con valor de 0.5, aplicando al conjunto de velocidades horizontales un algoritmo de interpolación manipulado por funciones de Green en una malla de 15 x 15 minutos de arco. Se ha identificado que el modelo caracteriza de mejor forma las velocidades en los límites interplaca dada su estimación con datos regionales localizados en zonas críticas a diferencia de los modelos tectónicos globales. Los desplazamientos en el modelo ajustado al ITRF14 son fiables para movimientos mayores a los 0.127 mm/año con base en el error medio cuadrático (RMSE). De forma similar el modelo relativo a cada placa tectónica tiene fiabilidad en desplazamientos sobre la Placa del Pacífico mayores a los 0.068 mm/año y para la Placa Norteamericana fiabilidad para desplazamientos mayores a los 0.067 mm/año incluso en las islas del Golfo de California (San Ángel y Tiburón) y la Isla Guadalupe sobre la Placa del Pacífico.

AUTONOMOUS UNIVERSITY OF SINALOA

Abstract

Faculty of Earth and Space Sciences

MASTER IN INFORMATION SCIENCES

GEODYNAMIC CHARACTERISATION OF THE PACIFIC - NORTH AMERICAN
PLATES IN NORTHWESTERN MEXICO BASED ON GPS OBSERVATIONS

DANIEL HERNÁNDEZ ANDRADE

The aim of this study is to analyze and characterize the interaction of the Pacific - North American Plates in Northwest Mexico by means of GPS geodetic satellite observations from 33 free access continuous operation references stations, in order to contribute to the kinematic knowledge of this tectonic interaction under the current estimation of the corresponding velocity fields and proposal of a cortical velocity model for Northwest Mexico, analyzing 12 years of GPS observations from 2010 to 2021, processed by means of GAMIT/GLOBK scientific software. The results show that the quality of signal reception in the L1 and L2 bands is better in those stations with recent hardware, software or firmware upgrades conforming to the standards proposed by the International GNSS Service (IGS), which represents stability and continuity of the data generated at each station analyzed. In this sense, the processing in a single network with 13 additional IGS stations for the definition of the reference frame adjusted to the ITRF14 achieves the processing quality criteria with an ambiguity resolution percentage of 95.4 % for wide lane and 92 % for narrow lane, with a normalized root mean square error (nrms) of 0.179 and root mean square (rms) of the phase residuals of less than 10 mm, representing sites with low noise levels. Regarding the time series, it has been identified that the modeling of seasonal effects in stations with minimum operation time (2.5 years) decreases the annual amplitudes up to 60 % in the horizontal component and 30 % in the vertical component, while the seasonal effects in stations with long operation time tend to decrease. Additionally, the inclusion of white noise plus temporally correlated noise (random walk noise) allows the estimation of realistic uncertainties in the velocity computation. Furthermore, the corresponding cortical velocity fields relative to each tectonic plate have been estimated, updating the displacements in Northwest Mexico, which for the Pacific Plate gave a velocity of 44.73 mm/year in the northwest direction relative to the North American Plate and a velocity of 45.34 mm/year in the southeast direction for the North American Plate relative to the Pacific Plate. Finally, the 2-D cortical velocity model called NW-MEXVEL has been proposed and

calculated under typical elasticity characteristics defined by the Poisson coefficient with a value of 0.5, applying to the set of horizontal velocities an interpolation algorithm manipulated by Green's functions on a 15×15 arcminute grid. It has been identified that the model provides a better characterization of the velocities at interplate boundaries given its estimation with regional data located in critical zones as opposed to global tectonic models. The displacements in the model fitted to the ITRF14 are reliable for motions larger than 0.127 mm/yr based on the root mean square error (RMSE). Similarly, the model for each tectonic plate has reliability for displacements on the Pacific Plate greater than 0.068 mm/year and for the North American Plate reliability for displacements greater than 0.067 mm/year even on the islands of the Gulf of California (San Angel and Tiburon) and Guadalupe Island on the Pacific Plate.

Agradecimientos

Doy gracias a **Dios** por poner los medios y abrir las puertas para realizar este trabajo, así también por la vida de mi **Familia** quienes son mi principal apoyo, motivación e impulso en todo y para todo, quienes me han dado la confianza y sin cuestionamiento alguno me han respaldado para bien.

A mis directores de tesis: **Dr. Rosendo Romero Andrade** y **Dr. Manuel E. Trejo Soto** quienes me mostraron su apoyo, disponibilidad y confianza para realizar este trabajo, siendo pacientes y flexibles en todo momento, mi más sincero agradecimiento.

Agradezco al **Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCYT)** por el financiamiento en mis estudios de maestría **CVU:1142605**. A la **Universidad Autónoma de Sinaloa**, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio (**FACITE**), Facultad de Informática Culiacán (**FIC**) que permitieron el desarrollo de la mayor parte de mi formación en la maestría. A la **Coordinación del Posgrado en Ciencias de la Información** Dra. Xiomara Penélope Zaldívar Colado y M.C. Thania Roxaana Félix González.

A cada uno de los profesores por sus grandes enseñanzas: Dra. Xochitl Guadalupe Torres Carrillo, Dr. Ramón Gaxiola Camacho, Dr. Inés Fernando Vega López, Dr. Christopher Añorve Solano, Dr. Juan Martín Aguilar Villegas, Dr. Jesús Roberto Millán Almaraz, Dr. Guadalupe Esteban Vázquez Becerra, M.C. Zeus del Valle Castillo Nájera, Dra. Isabel Domínguez Jiménez, y al Lic. José Mario Rojo Navarro.

Asimismo un amplio agradecimiento a la **Dra. Maria Clara de Lacy Pérez de los Cobos** y al **Dr. Antonio Miguel Ruiz Armenteros** de la Universidad de Jaén, España, al **Dr. Roberto Devoti** y a la **Dra. Federica Riguzzi** del Instituto Nacional de Geofísica y Vulcanología de Italia, quienes han hecho excelentes observaciones para la mejora de este trabajo de investigación.

A la Asociación Universitaria Iberoamericana de Postgrado (**AUIP**) y al Consorcio de Universidades Mexicanas (**CUMex**) por la concesión de la beca con código: **PMC-2023-11-16** para realizar una estancia académica en la Universidad de Jaén, España.

A compañeros y amigos quienes han hecho de este trayecto una estancia grata.

A **UNAVCO**, **CORS**, **IGS**, **SOPAC** e **INEGI** por poner a disposición todos los datos de libre acceso, sin los cuales este trabajo no hubiera sido posible.

Índice General

Resumen	V
Abstract	VII
Agradecimientos	IX
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Justificación	4
1.3. Hipótesis	4
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos particulares	5
1.5. Deformación de las Placas Pacífico-Norteamericana en la provincia del Golfo de California. Revisión del estado del arte	6
1.5.1. Marco tectónico del área de estudio	6
1.5.2. Marco Sísmotectónico del Noroeste de México	8
1.5.3. Estudios previos sobre la interacción de la Placas Pacífico-Norteamericana en el Noroeste (NW) de México	9
2. Marco Teórico	11
2.1. Sistemas Globales de Navegación por Satélite	11
2.2. Sistemas y Marcos de Referencia	13
2.3. Gestores y redes geodésicas GNSS de libre acceso en el Noroeste de México	14
2.3.1. Redes adscritas a UNAVCO	14
2.3.2. National Geodetic Survey	15
2.3.3. Red Geodésica Nacional Activa - INEGI	15
2.4. Análisis de calidad de las observaciones GPS	15
2.5. Posicionamiento Relativo Estático	17
2.6. Series temporales de posicionamiento preciso	21
2.7. Polo de Euler	24
2.8. Modelo de interpolación 2-D mediante Funciones de Green	26
2.8.1. Función de Green	27
3. Metodología	30

4. Resultados	36
4.1. Análisis de Calidad de las observaciones GPS	38
4.1.1. Multitrayectoria	38
4.1.2. Relación Señal-Ruido	41
4.1.3. Saltos de Ciclo por cada mil observaciones	43
4.1.4. Integridad de las observaciones GPS	44
4.2. Análisis del procesamiento en GAMIT/GLOBK	45
4.2.1. Soluciones diarias del postproceso	46
4.3. Análisis de Series temporales	49
4.3.1. Análisis de velocidades e incertidumbres en las 33 estaciones del Noroeste de México	54
4.4. Campos de velocidad e interpretación de la deformación en el No- roeste de México	57
4.5. Estimación del polo de Euler	64
4.6. Propuesta de Modelo de velocidad cortical para el Noroeste (NW) de México	67
4.6.1. Verificación de la exactitud del modelo y análisis del error . . .	69
4.6.2. Modelo de velocidad cortical para el NW de México - Relativo a la Placa Pacífico	73
4.6.3. Modelo de velocidad cortical para el NW de México - Relativo a la Placa Norteamericana	75
5. Conclusiones y Discusión	79
5.1. Aporte científico - social	83
5.2. Trabajo Futuro	84
5.3. Productos generados	85
5.4. Retribución social	88
Apéndice	90
A. Series temporales GPS	91
B. Datos del modelo NW-MEXVEL	94
B.1. Velocidades del modelo NW-MEXVEL relativas a la Placa del Pacífico	94
B.2. Velocidades del modelo NW-MEXVEL relativas a la Placa Norteame- ricana	96
B.3. Interpolación mediante funciones de Green en GMT 6	97
Bibliografía	101

Índice de Figuras

1.1. Mapa Geológico del Noroeste de México, datos geológicos de INEGI (2021). Centros de Dispersión (Ferrari y col., 2013): G-Guaymas, C-Carmen F-Fallarón P-Pescadero A-Alarcón. F.T.A-Falla Tosco Abreojos, S.M-F.S.L - Fallas Santa Margarita-Falla San Lorenzo.	7
1.2. a) División de Zonas Sísmicas en México (UNAM, 2017). b) Epicentros en el Golfo de California entre 2002 y 2014 (Castro y col., 2017).	8
1.3. a) Mecanismos focales de la actividad sísmica en el Golfo de California, México en el periodo 2010-2022. b) Profundidad de los hipocentros del perfil indicado en la Figura a.	9
2.1. Segmento espacial, control y usuario en los GNSS	12
2.2. Concepto de posicionamiento relativo.	17
2.3. Diagrama de Rotación del polo de Euler.	25
3.1. Metodología	30
4.1. Estaciones GNSS de libre acceso en el Noroeste (NW) de México identificadas por gestor. Modelo de Relieve Global ETOPO1 (NOAA, 2008). Mapa generado mediante Generic Mapping Tools (Wessel y col., 2019).	36
4.2. Promedio global de efecto multitrayectoria por estación: MP1 y MP2. La línea amarilla muestra el valor máximo recomendable por el IGS para la cantidad de efecto multitrayectoria. Las estaciones dentro del recuadro azul pertenecen al marco de referencia.	39
4.3. Series temporales de multitrayectoria y actualizaciones de antena y receptor en las estaciones MSD1, YESX, PLPX y MEXI.	40
4.4. Promedio global de la relación señal-ruido por estación: SNR1 y SNR2. Las estaciones dentro del recuadro azul pertenecen al marco de referencia.	41
4.5. Promedio global de los saltos de ciclo por cada mil observaciones por estación. Las estaciones dentro del recuadro azul pertenecen al marco de referencia.	43
4.6. Promedio global de integridad por estación. Las estaciones dentro del recuadro azul pertenecen al marco de referencia.	44
4.7. Localización de estaciones geodésicas para estimación de posicionamiento y velocidades.	45

4.8. Valores del <i>nrms</i> del <i>postfit</i> de las soluciones diarias obtenidas en GAMIT para los 12 años.	47
4.9. Raíz cuadrática media (<i>rms</i>) de los residuales de fase del procesamiento en GAMIT.	47
4.10. Desviaciones Estándar de las velocidades calculadas en GLOBK.	48
4.11. Comparativa de series temporales de la estación PTEX relativas al marco ITRF14.	49
4.12. Series temporales de la estación IHER, con (inferior) y sin (superior) considerar efecto anual y semianual. A la derecha el espectro de frecuencia correspondiente.	50
4.13. Series temporales de la estación HER2, con (inferior) y sin (superior) considerar efecto anual y semianual. A la derecha el espectro de frecuencia correspondiente.	52
4.14. Series temporales de la estación IMIP, con (inferior) y sin (superior) considerar efecto anual y semianual. A la derecha el espectro de frecuencia correspondiente.	53
4.15. Diferencias entre las componentes de velocidad con y sin señales estacionales y su relación con el tiempo de operación continua.	54
4.16. Velocidades residuales entre la estimación con TSVIEW y MIDAS de las 33 estaciones GPS relativas al marco de referencia ITRF14, Placa Norteamericana y relativa a la Placa del Pacífico.	57
4.17. Velocidades horizontales de estaciones GPS relativas al marco de referencia ITRF14.	58
4.18. Velocidades horizontales de estaciones GPS relativas a una placa tectónica.	59
4.19. Velocidades horizontales promedio para la Placa Norteamericana (relativa a la Placa Pacífico) y la Placa del Pacífico (relativa a la Placa Norteamericana).	63
4.20. Velocidades horizontales para cada placa tectónica reportadas en el estado del arte. El diagrama de caja y bigote muestra el resultado de este estudio.	64
4.21. a) Estimación del polo de Rotación de Euler a través de 18 estaciones en la Península de Baja California. b) Coeficiente de correlación observado vs modelado.	65
4.22. Modelo NW-MEXVEL de Velocidades horizontales interpoladas mediante funciones de Green con un coeficiente de Poisson de 0.5 considerando acoplamiento elástico. Vectores rojos: velocidades obtenidas del procesamiento en GAMIT/GLOBK. Vectores azules: Velocidades interpoladas en un grid de 15' X 15' de arco.	67

4.23. Modelo de Velocidades horizontales interpoladas mediante funciones de Green con un coeficiente de Poisson de 0.5 considerando acoplamiento elástico. Vectores rojos: Velocidades obtenidas del modelo GEODVEL 2010. Vectores azules: Velocidades interpoladas con funciones de Green (grid 15' X 15' de arco).	68
4.24. Residuales horizontales del modelo NW-MEXVEL (este estudio) tomando como referencia las velocidades interpoladas por el modelo GEODVEL 2010.	70
4.25. Validación directa del modelo NW-MEXVEL tomando como referencia el modelo GEODVEL 2010. a) Velocidad en la componente Norte. b) Velocidad en la componente Este. c) Correlación en las componentes Este-Este. d) Correlación en las componentes Norte-Norte.	70
4.26. Modelo de Velocidades horizontales respecto a la Placa del Pacífico, interpoladas mediante funciones de Green con un coeficiente de Poisson de 0.5 considerando acoplamiento elástico. Vectores rojos: velocidades obtenidas del procesamiento en GAMIT/GLOBK. Vectores azules: Velocidades interpoladas en un grid de 15' x 15' de arco.	73
4.27. Residuales horizontales del Modelo NW-MEXVEL relativo a la Placa del Pacífico considerando el modelo generado con el 100 % de las observaciones como modelo de validación respecto al modelo generado con el 80 % de velocidades conocidas.	74
4.28. Validación punto a punto del modelo generado con el 80 % de las velocidades conocidas respecto al modelo generado con el 100 % de velocidades conocidas. a) Histograma de velocidad en la componente Norte. b) Histograma de velocidad en la componente Este. c) Correlación entre las componentes Este-Este. d) Correlación entre las componentes Norte-Norte.	75
4.29. Modelo de Velocidades horizontales respecto a la Placa Norteamericana, interpoladas mediante funciones de Green con un coeficiente de Poisson de 0.5 considerando acoplamiento elástico. Vectores rojos: velocidades obtenidas del procesamiento en GAMIT/GLOBK. Vectores azules: Velocidades interpoladas en un grid de 15' x 15' de arco.	76
4.30. Residuales horizontales del Modelo NW-MEXVEL relativo a la Placa Norteamericana considerando el modelo generado con el 100 % de las observaciones como modelo de validación.	77
4.31. Validación directa punto a punto del modelo generado con el 80 % de las velocidades conocidas respecto al modelo generado con el 100 % de velocidades conocidas. a) Histograma de velocidad en la componente Norte. b) Histograma de velocidad en la componente Este. c) Correlación entre las componentes Este-Este. d) Correlación entre las componentes Norte-Norte.	78

A.1. Series temporales analizadas en este estudio con efecto anual y semi-anual removido ajustadas al marco ITRF14. Estaciones localizadas en el Noroeste de México.	91
A.2. Series temporales analizadas en este estudio con efecto anual y semi-anual removido ajustadas al marco ITRF14. Estaciones localizadas en el Noroeste de México <i>continuación</i>	92
A.3. Series temporales analizadas en este estudio con efecto anual y semi-anual removido ajustadas al marco ITRF14. Estaciones localizadas en el Noroeste de México <i>continuación</i>	93

Índice de Tablas

2.1. Principales características de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite.	12
2.2. Efectos físicos y geométricos en la recepción y transmisión GNSS (Kouba, Lahaye y Tétreault, 2017)	20
3.1. Estaciones en el área de estudio NW-México.	31
3.2. Parámetros y características de procesamiento GPS.	33
4.1. Disponibilidad de días por año.	37
4.2. Ruido en el receptor presente en el código y fase. Tabla adaptada de Flores Jiménez (2000)	40
4.3. Velocidades e incertidumbres realistas comparando Ruido Blanco (<i>White Noise</i> (WN)) y Ruido Blanco más Ruido aleatorio caminante (<i>White Noise</i> (WN) + <i>Random Walk Noise</i> (RW))	55
4.4. Velocidades e incertidumbres realistas relativas a la Placa de Norteamérica	60
4.5. Velocidades e incertidumbres realistas relativas a la Placa del Pacífico.	61
4.6. Comparativa de la Parametrización del Polo de Euler.	66
4.7. Velocidades interpoladas mediante funciones de Green y acoplamiento elástico para el modelo propuesto NW-MEXVEL ITRF14 y velocidades interpoladas del modelo GEODVEL 2010 como datos de validación	71
B.1. Velocidades interpoladas mediante funciones de Green y acoplamiento elástico para el modelo propuesto NW-MEXVEL relativo a la Placa del Pacífico con el 80 % de velocidades conocidas y como datos de validación velocidades generadas con el 100 % de velocidades estimadas	94
B.2. Velocidades interpoladas mediante funciones de Green y acoplamiento elástico para el modelo propuesto NW-MEXVEL relativo a la Placa Norteamericana con el 80 % de velocidades conocidas y como datos de validación velocidades generadas con el 100 % de velocidades estimadas	96

A mi familia...

Capítulo 1

Introducción

Los Sistemas Globales de Navegación Satelital GNSS (por sus siglas en inglés), están basados en un conjunto de satélites, los cuales proveen de coordenadas geocéntricas tridimensionales a un punto de medición (Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Wasle, 2008), dichos sistemas han sido ampliamente utilizados en la navegación, el posicionamiento y en la determinación precisa de la medida del tiempo (Leick, A., Rapoport, L., y Tatarnikov, 2015). Actualmente los GNSS, han marcado un punto de inflexión en el desarrollo de la infraestructura geodésica, dada la amplia gama de uso y optimización en actividades a nivel global y regional, algunas aplicaciones son: estudio de fenómenos atmosféricos y pronósticos climatológicos (MacDonald, A. E., y Platzer, 2020; Liu y col., 2020), localización y navegación (Leick, A., Rapoport, L., y Tatarnikov, 2015), manejo de recursos y evaluación de riesgos (sismos, deslizamientos de laderas, deformación de la corteza terrestre) (Marquez-Azua y DeMets, 2009; Yanlong y col., 2012; Murray y col., 2019), trabajos de modelación geológica y geomorfológica (Sonnette y col., 2010; Smith, M. J., Paron, P., y Griffiths, J. S., 2011), recursos hídricos (Foster, 2015), y monitoreo estructural (Cao y col., 2019; Zhang y col., 2020) entre otros.

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es una de las principales e importantes constelaciones para el posicionamiento preciso, dado el avance en la precisión de la medición, por ello entre sus bastas aplicaciones (posicionamiento, navegación y determinación del tiempo) el GPS ha permitido la observación y modelación de procesos geodinámicos, como lo es la tectónica de placas (Kreemer, C., G. Blewitt y Klein, 2014), deformación de la corteza (Sharma y col., 2021), acumulación de tensión (Craig y Calais, 2014), ajuste isostático glacial (Métivier y col., 2020), generación de series temporales (Luna y col., 2019), estimación de campos de velocidad (DeMets, Márquez-Azúa y Cabral-cano, 2014), análisis del ciclo sísmico (Mendoza y col., 2022), estudios de subsidencia (Agudelo y col., 2020), entre otros (Saleh y col., 2021; Sawires y col., 2021).

Actualmente el *International GNSS Service* (IGS), cuenta con más de 500 estaciones

de operación continua en todo el mundo (IGS, 2019), con una de sus principales misiones de apoyar en el establecimiento del Marco de Referencia Internacional Terrestre (ITRF) a través de la más alta calidad de datos GNSS. México también colabora con el IGS, así como con otros organismos que establecen redes GNSS multipropósito, como lo es el National Geodetic Survey (NGS), University NAVstar Consortium (UNAVCO) y Estaciones de Referencia de Operación Continua (CORS), con la finalidad de desarrollar trabajos científico-técnicos de alta precisión para evaluar el comportamiento geodinámico del territorio mexicano, como lo es la caracterización de la tectónica de placas (Kreemer, C., G. Blewitt y Klein, 2014), monitoreo de volcanes (Janssen y col., 2002) y procesos sísmicos (Cosenza-Murales y col., 2021), entre otras actividades.

La contribución de la geodesia ha sido significativa en los estudios de la cinemática de la corteza terrestre, permitiendo mejorar la comprensión de la complejidad tectónica a nivel global, regional y local. La actividad tectónica está ampliamente relacionada a la interacción entre placas, la actividad sísmica y volcánica de la región (Mora-Páez, H. y Audemard, F., 2021; Sohn y col., 2021), lo que da como resultado una gran cantidad de fallas geológicas, las cuales pueden estar activas o potencialmente activas (Aragón-Arreola y Martin-Barajas, 2007).

México es uno de los principales laboratorios naturales para el análisis respecto a la actividad geodinámica (sísmica y tectónica) dada su localización e interacción con 5 placas tectónicas: Norteamericana, Pacífico, Rivera, Cocos y Caribe, lo que da lugar a una alta actividad sísmica, y por lo tanto, a una necesidad de conocimiento sobre la interacción tectónica, para la correcta prevención de desastres originados por la geodinámica del país (Rodríguez-Lozoya y col., 2017; Espíndola y Pérez, 2018). En el estudio de la deformación de la corteza terrestre se han interrelacionado observaciones de carácter geodésicas, geológicas y sismológicas para una mejor comprensión del análisis cuantitativo, cercano a zonas de fallamiento (Fletcher y col., 2007; Suribabu y col., 2022; Mendoza y col., 2022). En el Noroeste de México, se han llevado a cabo diferentes estudios relacionados a la deformación y apertura del Golfo de California (Aragón-Arreola y Martin-Barajas, 2007; Fletcher y col., 2007; Ferrari y col., 2013; Duque-Trujillo y col., 2014; Balestrieri y col., 2017) analizado desde diferentes enfoques geológicos y sísmicos, así como campos de velocidad en relación a la deformación viscoelástica de terremotos históricos (Demets, Márquez-Azúa y Cabral-Cano, 2014; Ramírez-Ramos y col., 2015; González-Ortega, González-García y Sandwell, 2018). En este sentido, se propone realizar una caracterización geodinámica del Noroeste de México, a través de estaciones de operación continua GPS, con la finalidad de identificar la creciente actividad sísmica y la posible existencia de microplacas en el Golfo de California, así como proponer un modelo de velocidad cortical actual utilizando un poco más de una década de observación continua GPS en estaciones de libre acceso.

1.1. Planteamiento del problema

Con el avance en las tecnologías de posicionamiento, así como en las propias constelaciones, es posible obtener soluciones de posicionamiento a nivel milimétrico, de este modo los procesos de deformación de la corteza terrestre, así como la creciente actividad tectónica, han permitido ser evaluados en diferentes partes del mundo, principalmente en los límites de placa y en las regiones con actividad interplaca e intraplaca (Craig y Calais, 2014; Agudelo y col., 2020; Kandregula y col., 2021), obteniendo una mejor estimación de las tasas de deformación a través del tiempo, así como la acumulación de tensión antes, durante y después de alguna actividad sísmica, haciendo posible evaluar el riesgo por sismicidad.

Uno de los principales supuestos en la tectónica de placas es la rigidez de la placa, sin embargo, de acuerdo con Márquez-Azúa y DeMets (2003), Plattner y col. (2007) y Macias-Iñiguez y col. (2021), dicho supuesto se ajusta en el interior de las placas, no así para los límites interplaca, permitiendo el posible desarrollo de bloques o microplacas. En este sentido la interacción de las Placas Pacífico-Norteamericana en el Noroeste de México con un fallamiento transformante de tipo lateral derecho (Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007; Liu, Wang y Li, 2010; DeMets, Gordon y Argus, 2010; Castro y col., 2017; Alva-Valdivia y col., 2021), es una de las zonas donde este supuesto puede ser cierto, ya que no se crea ni destruye litosfera.

Con base en lo anterior, se propone realizar una caracterización geodinámica de la interacción de las Placas Pacífico y Norteamericana en el Noroeste de México a través de observaciones GPS de estaciones de operación continua, considerando un periodo de 12 años (2010 al año 2021) por analizar procesando con software científico GAMIT/GLOBK (Herring, King y McClusky, 2018), con la finalidad de, calcular las velocidades en cada estación y proponer un campo y modelo de velocidad cortical regional para el Noroeste de México mediante funciones de Green y acoplamiento elástico, identificando el acoplamiento y rigidez de ambas placas tectónicas con la cuantificación del movimiento actual, la estimación del polo de Euler y las características cinemáticas de la Placa del Pacífico en relación a la Placa Norteamericana y de la Norteamericana relativa a la Placa del Pacífico.

1.2. Justificación

La interacción entre la placa del Pacífico y Norteamericana resulta en un complicado movimiento entre fallas a lo largo del límite transformante así como en el interior de las placas, permitiendo acumulación de tensión en aquellas fallas activas o posiblemente activas que al activarse se liberaran a través de sismos de pequeña a gran magnitud y finalmente reflejados como un riesgo a la población, como reporta Rodríguez-Lozoya y col. (2017). En este sentido diversos trabajos han caracterizado algunas fallas en específico del Golfo de California y en la Península de Baja California México (Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007; González-Ortega, González-García y Sandwell, 2018; Plattner y col., 2015) demostrando la creciente actividad en fallas al oeste del Golfo de California y una continua sismicidad en el norte de Baja California.

Con base en lo anterior y bajo la premisa de que la península de Baja California no se encuentra completamente unida a la placa del Pacífico (Plattner y col., 2007; Michaud y col., 2005) y que la interacción del límite transformante interplaca Pacífico-Norteamericana pueda formar bloques o microplacas, es que este estudio muestra actualidad y relevancia al aporte en la caracterización geodinámica del límite transformante del Noroeste de México (Márquez-Azúa y DeMets, 2003; Plattner y col., 2007; Macías-Iñiguez y col., 2021), ya que, los estudios de modelos de deformación y extensión cortical han sido a través de métodos geológicos, sísmica de reflexión y estudios paleo-magnéticos, focalizados en diferentes áreas del Golfo de California. En este sentido, se busca evaluar a través de observaciones geodésicas satelitales GPS, la interacción de las Placas Pacífico-Norteamericana, con la finalidad de estimar un modelo de velocidad cortical y aportar al conocimiento cinemático de la Placa del Pacífico y la posible generación de bloques o microplacas.

1.3. Hipótesis

Es posible caracterizar la interacción de las placas Pacífico - Norteamericana en el Noroeste de México en zonas donde no existan estaciones de operación continua GNSS para determinar desplazamientos de la corteza terrestre, mediante la propuesta de un modelo de velocidad cortical interpolado con velocidades GPS.

1.4. Objetivos

Con la tendencia de México en la implementación de redes geodésicas locales y regionales, se plantean los siguientes objetivos en relación a la geodinámica del Noroeste de México.

1.4.1. Objetivo general

Analizar y caracterizar la interacción de las Placas Pacífico – Norteamericana en el Noroeste de México, a través de observaciones continuas GPS.

1.4.2. Objetivos particulares

- Seleccionar estaciones GNSS de libre acceso en el Noroeste de México.
- Realizar un análisis de calidad a las estaciones de operación continua GPS a utilizar en el estudio.
- Analizar las series temporales y sus correspondientes errores.
- Estimar un nuevo campo de velocidad a través de observaciones GPS.
- Analizar el movimiento de las placas tectónicas a través del cálculo del polo de Euler.
- Elaborar y proponer un modelo de velocidad Regional para el Noroeste de México.

1.5. Deformación de las Placas Pacífico-Norteamericana en la provincia del Golfo de California. Revisión del estado del arte

1.5.1. Marco tectónico del área de estudio

Las provincias magmáticas de la península de Baja California y el Noroeste de México registran la historia tectónica de la subducción de la placa Farallón por debajo de la Placa Norteamericana durante el Mesozoico (Gastil y Miller, 1993). Como resultado de esta tectónica convergente, el metamorfismo regional y el magmatismo asociado a la subducción resultó en la formación de un batolito peninsular compuesto principalmente por intrusiones de monzogranitos y gabros, mientras que en la parte oriental son comunes las granodioritas y las tonalitas (Figura 1.1). Durante el Cenozoico dominaron los depósitos de origen volcánico y sedimentario. En el norte de la península, las secuencias volcánicas del Mioceno temprano a Mioceno medio se formaron por la activación de volcanes dacíticos a andesíticos durante la subducción de la Placa Farallón-Guadalupe (Barajas, 2000). Las secuencias volcanosedimentarias del Oligoceno tardío al Mioceno medio conocida como el Grupo Comondú (Bryan y Ferrari, 2014), se asocia con un magmatismo sin tectónismo ocurrido durante de la subducción en el Oligoceno-Mioceno (Ferrari, Orozco-esquivel y Bryan, 2017).

Aproximadamente hace 12.5 Ma, tras el cese de la subducción y el abandono secuencial de pequeñas microplacas (p.ej., Guadalupe y Magdalena) a lo largo de la margen occidental de Baja California, una parte de la Placa de Norteamérica se acopló a la Placa del Pacífico por cizalla viscosa (Negrete-Aranda, Contreras y Spelz, 2013) y desde entonces ha sido arrastrada hacia el Noroeste (por una distancia de casi 650 km) dando inicio a la ruptura continental, vulcanismo intraplaca y la formación del Golfo de California (Fletcher y col., 2007; Negrete-Aranda, Contreras y Spelz, 2013; Ferrari, Orozco-esquivel y Bryan, 2017). De acuerdo con Umhoefer (2011), la creación de mares estrechos marginales ocurre generalmente con la ruptura en márgenes continentales activos y su resultado es la formación de micro continentes o terrenos continentales, ejemplo de ello es el Golfo de California, una región en la que se formó una grieta oblicua joven en un arco volcánico con un arco posterior extensional. Un rasgo característico del Golfo de California es la rapidez con la que evolucionó hacia la expansión activa del fondo marino y la formación de corteza oceánica. La microplaca de Baja California es un ejemplo de ruptura continental y formación de terreno, así como una rápida divergencia de placas y una ruptura rápida continental en fallamiento por deslizamiento (strike-slip).

El Golfo de California es una cuenca estructural caracterizada por una deformación transtensional con orientación Noroeste-Suroeste (NW-SE) de aproximadamente 1500 km de longitud y 200 km de ancho, caracterizada por fallas transformantes de desplazamiento lateral derecho unidas por una serie de centros de dispersión que conectan una serie de cuencas tipo *pull-apart* formadas desde el Mioceno medio-tardío hasta la actualidad (Figura 1.1). El Golfo de California es una zona de transición compleja, localizada entre el sistema transformante continental de San Andrés y los centros de dispersión del piso oceánico del ascenso del Pacífico Este.

El Golfo de California y el Canal Salton, forman el límite oblicuo-divergente entre las placas Pacífico-Norteamericana entre las latitudes 22° a 34° norte. La mayoría del movimiento tectónico en el sur del Golfo de California, es acomodado por fallas transformantes y pequeños centros de dispersión. El movimiento relativo entre la microplaca de Baja California y la Placa Norteamericana en el sur del Golfo de California es de aproximadamente 45 a 47 mm/año, que de acuerdo con DeMets y Dixon (1999), Dixon y col. (2000), Plattner y col. (2015) y Duque-Trujillo y col. (2014), la península de Baja California se mueve casi por completo con la Placa del Pacífico a una velocidad de aproximadamente 48 mm/año a través del Golfo de California, así como un movimiento relativo de 3 mm/año entre la península de Baja California y la Placa del Pacífico (DeMets, Gordon y Argus, 2010) con un movimiento adicional de 4 a 6 mm/año costa afuera de la zona de falla Tosco-Abreojos al suroeste de la península de Baja California.

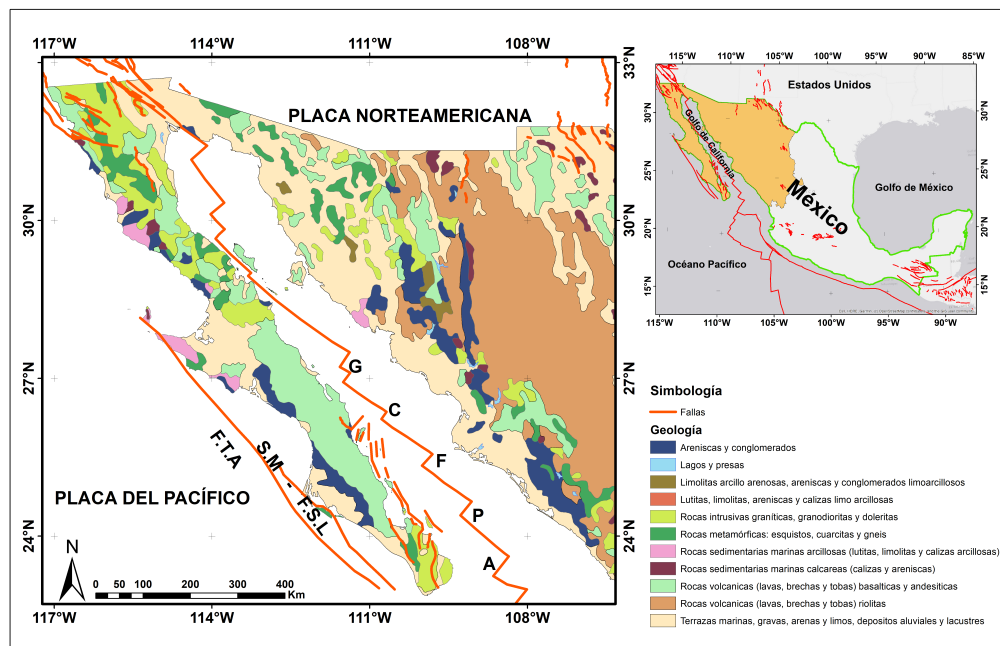


FIGURA 1.1: Mapa Geológico del Noroeste de México, datos geológicos de INEGI (2021). Centros de Dispersión (Ferrari y col., 2013): G-Guaymas, C-Carmen F-Fallarón P-Pescadero A-Alarcón. F.T.A-Falla Tosco Abreojos, S.M-F.S.L - Fallas Santa Margarita-Falla San Lorenzo.

1.5.2. Marco Sísmotectónico del Noroeste de México

La actividad sísmica presente en territorio mexicano ha sido clasificada con base en los registros sísmicos del país en cuatro zonas (Figura 1.2 a). En la Zona A no se tiene registro sísmico histórico y no se ha presentado actividad en los últimos 80 años, asimismo, no se esperan aceleraciones del suelo de más del 10 % de la aceleración de la gravedad. Las zonas B y C no presentan actividad tan frecuente o son zonas afectadas por aceleraciones del suelo no mayores al 70 % de aceleración de la gravedad y finalmente, la Zona D donde si se han reportado grandes sismos, actividad sísmica muy frecuente y las aceleraciones del suelo superan el 70 % de la aceleración de la gravedad (UNAM, 2017; SGM, 2017).

En el Noroeste de México y en específico para el Golfo de California se han llevado a cabo diferentes estudios sobre la actividad sísmica como el desarrollado por Castro y col. (2017) quienes a través de diferentes catálogos regionales y globales con magnitudes mayores a 3.0 mejoraron la precisión de la localización de los epicentros en el periodo 2002-2014, permitiendo un análisis sísmotectónico y la estimación de la profundidad de la zona sismogénica (Figura 1.2 b). Posteriormente Castro y col. (2021) amplían el tiempo de análisis desde el año 1901 al 2018 identificando fallas activas e inactivas que pueden estar relacionadas al sismo de abril de 2010 del Mayor Cucapah (Mw 7.2), activando fallas en el norte y centro del Golfo de California, perpendiculares a la falla transformante principal. Finalmente, identifican que los mecanismos focales derivados de sismos por deslizamiento se presentan en fallas transformantes y un fallamiento normal cercano a los centros de dispersión.

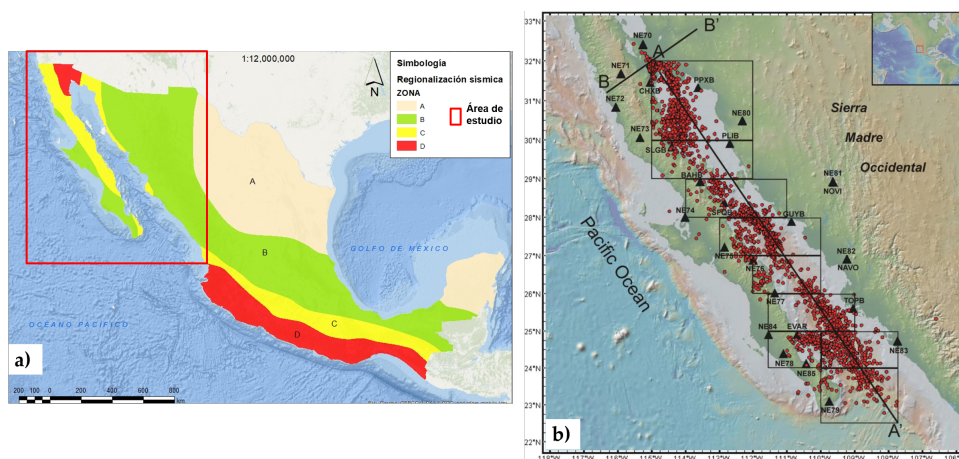


FIGURA 1.2: a) División de Zonas Sísmicas en México (UNAM, 2017).
b) Epicentros en el Golfo de California entre 2002 y 2014 (Castro y col., 2017).

Con base en el catálogo del *Global Centroid-Moment-Tensor* (CMT) (Dziewonski, Chou y Woodhouse, 1981; Ekström, Nettles y Dziewoński, 2012), se han localizado 196 epicentros, mecanismos focales y profundidades de los sismos mayores a 3 Mw en el periodo 2010 - 2021 como se muestra en la Figura 1.3. Los hipocentros están

localizados entre los 12 y 36 km de profundidad, similar a la zonas sismogénicas reportadas en otros estudios (Fernández y Pérez-Campos, 2017; Fragoso-Irineo y col., 2021), asimismo los mecanismos focales a pesar del complejo límite entre las Placas Pacífico y Norteamericana como reporta Castro y col. (2021) con un sistema de fallamiento altamente segmentado, los mecanismos focales muestran una combinación de sismos por deslizamiento en las fallas transformantes y un fallamiento normal en los centros de dispersión, dando información relevante sobre las características de ruptura en las fallas activas, así como la profundidad de la zona sismogénica de la interacción de las Placas Pacífico-Norteamericana.

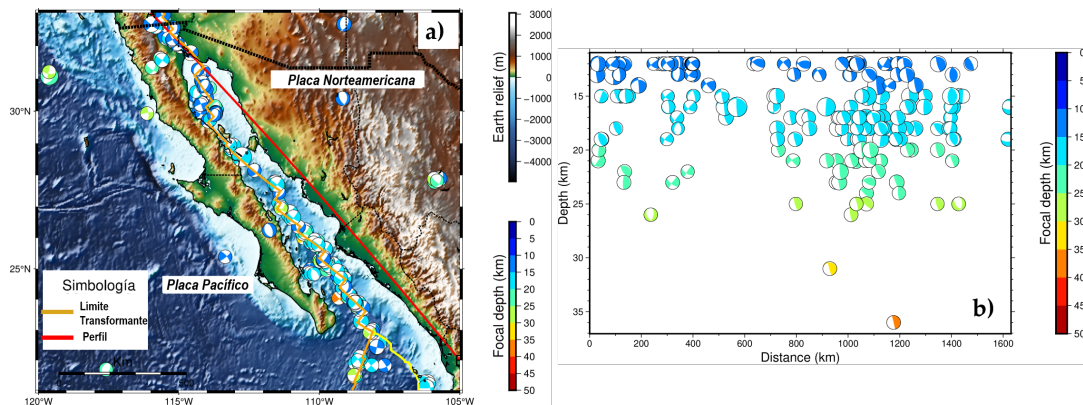


FIGURA 1.3: a) Mecanismos focales de la actividad sísmica en el Golfo de California, México en el periodo 2010-2022. b) Profundidad de los hipocentros del perfil indicado en la Figura a.

1.5.3. Estudios previos sobre la interacción de la Placas Pacífico-Norteamericana en el Noroeste (NW) de México

Con el objetivo de cuantificar la deformación en los límites de las Placas Pacífico-Norteamericana, diferentes estudios con distintos enfoques y metodologías se han desarrollado. Dunn y col. (1996) caracterizan por medio de Mediciones Láser por Satélites (SLR) el movimiento tectónico en el Golfo de California comparando la solución de mediciones continuas y episódicas en relación a las del modelo NNR-NUVEL1A encontrando velocidades similares de 6 mm/año con una orientación un poco más al oeste, concluyendo que una mayor cobertura con una red geodésica en la parte sur de Baja California dará certeza y evidencia de una región tectónica única. Por otro lado Dixon y col. (1991), muestran las primeras evidencias de cuantificación a través de mediciones GPS utilizando 4 años de medición en tres estaciones de operación, reportando un movimiento relativo a la Placa Norteamericana de Cabo San Lucas localizado en la Placa del Pacífico, con una tasa de 47 ± 7 mm/año, similar a la velocidad del modelo de movimiento de placa global NUVEL-1. Plattner y col. (2007) presentan un nuevo campo de velocidad para Baja California por medio de 33 estaciones continuas GPS de las cuales 32 son estaciones episódicas, consideraron

un periodo de 6 años con el fin de probar la rigidez de la microplaca de Baja California, demostrando que esta se desplaza de forma relativa a la Placa de Norteamérica, como un bloque cuasi-rígido en la misma dirección que la Placa del Pacífico pero con una velocidad menor. Recientemente, Demets, Márquez-Azúa y Cabral-Cano (2014) utilizan estaciones de operación continua localizadas en el interior de la Placa del Pacífico, como las localizadas en las islas Clarión, Socorro y Guadalupe, siendo en total 26 estaciones en toda la Placa del Pacífico, con el fin de comprobar la deformación en el interior de la Placa y estimar la viscosidad de la astenósfera, así como un nuevo campo de velocidad GPS con la inclusión por primera ocasión de las tres islas antes mencionadas, probando diferentes hipótesis de deformación en el interior de la Placa Pacífico incluida la deformación viscoelástica debido a terremotos históricos.

Además de las evidencias geodésicas de campos de velocidad cortical con tecnologías GPS, estudios como el de Hauksson y col. (2014) muestran que el tectonismo en la corteza oceánica de la Placa del Pacífico sigue activo debido al sismo reportado el 14 de diciembre del 2014 de magnitud 6.3 Mw en las costas de Ensenada, Baja California. También Castro y col. (2017) y Castro y col. (2021), mejoran la estimación de los epicentros y evalúan las características sismogénicas del Golfo de California, encontrando que la actividad sísmica es mayor en la parte sur y norte del Golfo y menor en la parte central, adicionalmente refieren que en la parte sur los sismos están relacionados al fallamiento transformante y que en la parte norte están vinculados a fallas oblicuas. González-Ortega, González-García y Sandwell (2018) muestran un campo de velocidad intersísmico para el norte de Baja California identificando la mayor acumulación de tensión en la Falla Imperial. Desde un enfoque geológico, siendo este el de mayor relevancia respecto a la apertura del Golfo de California y modelos de velocidad cortical, Balestrieri y col. (2017) analizan el patrón de apertura y deformación del inicio y migración del fallamiento extensional.

Específicamente modelos de velocidad cortical que caractericen la interacción de la Placa Pacífico - Norteamericana en el Noroeste de México a través de velocidades obtenidas de estaciones de operación continua GNSS, no se reportan en el estado del arte, sin embargo, en áreas cercanas como lo es al oeste de Estados Unidos de Norteamérica, Zeng (2022) recopila datos de velocidades calculadas por diferentes redes y centros de procesamiento, rotando las diferentes soluciones a un marco de referencia común con un total de 4979 velocidades horizontales, calculando la tasa y modelo de deformación para la actualización del modelo geodésico y geológico del año 2023.

Capítulo 2

Marco Teórico

En esta sección se describen algunos temas y conceptos geodésicos fundamentales para el desarrollo y sustento metodológico de la experimentación en este trabajo de investigación.

2.1. Sistemas Globales de Navegación por Satélite

Los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS), son aquellos sistemas capaces de determinar espacial y temporalmente cualquier punto sobre o cercano a la superficie terrestre haciendo uso de una o más constelaciones satelitales a través del seguimiento y recepción de las señales transmitidas por los satélites artificiales (Hegarty y Chatre, 2008; Álvarez, 2008; Ostini, 2012).

Por otro lado, los GNSS, constan de tres componentes denominados segmentos (Figura 2.1), el segmento espacial que hace referencia a la constelación de satélites orbitando la superficie terrestre que envía la señal a través de ondas electromagnéticas al menos en dos frecuencias y proveen al receptor de las efemérides del satélite. Posteriormente el segmento control o segmento terrestre que es el encargado del monitoreo del segmento espacial, actualizando, corrigiendo y ajustando las órbitas de los satélites mantenido estable y operacional el sistema. Este segmento consiste en un grupo de estaciones maestras y de monitoreo dispersas ya sea local o globalmente para el apoyo en la comunicación con los satélites. Finalmente, el segmento usuario consiste en los receptores GNSS tanto militares como civiles ya sean terrestres, marítimos, aéreos y espaciales (Teunissen y Montenbruck, 2017; Grewal, Andrews y Bartone, 2020).

Generalmente los GNSS adoptan una configuración en su órbita, siendo para cobertura global los de órbita terrestre media (MEO) y como complemento en los sistemas regionales las órbitas de inclinación geosincrónicas (IGSO) y las geoestacionarias (GEO), por sus siglas en inglés. Actualmente son seis los GNSS en operación (Tabla 2.1): el sistema estadounidense GPS, el ruso GLONNAS, BeiDou de China, Galileo de la Unión Europea y dos más como sistemas regionales Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) de Japón, e Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS

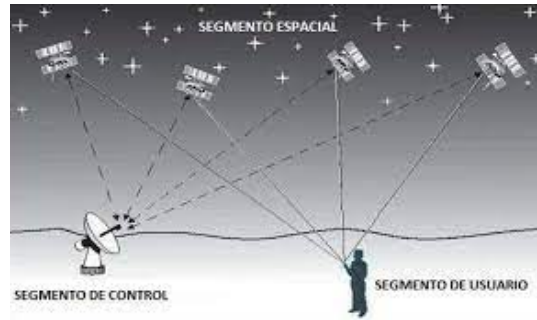


FIGURA 2.1: Segmento espacial, control y usuario en los GNSS.

actualmente NAVIC) perteneciente a la India, y finalmente los sistemas de aumento basados en satélites (SBAS), (Hegarty, 2012; Johnston, Riddell y Hausler, 2017; Teunissen y Montenbruck, 2017). Con base en Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Wasle (2008) el aumento en los GNSS puede incrementar el número de observaciones y el número de satélites, por lo que la dilución de la precisión (DOP) decrece y aumenta la precisión del posicionamiento, beneficiando también la disponibilidad, integridad y continuidad dadas las mediciones redundantes. De acuerdo con Odoinski, Teunissen y Zhang (2020), para el año 2024 se tendrá acceso a un total de 110 satélites en un modelo multi-GNSS en diferentes frecuencias.

TABLA 2.1: Principales características de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite.

Sistema	GPS	GLONASS	Beidou	Galileo	QZSS	IRNSS/NavIC
Órbita	MEO	MEO	MEO,IGSO,GEO	MEO	IGSO,GEO	IGSO,GEO
Número nominal de satélites	24	24	27,3,5	30	3,1	4,3
Plano orbital	6	3	3	3	IGSO	IGSO
Inclinación orbital	56°	64.8°	55°	56°	43°	29°
Servicio	SPS,PPS	SPS,PPS	OS,AS WADS,SMS	OS,CS PRS	GCS,GAS PRS,EWS MCS	SPS,RS
Inicio del servicio	Dic.1993	Sep. 1993	Dic. 2012	2016	2018	2016
Origen	USA	Rusia	China	Europa	Japón	India
Cobertura	Global	Global	Global	Global	Regional este de Asia y Oceanía	$-30^{\circ} < \phi < 50^{\circ}$; $30^{\circ} < \lambda < 130^{\circ}$
Frecuencias (MHz)	L1 1575.42	L1 1602.00	B1 1561.098	E1 1575.42	L1 1575.42	L5 1176.45
	L2 1227.60	L2 1246.00	B2 1207.14	E5a 1176.45	L2 1227.60	S 2492.028
	L5 1176.45	L3 1202.025	B3 1268.52	E5b 1207.14	L5 1176.45	
				E6 1278.75	E6 1278.75	

SPS: Standard Position Service; PPS: Precise Positioning Service; OS: Open Service; AS: Authorized Service;
WADS: Wide Area Differential Service; SMS: Short Message Service; CS: Commercial Service; PRS: Public Regulated Service;
PRS: Public Regulated Service; GCS: GPS Complementary Service; GAS: GPS Augmentation Service;
EWS: Early Warning Service; MCS: Message Communications Service; PS: Precision Service; RS: Restricted Service

2.2. Sistemas y Marcos de Referencia

De acuerdo con Seeber (2008), un Sistema de Referencia es completamente una definición conceptual, considerando los fundamentos matemáticos y modelos físicos respecto al origen y orientación de los planos fundamentales o ejes del sistema. Por otro lado, un sistema de referencia convencional es aquel donde los modelos, constantes numéricas y algoritmos, están explícitamente definidos.

Un Marco de Referencia es la materialización o realización práctica de un sistema de referencia a través de observaciones, que consisten en puntos sobre la superficie terrestre los cuales describen un catálogo de posiciones precisas en una determinada época de medición. En la geodesia satelital dos sistemas son fundamentales: el primero un Sistema de Referencia Inercial Convencional (CIS), el cual considera al espacio fijo, necesario para la descripción del movimiento de los satélites. El segundo es el de Tierra-Fija, denominado, Sistema de Referencia Terrestre Convencional (CTS), útil para la determinación de posición en las estaciones de observación. En los estudios geodinámicos como lo es el movimiento de las placas tectónicas y la deformación de la corteza terrestre se utiliza un Sistema de Referencia Terrestre definido por un punto origen (datum) una orientación y una escala. Un sistema de referencia no puede determinarse a partir de medidas, sino que es definido a través de observaciones, es decir, a partir de un conjunto de estaciones localizadas en la superficie terrestre con coordenadas y velocidades conocidas, las cuales dan como resultado la materialización en el espacio del sistema de referencia, lo que da lugar al Marco de Referencia Internacional Terrestre (ITRF) en sus diferentes realizaciones. Las técnicas geodésicas que contribuyen a la construcción y actualización del ITRF son Orbitografía Doppler y radio posicionamiento integrado por satélite (*Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite* - DORIS), Sistemas Globales de Navegación Por Satélite (GNSS), Mediciones Láser por Satélite (*Satellite Laser Ranging* - SLR), e Interferometría de Línea Base muy Larga (*Very Long Baseline Interferometry* - VLBI).

El ITRF2014 (Altamimi y col., 2016), al igual que las soluciones anteriores (ITRF2005, ITRF2008), es la realización actual (durante la redacción de esta tesis) y de combinación rigurosa de las cuatro técnicas geodésicas ya mencionadas, que provee de un marco consistente y compatible con los parámetros de rotación terrestres (EOP). Para su modelamiento se ha implementado un movimiento no lineal de las estaciones, incluyendo señales estacionales (anuales y semianuales), así como deformación post-sísmica en los sitios sujetos a grandes terremotos. El origen del ITRF2014 coincide con el centro de masa de la tierra calculado por observaciones SLR, cuya precisión respecto al ITRF2008 es menor a los 3 mm en la época 2010.0 y el modelo de variación anual del centro de masa de la tierra a un nivel de 0.5 mm/año. A finales de la redacción de este trabajo de tesis se ha publicado el ITRF2020 el cual se describe a detalle en Altamimi y col. (2023) para futuras consultas.

2.3. Gestores y redes geodésicas GNSS de libre acceso en el Noroeste de México

En México las redes geodésicas han sido de relevancia en el desarrollo y avance tecnológico del país, siendo de gran valor en la investigación para las geociencias a través de la materialización del Sistema Geodésico Nacional y el acceso gratuito a redes GNSS multipropósito de organismos internacionales como UNAVCO, NGS e IGS, mediante protocolos de transferencia de archivos (FTP).

University NAVstar Consortium (UNAVCO), actualmente EarthScope Consortium es un consorcio sin fines de lucro, creado en respuesta al desafío de aplicar GPS a las geociencias en el año de 1984 (Miller y col., 2017). A este consorcio están adscritas diferentes redes geodésicas proporcionándolas de mantenimiento y monitoreo.

El *Servicio Internacional de GNSS* (IGS), es una organización encargada de proveer de una base disponible de productos, servicios y datos GNSS de alta calidad desde 1994 (IGS, 2019) en apoyo al marco de referencia terrestre, investigación y observación terrestre, posicionamiento, navegación y determinación del tiempo, definiendo el marco de referencia global para aplicaciones científicas, comerciales y educativas.

2.3.1. Redes adscritas a UNAVCO

La Red Transfronteriza, Terrestre y Atmosférica de Colaboración y Observación, TLALOCNet por sus siglas en inglés, es una red geodésica y meteorológica en México para el estudio de tierra sólida y proceso atmosféricos enfocada en el sur y oeste del país, que apoya en el análisis de acumulación y liberación de tensión en las zonas de subducción, transformación de las fallas del Golfo de California, deformación de la corteza y estimaciones de vapor de agua (Cabral-Cano y col., 2018).

La red *The Plate Boundary Observatory*, PBO, estudia la deformación de los límites de la Placa del Pacífico y la Norteamericana en el oeste de los Estados Unidos y Alaska así como apoyo para entender la magnitud de los desastres naturales, comportamiento de terremotos y volcanes (Anderson y col., 2006).

La red *Continuously Operating Caribbean Observation Network*, COCONet fundada en el año 2010 bajo un enfoque científico por la Fundación Nacional de Ciencia (NSF) en busca de la comprensión de los riesgos naturales del Caribe, formada por UNAVCO, Universidad Purdue, Universidad de Puerto Rico y la Corporación Universitaria de Investigación Atmosférica (UCAR). Los productos generados son provistos por UNAVCO (Braun y col., 2012).

Bajo el actual *Geodetic Facility for the Advancement of Geoscience* (GAGE) ha integrado y federado redes GNSS y meteorológicas en una sola red Pan-Americana compuesta por PBO, TLAOCNet y COCONet denominada Red de las Américas (NOTA, por sus siglas en inglés) que comprende alrededor de 1278 estaciones continuas GPS/GNSS, siendo las tasas de muestreo de 15 s y de altas frecuencias de 1, 2 y 5 Hz (1Hz = 1 muestreo por segundo).

2.3.2. National Geodetic Survey

El *National Geodetic Survey* en oficinas de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) administra a la Red de Estaciones de Referencia de Operación Continua (CORS), la cual proporciona de manera gratuita datos GNSS para posicionamiento tridimensional, datos meteorológicos y aplicaciones geofísicas consistiendo en mediciones tanto de fase y código, con intervalos de muestreo de 30, 15, 5 o 1 s con ángulo de elevación de 5° o de preferencia a 0°, no sólo para Estados Unidos sino para otros países, dentro de los cuales se encuentra México, siendo un esfuerzo multipropósito que involucra organizaciones tanto gubernamentales, académicas y privadas (National Geodetic Survey, 2018; CORS, 2020).

2.3.3. Red Geodésica Nacional Activa - INEGI

El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) forma parte de las agencias extranjeras asociadas a la red de CORS, presente con 10 estaciones de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) la cual materializa el Sistema Geodésico Nacional y da acceso al Marco de Referencia Terrestre Internacional, ITRF08 época 2010.0 (INEGI, 2015). La RGNA ha sido ajustada a las condiciones y necesidades del país, siendo las aplicaciones más relevantes de acuerdo con INEGI (2017): actualización catastral, cartografía, límites nacionales e internacionales, subsidencia y deslizamiento de terrenos, tectónica de placas, prevención de desastres, actualización del marco de referencia terrestre internacional y regional, en general todo proyecto que requiera de una ubicación precisa.

INEGI pone a disposición los archivos de navegación y observación de las 28 estaciones que conforman la RGNA en formato RINEX 2.11 (Receiver Independent Exchange Format, (Gurtner y Estey, 2013)) con tasas de muestreo a 15 s y máscara de elevación de 10°, ya sea en el sitio web o en el servidor FTP de manera pública por un periodo de 90 días, posterior a este lapso tendrán que ser solicitados.

2.4. Análisis de calidad de las observaciones GPS

El análisis de calidad de las estaciones GNSS es un componente clave en la verificación del correcto funcionamiento de toda una infraestructura geodésica, respecto

a los datos crudos y el monitoreo de estabilidad de los datos (Brown y col., 2002). De este modo, el análisis de calidad de las observaciones GPS en este estudio se centra en cuatro indicadores propuestos por el IGS (IGS, 2019): efecto multitrayectoria (MP), relación señal-ruido (SNR), saltos de ciclo (CSR) e integridad (INT), los cuales pueden ser extraídos mediante software TEQC (Estey y Meertens, 1999):

- **Efecto Multitrayectoria:** tiene lugar cuando la misma señal llega al receptor por diferentes direcciones o trayectorias, dado por alguna superficie reflejante cercana al receptor (estructura, edificio, auto, árbol, etc.), llegando con un retraso relativo a la señal directa, ya que realiza un recorrido adicional, degradando la precisión en el posicionamiento (Seeber, 2008). El cálculo del efecto multitrayectoria se basa en una combinación lineal de pseudorange y fase portadora de L_1 y L_2 para la estimación del error medio cuadrático en metros (Estey y Meertens, 1999).
- **Relación Señal-Ruido:** expresada como SNR, S/N o C/N0 describe el estado operativo del sistema (receptor, antena, señal), rendimiento del seguimiento y captura de la señal (Xiao y col., 2020), siendo la potencia de la señal satelital, la ganancia de la antena, estado del receptor y el efecto multitrayectoria, los principales causantes de variación de la SNR (Zhang y col., 2017). Generalmente, el rango en el exterior es de 35 a 55 dBHz, clasificadas en señales débiles < 36 dBHz (6 indicador SNR) y fuertes ≥ 36 dBHz (6 de indicador SNR) (Gurtner y Estey, 2013). De esta manera, cuanto más grande sea la relación señal-ruido, mayor será la calidad de la señal observada (Zuo y col., 2019; Xiao y col., 2020); asimismo, de acuerdo con Kamatham (2018), la SNR es inversamente proporcional al efecto multitrayectoria.
- **Salto de Ciclo:** son una discontinuidad en el número entero de ciclos de la fase, efecto similar en la ambigüedad, producidos por una mala recepción de la fase portadora, saltos bruscos en la señal recibida, malas condiciones ionosféricas, alto efecto multitrayectoria, baja elevación del satélite así como falla en el software del receptor y raramente por malfuncionamiento de los osciladores de los satélites (Yeh y col., 2007; Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Wasle, 2008). La relación de los saltos de ciclo por cada mil observaciones se expresa como $CSR = 1000 / (\frac{o}{slps})$ (Zuo y col., 2019; Xiao y col., 2020) donde "o" es el número de observaciones registradas y "slps" la cantidad de saltos de ciclo.
- **Integridad:** hace referencia a la cantidad de datos obtenidos respecto de los posibles, como medida de confianza (Álvarez, 2008; Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Wasle, 2008) siendo un concepto fundamental en la navegación y característica en el análisis de calidad (Souto, 2014). La relación de los

datos observados es $INT = \frac{N_1}{N_0} \times 100$ donde N_1 es el número de observaciones recibidas y N_0 representa el número de observaciones posibles (Xiao y col., 2020).

2.5. Posicionamiento Relativo Estático

De acuerdo con Huerta, E., Mangiaterra, A., y Noguera (2005) y Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Wasle (2008), el objetivo del posicionamiento relativo es determinar las coordenadas de un punto desconocido respecto a uno conocido, generalmente fijo. El posicionamiento relativo determina el vector entre ambos puntos denominado vector de línea base o simplemente línea base (Figura 2.2).

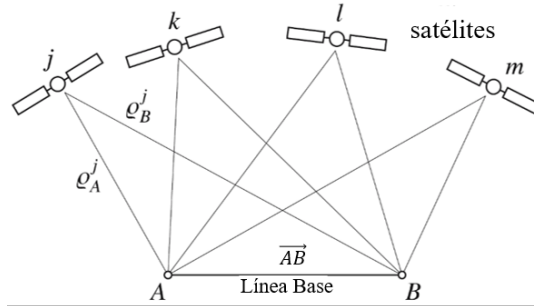


FIGURA 2.2: Concepto de posicionamiento relativo. Fuente: (Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Wasle, 2008).

El posicionamiento relativo estático requiere de observaciones simultáneas a los mismos satélites desde ambos puntos durante un periodo de tiempo, permitiendo formar combinaciones lineales, conduciendo a formar simples diferencias, dobles diferencias y triples diferencias considerando observaciones desde A y B (puntos de observación) a los satélites K y J. Estas diferencias pueden realizarse de tres maneras: a través del receptor, a través de los satélites y a través del tiempo. Las simples diferencias de fase corresponden a las diferencias a través del receptor, las dobles diferencias corresponden a las diferencias a través de receptor y de satélites y las triples diferencias corresponden a las diferencias a través del receptor, satélites y el tiempo (Huerta, E., Mangiaterra, A., y Noguera, 2005; Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Wasle, 2008).

Son las ecuaciones de fase expresadas en unidades de ciclos, donde se involucran dos receptores y un satélite, designando A y B a los receptores y J al satélite como se muestra en las Ecuaciones 2.1 y 2.2:

$$\phi_A^j + f^j \delta^j(t) = \frac{1}{\lambda^j} \phi_A^j(t) + N_A^j + f^j \delta_A(t) \quad (2.1)$$

$$\phi_B^j + f^j \delta^j(t) = \frac{1}{\lambda^j} \varrho_B^j(t) + N_B^j + f^j \delta_B(t) \quad (2.2)$$

Donde $\phi(t)$ son la mediciones de fase, f^j es la frecuencia del satélite, $\delta^j(t)$ error o desfase del reloj del satélite, $\delta_A(t)$ error o desfase del reloj del receptor, N es la ambigüedad y $\varrho(t)$ es la distancia geométrica entre el receptor y el satélite.

La resta de las Ecuaciones 2.1 y 2.2 resulta en la Ecuación 2.3 denominada como ecuación de simples diferencias de fase, donde el error correspondiente al satélite se ha cancelado.

$$\phi_B^j - \phi_A^j = \frac{1}{\lambda^j} [\varrho_B^j(t) - \varrho_A^j(t)] + N_B^j - N_A^j + f^j [\delta_B(t) - \delta_A(t)] \quad (2.3)$$

La Ecuación 2.3, puede reescribirse como la Ecuación 2.4

$$\phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda^j} \varrho_{AB}^j(t) + N_{AB}^j + f^j \delta_{AB}(t) \quad (2.4)$$

Aplicando las Ecuaciones de simples diferencias para dos receptores en los puntos A y B y dos satélites j y k , se tienen las Ecuaciones 2.5 y 2.6

$$\phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda^j} \varrho_{AB}^j(t) + N_{AB}^j + f^j \delta_{AB}(t) \quad (2.5)$$

$$\phi_{AB}^k(t) = \frac{1}{\lambda^k} \varrho_{AB}^k(t) + N_{AB}^k + f^k \delta_{AB}(t) \quad (2.6)$$

Para obtener dobles diferencias de fase se restan las simples diferencias de fase, dando como resultado la Ecuación 2.7, asumiendo que $f = f^j = f^k$.

$$\phi_{AB}^k(t) - \phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda^j} [\varrho_{AB}^k(t) - \varrho_{AB}^j(t)] + N_{AB}^k - N_{AB}^j \quad (2.7)$$

La Ecuación 2.7 puede reescribirse como la Ecuación 2.8:

$$\phi_{AB}^{kj}(t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_{AB}^{kj}(t) + N_{AB}^{kj} \quad (2.8)$$

Las dobles diferencias eliminan los errores provenientes de los relojes de los receptores, siendo la principal razón por la cual es utilizada, asumiendo que $\lambda = \lambda^j = \lambda^k$.

Para eliminar las ambigüedades, que son independientes del tiempo, Remondi (1984), propuso diferenciar las dobles diferencias entre dos épocas t_1 y t_2 teniendo las Ecuaciones 2.9 y 2.10 como las dobles diferencias entre dos épocas.

$$\phi_{AB}^{kj}(t_1) = \frac{1}{\lambda} \varrho_{AB}^{kj}(t) + N_{AB}^{kj} \quad (2.9)$$

$$\phi_{AB}^{kj}(t_2) = \frac{1}{\lambda} \varrho_{AB}^{kj}(t) + N_{AB}^{kj} \quad (2.10)$$

De manera simplificada en la Ecuación 2.11 se presentan las triples diferencias, la cual tiene por ventaja la eliminación de las ambigüedades, eliminando la necesidad de su determinación.

$$\phi_{AB}^{kj}(t_{12}) = \frac{1}{\lambda} \varrho_{AB}^{kj}(t_{12}) \quad (2.11)$$

Los errores en la propagación de la señal (ionosfera y troposfera) afectan de manera similar a dos estaciones que utilizan los mismos satélites, dado que la distancia entre receptores es muy pequeña comparada con la distancia a los satélites, incluso si fueran 500 km, la porción de atmósfera que atraviesan las señales del mismo satélite es prácticamente la misma y las simples diferencias de fase posibilitan una importante reducción tanto de errores orbitales como de ionosfera y troposfera. De forma similar los errores en cada satélite (reloj, órbita) son comunes para ambas estaciones y son eliminados por dobles diferencias. De acuerdo con Huerta, E., Mangiaterra, A., y Noguera (2005), las sucesivas diferencias contribuyen de dos maneras: reduciendo el número de incógnitas y eliminando o minimizando los errores sistemáticos. No obstante, produce una disminución en la precisión de las soluciones. Generalmente las dobles diferencias de fase son las más utilizadas para posicionamiento, permitiendo soluciones fijas (ambigüedades enteras), mientras que a través de triples diferencias es posible la detección de saltos de ciclo (Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Wasle, 2008).

Debe considerarse que esta técnica no elimina todos los errores del posicionamiento satelital, aún quedan los propios de cada estación, la multitrayectoria, los residuos de ionosfera y troposfera, así como la corrección de cada receptor (Morillo Barragán, 2013; Huerta, E., Mangiaterra, A., y Noguera, 2005), no obstante, la precisión en la estimación de la posición del receptor se ve mejorada llegando a $5\text{mm} \pm 0.5 \text{ ppm}$, disminuyendo con la longitud de la línea base. La Tabla 2.2 muestra el resumen de algunos de los efectos físicos y geométricos que alteran la recepción y transmisión de la señal los cuales deben ser modelados.

TABLA 2.2: Efectos físicos y geométricos en la recepción y transmisión GNSS (Kouba, Lahaye y Tétreault, 2017) .

Errores relacionados al satélite				
Error	Magnitud	Incertidumbre	Mitigación	Provista por:
Órbita	15 m	10 ¹ mm	Corrección	Centro de Análisis
Desfase de reloj	< 1 ms	1 – 2 cm	Corrección	Centro de Análisis
Desplazamiento del centro de fase	0.5–3 m	10 cm	Calibración	Fabricante de la antena
Variaciones del centro de Fase	5 – 15 mm	1 mm	Calibración	Fabricante de la antena
Relativista	<0.02 m		Modelado	
Sesgo de Código	5 m	10 ² mm	Corrección	Centro de Análisis
Sesgo de Fase	0.5 ciclos	0.01 ciclos	Corrección	Centro de Análisis
Errores relacionados a la propagación de la trayectoria				
Error	Magnitud	Incertidumbre	Mitigación	Nota
Retraso troposférico (seco)	2.3 m	5 mm	Modelado	Relacionado a la presión atmosférica y a la temperatura del aire
Retardo Troposférico (Humedo)	0.30 m	100 %	Estimación/Corrección	Relacionado a la presión de vapor de agua y a la temperatura del aire
Retraso Inosférico (1er)	30 m	1 m	Eliminación por combinación lineal	Inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia
Retraso Inosférico (Orden superior)	0.02 m	2 mm	Ignorar/Calibración	Inversamente proporcional a la frecuencia de potencia superior
Multitrayectoria	1 m	100 %	–	
Phase Wind-up	10 cm		modelado	
Errores relacionados al receptor				
Error	Magnitud	Incertidumbre	Mitigación	Nota
Marea terrestre Sólida	0.40 m	1 mm	Corrección	Calculado por el IERS 2010
Marea Oceánica	0.10 m	2 mm	Modelado/Corrección	Calculado por el IERS 2010
Movimiento del Polo	0.025 m		Calibración	Calculado por el IERS 2010
Desfase del reloj	10 ¹ mm		Modelado	
Desfase del Centro de Fase (PCO)	5-15 cm	10 ¹ mm	Corrección	Fabricante de la Antena
Variación del Centro de Fase (PCV)	3 cm	1 – 2 mm	Corrección	Fabricante de la Antena

2.6. Series temporales de posicionamiento preciso

Las series temporales derivadas de posicionamiento GNSS, muestran, como su nombre lo indica, la posición respecto al tiempo, en dicho análisis se busca obtener un modelo que muestre los procesos estocásticos durante la generación de la serie, es decir, se analiza desde un punto de vista determinista que hace referencia a la señal, y la parte estocástica al ruido.

En el análisis de series temporales es necesario considerar la existencia de valores anómalos, los cuales deberán ser corregidos o eliminados, estos valores son: los saltos en las series temporales (*offsets*) y los valores atípicos (*outliers*). Para ello, los saltos deben ser identificados y corregidos a través del cálculo de la tendencia de la serie temporal antes y después del salto a través de un ajuste de mínimos cuadrados obteniendo las ecuaciones de la recta para cada lado de ese desplazamiento (*offset*), posteriormente los valores atípicos (*outliers*) deberán ser eliminados, quitando aquellos que no sean similares a los de su alrededor, así como aquellos que no sean discordantes en valores de coordenadas pero su error si lo sea respecto a la tendencia, superando las 3 desviaciones estándar. Finalmente, el resultado es una serie temporal limpia.

De acuerdo con Luna y col. (2019), una serie temporal es la suma de tres factores que deben ser analizados de manera separada, los cuales son:

- **Tendencia:** esta dada por el movimiento a largo plazo, reflejada en los datos que la conforman, con un patrón gradual y variaciones de la propia serie a consecuencia de la deformación en la corteza terrestre, lo que permite el crecimiento o disminución en la tendencia de la serie. Generalmente, la tendencia a largo plazo se aproxima a una línea recta.
- **Estacionalidad:** hace referencia a las variaciones periódicas, es decir, repeticiones en el comportamiento de la serie cada cierto periodo. La estacionalidad debe ser incorporada al modelo de las series temporales, de lo contrario puede afectar en la estimación de la velocidad de la estación (Blewitt y Lavallée, 2002).
- **Ruido:** sirve para asignar una incertidumbre realista a la estimación de los parámetros de la serie temporal. El análisis del espectro de potencia es uno de los principales enfoques para la determinación del tipo de ruido existente en la serie. Tres tipos de ruido se encuentran en el estudio de series temporales en estaciones de monitoreo continuo los cuales son el ruido blanco, ruido de parpadeo o rosa (*flicker*) y ruido rojo, browniano o de camino aleatorio (*random walk noise*), cada uno con un índice del espectro de potencia de 0, -1 y -2 respectivamente.

Las series temporales pueden representarse a través de un modelo lineal (Ecuación 2.12) (Langbein, 2004)

$$x(t_i) = x_0 + bt_i + csin(2\pi t_i) + dcos(2\pi t_i) + esin(4\pi t_i) + fcos(4\pi t_i) + \sum_{k=1}^I v_k(t_i - t_k)H(t_i - t_k) + \sum_{j=1}^J O_j H(t_i - t_j) + v_i \quad (2.12)$$

Donde t_i es la época de la solución diaria, x_0 la posición inicial, b la tasa lineal. Los coeficientes c, d, e y f son los términos anuales y semianuales; $H(t_i - t_j)$ es la función *Heaviside* o función de escalón, que será igual a 1 si $t_i \geq t_j$ o cero en otro caso; v_k son los cambios en la tasa de inicio, O_j son los offset de la serie temporal y v_i representa los errores en la medición.

Una de las principales actividades en el análisis de series temporales es evitar sesgos en la estimación de la velocidad de la estación, por lo que la periodicidad estacional en las series temporales ha sido objeto de estudio para el modelamiento y corrección. De acuerdo con Meertens y col. (2012), Tregoning y T (2005), Fritsche, Döll y Dietrich (2012) y Yan y col. (2009) han identificado que estas variaciones periódicas están relacionadas con diferentes efectos locales como lo es la carga oceánica, carga atmosférica o la carga hidrológica, que generalmente afectan a la componente vertical y el espectro de frecuencia de las señales es dominado por periodos anuales y semianuales, es por ello que se les denomina señales estacionales, las cuales pueden ser visibles en las series temporales como ondas sinusoidales, las cuales deben ser modeladas mediante funciones seno y coseno con periodos anual, semianual y su correspondiente amplitud. La Ecuación 2.13 muestra el desplazamiento en metros en función del tiempo $D(t)$:

$$D(t) = A\cos(2\pi \frac{t-t_0}{T}) + B\sin(2\pi \frac{t-t_0}{T}) \quad (2.13)$$

Donde A, B son las amplitudes expresadas en metros a estimar de las funciones de seno y coseno, t es la fecha final de cálculo, t_0 es la fecha inicial del cálculo y T el periodo, ambas fechas y el periodo expresados en días.

La parte estocástica en las series temporales es analizada desde el ruido, para calcular una incertidumbre realista en la velocidad de la estación, con el fin de conocer los fenómenos físicos sobre la superficie terrestre. De acuerdo con Santamaría-Gómez y col. (2011) todo aquel efecto físico no modelado como: carga oceánica, señales estacionales, desplazamientos sísmicos, errores de centro de fase de la antena, entre otros, así como el ruido correlacionado en el tiempo, afectan la incertidumbre de la velocidad en la estación. Las principales fuentes de ruido se relacionan con el

modelamiento de las órbitas, efectos atmosféricos (carga y retraso troposférico), inestabilidad del monumento al igual que el efecto multitrayectoria cercano a la estación. Asumir únicamente ruido blanco subestimaré la incertidumbre en la estación, es por ello que los errores en la estimación de la velocidad son una combinación de ruido blanco y ruido correlado en el tiempo (Williams, 2004). El ruido blanco hace referencia al ruido del hardware y es independiente de la frecuencia, mientras que ruidos correlados en el tiempo, como el ruido aleatorio que es inversamente proporcional a la frecuencia (f^2) y generalmente es causado por inestabilidad del monumento (Luna y col., 2019).

El espectro de potencia de las series temporales de observaciones GPS, se aproxima a la ley de potencia, que es dependiente de la frecuencia (Ecuación 2.14)

$$P_x(f) = P_0 \left(\frac{f}{f_0} \right)^k \quad (2.14)$$

Donde f es la frecuencia temporal, P_0, f_0 son constantes de normalización y k es el índice espectral. Herring (2003), propuso una alternativa computacionalmente efectiva y que puede ser introducida en Globk, es decir, el algoritmo *Real Sigma* el cual considera la dispersión de las series temporales para los posibles promedios de tiempo. Cuando el ruido es blanco, el error medio cuadrático ponderado (WRMS) tendría que disminuir de acuerdo a la raíz cuadrada del tiempo promediado y el error medio cuadrático normalizado (NRMS) no mostrar variación. En presencia de ruido correlacionado en el tiempo, el algoritmo *Real Sigma* utiliza la premisa de que el χ^2/dof (chi cuadrada/grados de libertad) no se mantiene constante sino que aumenta en función del tiempo como un proceso de primer orden *Gauss-Marcov*. Con base en la estimación de la amplitud y la función exponencial constante en el tiempo y evaluar la función para un tiempo medio se determina el valor del ruido aleatorio (*Random Walk Noise*) que muestra una incertidumbre o error realístico (Reilinger y col., 2006; Shen y col., 2011).

2.7. Polo de Euler

El polo de euler a través de mediciones geodésicas u observaciones geofísicas permite cuantificar el movimiento relativo o absoluto de las placas tectónicas mediante su parametrización, que hace referencia a la velocidad angular (vector de euler) y a la localización del polo, generalmente latitud y longitud. De acuerdo con Aktuğ y Yildirim (2013), la parametrización del polo de euler provee de una herramienta indispensable para el modelamiento de una placa rígida, donde un cálculo fiable del polo de euler permitirá la estimación de deslizamientos en los límites de placas tectónicas hasta estudios paleomagnéticos para la reconstrucción del movimiento de las placas tectónicas. Estudios como el de Angermann, Klotz y Reigber (1999), reportan el cálculo del polo de euler de la placa Nazca respecto a la placa Sudamericana, haciendo uso de velocidades de estaciones GPS en ambas placas, teniendo como resultado una menor velocidad angular a la del modelo geológico NUVEL1-A. Por otro lado Bandy, Kostoglodov y Mortera-Gutiérrez (1998) estiman el polo de euler entre la placa Rivera y Pacífico bajo la premisa de una reorientación substancial durante el paso de millones de años entre estas dos placas con el fin de determinar un modelo de migración suroeste (SW) del polo de rotación durante los últimos 0.78 Ma (Millones de años) y así examinar las velocidades de las placas previamente calculadas en otros estudios y las características morfológicas y sismotectónicas a lo largo del límite de la placa Rivera, los autores concluyen que la migración hacia el SW del polo de euler de aproximadamente 2° o más, durante los últimos 0.78 Ma, puede relacionarse a las incertidumbres de los elementos estructurales de los límites de placa Rivera-Pacífico, que ajustan ya sea de manera rápida o lenta los cambios en la posición del polo de euler. Plattner y col. (2007), realizan el cálculo del polo de euler para la placa del Pacífico reportando una velocidad angular similar al modelo geológico NUVEL1-A, lo que indica que la tasa de expansión promedio del Golfo de California en los últimos 3 millones de años se compara con la velocidad geodésica calculada en dicho estudio.

Al considerar a la tectónica de placas sobre una superficie esférica las zonas de fallas transformantes y las zonas de fractura se ajustan a círculos menores y círculos mayores (Figura 2.3). Los círculos mayores son aquellas circunferencias cuyo plano pasa por el centro de la esfera, es decir, todos los meridianos son círculos mayores, mientras los círculos menores, son aquellas circunferencias cuyo plano no pasa por el centro de la esfera, todos los paralelos a excepción del ecuador son círculos menores.

El movimiento de las placas tectónicas sobre una superficie esférica puede representarse por el teorema de rotación de Euler, donde el movimiento de un cuerpo rígido a través de una superficie esférica, se describirse como la rotación alrededor de un eje de rotación el cual pasa a través del centro de la esfera.

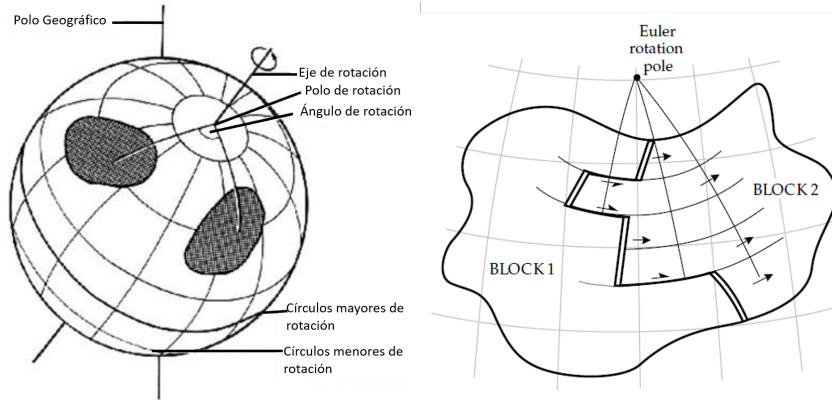


FIGURA 2.3: Diagrama de Rotación del polo de Euler.

El movimiento entre dos placas tectónicas se describe mediante su velocidad angular (ω), cuyo movimiento relativo varía conforme la latitud, siendo máximo en el ecuador y mínimo en latitudes altas. Matemáticamente se expresa como la Ecuación 2.15 (Goudarzi, Cocard y Santerre, 2014) :

$$v_i^P = \Omega^P \times X_i = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}^P \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_i \quad (2.15)$$

Donde Ω^P es la Velocidad angular asociada a la placa tectónica de referencia expresada en grado por millones de años $^\circ/\text{Myr}$, y X_i es la posición de la estación i

2.8. Modelo de interpolación 2-D mediante Funciones de Green

De acuerdo con Bian, Wu y Wu (2020) y Hammond, Blewitt y Kreemer (2011) actualmente existen dos modelos considerados en la deformación de la corteza terrestre principalmente. El primero es el "modelo de bloque" en el que se considera que la mayor deformación ocurre en los principales límites de fractura del bloque. El segundo, es el "modelo continuo" en el que se estima que la deformación es cuasi-continua, sujeta al flujo sólido de material viscoso similar al control de fluidos. En este sentido, se han desarrollado diferentes estudios en relación al cálculo y estimación de modelos de velocidad cortical basados en un esquema de interpolación de datos. Sánchez y Drewes (2020) presentan un modelo de deformación cortical en el que se muestra la cinemática en Latinoamérica mediante colocación por mínimos cuadrados. Wdowinski, Sudman y Bock (2001) interpolan la velocidad a través de pequeños círculos relativos a la rotación del polo para minimizar el error. Por otro lado Shen y col. (2015) utilizan el algoritmo de vecinos mas cercanos e inversión por mínimos cuadrados para lograr un campo de velocidad continuo y estimación de la deformación. Con base en Bian, Wu y Wu (2020), estos enfoques de interpolación requieren de un gran costo computacional además de que el procesamiento es relativamente complejo en relación a la interpolación 2-D mediante Funciones de Green.

El método de interpolación aplicado en este estudio se basa en un conjunto de datos vectoriales dispersos de dos dimensiones manipulados mediante funciones de Green (Sección 2.8.1) en un cuerpo elástico sujeto a un plano de fuerzas, ajustando el acoplamiento elástico mediante el coeficiente de Poisson, que de acuerdo con Sandwell y Wessel (2016) ha sido implementado en Generic Mapping Tools (GMT). El enfoque de este método de interpolación es la aplicación de cargas puntuales a una superficie elástica en la localización de los datos constreñidos, es decir, los datos constreñidos son la velocidades horizontales presentes en cada estación de operación continua. Posteriormente las fuerzas son ajustadas mediante una inversión por mínimos cuadrados ajustando los datos puntuales dentro de sus incertidumbres, luego la deformación puede ser calculada en cualquier parte dentro de los límites de los datos. La respuesta a una carga puntual en (x_o, y_o) sobre una superficie elástica se expresa mediante una función de Green como $\phi(\vec{r}) = r^2[\ln(r) - 1]$ donde $\vec{r} = (x - x_o, y - y_o)$. Por otro lado el método puede amortiguarse a una sobrecarga de la superficie elástica donde la función de Green es un poco más compleja, expresada como $\phi(\vec{r}) = K_o(pr) + \ln(pr)$, donde K_o es la función de Bessel modificada de segundo orden y p es el factor de tensión.

Considerando un campo vectorial de fuerzas, aplicado a un cuerpo elástico, se genera un campo vectorial de deformación, siendo este el enfoque de la interpolación de datos vectoriales 2-D, donde el cálculo de elemento finito es remplazado por funciones analíticas de Green para conocer la respuesta de una superficie elástica

sometida a un plano de fuerzas bidimensional. Con esto el cálculo se simplifica y además permite estimar el gradiente de deformación (tensor de deformación). Asimismo el acoplamiento elástico del campo de deformación se realiza mediante el coeficiente de Poisson, tomando valor de 1.0 como incompresible, valor de 0.5 como elástico y -1 para eliminar el acoplamiento elástico del vector de interpolación.

2.8.1. Función de Green

Una función de Green para una superficie bidimensional describe matemáticamente la deformación superficial derivada de una carga puntual sobre la corteza terrestre bajo la consideración de una superficie continua y elástica, es decir, una superficie ideal donde la distancia entre dos puntos contiguos puede ser infinitamente pequeña y un medio elástico aquel que al dejar de aplicar una fuerza conserva su estado natural, así los desplazamientos en superficies elásticas constituyen un campo vectorial definido por la relación existente entre esfuerzos y deformaciones que dada una carga puntual o una fuerza puntual cumpla con la ley de Hooke la cual describe que la deformación es proporcional al esfuerzo (Udias y Bufo, 2001).

Para el cálculo del vector 2-D de desplazamiento $\vec{u}(x, y) = u(x, y)\hat{i} + v(x, y)\hat{j}$, Haines y col. (2015) desarrollaron las ecuaciones de equilibrio de fuerzas cuasi-estáticas 2-D como se muestra en la Ecuaciones 2.16 y 2.17:

$$\left(\frac{2}{1-\nu}\right)\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left(\frac{2\nu}{1-\nu}\right)\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} = \frac{-f_x}{\mu}\delta(x)\delta(y) \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \left(\frac{2\nu}{1-\nu}\right)\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \left(\frac{2}{1-\nu}\right)\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{-f_y}{\mu}\delta(x)\delta(y) \quad (2.17)$$

Donde ν es el coeficiente de Poisson, μ módulo de corte o cizalla y f_x, f_y es el vector de fuerza. Las unidades son fuerza por distancia, donde las fuerzas son aplicadas en un punto usando la función delta bidimensional $\delta(x)\delta(y)$, para resolver este problema se requiere de la transformada de Fourier 2-D de las Ecuaciones 2.16 y 2.17, dando como resultado la Ecuación 2.18:

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{2}{1-\nu}\right)k_x^2 + k_y^2 & \left(\frac{1+\nu}{1-\nu}\right)k_x k_y \\ \left(\frac{1+\nu}{1-\nu}\right)k_x k_y & \left(\frac{2}{1-\nu}\right)k_y^2 + k_x^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U(\vec{k}) \\ V(\vec{k}) \end{bmatrix} = \frac{1}{4\pi^2\mu} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Donde k_x y k_y son el número de ondas (1/longitud de onda).

Para determinar la respuesta de una fuerza puntual es necesario invertir el conjunto de ecuaciones descritas y considerar la transformada de Fourier 2-D inversa del resultado, es decir, el resultado de la matriz inversa será la Ecuación 2.19:

$$\begin{bmatrix} U(\vec{k}) \\ V(\vec{k}) \end{bmatrix} = \frac{1}{8\pi^2\mu k_r^4} \begin{bmatrix} 2k_r^2 - (1+\nu)k_x^2 & -(1+\nu)k_xk_y \\ -(1+\nu)k_xk_y & 2k_r^2 - (1+\nu)k_y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Donde $k_r^2 = k_x^2 + k_y^2$. En el caso de considerar el coeficiente de Poisson igual a -1 correspondería a una interpolación sin acoplamiento elástico, es decir sin acoplamiento entre las dos componentes de velocidad GPS interpolando de manera separada, el resultado sería la Ecuación 2.20.

$$\begin{bmatrix} U(\vec{k}) \\ V(\vec{k}) \end{bmatrix} = \frac{1}{4\pi^2\mu k_r^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

La solución general (Ecuación 2.21) depende de las tres funciones en la Ecuación 2.19.

$$Q(\vec{k}) = \frac{2k_r^2 - (1+\nu)k_x^2}{k_r^4}; P(\vec{k}) = \frac{2k_r^2 - (1+\nu)k_y^2}{k_r^4}; W(\vec{k}) = \frac{-(1+\nu)k_xk_y}{k_r^4} \quad (2.21)$$

La solución en el dominio del espacio se obtiene mediante la evaluación de la transformada inversa de Fourier 2-D en las siguientes cuatro componentes de la función (Ecuación 2.22):

$$\tau_2^{-1} \left[\frac{1}{k_x^2 + k_y^2} \right]; \tau_2^{-1} \left[\frac{k_x^2}{(k_x^2 + k_y^2)^2} \right]; \tau_2^{-1} \left[\frac{k_y^2}{(k_x^2 + k_y^2)^2} \right]; \tau_2^{-1} \left[\frac{k_xk_y}{(k_x^2 + k_y^2)^2} \right] \quad (2.22)$$

Dicha transformación inversa de estas cuatro funciones, da como resultado la Ecuación 2.23:

$$-lnr; \frac{1}{2} \left[\frac{y^2}{r^2} - lnr \right]; \frac{1}{2} \left[\frac{x^2}{r^2} - lnr \right]; -\frac{1xy}{2r^2} \quad (2.23)$$

En el dominio del espacio las tres funciones de Green dadas por la Ecuación 2.21 se pueden reescribir como las Ecuaciones 2.24, 2.25 y 2.26:

$$q(\vec{r}) = 4lnr + (1 + \nu) \left(\frac{y^2}{r^2} - lnr \right) = (3 - \nu)lnr + (1 + \nu) \frac{y^2}{r^2} \quad (2.24)$$

$$p(\vec{r}) = (3 - \nu)lnr + (1 + \nu) \frac{x^2}{r^2} \quad (2.25)$$

$$w(\vec{r}) = -(1 + \nu) \frac{xy}{r^2} \quad (2.26)$$

Con la finalidad de obtener un modelo de velocidades suavizadas que se ajuste a un conjunto finito de N vectores medidos $u(\vec{r}_i), v(\vec{r}_i)$ (velocidades correspondientes a cada estación de operación continua) donde $\vec{r}_i = (x_i, y_i)$ es la localización de cada vector (coordenadas de la estación). Así es posible calcular y resolver el conjunto de N fuerzas vectoriales f_x^j, f_y^j que es aplicado en las ubicaciones de las velocidades medidas o calculadas. Para determinar la magnitud de las fuerzas se invierte el siguiente sistema de ecuaciones lineales (Ecuación 2.27):

$$\begin{bmatrix} U(\vec{r}) \\ V(\vec{r}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q(\vec{r}_i - \vec{r}_j) & w(\vec{r}_i - \vec{r}_j) \\ w(\vec{r}_i - \vec{r}_j) & p(\vec{r}_i - \vec{r}_j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x^j \\ f_y^j \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Finalmente, el modelo vectorial de velocidad puede ser calculado mediante las Ecuaciones 2.28 y 2.29:

$$u(\vec{r}) = \sum_{j=1}^N \left[q(\vec{r} - \vec{r}_j) f_x^j + w(\vec{r} - \vec{r}_j) f_y^j \right] \quad (2.28)$$

$$v(\vec{r}) = \sum_{j=1}^N \left[w(\vec{r} - \vec{r}_j) f_x^j + p(\vec{r} - \vec{r}_j) f_y^j \right] \quad (2.29)$$

Capítulo 3

Metodología

La propuesta de un modelo de deformación cortical en el Noroeste de México, que busca caracterizar la interacción de las Placas Pacífico - Norteamericana mediante observaciones geodésicas satelitales, necesita de una secuencia lógica que permita el tratamiento de las observaciones GPS en estaciones de operación continua para concretar el objetivo general así como los objetivos particulares previamente planteados. Con este breve panorama, esta sección se centra en la descripción metodológica implementada en este trabajo de investigación.

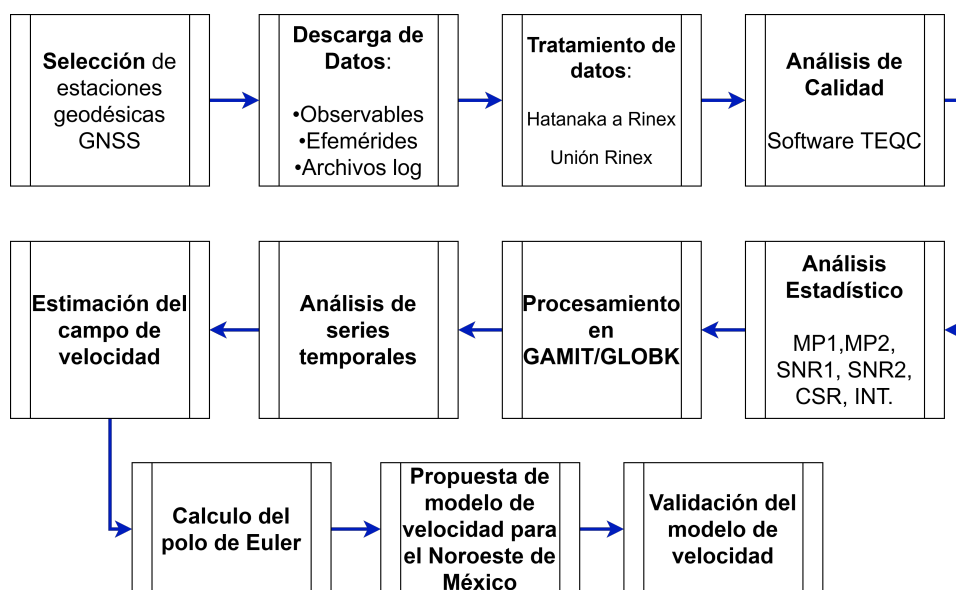


FIGURA 3.1: Metodología

La caracterización geodinámica de las Placas Pacífico-Norteamericana se llevó a cabo bajo la metodología que muestra la Figura 3.1. La primera etapa es la selección de estaciones de operación continua GNSS, considerando aquellas que están dentro del área de estudio (105W,22N; 120W,34N Noroeste de México) y que sean de libre acceso, para ello tres principales gestores fueron utilizados: UNAVCO, IGS y CORS. Adicionalmente fueron solicitadas 8 estaciones de la Red Geodésica Nacional Activa – RGNA, contabilizando en total 33 estaciones de operación continua pertenecientes a diferentes redes geodésicas (Tabla 3.1).

TABLA 3.1: Estaciones en el área de estudio NW-México.

No	Estación	No de días	Tipo de Receptor	Tipo de antena	Radomo	Gestor	Latitud	Longitud	Estado
1	TNCU	2921	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	SCIT	UNAVCO	28.450555	-106.79405	Cuauhtemoc, Chihuahua
2	YESX	3249	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	SCIT	UNAVCO	28.378336	-108.919639	Yecora, Sonora
3	TNTB	1826	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	SCIT	UNAVCO	25.605884	-109.052724	Topolobampo, Sinaloa
4	MSD1	4347	NOV WAASGII	MPL WAAS 2225NW	NONE	NGS	23.09376	-109.430352	San Jose del Cabo, Baja California
5	USMX	2921	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	SCIT	UNAVCO	29.821653	-109.681051	Moctezuma, Sonora
6	IPAZ	3652	LEICA GR10	LEIAR10	NONE	NGS	24.0843	-110.19507	La Paz, Baja California Sur
7	IAGX	741	TRIMBLE NETR8	TRM59800.00	SCIT	UNAVCO	29.02656	-113.171878	Isla Angel de la Guarda, Baja California
8	TNBA	2267	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	SCIT	UNAVCO	28.971916	-113.54728	Bahia de los Angeles, Baja California Sur
9	TNPP	2257	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	SCIT	UNAVCO	31.335518	-113.631638	Puerto Peñasco, Sonora
10	PLPX	4080	TRIMBLE NETRS	TRM59800.80	SCIT	UNAVCO	31.58860016	-115.151275	San Felipe, Baja California
11	MEXI	4379	LEICA GR10	LEIAR10	NONE	NGS	32.375876	-115.283253	Mexicali, Baja California
12	PLTX	4080	TRIMBLE NETRS	TRM29659.00	SCIT	UNAVCO	31.81633926	-115.430893	Mexicali, Baja California
13	PHJX	3161	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	SCIT	UNAVCO	32.49005556	-115.55045	Mexicali, Baja California
14	PSTX	3463	TRIMBLE NETRS	TRM59800.00	SCIT	UNAVCO	31.313122	-115.835435	San Isidro, California
15	PJZX	3976	TRIMBLE NETRS	TRM59800.00	SCIT	UNAVCO	32.41700685	-115.88373	La Rumorosa, Baja California
16	PALX	4138	TRIMBLE NETRS	TRM59800.00	SCIT	UNAVCO	31.559118	-116.063789	El Alamo, Baja California
17	PTEX	3901	TRIMBLE NETRS	TRM59800.00	SCIT	UNAVCO	32.288453	-116.521238	Tecate, Baja California
18	GUAX	2192	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	SCIT	UNAVCO	28.884067	-118.289691	Isla Guadalupe, Baja California
19	IDGO	4152	ALLOY	TRM115000.00	NONE	INEGI	24.067453	-104.607079	Durango, Durango
20	HER2	3070	ALLOY	TRM115000.00	NONE	INEGI	29.067630	-110.961299	Hermosillo, Sonora
21	IHER	868	ALLOY	TRM115000.00	NONE	INEGI	29.067629	-110.961299	Hermosillo, Sonora
22	IMIP	4103	ALLOY	TRM115000.00	NONE	INEGI	31.744933	-106.445868	Ciudad Juárez, Chihuahua
23	IMIE	3460	ALLOY	TRM115000.00	NONE	INEGI	31.861860	-116.616336	Ensenada, Baja California
24	CULC	4332	ALLOY	TRM115000.00	NONE	INEGI	24.795085	-107.412597	Culiacán, Sinaloa
25	CORX	1388	TRIMBLE NETR8	TRM59800.00	SCIT	UNAVCO	32.41538	-117.24819	Isla Coronado Baja California
26	QUEX	3453	TRIMBLE NETRS	TRM29659.00	SCIT	UNAVCO	32.54921	-115.15323	Ejido queretaro, Baja California
27	NAYX	2790	TRIMBLE NETRS	TRM59800.80	SCIT	UNAVCO	32.32429	-115.29551	Ejido Nayarut, Baja California
28	DAEX	3737	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	SCIT	UNAVCO	32.22451	-115.41922	Mexicali, Baja California
29	YUMX	2952	TRIMBLE NETRS	TRM59800.80	SCIT	UNAVCO	32.02769	-115.1992	Ejido Yurimuri, Baja California
30	PLCX	2190	TRIMBLE NETRS	TRM59800.80	SCIT	UNAVCO	31.255	-116.158	Llano Colorado, Baja California
31	TSFX	2192	TRIMBLE NETR9	TRM29659.00	NONE	UNAVCO	30.9339	-114.8107	San Felipe, Baja California
32	PB2Y	1934	TRIMBLE NETRS	TRM29659.00	NONE	UNAVCO	32.61393	-115.88961	Mexicali, Baja California
33	NVLX	1321	TRIMBLE NETRS	TRM59800.80	SCIT	UNAVCO	32.394	-115.183	Ejido Nuevo León, Baja California

La segunda etapa es la descarga de datos implementado scripts en Shell-C en UNIX, para la descarga automatizada de los archivos de observación, teniendo en consideración el FTP de cada gestor, así como el periodo de análisis de los datos requeridos (01/01/2010 a 31/12/2021). De forma similar se descargaron los archivos “log”, los cuales contienen información histórica general de cada estación, así mismo se descargaron las efemérides transmitidas de SOPAC (Scripps Orbits and Permanent Array Center), efemérides precisas y archivos de ionosfera del IGS.

En la tercera etapa, se llevó a cabo la conversión de formato Hatanaka a RINEX 2.11 mediante software RNXCMP y su herramienta CRX2RNX (Hatanaka, 2008) así como la unión de archivos diarios (24 horas) proporcionados por INEGI. La cuarta etapa referente al análisis de calidad, se realizó a través de la implementación de un script y el software TEQC, eliminando constelaciones a excepción de GPS, al ser la constelación de mayor robustez y antigüedad con operación continua desde sus inicios, así como por sus aplicaciones, además de ser la constelación que todos los receptores de las estaciones en este estudio tienen en común, de este modo, se estandariza a una sola constelación evitando sesgos para el análisis de calidad e inconsistencias para el procesamiento, debido a que hasta el momento sólo 8 de las 33 estaciones reciben más de una constelación. Se establece el orden de las observables deseadas y el estandarizado de la tasa de muestreo a 30 segundos ya que en las estaciones varía entre 1, 15 y 30 s, asimismo GAMIT procesa en ese intervalo de muestreo, así como una máscara de elevación a 10° dado que las señales por debajo de esta elevación, generalmente, se ven obstruidas por obstáculos artificiales o naturales, así como una mayor afectación por troposfera (Leick, A., Rapoport, L., y Tatarnikov, 2015; Ning y Elgered, 2012). Una vez preparados los archivos RINEX, se realizó el análisis de calidad con base en las recomendaciones del Servicio Internacional de GNSS (IGS, 2019) para estaciones de operación continua, extrayendo los valores de multitrayectoria en ambas bandas (MP1, MP2), relación señal-ruido en ambas bandas (SNR1, SNR2), saltos de ciclo por cada mil observaciones (CSR) e integridad (INT).

A través de un análisis de estadística descriptiva sobre la calidad de la señal en las estaciones de operación continua, se obtuvieron los valores máximos, mínimos, promedios y desviaciones estándar de los 4 indicadores en las 6 variables: MP1, MP2, SNR1, SNR2, CSR e INT, permitiendo evaluar cada estación de forma individual en función de sus resultados, generando las series temporales de cada indicador.

La etapa siguiente consistió en el procesamiento con software científico GAMIT/GLOBK 10.71 (Herring, King y McClusky, 2018), de las 33 estaciones geodésicas de operación continua, considerando 13 estaciones de la red IGS para definir el marco de referencia en este estudio, con base en la geometría y el tiempo mínimo de operación continua de 2.5 años (Blewitt y Lavallée, 2002) evitando así, sesgos en

la estimación de la velocidad en la estación. Para dicho procesamiento el módulo GAMIT permite estimar un sistema tridimensional de coordenadas mínimamente constreñidas con el uso de órbitas precisas, modelos troposféricos, retardo ionosférico y parámetros de rotación terrestre (Tabla 3.2) procesando en modo relativo estático, con el fin de identificar diferencias significativas en coordenadas, velocidades y amplitudes en las series temporales (Legrand y col., 2012). Con el módulo GLOBK, se estima la velocidad de la estación, con la implementación del filtro de Kalman (Herring, King y McClusky, 2018). Posteriormente, a través de TSVIEW (Herring, 2003) se visualizan las series temporales en sus tres componentes; Este, Norte y Vertical, para eliminar errores que superen tres veces la incertidumbre del procesamiento, ajustando la tendencia lineal y señales periódicas, así como la implementación del algoritmo *real sigma* para la estimación de una incertidumbre realista en la velocidad. Es decir, con el fin de evitar sesgos en el cálculo de la velocidad en las estaciones, los términos anuales y semianuales (señales periódicas, exponenciales y logarítmicas), la tendencia lineal y discontinuidades son estimadas a partir del módulo *tsfit* de GLOBK, así como la eliminación de errores groseros (n-sigma). Sin embargo, es posible realizar una inspección visual de posibles errores o movimientos no detectados en *tsfit*, haciendo uso de *tsview* (Herring, 2003) que gráficamente permite implementar los modelos de *tsfit*. Adicionalmente se incorporó una comparativa entre las velocidades obtenidas bajo los algoritmos de TSVIEW y el algoritmo MIDAS (Blewitt y col., 2016) con el fin de identificar alguna diferencia significativa en la estimación.

TABLA 3.2: Parámetros y características de procesamiento GPS.

Parámetro	Característica
Pre-procesamiento	Eliminación de constelaciones, edición de observables y muestreo
Tasas de muestreo	30 segundos
Ángulo de elevación	10°
Carga oceánica	FES2014
Marea terrestre sólida	IERS 2010
Marea del Polo terrestre	IERS 2010
Parámetros de Orientación Terrestre	IERS Boletín A
Órbitas	Precisas (finales - .sp3) de IGS
Calibración de antena	IGS14 (Archivo ATX)
Ionosfera	Combinación libre de ionosfera de L1 y L2
Troposfera	GMF (Global Mapping Function); mapeo hidrostático y húmedo en los modelos GPT2 (Presión y Temperatura Global) y VMF1 (Función de Mapeo de Viena)
Observables	L1 + L2, código y fase para Dobles Diferencias de Fase

En la siguiente etapa se calculó el Polo de Euler considerando el movimiento de un cuerpo rígido a través de una superficie esférica, mediante el modelo matemático y software EPC propuesto por Goudarzi, Cocard y Santerre (2014), ya que, el Polo de Euler es una herramienta relevante para el modelamiento y estimación de los desplazamientos de límites de placas tectónicas, suponiendo rigidez en la interacción

del movimiento, evaluando la velocidad angular de la Placa del Pacífico como de la Norteamericana, los vectores de posición de cada una de las estaciones analizadas y la posición del polo de Euler (Ecuación 3.1), validando a través de una prueba estadística χ^2 (chi-cuadrada), considerando la comparativa respecto a los modelos validados y publicados de Demets, Márquez-Azúa y Cabral-Cano (2014) y Kreemer, C., G. Blewitt y Klein (2014) a través de la Ecuación 3.2 teniendo en cuenta que los residuales de las velocidades observadas menos las modeladas no sean superiores a ± 1 mm/año.

Finalmente, se estimó un modelo de velocidad cortical para el Noroeste de México, considerando el algoritmo de interpolación implementado por Sandwell y Wesel (2016) mediante funciones de Green y acoplamiento elástico, el cual fue ajustado mediante el coeficiente de Poisson con valor de 0.5 con base en el estado del arte, con el fin de generar un modelo de velocidad cortical para el Noroeste de México (regional) en un grid de 15 x 15 minutos de arco permitiendo observar las características de deformación en zonas donde no este instalada alguna estación de operación continua, asimismo se realizó un modelo relativo a cada placa tectónica evaluada, por último la validación directa punto a punto de cada modelo generado, se llevó acabo considerando el modelo GEODVEL publicado por Argus y col. (2010), ya que dicho modelo global ha sido realizado para las 11 placas tectónicas mayores bajo técnicas geodésicas a diferencia de los dos antes mencionados de validación geológica. También se calcularon los residuales del modelo regional propuesto para la componente Norte y Este, los correspondientes coeficientes de correlación por componente, así como el error medio cuadrático (Root Mean Square Error - RMSE) para cada modelo propuesto.

$$V_{ij} = |\bar{W}x\bar{r}|; \bar{r} = \begin{bmatrix} \cos \theta_j \sin \theta_i \sin \lambda_j - \sin \theta_j \cos \theta_i \sin \lambda_i \\ \sin \theta_j \cos \theta_i \cos \lambda_i - \cos \theta_j \sin \theta_i \sin \lambda_j \\ \cos \theta_j \cos \theta_i \sin(\lambda_i - \lambda_j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Donde:

- V_{ij} = Velocidad del modelo
- $\bar{W}$ = Velocidad angular de la placa tectónica en mm/año
- $\bar{r}$ = Vector de posición del sitio
- $\theta_j; \theta_i$ = Latitud del sitio, latitud del polo de euler
- $\lambda_j; \lambda_i$ = Longitud del sitio, longitud del polo de euler

$$\chi^2 = (\vec{\omega} - \vec{\omega}^*)(Cov + Cov^*)^{-1}(\vec{\omega} - \vec{\omega}^*)^T \quad (3.2)$$

Donde:

- $\vec{\omega}$ = Velocidad angular de la placa
- $\vec{\omega}^*$ = Velocidad angular del polo de Euler
- Cov = Matriz de covarianza Cartesiana para las velocidades angulares de la placa de referencia
- Cov^* = Matriz de covarianza Cartesiana para las velocidades angulares estimadas del polo de Euler

Capítulo 4

Resultados

Se han contabilizado en total 150054 días disponibles por analizar correspondientes a las 46 estaciones geodésicas de las cuales 13 estaciones serán utilizadas para la definición del marco de referencia y 33 estaciones para la caracterización geodinámica, localizadas en el Noroeste de México como se muestra en la Figura 4.1, pertenecientes a tres principales gestores: UNAVCO, NGS e INEGI.

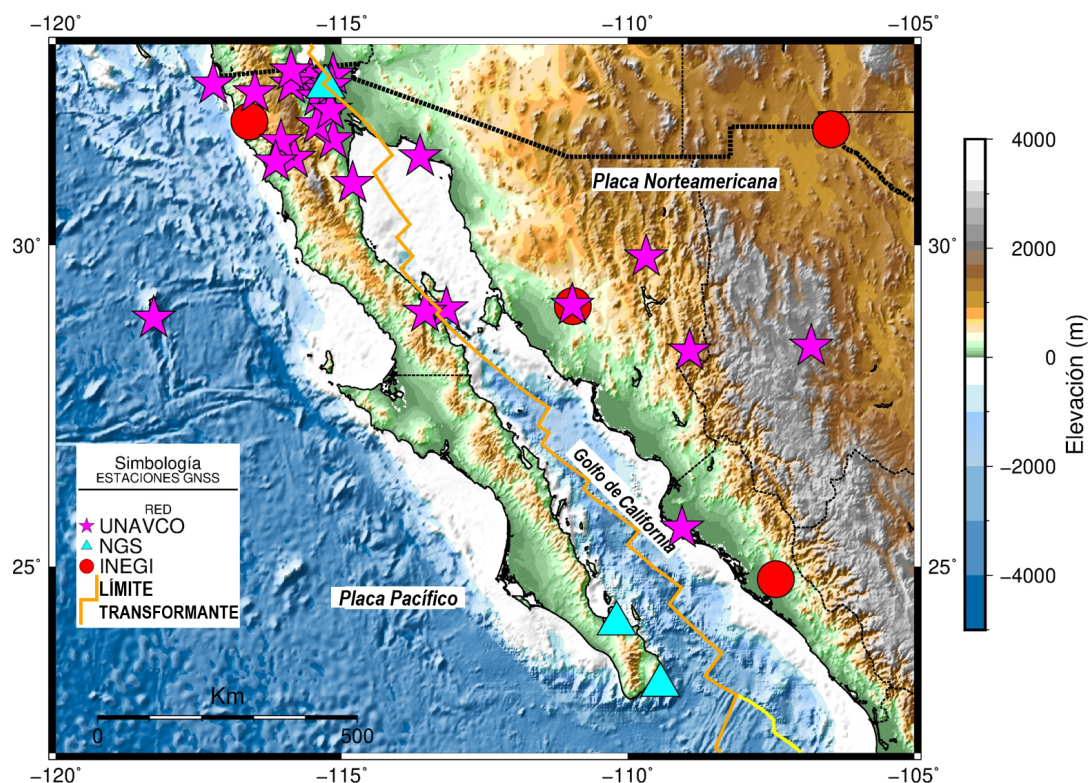


FIGURA 4.1: Estaciones GNSS de libre acceso en el Noroeste (NW) de México identificadas por gestor. Modelo de Relieve Global ETOPO1 (NOAA, 2008). Mapa generado mediante Generic Mapping Tools (Wessel y col., 2019).

Una de las principales características en el estudio e interpretación de la tectónica de placas es el tiempo a utilizar en el análisis, de acuerdo con Blewitt y Lavallée (2002), se adopta 2.5 años de operación continua en la estación para evitar sesgos en la determinación de la velocidad, dado que un tiempo menor dará lugar a una estimación inestable. El análisis de calidad y estimación del campo de velocidad se

realizó del primero de enero de 2010 al 31 de diciembre de 2021, siendo un periodo de 12 años a estudiar, la Tabla 4.1 muestra el concentrado total de días y años disponibles por cada estación, donde únicamente 3 estaciones cuentan con un tiempo total de operación menor a 2.5 años (IAGX, IHER, LPAZ), sin embargo, dada la cantidad reducida de estaciones de operación continua de libre acceso en el Noroeste de México, dichas estaciones también han sido consideradas en el análisis, no obstante, se ha cuidado su uso en la interpretación de la velocidad estimada.

TABLA 4.1: Disponibilidad de días por año.

CORS	Años												Tot.	Tot.
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Días	Años
Estaciones del Marco de Referencia														
ALBH	365	365	366	365	364	365	366	365	363	365	366	365	4380	12.0
BREW	359	363	366	355	364	365	366	365	355	365	365	365	4353	11.9
DRAO	365	365	366	365	364	365	366	365	365	365	366	365	4382	12.0
DUBO	346	365	366	365	364	365	366	365	363	365	366	365	4361	11.9
FLIN	364	365	366	364	364	365	366	365	357	365	366	365	4372	11.97
JPLM	364	349	366	323	364	365	366	365	354	365	366	365	4312	11.81
MDO1	361	364	366	341	-	-	-	365	357	365	261	365	3145	8.62
MONP	364	361	366	364	364	365	366	365	361	365	365	365	4371	11.98
NANO	122	365	366	365	364	365	366	365	365	365	366	365	4139	11.34
NIST	365	365	366	365	364	365	366	365	365	365	366	365	4382	12.00
PRDS	122	365	366	365	364	365	366	365	364	365	366	365	4138	11.34
VNDP	365	365	366	361	364	365	366	365	365	365	366	365	4378	11.99
WILL	359	365	366	361	364	365	366	365	341	365	366	365	4348	11.91
Estaciones por Analizar														
TNCU	-	-	-	-	364	365	366	365	365	365	366	365	2921	8.00
YESX	143	185	-	-	364	365	366	365	365	365	366	365	3249	8.90
TNTB	-	-	-	-	-	365	366	365	365	365	-	-	1826	5.00
MSD1	364	364	366	365	364	365	366	365	349	365	349	365	4347	11.91
USMX	-	-	-	-	364	365	366	365	365	365	366	365	2921	8.00
IPAZ	-	-	366	365	364	365	366	365	365	365	366	365	3652	10.01
IAGX	-	-	-	-	-	-	-	-	298	365	78	-	741	2.03
TNBA	-	-	-	-	364	365	366	365	365	365	77	-	2267	6.21
TNPP	-	-	-	-	-	365	366	365	365	365	366	365	2557	7.01
PLPX	66	365	366	365	364	365	366	365	365	365	366	365	4083	11.19
MEXI	363	365	366	364	364	365	366	365	365	365	366	365	4379	11.99
PLTX	63	365	366	365	364	365	366	365	365	365	366	365	4080	11.18
PHJX	-	64	366	365	364	365	366	365	365	365	176	-	3161	8.66
PSTX	124	365	366	365	364	365	366	365	365	365	53	-	3463	9.49

PJZX	-	324	366	365	364	365	366	365	365	365	366	365	3976	10.89
PALX	121	365	366	365	364	365	366	365	365	365	366	365	4138	11.34
PTEX	-	249	366	365	364	365	366	365	365	365	366	365	3901	10.69
GUAX	-	-	-	-	-	-	366	365	365	365	366	365	2192	6.01
IDGO	364	359	366	364	364	365	366	365	355	365	154	365	4152	11.38
HER2	364	365	366	365	364	365	366	365	150	-	-	-	3070	8.41
IHER	-	-	-	-	-	-	-	-	174	365	329	-	868	2.38
IMIP	365	365	366	156	364	365	366	365	356	365	305	365	4103	11.24
IMIE	-	30	366	361	364	365	366	365	187	365	326	365	3460	9.48
CULC	364	362	366	365	364	365	366	365	355	365	330	365	4332	11.87
CORX	-	-	-	-	-	-	-	-	292	365	366	365	1388	3.80
QUEX	56	29	366	108	364	365	366	365	364	365	340	365	3453	9.46
NAYX	-	-	-	108	364	365	366	365	126	365	366	365	2790	7.64
DAEX	-	202	366	258	364	365	366	365	355	365	366	365	3737	10.24
YUMX	-	-	-	113	364	365	366	365	332	365	317	365	2952	8.09
PLCX	-	-	-	-	-	-	366	365	365	365	364	365	2190	6.00
TSFX	-	-	-	-	-	-	366	365	365	365	366	365	2192	6.01
PB2Y	-	-	-	-	364	365	366	365	109	365	-	-	1934	5.30
NVLX	56	162	-	8	364	365	366	-	-	-	-	-	1321	3.62
LPAZ	365	365	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	730	2.00

4.1. Análisis de Calidad de las observaciones GPS

En el análisis de redes geodésicas es fundamental la verificación de las observaciones que receptiona cada estación de operación continua en relación a su calidad, es por ello que a nivel internacional el Servicio de GNSS (IGS) ha propuesto algunos indicadores de calidad, como lo son: la multitrayectoria (MP), los saltos de ciclo por cada mil observaciones (CSR), la integridad (INT) y la relación señal-ruido (SNR) mencionada en los manuales de RINEX. A continuación se describe cada uno de estos cuatro indicadores de calidad sobre las estaciones utilizadas en el procesamiento para deformación de la corteza terrestre en el Noroeste de México.

4.1.1. Multitrayectoria

El cálculo del efecto multitrayectoria se basa en una combinación lineal de pseudorange y fase portadora para la estimación del error medio cuadrático en la banda L1 y L2, haciendo referencia a la multitrayectoria MP1 y MP2 respectivamente (Ecuaciones 4.1, 4.2).

$$MP1 = P_1 - (1 + \frac{2}{\alpha - 1})L_1 + (\frac{2}{\alpha - 1})L_2 \quad (4.1)$$

$$MP2 = P_2 - \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1}\right)L_1 + \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1} - 1\right)L_2 \quad (4.2)$$

Donde: P_i es el observable de pseudorange para la frecuencia i , L_i es el observable de fase para la frecuencia i y $\alpha \equiv \frac{f_1^2}{f_2^2}$.

La Figura 4.2, muestra el promedio del efecto multitrayectoria en las bandas L1 y L2 por estación, ordenados de menor a mayor respecto del efecto multitrayectoria en la banda L1. Los valores promedios en la banda L1 se presentan entre 0.18 a 0.94 m, mientras en la banda L2 se presentan entre 0.23 a 0.89 m. La estación con el valor promedio más elevado es la estación MSD1 con 0.94 y 0.89 m de efecto multitrayectoria en la banda L1 y L2 respectivamente. En contraste la estación MEXI perteneciente a la RGNA muestra la menor cantidad con 0.18 y 0.29 m de efecto multitrayectoria de las 47 estaciones analizadas. Generalmente, el efecto multitrayectoria es mayor en la banda L2 que en la banda L1, sin embargo, esto sólo se presenta en 16 estaciones, el resto muestra valores de MP1 mayores que MP2.

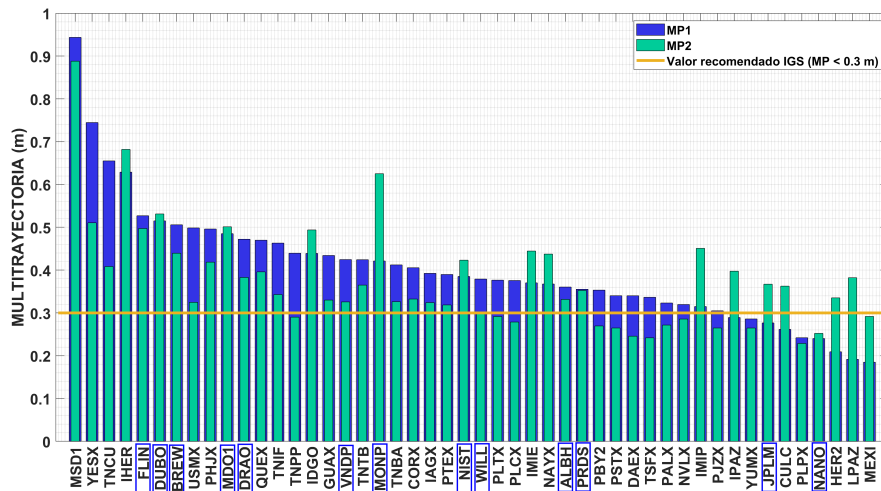


FIGURA 4.2: Promedio global de efecto multitrayectoria por estación: MP1 y MP2. La línea amarilla muestra el valor máximo recomendable por el IGS para la cantidad de efecto multitrayectoria. Las estaciones dentro del recuadro azul pertenecen al marco de referencia.

De acuerdo con el umbral propuesto por el IGS de 0.30 m como valor recomendado de efecto multitrayectoria en las estaciones de operación continua (línea horizontal amarilla en la Figura 4.2), queda demostrado que únicamente 5 estaciones se ajustan a dicho estándar propuesto y que el resto supera dicho valor e incluso lo triplican. En aquellas estaciones con valores elevados han mostrado un comportamiento constante, lo cual puede estar relacionado de acuerdo con Van Sickle y A.

Dutton (2023) al ruido proveniente del receptor ya que en la fase portadora el ruido es aproximado al 1 % de la longitud de la onda, mientras que en el código está relacionado a la amplitud del chip que con base en la estimación de Flores Jiménez (2000), el ruido puede llegar a niveles métricos en los códigos C/A y P, mientras que para la fase el ruido es menor a 1 mm como se muestra en la Tabla 4.2.

TABLA 4.2: Ruido en el receptor presente en el código y fase. Tabla adaptada de Flores Jiménez (2000)

Observable	C/A	P	L1	L2
Ruido en el Código	1.04 m	0.165 m	-	-
Ruido en la fase	-	-	0.12 mm	0.3 mm

En este sentido las Ecuaciones 4.1 y 4.2 ayudan a inferir que la mayor cantidad de efecto multitrayectoria esta en el código proveniente del receptor, esto sabiendo que el medio ambiente de las estaciones está libre de interferencias, además que en otros análisis publicados (Vázquez, Bennett y Spinler, 2013; Hernández-Andrade y col., 2022) la cantidad de multitrayectoria es similar a la que se reporta en este estudio. Por otro lado, en el estado del arte (Yeh y col., 2007; Yeh y col., 2008; Vázquez, Bennett y Spinler, 2013) se ha identificado que las actualizaciones de hardware y software pueden favorecer en la disminución del efecto multitrayectoria, sin embargo esto no sucede con todas las actualizaciones por ejemplo la estación MSD1 no ha tenido ningún cambio desde su instalación o la estación YESX que muestra cambio de receptor y antena. Por otro lado, estaciones como MEXI y PLPX, con bajo efecto multitrayectoria, han presentado recientemente diferentes cambios en hardware y software entre los años 2016 y 2022 como se muestra en la Figura 4.3.

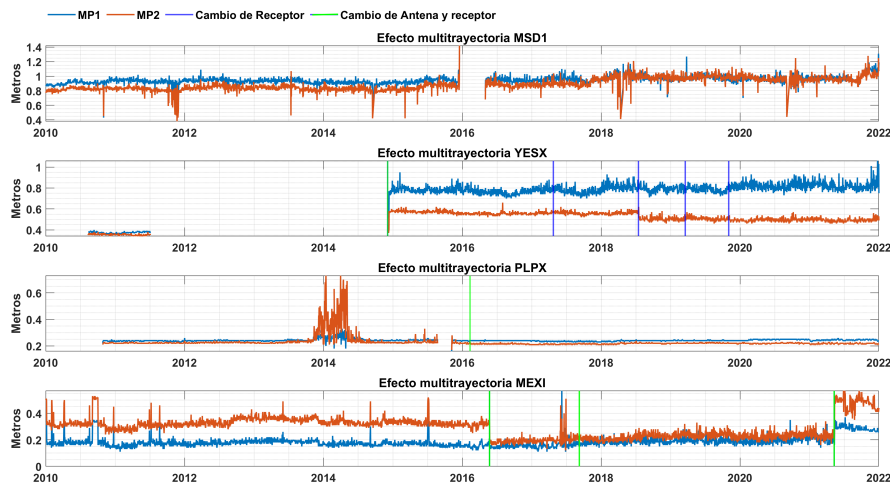


FIGURA 4.3: Series temporales de multitrayectoria y actualizaciones de antena y receptor en las estaciones MSD1, YESX, PLPX y MEXI.

4.1.2. Relación Señal-Ruido

La Figura 4.4 muestra los valores promedios de la relación señal-ruido SNR1 y SNR2, correspondientes a la banda L1 y L2. Con base en la clasificación de señales fuertes (≥ 36 dBHz) y débiles (< 36 dBHz), 45 de las 47 estaciones muestran señales fuertes en la banda L1, mientras en la banda L2, 13 estaciones muestran señales fuertes y 34 con señales débiles. Lo anterior, se denota con una línea horizontal amarilla, siendo evidente que únicamente 10 estaciones indican recepción de señales fuertes en ambas bandas, tres de estas estaciones consideradas para la definición del marco de referencia. Dicho comportamiento puede estar relacionado a diferentes factores como lo es la potencia de la señal recibida, la ganancia de la antena, así como el estado físico del receptor, ya que tienden a degradar la señal y por lo tanto disminuir la potencia de la señal recibida.

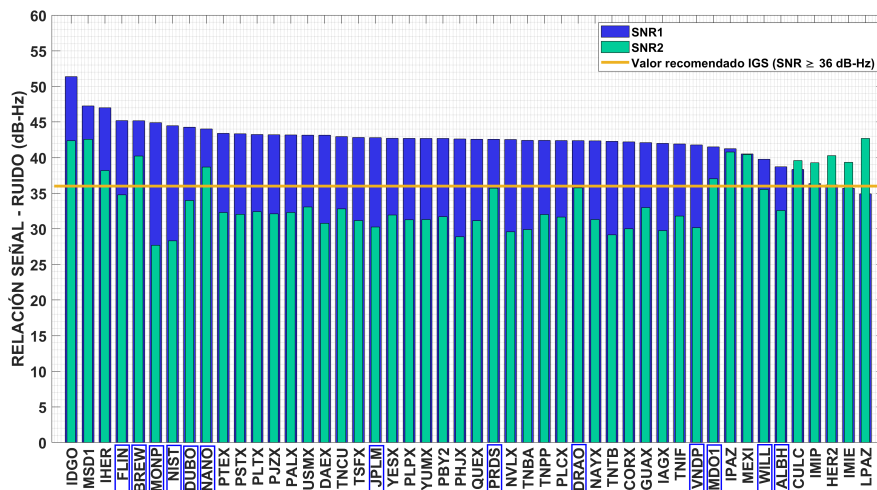


FIGURA 4.4: Promedio global de la relación señal-ruido por estación: SNR1 y SNR2. Las estaciones dentro del recuadro azul pertenecen al marco de referencia.

De forma particular, aquellas estaciones que muestran señales fuertes en ambas bandas (≥ 36 dBHz), son estaciones que muestran valores de multitrayectoria superior a lo recomendado (0.30 m), sin embargo, esto refuerza la idea descrita en la sección de multitrayectoria donde se ha considerado que la cantidad de tal efecto está relacionada con las observaciones de código en la estimación, ya que la mayoría de las señales recibidas no muestran degradación en la recepción de la señal con base en la potencia de la señal recibida mediante la relación señal-ruido.

Por otro lado, las estaciones no muestran un comportamiento inversamente proporcional entre la cantidad de efecto multitrayectoria y la relación señal - ruido, sino que puede describirse de forma directamente proporcional, aunque esto no es una regla definida, sino el comportamiento en este estudio, es decir, incremento de la multitrayectoria relacionado al ruido del código del pseudorango e incremento de

la relación señal - ruido, sin manifestar degradación de la señal recibida como describe Zhang y col. (2017) y Hatanaka (2008), por ejemplo el caso de las estaciones MSD1, MEXI, NANO, PLPX, HER2 y YUMX, por mencionar algunas.

4.1.3. Saltos de Ciclo por cada mil observaciones

La estación que presenta la mayor cantidad de saltos de ciclo por cada mil observaciones (CSR) es la estación IDGO, perteneciente a la RGNA, seguida por estaciones como HER2, CULC, LPAZ y MEXI que pertenecen a la misma red geodésica. Por otro lado la estación con la menor cantidad de saltos de ciclo por cada mil observaciones es la estación PHJX. Con base en lo establecido por el Servicio Internacional de GNSS, 12 estaciones GPS superan el valor recomendado de un salto de ciclo por cada mil observaciones en el periodo estudiado, siendo la línea anaranjada en la Figura 4.5 el límite del valor recomendado para CSR. En total 35 estaciones se encuentran por debajo de este valor, cuyas estaciones pertenecen a redes de UNAVCO y el NGS.

Con base en la descripción de los dos indicadores de calidad en la recepción de la señal previamente analizados (multitrayectoria y relación señal - ruido), la estación IDGO, ha presentado señales fuertes en ambas bandas y multitrayectoria asociada al ruido del código en el receptor al localizarse libre de obstrucciones, en este sentido es probable que la cantidad de saltos de ciclo por cada mil observaciones que promedia para el tiempo de análisis (6 CSR) este en relación a alguna falla del receptor como puede ser el oscilador del mismo. Además, otras estaciones como MEXI, CULC y LPAZ que comparten el mismo tipo de receptor muestran un comportamiento similar a IDGO y de acuerdo con Ray y Senior (2005) el incremento de saltos de ciclo puede relacionarse a fallas en el software del receptor. Por otro lado estaciones como DAEX e IMIP, por mencionar algunas, si se ajustan a una baja cantidad de saltos de ciclo por debajo de los 0.2 CSR por cada mil observaciones.

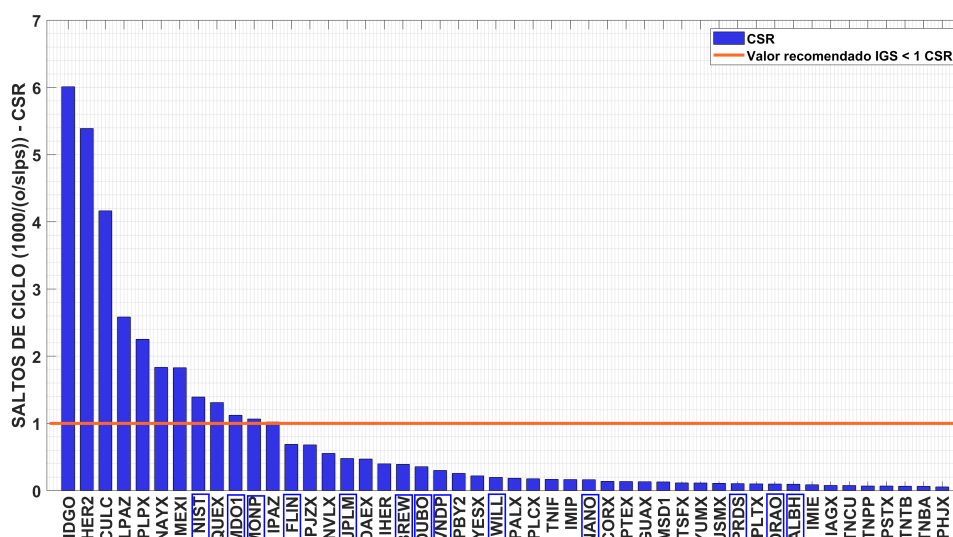


FIGURA 4.5: Promedio global de los saltos de ciclo por cada mil observaciones por estación. Las estaciones dentro del recuadro azul pertenecen al marco de referencia.

4.1.4. Integridad de las observaciones GPS

Respecto al porcentaje de integridad (INT) 45 estaciones están por arriba del 95 % de integridad y únicamente 2 estaciones presentan valores por debajo del valor recomendado, es decir, la estación DAEX con 94.20 % y JPLM con un 93.17 % como se muestra en la Figura 4.6. La estación NANO es la que mejor porcentaje de observaciones registradas presenta con un 99.94 %, sin embargo otras 29 estaciones se encuentran entre el 98 y el 100 % y 16 estaciones entre el 95 y el 97.99 %, aceptables para el valor recomendado del 95 % por el IGS.

Estaciones como DAEX, que se ajustan a los valores propuestos por el IGS respecto a la cantidad de efecto multitrayectoria, relación señal - ruido y en la cantidad de saltos de ciclo por cada mil observaciones, se supondría que lograra un porcentaje de integridad mayor del 95 %, sin embargo el valor que presenta es muy cercano. Un caso similar es de la estación JPLM, estación considerada en la definición del marco de referencia, que se ajusta a los indicadores de calidad a excepción del porcentaje de integridad. El resto de las estaciones no muestra diferencias significativas, a pesar de que en algunos casos estas no se ajusten en todos los indicadores de calidad.

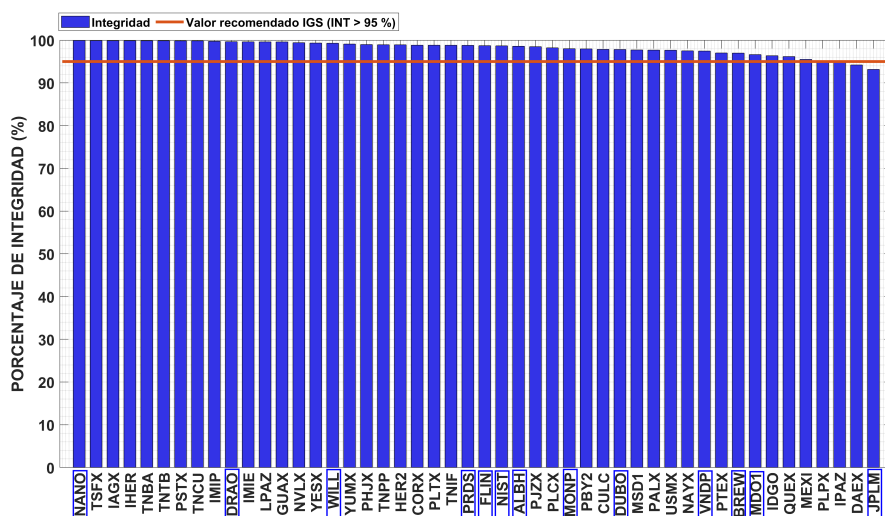


FIGURA 4.6: Promedio global de integridad por estación. Las estaciones dentro del recuadro azul pertenecen al marco de referencia.

Finalmente, de las 47 estaciones evaluadas bajo el estándar propuesto por el IGS y considerando asignar un valor de 1 cuando se cumpla el estándar propuesto, se tiene que el máximo valor sería 6 correspondiente a cada variable analizada (MP1, MP2, SNR1, SNR2, CSR, INT), en este sentido, 4 estaciones se ajustan en 2 de las 6 variables; 23 estaciones a 3 de 6; 18 estaciones a 4 de 6; 2 estaciones a 5 de 6 y una estación a 6 de 6 variables analizadas, siendo esta única estación que se ajusta a los 6 indicadores de calidad parte de las estaciones utilizadas en el establecimiento del marco de referencia para este análisis.

4.2. Análisis del procesamiento en GAMIT/GLOBK

Actualmente la mejora en los Sistemas Globales de Navegación por Satélite, el progreso tecnológico en la recepción de las señales, así como el refinamiento de los modelos geofísicos involucrados en el procesamiento de datos geodésicos y la mejora en la definición de los marcos de referencia, han contribuido en el incremento de la exactitud posicional con tecnologías GNSS. Dentro de las Ciencias de la Tierra el software científico de procesamiento GNSS de alta precisión GAMIT/GLOBK, ha sido ampliamente utilizado, por ejemplo en la tectónica de placas y su modelamiento (Altamimi y col., 2016), estudios de deformación de la corteza terrestre a nivel global y local (Wang y col., 2022), así como en análisis dinámicos de límites de placas tectónicas (Kreemer, C., G. Blewitt y Klein, 2014), entre otros.

Con el fin de obtener la mayor precisión en la determinación de la posición de las estaciones de operación continua, GAMIT/GLOBK (Herring, King y McClusky, 2018) considera los errores provenientes del satélite, la propagación de la señal, así como los errores en el receptor y la antena, eliminando o reduciendo algunos errores a través de modelos físicos, como los relacionados a los saltos en el reloj, satélite, errores en las órbitas, retraso atmosférico, parámetros de rotación terrestre y ambigüedades de fase, mediante un ajuste de mínimos cuadrados ponderado de dobles diferencias de fase. En este estudio se han considerado 33 estaciones por analizar, las cuales pertenecen a diferentes gestores y redes geodésicas en el Noroeste de México. También se han tenido en cuenta 13 estaciones de la red IGS que definirán el marco de referencia global ajustado al ITRF14 (Figura 4.7).

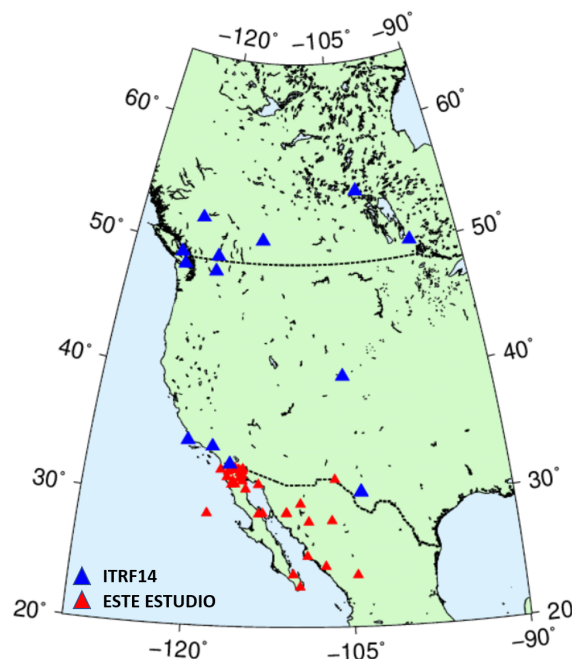


FIGURA 4.7: Localización de estaciones geodésicas para estimación de posicionamiento y velocidades.

4.2.1. Soluciones diarias del postproceso

Derivado del postproceso en GAMIT se ha considerado evaluar las posiciones diarias de las 46 estaciones, procesadas de forma simultanea en una sola red con el fin de que el procesamiento sea más eficiente y exacto, ya que con un número menor de 50 estaciones no es necesario el uso de subredes. La solución en el procesamiento hace uso de archivos RINEX 2.11 en formatos de 24 horas a 30 segundos previamente revisados por una análisis de calidad (sección 4.1), la posición diaria y los retrasos atmosféricos son estimados por una combinación lineal libre de ionosfera a través de la técnica de dobles diferencias de fase. Los parámetros orbitales del satélite son ajustados a la solución final del IGS y los parámetros de Orientación Terrestre son interpolados por el boletín del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia (IERS). Las correcciones de segundo y tercer orden se hacen mediante la aplicación de los archivos de Ionosfera (IONEX), los efectos de carga oceánica son corregidos por el modelo de FES2014 incluyendo correcciones por movimiento del centro de masa. Funciones de mapeo de Viena, así como, temperatura y presión global para modelar el retraso zenital en las componentes húmedas e hidrostáticas en la troposfera. Así se obtiene una solución libre de constreñimiento con su matriz de varianza - covarianza, posteriormente mediante GLOBK se aplica una transformación de Helmert para obtener la solución final en el marco ITRF14 (seleccionado en este estudio) junto a la matriz de varianza - covarianza.

Los criterios de calidad para determinar un resultado satisfactorio, son el uso de todos los archivos de observación que se tengan en el experimento, el nivel de ajuste adecuado e incertidumbres pequeñas. Un indicador de buena calidad de la solución es la resolución de las ambigüedades de fase, que para este estudio se consideran exitosas con un 95.4 % para el carril ancho (wide-lane WL) y un 92.1 % para el carril estrecho (narrow-lane NL), ya que de acuerdo con Herring, King y McClusky (2018) se recomienda una resolución en las ambigüedades de fase de más del 90 % para WL y 80 % para NL.

El error medio cuadrático normalizado (*nrms*) del ajuste de la posición (*postfit*) definida como la raíz cuadrada de Chi cuadrada (χ^2) dividido por los grados de libertad (dof:degrees of freedom) es otro indicador de calidad. El valor recomendado para este estadístico debería tener un valor máximo de 0.22. La Figura 4.8 muestra los valores estadísticos para el Noroeste de México, del periodo 2010 - 2021, quedando demostrado que durante todo el procesamiento no hay valores superiores a los 0.22, con un valor máximo de 0.193 y mínimo de 0.169 con promedio de 0.179.

De acuerdo con Herring, King y McClusky (2018) los mejores sitios presentarán valores entre 3 y 5 mm de raíz cuadrática media (rms) de los residuales de fase, los peores sitios entre 7 y 9 mm de rms, valores de 10 a 15 mm indican un alto pero aceptable nivel de ruido, valores mayores a los 15 mm sugieren una mala recepción de la

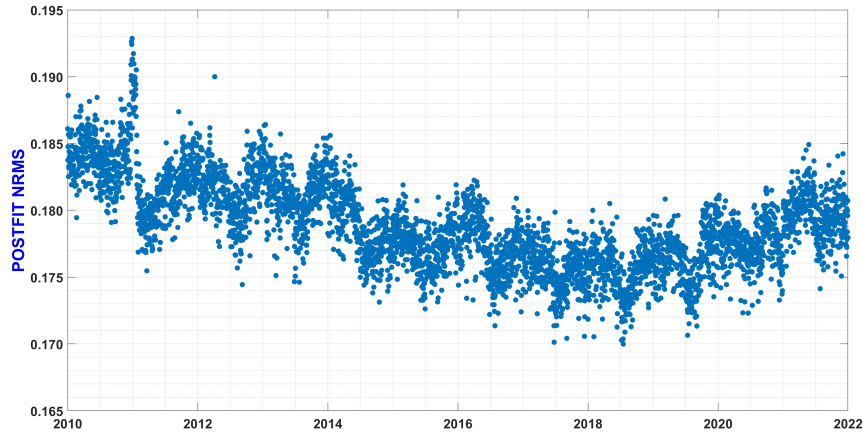


FIGURA 4.8: Valores del *nrms* del *postfit* de las soluciones diarias obtenidas en GAMIT para los 12 años.

señal, un ambiente multitrayectoria alto, climas severos, problemas de convergencia causados por pocos datos o una coordenada a priori pobre. La Figura 4.9 muestra los histogramas de frecuencia diaria de la raíz cuadrática media global presente en cada año, la mayoría de los histogramas muestran un comportamiento pegado a la izquierda, donde en el eje de las abscisas se encuentran los valores menores y pueden considerarse como sitios con niveles de ruido no significativo, sin embargo en la mayoría de los años hubo errores medios cuadráticos superiores a los 10 mm pero no mayores a 12 mm, lo que evidencia estaciones con un aceptable nivel de ruido, no obstante, la cantidad de días que se presentó en la red fue menor a 5 días por año, lo que da como resultado que el comportamiento de los histogramas tienda a disminuir en frecuencia hacia la derecha, con un comportamiento similar a la de una distribución lognormal.

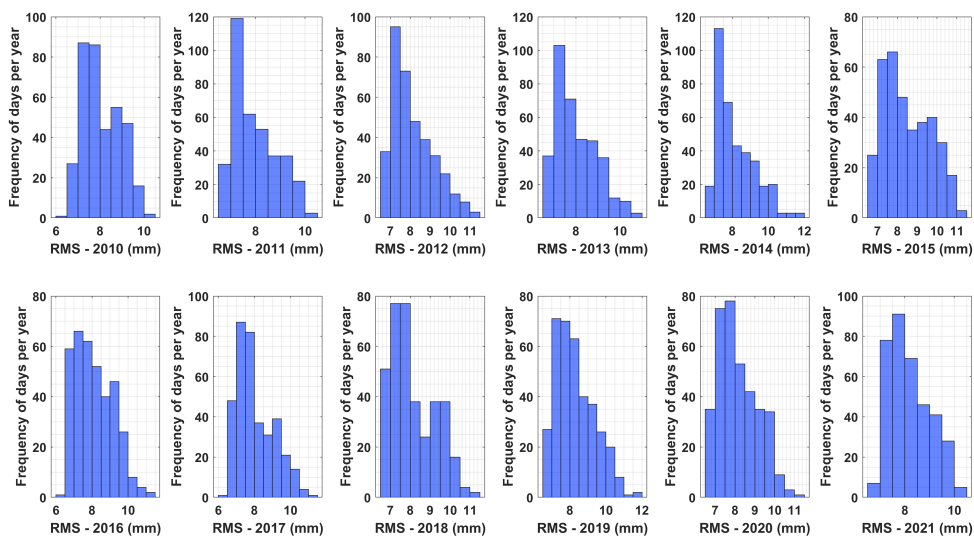


FIGURA 4.9: Raíz cuadrática media (*rms*) de los residuales de fase del procesamiento en GAMIT.

De acuerdo con Herring, King y McClusky (2018), si se considera un núcleo de 20 a 50 estaciones IGS en el procesamiento, es posible obtener un nivel de ajuste menor a 1 mm/año respecto a la velocidad horizontal. En este estudio se ha considerado un número de 13 estaciones para el marco de referencia y 33 estaciones por analizar, teniendo como resultado la Figura 4.10, la cual evidencia que la mayoría de las estaciones muestran incertidumbres menores a 0.5 mm/año para la componente horizontal y vertical, mientras que una única estación es cercana a 1 mm/año en la componente vertical.

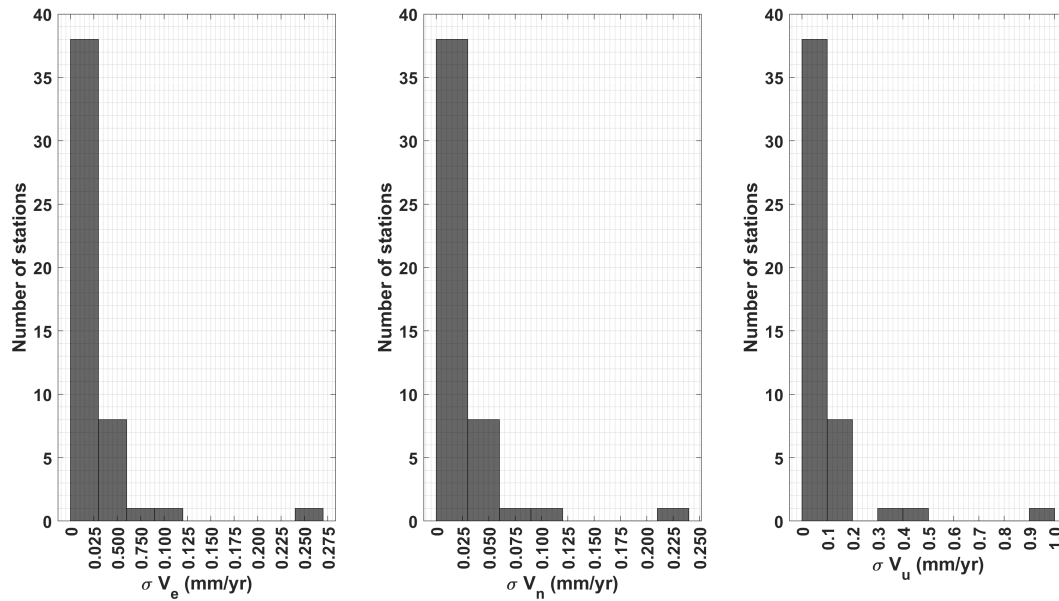


FIGURA 4.10: Desviaciones Estándar de las velocidades calculadas en GLOBK.

Con base en los criterios de calidad que los manuales de GAMIT/GLOBK refieren, las características de procesamiento, así como los modelos de implementación rigurosa para lograr la mejor precisión, se tiene que los resultados de las incertidumbres en el cálculo de las posiciones diarias en la red del Noroeste de México (este estudio), se ajustan de manera satisfactoria a los valores recomendados, teniendo certeza en la interpretación de los resultados obtenidos y el modelamiento de los datos en las siguientes secciones de esta tesis.

4.3. Análisis de Series temporales

Con el objetivo de analizar las posiciones diarias en función del tiempo, se han generado las series temporales de las 46 estaciones que componen tanto el marco de referencia como las estaciones de estudio, enfocando este análisis en las 33 estaciones del Noroeste de México. En primera instancia, se ha comparado contra las series temporales que el laboratorio Geodésico de Nevada calcula, analizando la tendencia en las tres componentes: Este, Norte y Vertical (ENU) que corresponden a un sistema topocéntrico local en cada estación para facilitar el proceso de interpretación, ya que este deriva de las coordenadas en un sistema cartesiano definido en el marco de referencia ITRF14 para este estudio. En este sentido, la Figura 4.11a muestra la serie temporal calculada para la estación PTEX del periodo 2010 - 2021 y la Figura 4.11b muestra la serie temporal proporcionada por el laboratorio Geodésico de Nevada del año 2011 al 2022, y a pesar de mostrarse un año de diferencia entre ambas series, la tendencia es similar, ambas muestran un comportamiento en dirección positiva en la componente Norte (N) y negativa en la componente Este (E), lo que permite hacer una interpretación del sentido del desplazamiento Noroeste (Nw) en la estación, que puede considerarse derivado del movimiento y deformación de la corteza terrestre. Por otro lado, la componente vertical muestra una estacionalidad bien definida, que es la componente donde los efectos anuales y semianuales tienden a reflejarse mayormente (Williams, 2004).

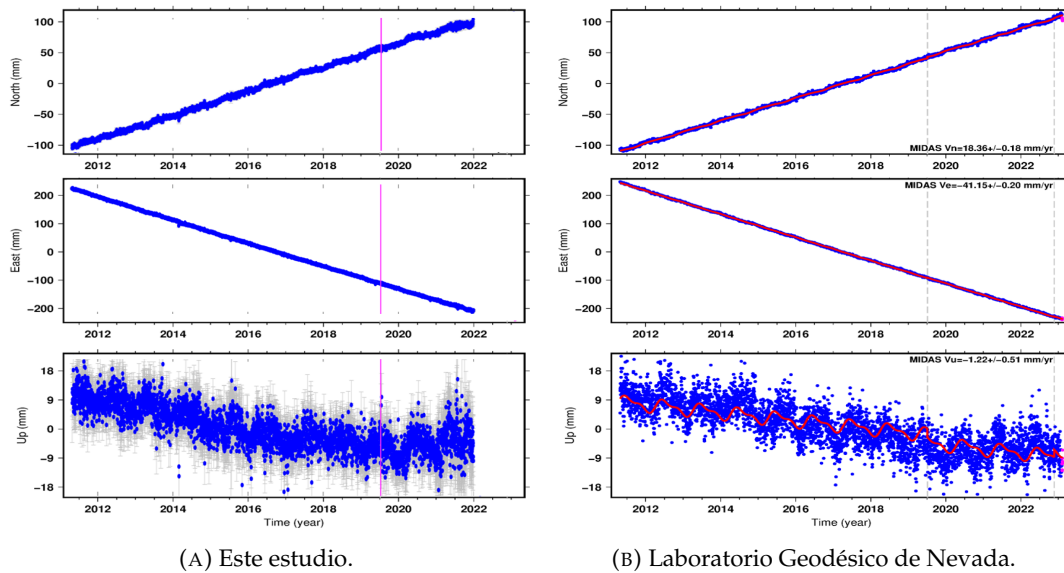


FIGURA 4.11: Comparativa de series temporales de la estación PTEX relativas al marco ITRF14.

Previo a cualquier estimación de velocidad es necesario hacer la limpieza correspondiente a cada serie temporal, con el propósito de evitar sesgos en la estimación de la velocidad. Además de haber implementado durante el procesamiento el módulo de *tsfit* de Globk, se ha realizado una inspección visual mediante *tsview* (Herring, 2003) que gráficamente permite implementar los modelos de *tsfit* eliminando

los valores atípicos considerando aquellos mayores a 3σ , identificando saltos (*offsets*) en las series temporales derivados de actividad sísmica y cambios de antena. También es necesario considerar las señales estacionales, es decir, los efectos anuales y semianuales que de acuerdo con Blewitt y Lavallée (2002) generan un sesgo en la estimación de la velocidad por lo que se recomienda un tiempo de operación continua de al menos 2.5 años.

La Figura 4.12 muestra la serie temporal limpia de la estación IHER perteneciente a la Red Geodésica Nacional Activa de INEGI, donde se ha considerado eliminar los valores atípicos superiores a 3σ y verificar si existió alguna actualización de hardware y software en la estación así como algún desplazamiento co-sísmico que genere alguna discontinuidad en la serie temporal. Por otro lado y con el fin de demostrar el efecto de las señales estacionales, se ha realizado una comparación entre considerar y no considerar los efectos anuales y semianuales en las series temporales para evidenciar las variaciones en las coordenadas de la serie temporal GPS y la influencia en la estimación de la velocidad. En la parte superior de la Figura 4.12 se muestran las tres componentes de la estación IHER sin modelar los efectos de las señales estacionales que afectan a las tres componentes de esta estación, mostrando tendencias sinusoidales similares en las tres componentes. A la derecha se muestra el espectro de frecuencia de la misma estación que se encuentra dominado por la máxima amplitud anual cercano a 1.5 mm en las componentes horizontales y 3 mm para la componente vertical.

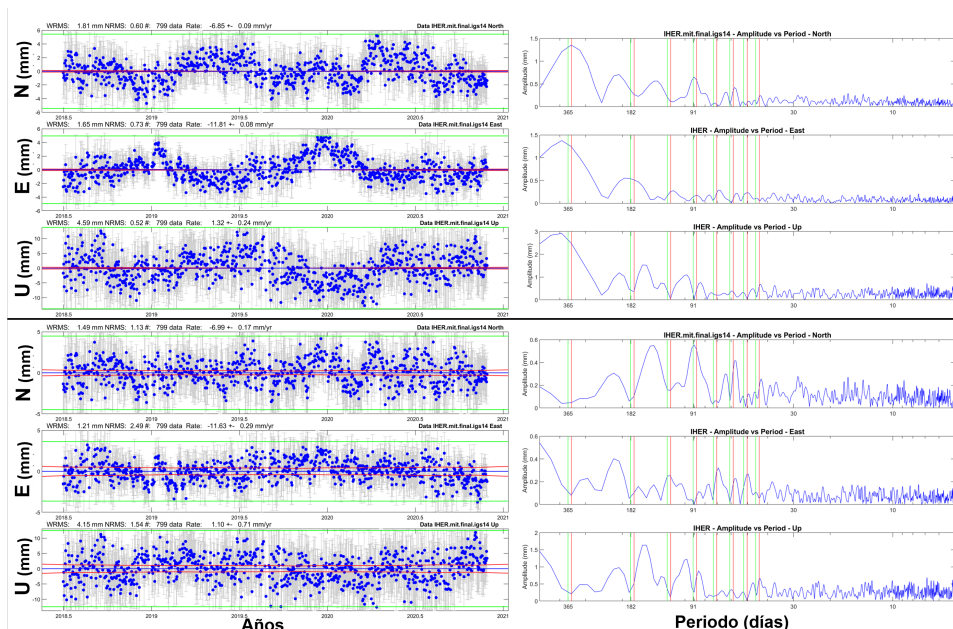


FIGURA 4.12: Series temporales de la estación IHER, con (inferior) y sin (superior) considerar efecto anual y semianual. A la derecha el espectro de frecuencia correspondiente.

Una vez que se han modelado los efectos anuales y semianuales presentes en

las series temporales de la misma estación (Figura 4.12 inferior), es visible que la tendencia en las tres componentes se muestra con un ajuste lineal y las amplitudes disminuyen al modelar las frecuencias anuales, derivando en amplitudes de menos de 0.6 mm para las componentes horizontales y menores a 2 mm para la componente vertical. Por otra parte, la velocidad muestra una variación absoluta en las componentes Norte y Este de 0.14 y 0.18 mm/año, respectivamente y para la componente vertical de 0.22 mm/año en un tiempo de operación de 2.4 años. Además, el implementar el algoritmo *real sigma* asumiendo combinación de ruido blanco con ruido correlado temporalmente, permite una estimación realista de las incertidumbres en la velocidad con ± 0.17 , ± 0.29 , ± 0.71 mm/año, correspondientes a las componentes Norte, Este y vertical.

De manera similar la Figura 4.13 muestra la series temporales de la estación HER2 con un tiempo de operación de 8.4 años perteneciente a la RGNA de INEGI, que posterior a realizar una inspección visual y la limpieza de la serie temporal, se ha ajustado a una tendencia lineal sin considerar dos cuestiones por demostrar: la primera es la estacionalidad presente y la segunda el desplazamiento co-sísmico identificado principalmente en la componente Este de la estación. En la parte superior de la Figura 4.13 se ha identificado con una elipse roja el desplazamiento co-sísmico correspondiente al sismo del 12 de abril del 2012 de magnitud 6.9 Mw localizado en el Golfo de California, el cual de forma intencional se ha dejado sin ajustar antes y después del sismo a una tendencia lineal, con el fin de evidenciar la diferencia en la estimación de la velocidad al momento del ajuste de tendencia, ya que generalmente el desplazamiento co-sísmico se caracteriza por un comportamiento logarítmico o exponencial aunque no es tan visible en esta serie temporal, un ejemplo puede verse en la serie temporal de la estación MEXI en la Figura A.2 (Anexo A). Por otro lado, se mantiene la estacionalidad, donde las amplitudes del espectro de frecuencia en la parte superior derecha de la Figura 4.13, muestra amplitudes de 1 mm y 1.5 mm para las componentes horizontales Norte y Este respectivamente, máximas en los periodos anuales y semianuales, mientras que en la componente vertical cercana a los 2 mm en el efecto anual y de 1 mm de amplitud en el efecto semianual. Al modelar el efecto anual y semianual presente en la estación HER2, así como el ajuste de tendencia derivado del desplazamiento co-sísmico en la estación (línea morada vertical), se muestra una disminución en las amplitudes sinusoidales de las tres componentes, que en la Figura 4.13 derecha-inferior se muestra que el efecto disminuye cercano a la mitad, principalmente en la componente Este. La amplitud disminuye en la componente Norte a 0.9 mm, en la componente Este a valores menores de 1 mm y en el efecto anual y semianual a menos de 0.4 mm de amplitud y finalmente para la componente vertical menores a 1.3 mm de amplitud máxima.

Respecto a la diferencia de velocidad al considerar el no modelar los efectos de las señales estacionales y el desplazamiento co-sísmico, se tiene que la mayor variación en velocidad esta en la componente Este con una diferencia de 0.80 mm/año

resultado de la corrección al desplazamiento co-sísmico, mientras que en la componente Norte una diferencia de velocidad de -0.23 mm/año y en la componente vertical de -0.33 mm/año. También, al momento de estimar la velocidad final de la estación se tomó en cuenta el desplazamiento ajustado y señales estacionales modeladas, asimismo se incluyó el algoritmo *real sigma* con la finalidad de tener incertidumbres realistas en la velocidad, derivado de la inclusión de ruido blanco y ruido correlado temporalmente teniendo como incertidumbres ± 0.11 , ± 0.16 , ± 0.37 mm/año correspondientes a las componentes Norte, Este y vertical.

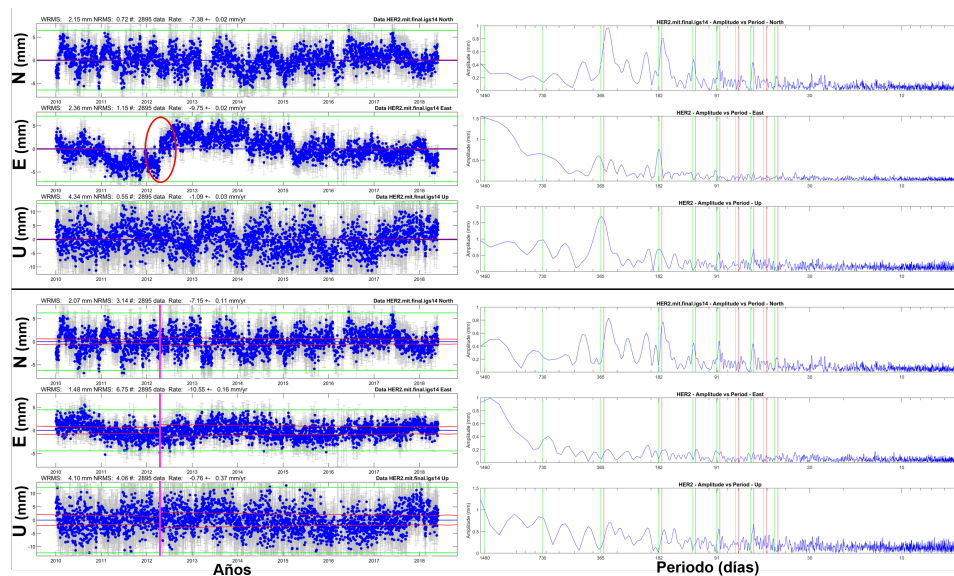


FIGURA 4.13: Series temporales de la estación HER2, con (inferior) y sin (superior) considerar efecto anual y semianual. A la derecha el espectro de frecuencia correspondiente.

La Figura 4.14 muestra las series temporales de la estación IMIP gestionada por la RGNA de INEGI, localizada en Ciudad Juárez Chihuahua con un tiempo de operación de 11.2 años, seleccionando esta estación con el fin de evidenciar si con un tiempo de mayor operación los efectos de las señales estacionales tienen un menor impacto en la amplitud de la señal y menores variaciones en la estimación de la velocidad. En este sentido, en la parte superior de la Figura 4.14 se tiene la serie temporal sin modelar el efecto estacional visible en forma de senoide, a la derecha se muestra el espectro de frecuencia con amplitudes máximas para el periodo anual de 2 mm y 1.5 mm para las componentes Norte y Este, respectivamente, mientras que en la componente vertical un valor cercano a los 2.5 mm de amplitud. Al modelar el efecto de las señales estacionales (Figura 4.14 inferior izquierda), los sinusoides del efecto estacional son suavizados a una tendencia lineal para la correcta estimación en la velocidad e identificar la disminución de las amplitudes de la señal, que para la componente Norte (Figura 4.14 inferior derecha) disminuye un poco más del 50 % con valores de 0.9 mm de amplitud y en la componente Este disminuye hasta un tercio, con valores de 0.5 mm de amplitud en el efecto anual principalmente. Para la componente vertical la diferencia en amplitud no es significativa como

en las otras componentes, mostrando un comportamiento similar en el espectro de frecuencia de 2.5 mm de amplitud máxima, esto puede relacionarse a que en la misma serie temporal la componente vertical no muestra la tendencia sinusoidal como las componentes Norte y Este de la misma estación, por lo que al modelar el efecto anual y semianual tenga un mínimo impacto en la componente vertical para la estación IMIP, ya que por lo general en el estado del arte esta es la componente con una mayor tendencia estacional derivado de los principales efectos causantes como la carga oceánica, carga atmosférica así como la carga hidrológica por mencionar algunas. Como resultado, la diferencia de velocidad entre modelar los efectos anuales y semianuales en una estación de operación continua con un tiempo prolongado de operación (11.2 años) se tienen las menores diferencias con 0.02 mm/año para las componentes horizontales y para la componente vertical de 0.01 mm/año por lo que el mayor tiempo de operación ha mostrado una menor diferencia en velocidad derivado de los efectos estacionales. Finalmente, se han estimado las incertidumbres realistas de la velocidad con la inclusión de ruido blanco y ruido correlado temporalmente, teniendo como incertidumbre en la componente Norte ± 0.07 mm/año en la componente Este ± 0.04 mm/año y para la componente vertical ± 0.18 mm/año. En el Anexo A se encuentran las series temporales restantes con efectos anuales modelados y aplicación de algoritmo real sigma.

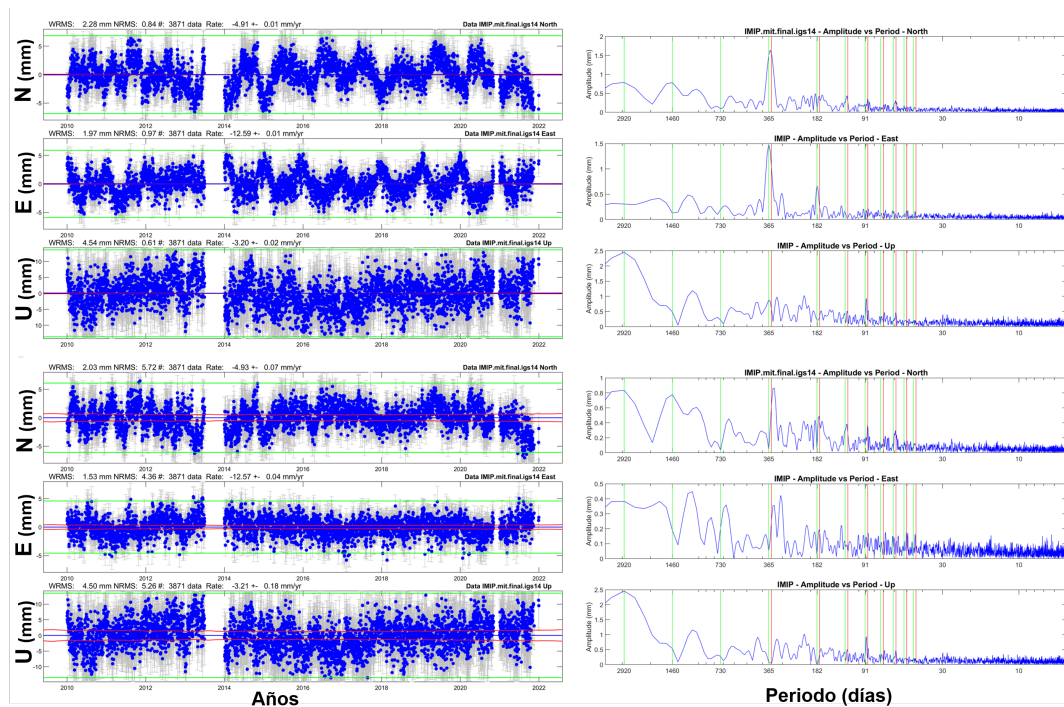


FIGURA 4.14: Series temporales de la estación IMIP, con (inferior) y sin (superior) considerar efecto anual y semianual. A la derecha el espectro de frecuencia correspondiente.

4.3.1. Análisis de velocidades e incertidumbres en las 33 estaciones del Noroeste de México

Se ha realizado una comparación en las 33 estaciones del Noroeste de México, entre velocidades estimadas considerando y no considerando los efectos de las señales estacionales. En la Figura 4.15 se muestra de manera gráfica las características que cada estación ha presentado. En el eje vertical izquierdo se encuentra la variación de velocidad expresada en mm/año siendo el gráfico de barras el correspondiente a dicha variación en las tres componentes de la serie temporal de cada estación. Por otro lado, en el eje vertical derecho, se ha graficado el tiempo de operación de cada estación (línea azul con rombos) ordenando las estaciones en función del tiempo de adquisición de datos de menor a mayor. En este sentido, se evidencia que aquellas estaciones con un tiempo de operación menor al recomendado por Blewitt y Lavallée (2002) de 2.5 años, son aquellas estaciones con mayor variación en velocidad, como es el caso de la estación LPAZ e IAGX con variaciones entre los 0.40 a 0.80 mm/año, asimismo estaciones con tiempos de operación de no más de 4.5 años (Blewitt y Lavallée, 2002) como IHER, NVLX y CORX presentan variaciones de entre los 0.14 y 0.36 mm/años.

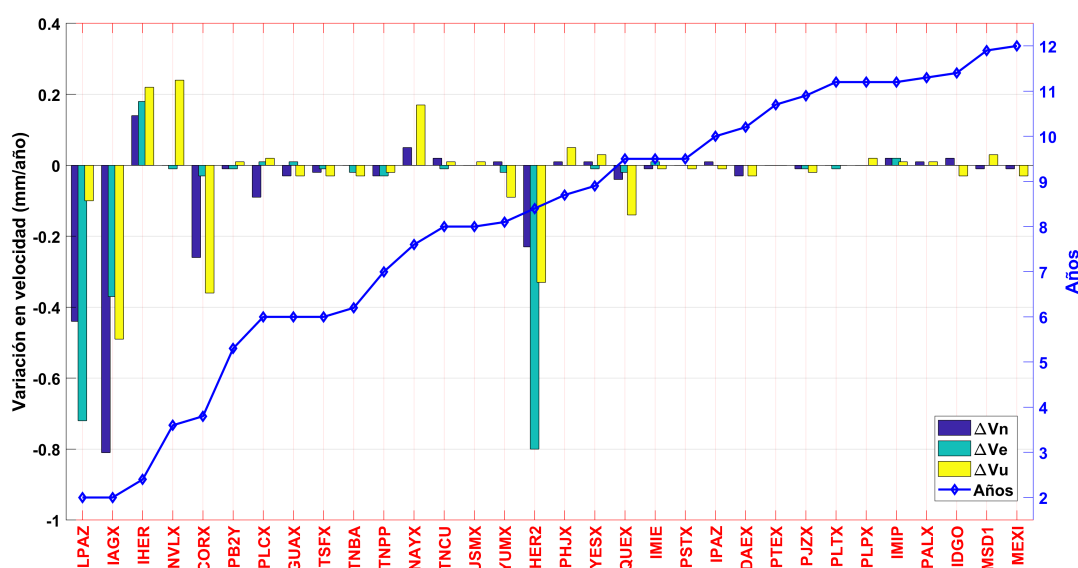


FIGURA 4.15: Diferencias entre las componentes de velocidad con y sin señales estacionales y su relación con el tiempo de operación continua.

Conforme el tiempo de operación incrementa las variaciones en la velocidad de cada una de las estaciones disminuye volviéndose mínimas, sin embargo, un caso particular es el de la estación HER2, que de manera intencional se dejó sin realizar un ajuste lineal derivado del desplazamiento co-sísmico identificado por la estación, evidenciando una fuerte variación de velocidad dado el no considerar la corrección a este desplazamiento de -1.72 mm Norte, 5.98 mm Este y -2.37 mm en la componente vertical, esto con la finalidad de demostrar que a pesar de tener un tiempo de

operación de 8.4 años, un mal tratamiento en las correcciones aplicadas en la serie temporal sesgará la estimación de velocidad, por lo que es necesario tener en cuenta los eventos sísmicos identificados por la estaciones de operación continua, como es el caso de la estación MEXI, que identificó el sismo del mayor de Cucapha de magnitud 7.2 Mw con un desplazamiento co-sísmico de -183.88 mm en la componente Norte, 182.09 mm en la componente Este y en la componente vertical de 16.87 mm, por lo que después de realizar el ajuste del desplazamiento, la estación muestra una variación mínima en velocidad (0.02 mm/año) y un tiempo de operación de 11.2 años.

Una vez finalizado el procesamiento así como la correspondiente limpieza de las series temporales, identificación de actualizaciones de hardware y software, además de la inclusión de ruido blanco y ruido correlado temporalmente mediante el algoritmo *real sigma* (Sección 2.6), se han evaluado las diferencias en incertidumbres estimadas de velocidad, debido a que en el estado del arte se ha identificado que considerar únicamente ruido blanco en la estimación de la velocidad dará una subestimación de las incertidumbres en la velocidad (Williams, 2004; Shen y col., 2011; Luna y col., 2019). Por ello se ha realizado una comparativa en las incertidumbres estimadas con ruido blanco y la combinación de ruido blanco más ruido correlado temporalmente (ruido aleatorio caminante), esta comparativa se muestra en la Tabla 4.3 donde se puede ver que las incertidumbres (σ) del efecto de ruido blanco son menores y se consideran subestimadas debido a que este ruido proveniente del hardware es independiente de la frecuencia y la temporalidad, mientras que considerar correlación temporal mediante la inclusión de ruido caminante aleatorio (*Random Walk Noise*) causado por inestabilidad del monumento, así como a la correlación de las posiciones de una época a otra, favoreciendo en la estimación realista de la incertidumbre de la velocidad.

TABLA 4.3: Velocidades e incertidumbres realistas comparando Ruido Blanco (*White Noise* (WN)) y Ruido Blanco más Ruido aleatorio caminante (*White Noise* (WN) + *Random Walk Noise* (RW))

Estación	RW+WN						WN					
	V_n	σ_{V_n}	V_e	σ_{V_e}	V_u	σ_u	V_n	σ_{V_n}	V_e	σ_{V_e}	V_u	σ_u
LPAZ	24.4	0.39	-51.03	0.28	-2.77	1.23	23.96	0.17	-50.31	0.14	-2.87	0.33
IAGX	-5.31	0.49	-17.79	0.10	-0.90	0.56	-6.12	0.12	-17.42	0.07	-1.39	0.25
IHER	-6.99	0.17	-11.63	0.29	1.10	0.71	-6.85	0.09	-11.81	0.08	1.32	0.24
NVLX	33.66	0.12	-27.82	0.09	-76.77	0.39	33.66	0.03	-27.81	0.02	-76.53	0.08
CORX	20.10	0.34	-40.94	0.10	0.01	0.26	19.84	0.05	-40.91	0.03	-0.35	0.09
PB2Y	16.71	0.11	-38.93	0.09	0.49	0.14	16.7	0.03	-38.92	0.02	0.50	0.05
PLCX	20.44	0.13	-42.61	0.05	0.42	0.43	20.35	0.03	-42.62	0.02	0.44	0.07
GUAX	23.80	0.14	-47.42	0.06	0.13	0.14	23.77	0.04	-47.43	0.02	0.10	0.07

TSFX	17.80	0.16	-41.36	0.07	0.86	0.23	17.78	0.03	-41.35	0.02	0.83	0.06
TNBA	20.02	0.22	-42.79	0.20	0.33	0.14	20.02	0.03	-42.77	0.02	0.3	0.07
TNPP	-8.46	0.14	-13.11	0.04	0.95	0.16	-8.49	0.02	-13.08	0.01	0.93	0.04
NAYX	14.31	0.20	-25.32	0.34	-1.21	0.38	14.36	0.02	-25.32	0.03	-1.04	0.05
TNCU	-6.22	0.15	-11.51	0.05	0.50	0.36	-6.20	0.02	-11.50	0.02	0.51	0.04
USMX	-7.10	0.17	-11.58	0.05	0.90	0.36	-7.10	0.02	-11.58	0.01	0.91	0.05
YUMX	16.60	0.24	-36.23	0.15	4.12	0.19	16.61	0.02	-36.21	0.01	4.03	0.04
HER2	-7.15	0.11	-10.55	0.16	-0.76	0.37	-7.38	0.02	-9.75	0.02	-1.09	0.03
PHJX	14.88	0.09	-31.03	0.12	-0.20	0.13	14.89	0.01	-31.03	0.01	-0.15	0.03
YESX	-6.73	0.19	-11.09	0.03	0.08	0.44	-6.72	0.02	-11.08	0.01	0.11	0.03
QUEX	-7.99	0.16	-16.72	0.11	-4.55	0.17	-8.03	0.02	-16.70	0.01	-4.69	0.03
IMIE	19.69	0.10	-41.41	0.13	-2.15	0.3	19.68	0.01	-41.42	0.01	-2.16	0.03
PSTX	20.82	0.09	-42.62	0.16	-0.90	0.13	20.82	0.01	-42.62	0.01	-0.91	0.02
IPAZ	21.92	0.20	-49.37	0.23	0.37	0.35	21.93	0.02	-49.37	0.02	0.36	0.04
DAEX	18.08	0.15	-37.63	0.48	2.50	0.09	18.05	0.01	-37.63	0.02	2.47	0.02
PTEX	18.29	0.08	-40.93	0.19	-1.94	0.18	18.29	0.01	-40.93	0.01	-1.94	0.02
PJZX	17.65	0.06	-40.80	0.25	-0.18	0.16	17.64	0.01	-40.79	0.01	-0.20	0.02
PLTX	19.46	0.14	-39.47	0.20	1.51	0.11	19.46	0.01	-39.46	0.01	1.51	0.02
PLPX	19.9	0.09	-37.85	0.28	0.28	0.19	19.9	0.01	-37.85	0.01	0.3	0.02
IMIP	-4.93	0.07	-12.57	0.04	-3.21	0.18	-4.91	0.01	-12.59	0.01	-3.20	0.02
PALX	20.28	0.08	-42	0.15	-0.96	0.21	20.29	0.01	-42	0.01	-0.95	0.02
IDGO	-5.34	0.07	-9.81	0.06	-3.10	0.44	-5.32	0.01	-9.81	0.01	-3.13	0.04
MSD1	20.74	0.56	-49.15	0.25	1.12	0.93	20.73	0.03	-49.15	0.02	1.15	0.07
MEXI	8.81	0.55	-29.74	0.78	-1.86	1.00	8.8	0.03	-29.74	0.03	-1.89	0.04

Dado que el tratamiento y análisis de las series temporales ha sido de forma manual, existe la posibilidad de que la velocidad pueda tener alguna variación en relación a la manipulación humana, sin embargo, para corroborar que no existan variaciones significativas en el cálculo de la velocidad y por lo tanto se sesgue la interpretación de los desplazamiento, se ha implementado el algoritmo MIDAS (*Median Interannual Difference Adjusted for Skewness* (Blewitt y col., 2016)) que es un estimador de velocidad automático que es insensible a problemas como las discontinuidades de salto, valores atípicos, estacionalidad, asimetría entre otros, seleccionando pares de datos separados por un año, estimado por la mediana de todas las pendientes posibles del conjunto de datos, basado en la distribución de las pendientes muestradas, cuyo algoritmo se describe a detalle en Blewitt y col. (2016). En este sentido se estiman los residuales de las velocidades calculadas entre en TSVIEW y el algoritmo MIDAS. El resultado de los residuales se muestra en la Figura 4.16 donde se tienen las distribuciones de frecuencia respecto al marco de referencia global ITRF14, es evidente que la mayor frecuencia acumulada esta dentro de los valores de 0 a 0.5 mm/año para las componentes horizontales y para la vertical la mayoría se muestra

entre 0 y 1 mm/año de diferencia. Los residuales relativos a la Placa Norteamericana están entre 1 y 2 mm/año para las componentes horizontales y entre 0 y 2 mm/año en la vertical, por último la mayor frecuencia acumulada relativa a la Placa del Pacífico esta entre 0 y 1 mm/año para las tres componentes (E,N,U). Con base en esta comparativa de velocidades (TSVIEW - MIDAS) se da certeza de que las variaciones en velocidad son mínimas, por lo tanto en las siguientes secciones se considera trabajar con la soluciones de velocidad generadas con TSVIEW (Herring, 2003).

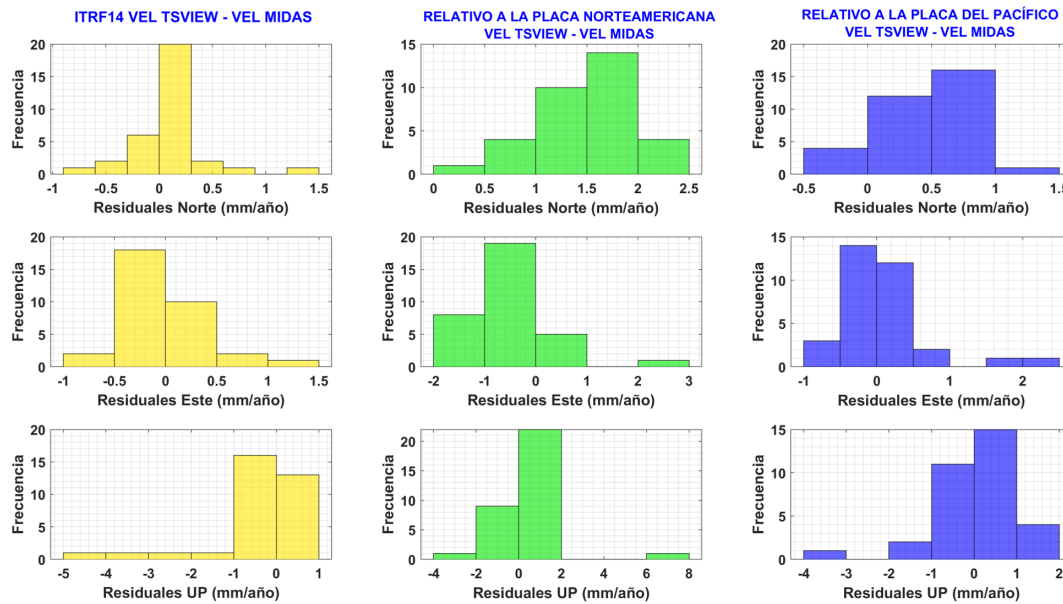


FIGURA 4.16: Velocidades residuales entre la estimación con TSVIEW y MIDAS de las 33 estaciones GPS relativas al marco de referencia ITRF14, Placa Norteamericana y relativa a la Placa del Pacífico.

4.4. Campos de velocidad e interpretación de la deformación en el Noroeste de México

Una vez que se han estimado las velocidades y sus correspondientes incertidumbres considerando ruido blanco más ruido correlado temporalmente, así como los modelos de procesamiento riguroso para alcanzar la mejor precisión, se ha estimado y generado el campo de velocidad correspondiente a la solución ajustada al marco de referencia global ITRF14, con base al tiempo de procesamiento del año 2010 al año 2021, el resultado del campo de velocidad para el Noroeste de México se muestra en la Figura 4.17 descrito por las 33 estaciones de libre acceso en este estudio. Es evidente que el comportamiento de las estaciones ubicadas en la Placa del Pacífico, presentan un desplazamiento en su mayoría en dirección Noroeste (NW), mientras que las estaciones que están sobre la Placa Norteamericana muestran un desplazamiento en dirección suroeste (SW), lo que puede llegar a interpretarse como si la

Placa Norteamericana subduciera por debajo de la Placa Pacífico, aunque esta interpretación no es adecuada para la caracterización entre ambas placas tectónicas, ya que el análisis deriva de un circuito tectónico global, que hace referencia a un movimiento absoluto, por lo que ambas placas se desplazan de forma conjunta a tasas de desplazamiento diferentes, es decir, las estaciones que están sobre la Placa Norteamericana tienen una tasa de desplazamiento menor en comparación con las de la Placa del Pacífico, en promedio las estaciones sobre la Placa Pacífico tienen una velocidad de 47.20 mm/año mientras las de la placa Norteamericana tienen un promedio de 12.88 mm/año, dichas velocidades promedio están ajustadas al marco de referencia global ITRF14.

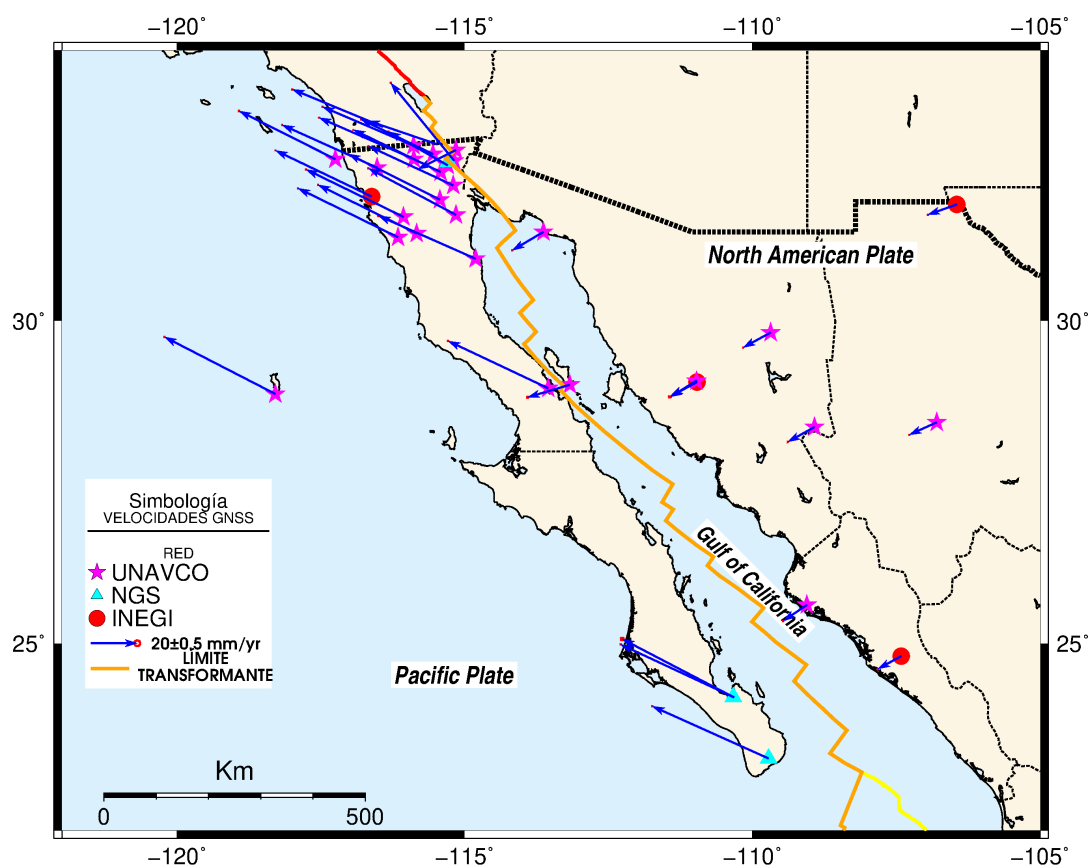


FIGURA 4.17: Velocidades horizontales de estaciones GPS relativas al marco de referencia ITRF14.

Con el objetivo de demostrar el comportamiento e interacción entre la Placa del Pacífico y Norteamericana, se han realizado los correspondientes campos de velocidad cortical en relación a cada placa tectónica, es decir considerando a la Placa Norteamericana como referencia (Figura 4.18a) para analizar el desplazamiento e interacción de la Placa Pacífico con base en los desplazamientos de las estaciones sobre la Placa del Pacífico. De forma similar, se ha realizado el análisis del desplazamiento de las estaciones sobre la placa Norteamericana considerando como placa de referencia a la Placa del Pacífico (Figura 4.18b), evaluando los desplazamientos de

las estaciones sobre la placa Norteamericana.

La Figura 4.18a muestra el campo de velocidad relativo a la Placa Norteamericana, donde la velocidad de dicha placa es eliminada y sólo queda la velocidad presente en cada estación, con el fin de evidenciar el desplazamiento de las estaciones sobre la Placa del Pacífico, las cuales muestran vectores de desplazamiento en dirección Noroeste con valores que van desde 39 mm/año hasta 55 mm/año, por lo que el comportamiento de desplazamiento puede ser similar al de un bloque conjunto ya que las velocidades son similares entre sí, tanto en magnitud, dirección y sentido, sin embargo existen algunos casos particulares que se pueden evidenciar en la Tabla 4.4 mostrando con detalle las velocidades calculadas para las 33 estaciones evaluadas, específicamente las estaciones que están al norte de Baja California, que pueden mostrar influencia debido a deformaciones locales que se presentan, como es el caso de la estación NVLX cercana a las zona de falla transformante que se desliza a una velocidad menor en la componente Este en relación a las otras estaciones de la Placa del Pacífico, pero a una velocidad mayor en la componente Norte, por lo que la dirección descrita por el ángulo azimutal es de 358.78 grados.

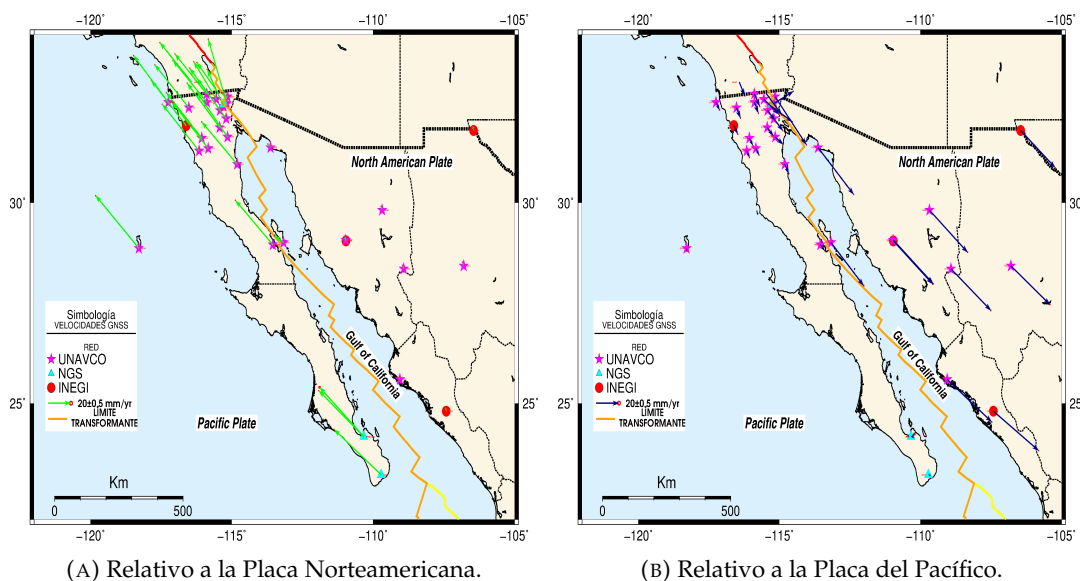


FIGURA 4.18: Velocidades horizontales de estaciones GPS relativas a una placa tectónica.

TABLA 4.4: Velocidades e incertidumbres realistas relativas a la Placa de Norteamérica

Estación	Longitud	Latitud	V_e mm/yr	σ_{V_e} mm/yr	V_n mm/yr	σ_{V_n} mm/yr	V_u mm/yr	σ_u mm/yr
CORX	-117.24819	32.41538	-30.38	0.1	32.27	0.34	-0.85	0.26
CULC	-107.4126	24.79509	-0.51	0.02	2.62	0.02	0.33	0.06
DAEX	-115.41921	32.2245	-26.45	0.48	29.18	0.15	3.04	0.09
GUAX	-118.28969	28.88406	-37.77	0.06	36.44	0.14	-0.26	0.14
HER2	-110.96722	29.09255	-0.49	0.16	2.36	0.11	0.94	0.37
IAGX	-113.17188	29.02656	-7.78	0.1	4.77	0.49	-0.17	0.56
IDGO	-104.60708	24.06745	-0.03	0.06	2.5	0.07	-1.06	0.44
IHER	-110.9613	29.06763	-1.27	0.29	2.97	0.17	0.85	0.71
IMIE	-116.61634	31.86186	-30.46	0.13	31.18	0.1	-1.77	0.3
IMIP	-106.44587	31.74493	-0.74	0.04	3.34	0.07	-1.58	0.18
IPAZ	-110.33075	24.14528	-39.31	0.23	31.78	0.2	-0.15	0.35
LPAZ	-110.31935	24.1388	-38.89	0.28	34.26	0.39	2.43	1.23
MEXI	-115.4757	32.63299	-18.73	0.78	21.19	0.55	-3.7	1
MSD1	-109.71765	23.16045	-41.11	0.25	31.42	0.56	1.67	0.93
NAYX	-115.29551	32.32428	-14.3	0.34	25.4	0.2	-0.54	0.38
NVLX	-115.18324	32.39354	-16.08	0.09	44.27	0.12	-75.8	0.39
PALX	-116.06379	31.55912	-30.98	0.15	31.56	0.08	-0.39	0.21
PB2Y	-115.88961	32.61392	-27.89	0.09	27.8	0.11	0.85	0.14
PHJX	-115.55045	32.49006	-19.7	0.12	25.87	0.088	0.67	0.13
PJZX	-115.88373	32.41701	-29.57	0.25	28.89	0.06	0.39	0.16
PLCX	-116.15808	31.25522	-32.23	0.05	32.27	0.13	0.09	0.43
PLPX	-115.15128	31.5886	-26.69	0.28	30.91	0.09	0.89	0.19
PLTX	-115.4309	31.81634	-28.38	0.2	30.59	0.14	2.2	0.11
PSTX	-115.83544	31.31312	-31.55	0.16	31.98	0.09	-0.16	0.13
PTEX	-116.52124	32.28846	-29.79	0.19	29.7	0.08	-1.38	0.18
QUEX	-115.15322	32.54921	-5.1	0.11	2.66	0.16	-3.91	0.17
TNBA	-113.54728	28.97192	-32.71	0.2	30.64	0.22	0.76	0.14
TNCU	-106.79405	28.45056	-1.11	0.05	2.51	0.15	0.87	0.36
TNPP	-113.63164	31.33552	-2.37	0.04	2.43	0.14	1.15	0.16
TNTB	-109.05272	25.60586	-0.45	0.03	1.81	0.03	0.66	0.13
TSFX	-114.81064	30.93393	-30.97	0.07	29.22	0.16	0.62	0.23
USMX	-109.68105	29.82165	-0.93	0.05	2.49	0.17	1.17	0.36
YESX	-108.91964	28.37834	-0.95	0.03	2.27	0.19	1.44	0.44
YUMX	-115.1992	32.02769	-25.28	0.15	27.72	0.24	4.35	0.19

En promedio el desplazamiento relativo de la Placa del Pacífico en referencia a la placa Norteamericana es de 44.73 mm/año, velocidad calculada con base en los desplazamientos horizontales de las estaciones sobre la misma placa Pacífico. En dicha velocidad, se ha considerado eliminar algunas estaciones que presentan tasas de desplazamiento distintas a las que la mayoría presentan, es decir, aquellas estaciones que puedan estar influenciadas por deformaciones locales o actividad sísmica, como es el caso de las estaciones MEXI, NAYX, PHJX y YUMX, que dadas sus velocidades (Tabla 4.4) pueden ser causantes de sesgo en la estimación de la velocidad promedio, pues las velocidades en las componentes Norte y Este, están por debajo de la media.

De forma similar se ha estimado el campo de velocidad relativo a la Placa del Pacífico como se ilustra en la Figura (4.18b), donde los desplazamientos de las estaciones sobre la placa Norteamericana describen una dirección Sureste (SE), incluso la estación IAGX que esta localizada en la isla San Ángel en el Golfo de California. Las velocidades presentes en la Placa Norteamericana están en el rango de 39 a 52 mm/año y para el cálculo de la velocidad promedio como un bloque rígido, se han excluido las velocidades horizontales de las estaciones NVLX dada la distinta dirección de desplazamiento y a la estación QUEX por la diferencia en velocidad (Tabla 4.5), que sesgarían una correcta estimación en la componente Este principalmente. Con base en lo anterior, el promedio de velocidad calculado para la Placa Norteamericana es de 45.34 mm/año.

TABLA 4.5: Velocidades e incertidumbres realistas relativas a la Placa del Pacífico.

Estación	Longitud	Latitud	V_e mm/yr	σ_{V_e} mm/yr	V_n mm/yr	σ_{V_n} mm/yr	V_u mm/yr	σ_u mm/yr
CORX	-117.24818	32.41537	3.09	0.1	-5.32	0.34	-0.89	0.26
CULC	-107.41259	24.79508	39.61	0.02	-27.23	0.02	0.28	0.06
DAEX	-115.41921	32.2245	6.63	0.48	-7.05	0.15	3.01	0.09
GUAX	-118.28968	28.88406	0.33	0.06	-1.92	0.14	-0.3	0.14
HER2	-110.96721	29.09254	35.14	0.16	-30.4	0.11	0.9	0.37
IAGX	-113.17187	29.02656	28.57	0.1	-29.74	0.49	-0.21	0.56
IDGO	-104.60707	24.06745	40.42	0.06	-24.97	0.07	-1.11	0.44
IHER	-110.96129	29.06763	34.4	0.29	-29.79	0.17	0.81	0.71
IMIE	-116.61634	31.86186	3.48	0.13	-5.95	0.1	-1.81	0.3
IMIP	-106.44586	31.74493	30.24	0.04	-25.7	0.07	-1.62	0.18
IPAZ	-110.33074	24.14527	2.26	0.23	-0.48	0.2	-0.19	0.35
LPAZ	-110.31935	24.1388	2.68	0.28	2.01	0.39	2.38	1.23
MEXI	-115.4757	32.63299	13.86	0.78	-15.09	0.55	-3.73	1
MSD1	-109.71765	23.16045	1.49	0.25	-0.34	0.56	1.63	0.93
NAYX	-115.29551	32.32428	18.62	0.34	-10.74	0.2	-0.58	0.38
NVLX	-115.18323	32.39353	16.71	0.09	8.21	0.12	-75.83	0.39

PALX	-116.06378	31.55912	3.16	0.15	-5.17	0.08	-0.42	0.21
PB2Y	-115.88961	32.61392	4.87	0.09	-8.79	0.11	0.81	0.14
PHJX	-115.55045	32.49005	13.09	0.12	-10.46	0.088	0.63	0.13
PJZX	-115.88373	32.41701	3.43	0.25	-7.7	0.06	0.35	0.16
PLCX	-116.15807	31.25521	2.31	0.05	-4.52	0.13	0.05	0.43
PLPX	-115.15127	31.5886	7.1	0.28	-5.13	0.09	0.86	0.19
PLTX	-115.43089	31.81634	5.21	0.2	-5.66	0.14	2.16	0.11
PSTX	-115.83543	31.31312	2.8	0.16	-4.57	0.09	-0.2	0.13
PTEX	-116.52123	32.28845	3.59	0.19	-7.36	0.08	-1.42	0.18
QUEX	-115.15322	32.5492	27.49	0.11	-33.37	0.16	-3.94	0.17
TNBA	-113.54728	28.97191	3.81	0.2	-4.16	0.22	0.72	0.14
TNCU	-106.79404	28.45055	34.26	0.05	-26.83	0.15	0.82	0.36
TNPP	-113.63163	31.33552	31.24	0.04	-32.44	0.14	1.11	0.16
TNTB	-109.05272	25.60586	39.03	0.03	-29.41	0.03	0.61	0.13
TSFX	-114.81063	30.93393	3.52	0.07	-6.55	0.16	0.58	0.23
USMX	-109.68105	29.82165	33.43	0.05	-29.24	0.17	1.13	0.36
YESX	-108.91963	28.37833	35.04	0.03	-28.84	0.19	1.4	0.44
YUMX	-115.1992	32.02768	7.98	0.15	-8.35	0.24	4.32	0.19

Con base en las velocidades relativas a cada placa en análisis (Pacífico - Norteamericana) se ha calculado una velocidad promedio para cada placa tectónica, con el fin de analizar y realizar una comparativa de velocidades, considerando algunas que se reportan en el estado del arte bajo diferentes técnicas o modelos. La Figura 4.19 muestra el vector de desplazamiento promedio para cada placa tectónica, con el objetivo de evidenciar gráficamente la interacción entre ambas placas tectónicas en el Noroeste de México, con esto es posible identificar el desplazamiento de tipo lateral derecho que en la literatura se describe. Sin embargo, estas velocidades se han calculado considerando el tiempo de análisis de 12 años, únicamente con estaciones sobre cada placa correspondiente, por lo que es necesario realizar una comparativa con otros estudios que han estimado la velocidad bajo diferentes enfoques y técnicas. El promedio obtenido para este estudio es de 44.72 ± 0.29 mm/año en dirección NW para la Placa del Pacífico y de 45.34 ± 0.18 mm/año en dirección SE para la Placa de Norteamérica.

La Figura 4.20 muestra la comparativa de velocidades entre este estudio y algunos del estado del arte. DeMets, Gordon y Argus (2010) calculan mediante métodos geológicos una velocidad de 48.6 mm/año para la Placa Norteamericana y de 51 mm/año para la Placa del Pacífico. El modelo NUVEL1-A velocidad de 47.4 mm/año para la Placa Norteamericana y 51.6 mm/año para la Placa del Pacífico, por otro lado el modelo MORVEL estima velocidades de 49.4 mm/año y 50.2 mm/año para

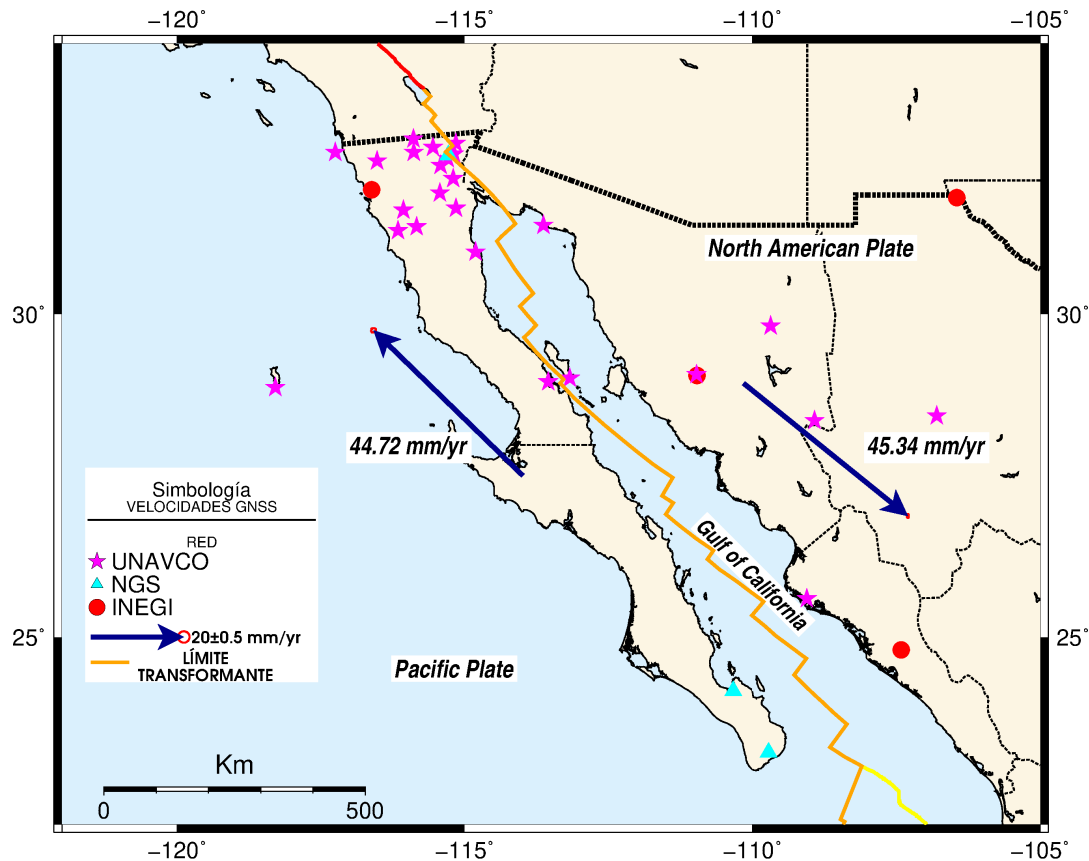


FIGURA 4.19: Velocidades horizontales promedio para la Placa Norteamericana (relativa a la Placa Pacífico) y la Placa del Pacífico (relativa a la Placa Norteamericana).

la Placa Norteamericana y Placa del Pacífico, respectivamente. Finalmente el estudio de Plattner y col. (2007) mencionan velocidades de 46.8 mm/año para la Placa de Norteamérica y 51.1 mm/año para la Placa del Pacífico. En este sentido, es posible analizar de manera gráfica la localización y relación de las velocidades de otros trabajos con las calculadas en este estudio. El diagrama de caja y bigote (Figura 4.20) permite describir los valores máximos y mínimos de velocidad así como la media, que en este estudio el valor de la media es igual al de la mediana. Es evidente que las velocidades para ambas placas tectónicas se encuentren en el tercer cuartil del diagrama y que las velocidades estimadas en la Placa Norteamericana muestran menor diferencia a la media de este estudio (línea roja horizontal Figura 4.20) entre 1 y 4 mm/año de diferencia, mientras que las velocidades en la Placa del Pacífico tienen diferencias entre 5 y 6 mm/año, no obstante dichas diferencias están en el rango de velocidades mínimas y máximas en cada placa tectónica, además de que los modelos NUVEL1-A y MORVEL son generados mediante técnicas geológicas como lo son las anomalías magnéticas en circuitos tectónicos globales.

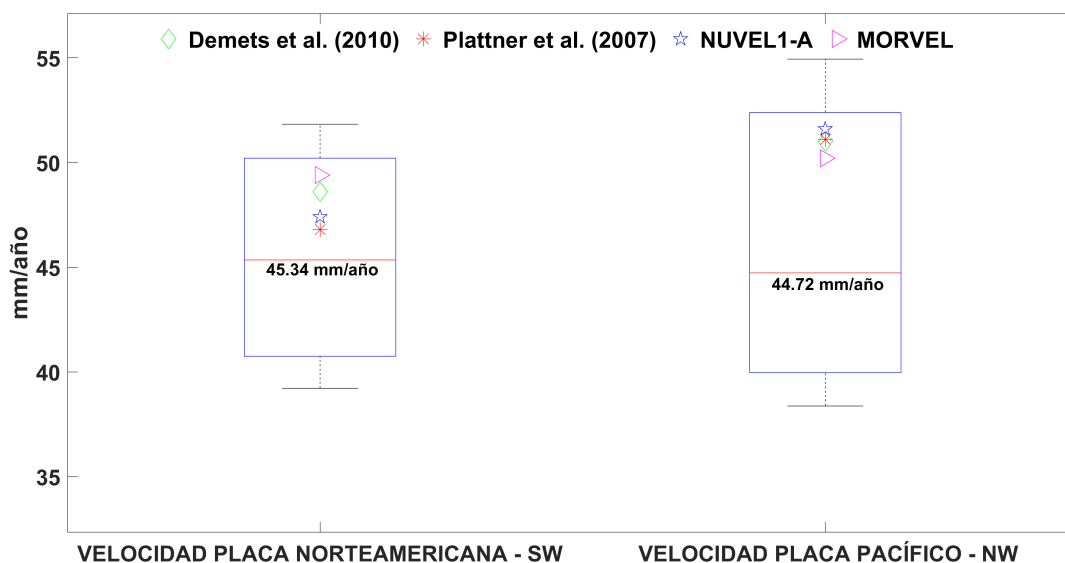


FIGURA 4.20: Velocidades horizontales para cada placa tectónica reportadas en el estado del arte. El diagrama de caja y bigote muestra el resultado de este estudio.

4.5. Estimación del polo de Euler

El movimiento de las placas tectónicas caracterizado sobre una esfera, parte de la parametrización del vector o polo de Euler, el cual es útil en la comparación de diferentes fuentes de medición geodésicas, seguimiento de puntos calientes, el azimuth de fallas transformantes, centros de dispersión y deslizamiento sísmico (Aktuğ y Yildirim, 2013). En particular, el movimiento relativo de las placas tectónicas en las mediciones GPS a través de vectores de velocidad queda definido por el marco de referencia global (no-net-rotation) o bien relativo a una placa tectónica específica. La estimación del Polo de Euler es relevante en la estimación de los desplazamientos de límites de placas, suponiendo rigidez en la interacción del movimiento (Angermann, Klotz y Reigber, 1999). En este sentido, la cobertura geométrica de los vectores de velocidad se limita a la parte rígida de la placa de estudio. El polo de Euler es una herramienta indispensable para el modelamiento de las placas tectónicas como una aproximación del movimiento rígido entre las placas, sin embargo las estaciones puedan ser limitadas. En el cálculo del Polo de Rotación entre la Placa Pacífico - Norteamericana, se han considerado únicamente 18 estaciones en la Placa del Pacífico para la parametrización del Polo de Euler, localizadas principalmente en la Península de Baja California y en la isla Guadalupe. El resultado de la parametrización (latitud, longitud, ω) se muestra en la Tabla 4.6. La Figura 4.21 muestra la localización del polo de rotación y el coeficiente de correlación entre las velocidades observadas (calculadas) vs modeladas.

De acuerdo con Plattner y col. (2007) el polo de rotación para la Placa del Pacífico muestra una velocidad angular y localización diferente a la estimada en este estudio

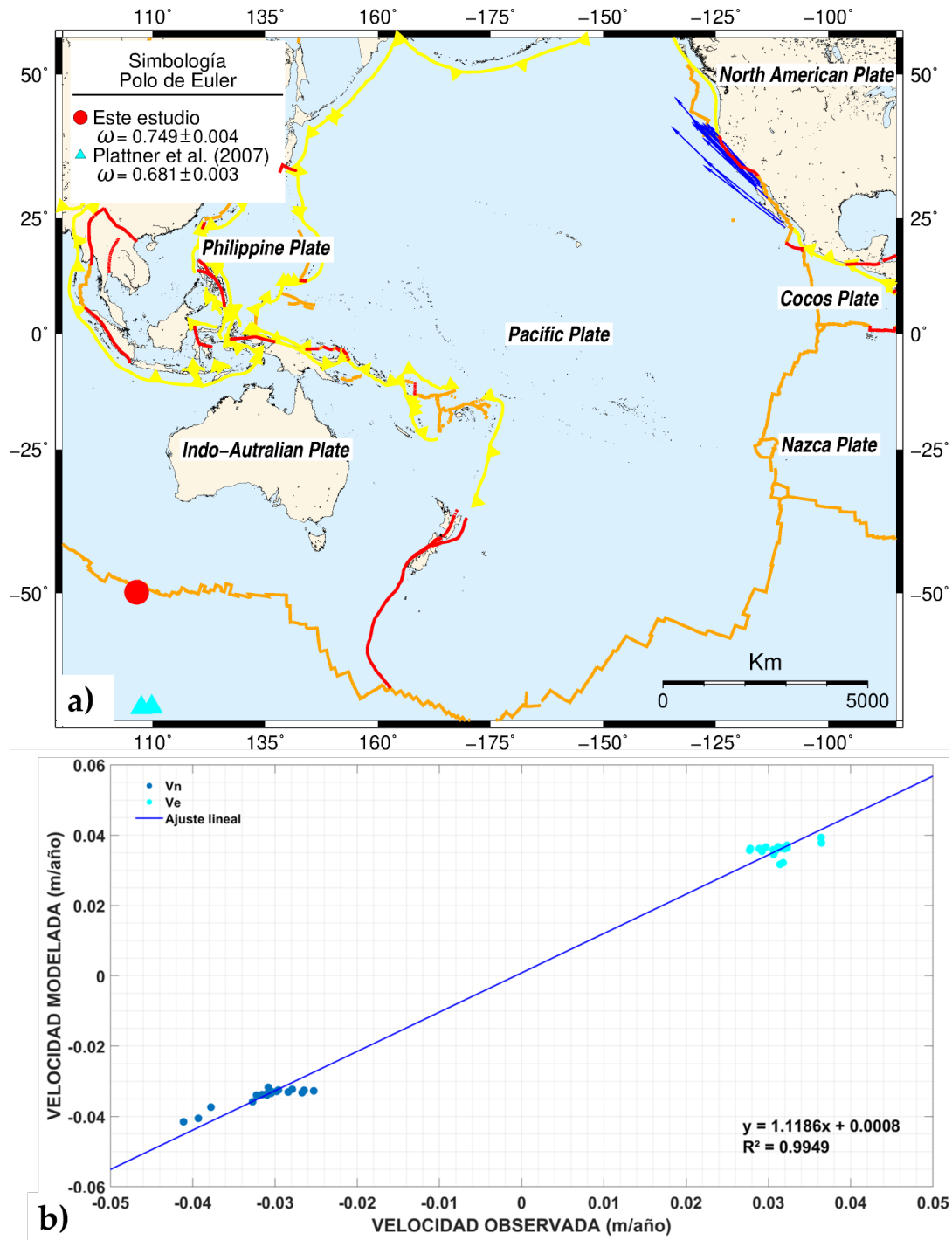


FIGURA 4.21: a) Estimación del polo de Rotación de Euler a través de 18 estaciones en la Península de Baja California. b) Coeficiente de correlación observado vs modelado.

(Tabla 4.6), esto está relacionado a la cantidad y distribución de estaciones ya que en este estudio los parámetros del polo de Euler se definen con 18 estaciones concentradas en su mayoría en la Península de Baja California, que en comparación con Plattner y col. (2007) han utilizado 9 estaciones distribuidas en la Placa del Pacífico.

TABLA 4.6: Comparativa de la Parametrización del Polo de Euler.

Polo de rotación	Latitud	Longitud	omega (°/Myr)
Pacífico (Este estudio)	-49.87769	106.4509	0.749 ± 0.004
Pacífico (Plattner y col., 2007)	-63.6700	109.8100	0.681 ± 0.003

Por otro lado la velocidad angular estimada para la Placa Norteamericana es de 0.177 ± 0.139 °/Myr que en comparación con la velocidad descrita por Altamimi y col. (2016) de 0.194 ± 0.001 °/Myr refleja una diferencia en velocidad angular de 0.017 °/Myr, donde dicha diferencia está relacionada a la localización y cantidad de estaciones seleccionadas, ya que en este estudio y para definir el polo de Euler de la Placa Norteamericana se utilizaron 23 estaciones localizadas en la misma placa, mientras que Altamimi y col. (2016) aplicaron 72 sitios para su estimación. En este sentido la localización del polo de Euler es distinta a la de este estudio dada la distribución de las estaciones seleccionadas, por lo que el polo de Euler para la Placa Norteamericana (en este estudio) está localizado en la Latitud -19.18477 y Longitud -65.42705 mientras que Altamimi y col. (2016) y McCaffrey (2005) reportan la localización de Latitud -4.00 y Longitud -89.91, en este sentido y considerando las diferencias significativas en la estimación de la localización del polo, se puede inferir que es debido a la cantidad de estaciones para su estimación así como la distribución, dado que usan estaciones que están al Este de Estados Unidos a diferencia de este estudio donde las estaciones están localizadas principalmente al Noroeste de México y Estados Unidos, sin embargo la velocidad angular es semejante a la que se reporta en el estado del arte lo que implica un movimiento rotacional similar con un polo de Euler en diferente locación.

4.6. Propuesta de Modelo de velocidad cortical para el Noroeste (NW) de México

Derivado del cálculo y estimación de las velocidades en las estaciones de operación continua, se ha aplicado al conjunto de velocidades horizontales (datos vectoriales horizontales) el algoritmo de interpolación implementado por Sandwell y Wesel (2016) descrito en la Sección 2.8, el cual es manipulado mediante funciones de Green (Sección 2.8.1), ajustando el acoplamiento elástico bajo el coeficiente de Poisson (ν), que con base en el estado del arte (Bian, Wu y Wu, 2020; Wang y col., 2022), se recomienda el valor de $\nu = 0.5$, es decir, elasticidad típica, ya que las variaciones son mínimas al considerar un coeficiente de incompresibilidad ($\nu = 1$) o de no acoplamiento elástico ($\nu = -1$) al vector de interpolación.

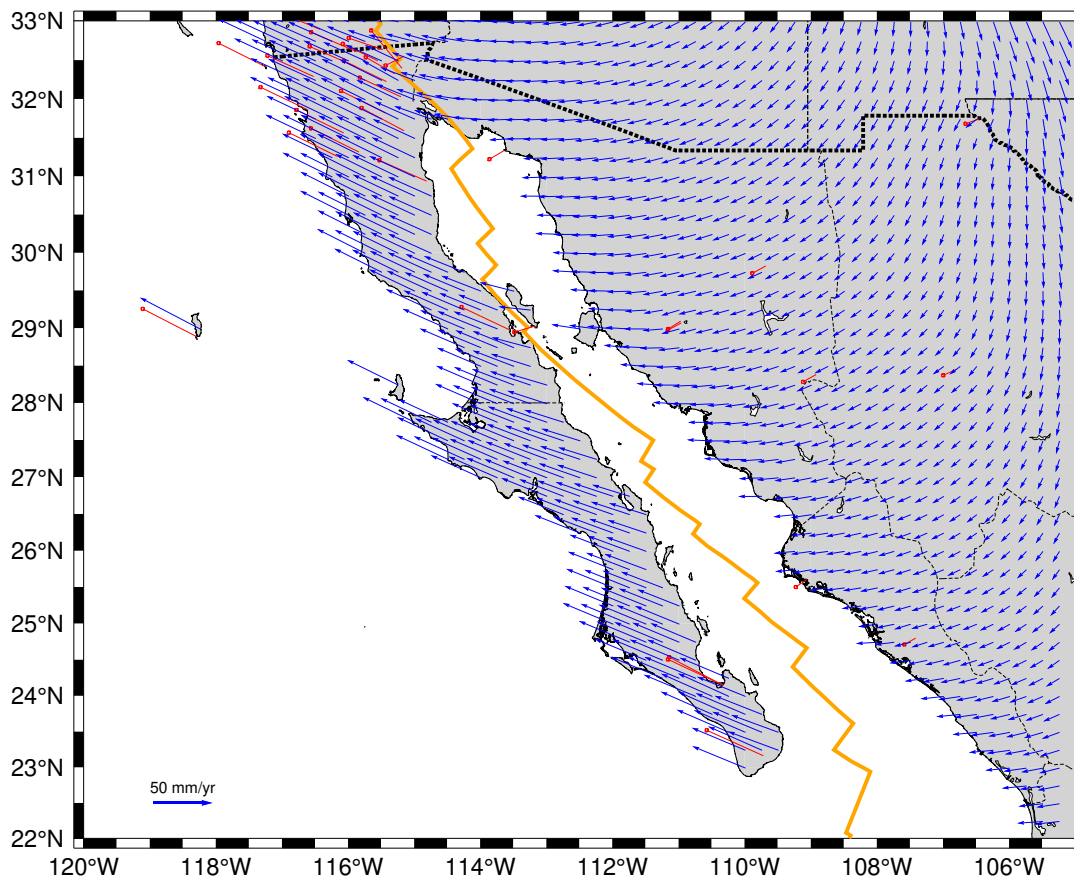


FIGURA 4.22: Modelo NW-MEXVEL de Velocidades horizontales interpoladas mediante funciones de Green con un coeficiente de Poisson de 0.5 considerando acoplamiento elástico. Vectores rojos: velocidades obtenidas del procesamiento en GAMIT/GLOBK. Vectores azules: Velocidades interpoladas en un grid de 15' X 15' de arco.

La Figura 4.22 muestra el modelo de velocidad cortical 2D interpolado, donde los vectores rojos muestran las velocidades correspondientes a las estaciones de libre acceso calculadas y analizadas en este estudio, con las cuales se implementó la interpolación mediante funciones de Green en una malla de 15 x 15 minutos de arco,

con el fin de observar las características de deformación en zonas donde no existen estaciones de operación continua. Los vectores de color azul muestran el modelo de velocidad cortical interpolado con base en los datos de entrada conocidos (velocidades de las estaciones GNSS). Dicho modelo de velocidad favorece en el análisis continuo de deformación, dando evidencia del comportamiento global del Noroeste de México. En lo subsecuente a este modelo se le denominará **NW-MEXVEL**.

Asimismo se puede evidenciar el desplazamiento en algunas localidades específicas como la isla Guadalupe en la Placa del Pacífico y en las islas San Ángel y Tiburón en el Golfo de California, mostrando correspondencia y coherencia a los vectores de desplazamiento más cercanos, ya que el modelo de velocidad cortical **NW-MEXVEL** se estima considerando a la corteza terrestre del Noroeste de México como una superficie elástica, modificada bajo el comportamiento geodinámico e interacción de las placas Pacífico y Norteamericana evaluado por los desplazamientos horizontales en las estaciones GNSS del área de estudio. Por otro lado, en el límite de placa cercano a la falla de San Andrés, localizado en el Valle de Mexicali, se muestra un cambio de dirección en los vectores interpolados al momento de cruzar la falla (línea amarilla en la Figura 4.22), sin embargo, el cambio de dirección será mas evidente cuando se analice el modelo de velocidad interpolado relativo a una placa fija (Sección 4.6.2 y 4.6.3).

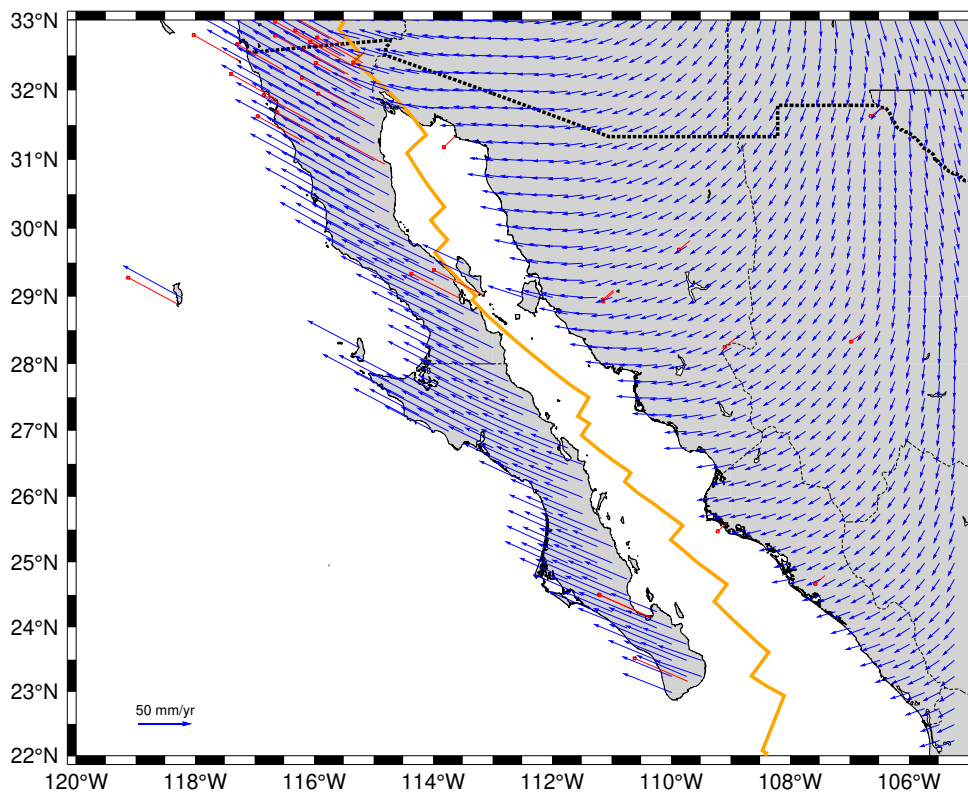


FIGURA 4.23: Modelo de Velocidades horizontales interpoladas mediante funciones de Green con un coeficiente de Poisson de 0.5 considerando acoplamiento elástico. Vectores rojos: Velocidades obtenidas del modelo GEODVEL 2010. Vectores azules: Velocidades interpoladas con funciones de Green (grid 15' X 15' de arco).

La Figura 4.23 muestra el modelo de velocidad interpolado, con base en los vectores de desplazamiento calculados para las mismas coordenadas de las 33 estaciones de operación continua obtenidos del modelo GEODVEL 2010 (Argus y col., 2010) teniendo en cuenta que este modelo ha sido estimado bajo observaciones del espacio geodésico (GPS, VLBI, SLR y DORIS) para las 11 placas tectónicas mayores. En este sentido, existen zonas cercanas a los límites de placa, donde el modelo GEODVEL puede tener una mayor incertidumbre al comportamiento tectónico local, ejemplo de ello es la velocidad estimada en la Isla San Ángel en el Golfo de California, que a diferencia de la velocidad estimada con datos discretos de la estación IAGX, la velocidad del modelo GEODVEL muestra una mayor similitud a las velocidades en la Placa del Pacífico por la cercanía de la isla al límite transformante (Figura 4.23), lo que deriva también en una diferencia con el modelo de velocidad interpolado con funciones de Green y acoplamiento elástico, siendo un poco más suave y continuo en el cambio de dirección de los vectores de desplazamiento interpolados en el norte de Baja California cercano a la falla de San Andrés a diferencia del modelo interpolado con base en las velocidades de cada estación GNSS (NW-MEXVEL-Figura 4.22). No obstante el modelo de velocidad interpolada, basado en las estimaciones de GEODVEL 2010, será el punto de comparación para realizar la validación directa respecto al modelo interpolado con datos de velocidades calculadas en cada estación del área de estudio, lo cual se explica en la siguiente sección.

4.6.1. Verificación de la exactitud del modelo y análisis del error

Con el fin de validar los valores obtenidos en el modelo de interpolación NW-MEXVEL se ha realizado una validación directa punto a punto, estimado los residuales, así como el cálculo del Error Medio Cuadrático (RMSE) del modelo propuesto y los correspondientes coeficientes de correlación entre las componentes Este-Este y Norte-Norte entre ambos modelos. Para ello el modelo publicado por Argus y col. (2010) (GEODVEL 2010) se ha considerado como la base de la comparación y cálculo de los residuales en la validación directa punto a punto, es decir, se calculan los residuales como $R_{residuales} = R_{modeloNW-MEXVEL} - R_{modeloGEODVEL}$ para evidenciar las variaciones máximas y mínimas respecto al modelo GEODVEL. La Figura 4.24 muestra el comportamiento de los residuales para la componente Norte y Este del modelo NW-MEXVEL, donde la mayor frecuencia acumulada está entre valores de 0 y 3 mm/año para la componente Norte y entre valores de -2.5 a 2.5 mm/año para la componente Este.

Por otro lado la Figura 4.25a y 4.25b muestran los histogramas de las velocidades interpoladas para el modelo NW-MEXVEL (este estudio) y el modelo GEODVEL para evidenciar las similitudes por componente y así calcular los coeficientes de correlación, los cuales se muestran gráficamente en la Figura 4.25c y 4.25d, donde es posible evidenciar una fuerte correspondencia entre cada componente de ambos modelos. El coeficiente de correlación para la componente Norte es de 0.989 a la recta

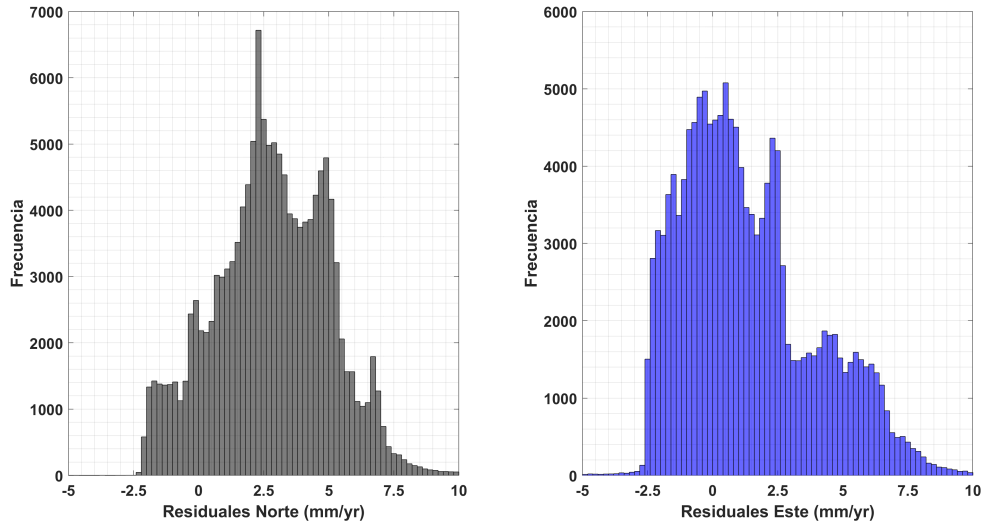


FIGURA 4.24: Residuales horizontales del modelo NW-MEXVEL (este estudio) tomando como referencia las velocidades interpoladas por el modelo GEODVEL 2010.

de mejor ajuste lineal que describe el comportamiento de los datos bajo la ecuación $y = 1.2926x + 0.3121$ (Figura 4.25c) mientras que el coeficiente de correlación para la componente Este describe una correlación positiva fuerte con valor de 0.994 a la recta de mejor ajuste descrito por $y = 1.1743x + 1.7351$

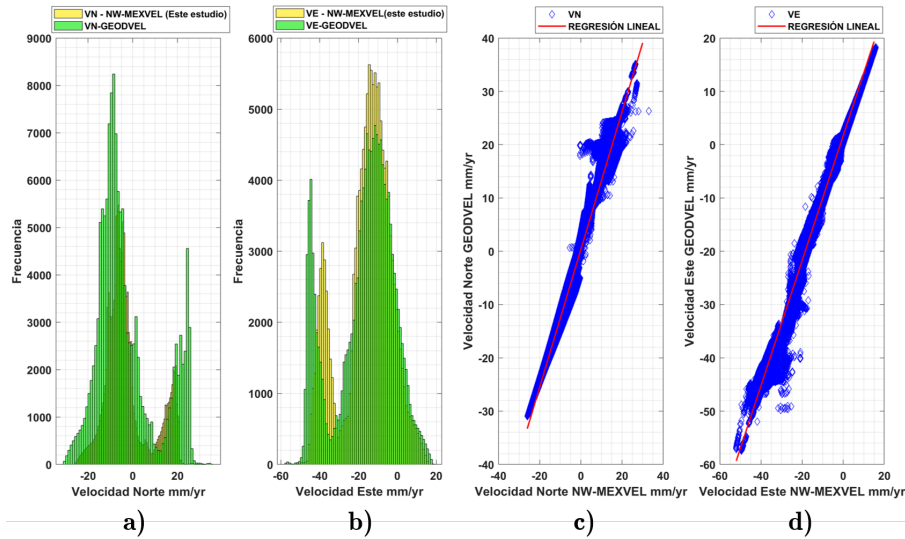


FIGURA 4.25: Validación directa del modelo NW-MEXVEL tomando como referencia el modelo GEODVEL 2010. a) Velocidad en la componente Norte. b) Velocidad en la componente Este. c) Correlación en las componentes Este-Este. d) Correlación en las componentes Norte-Norte.

Además para el cálculo del error se ha estimado el calculado del error medio cuadrático (Root Mean Square Error - RMSE) del modelo NW-MEXVEL mediante la Ecuación 4.3 :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z^*(x_i) - z(x_i)]^2} \quad (4.3)$$

Dónde $z(x_i)$ es el valor observado en la posición i , $z^*(x_i)$ es el valor interpolado en la posición i y n es el tamaño de la muestra. En este sentido se ha estimado el RMSE para cada una de las componentes de los vectores interpolados, siendo más de 139000 valores en cada componente horizontal que conforman el grid de 15 x 15 minutos de arco. El RMSE en la componente Este es de 0.052 mm/año y para la componente Norte de 0.116 mm/año lo que permite interpretar que el error que se puede obtener para la componente Este en el rango absoluto de las velocidades interpoladas en esta componente es menor que en la componente Norte, mostrando una mejor correlación en la componente Este entre el modelo NW-MEXVEL interpolado de este estudio y el modelo GEODVEL 2010.

Con base en lo anterior se puede decir que el modelo de interpolación para el Noroeste de México (NW-MEXVEL) demuestra fiabilidad en las incertidumbres estimadas, así como en los coeficientes de correlación entre ambas componentes, siendo la validación directa punto a punto el método para el análisis del error, el cual en la interpolación ha sido estimado mediante el RMSE donde el mejor comportamiento es en la componente Este y ligeramente mayor en la componente Norte, por lo que la fiabilidad del modelo NW-MEXVEL estimará con menor incertidumbre en la componente Este que en la componente Norte, sin embargo, el modelo es fiable para desplazamientos mayores a los 0.127 mm/año, siendo este el error global estimado.

La Tabla 4.7 muestra una fracción de los datos del grid modelado NW-MEXVEL y del modelo GEODVEL utilizado en la validación. En el Apéndice B.3 se muestran los códigos para la generación de dichos modelos.

TABLA 4.7: Velocidades interpoladas mediante funciones de Green y acoplamiento elástico para el modelo propuesto NW-MEXVEL ITRF14 y velocidades interpoladas del modelo GEODVEL 2010 como datos de validación

No	Long	Lat	NW MEXVEL ITRF14		VALIDACIÓN GEODVEL 2010	
			V_E mm/yr	V_N mm/yr	V_E mm/yr	V_N mm/yr
1	-112.4125	31.3125	-19.4342880249	-1.63341188431	-20.5245857239	0.977962553501
2	-112.4125	31.2875	-19.4721298218	-1.62866425514	-20.5442714691	0.988885939121
3	-112.4125	31.2625	-19.512720108	-1.62372422218	-20.5688362122	1.00007975101
4	-112.4125	31.2375	-19.5561180115	-1.61844491959	-20.5984039307	1.01177036762
5	-112.4125	31.2125	-19.6023521423	-1.61267828941	-20.6330604553	1.02418720722

6	-112.4125	31.1875	-19.6514358521	-1.60627627373	-20.6728610992	1.03755998611
7	-112.4125	31.1625	-19.7033519745	-1.59909391403	-20.7178249359	1.05211544037
8	-112.4125	31.1375	-19.7580699921	-1.59098994732	-20.7679405212	1.06807529926
9	-112.4125	31.1125	-19.8155326843	-1.58182930946	-20.8231639862	1.08565270901
10	-112.4125	31.0875	-19.8756656647	-1.57148432732	-20.8834209442	1.1050504446
11	-112.4125	31.0625	-19.938375473	-1.55983614922	-20.9486122131	1.12645888329
12	-112.4125	31.0375	-20.0035514832	-1.54677593708	-21.0186061859	1.15005397797
13	-112.4125	31.0125	-20.0710697174	-1.53220570087	-21.0932559967	1.17599594593
14	-112.4125	30.9875	-20.1407928467	-1.51603877544	-21.1723899841	1.20442783833
15	-112.4125	30.9625	-20.2125720978	-1.49820053577	-21.255821228	1.23547530174
16	-112.4125	30.9375	-20.2862510681	-1.4786285162	-21.3433456421	1.26924586296
17	-112.4125	30.9125	-20.3616638184	-1.45727229118	-21.434753418	1.30582869053
18	-112.4125	30.8875	-20.4386405945	-1.43409347534	-21.5298194885	1.34529483318
19	-112.4125	30.8625	-20.5170116425	-1.40906500816	-21.628320694	1.3876979351
:	:	:	:	:	:	:
139081	-111.8125	31.2125	-18.0284194946	-2.91683220863	-18.8955059052	-1.24259662628
139082	-111.8125	31.1875	-18.068447113	-2.90450739861	-18.9282188416	-1.23414206505
139083	-111.8125	31.1625	-18.1091861725	-2.89193296432	-18.9628009796	-1.22553133965
139084	-111.8125	31.1375	-18.1506309509	-2.87906646729	-18.9992656708	-1.21670150757
139085	-111.8125	31.1125	-18.1927680969	-2.8658657074	-19.0376262665	-1.20758938789
139086	-111.8125	31.0875	-18.2355823517	-2.85228896141	-19.0778808594	-1.198133111
139087	-111.8125	31.0625	-18.279050827	-2.83829545975	-19.1200275421	-1.18827152252
139088	-111.8125	31.0375	-18.3231506348	-2.82384562492	-19.1640586853	-1.17794513702
139089	-111.8125	31.0125	-18.3678531647	-2.80890035629	-19.2099552155	-1.16709578037
139090	-111.8125	30.9875	-18.4131221771	-2.79342317581	-19.2576961517	-1.15566766262
139091	-111.8125	30.9625	-18.4589233398	-2.77737784386	-19.3072566986	-1.14360702038
139092	-111.8125	30.9375	-18.5052165985	-2.76073050499	-19.3586044312	-1.13086235523
139093	-111.8125	30.9125	-18.5519580841	-2.74344921112	-19.4117031097	-1.11738502979
139094	-111.8125	30.8875	-18.5990982056	-2.72550320625	-19.4665088654	-1.10312902927
139095	-111.8125	30.8625	-18.6465911865	-2.70686435699	-19.522977829	-1.08805143833
139096	-111.8125	30.8375	-18.6943817139	-2.6875064373	-19.5810623169	-1.07211184502
139097	-111.8125	30.8125	-18.7424144745	-2.66740489006	-19.6407089233	-1.05527341366
139098	-111.8125	30.7875	-18.7906360626	-2.64653730392	-19.7018604279	-1.03750169277
139099	-111.8125	30.7625	-18.8389854431	-2.62488365173	-19.7644615173	-1.01876580715
139100	-111.8125	30.7375	-18.8873996735	-2.60242581367	-19.8284511566	-0.999037563801
139101	-111.8125	30.7125	-18.9358215332	-2.57914710045	-19.8937664032	-0.978291451931
139102	-111.8125	30.6875	-18.9841842651	-2.55503344536	-19.9603424072	-0.956504940987
139103	-111.8125	30.6625	-19.0324268341	-2.5300719738	-20.0281181335	-0.933657944202
139104	-111.8125	30.6375	-19.0804805756	-2.50425195694	-20.0970249176	-0.909732818604
139105	-111.8125	30.6125	-19.128282547	-2.47756409645	-20.1669960022	-0.884714066982
139106	-111.8125	30.5875	-19.1757659912	-2.4500002861	-20.2379684448	-0.858588159084

4.6.2. Modelo de velocidad cortical para el NW de México - Relativo a la Placa Pacífico

El modelo de velocidad propuesto con un desplazamiento absoluto ajustado al marco de referencia ITRF14, muestra a nivel global el desplazamiento de ambas placas tectónicas en conjunto, por lo que se ha realizado el modelo de velocidades interpoladas relativo a una placa fija, es decir, se han evaluado dos casos, el primero relativo a la Placa del Pacífico y el segundo relativo a la Placa Norteamericana, con el fin de evaluar el modelo de deformación y su incertidumbre de forma relativa a cada placa tectónica. Además se ha considerado evaluar las correlaciones y RMSE con base en una validación directa punto a punto, considerando de forma análoga a una validación cruzada un 80 % de velocidades conocidas como valores de entrada y 20 % restante como datos de prueba, sabiendo que este modelo es una inversión del modelo global (Sección 4.6) fijo en una placa tectónica de referencia.

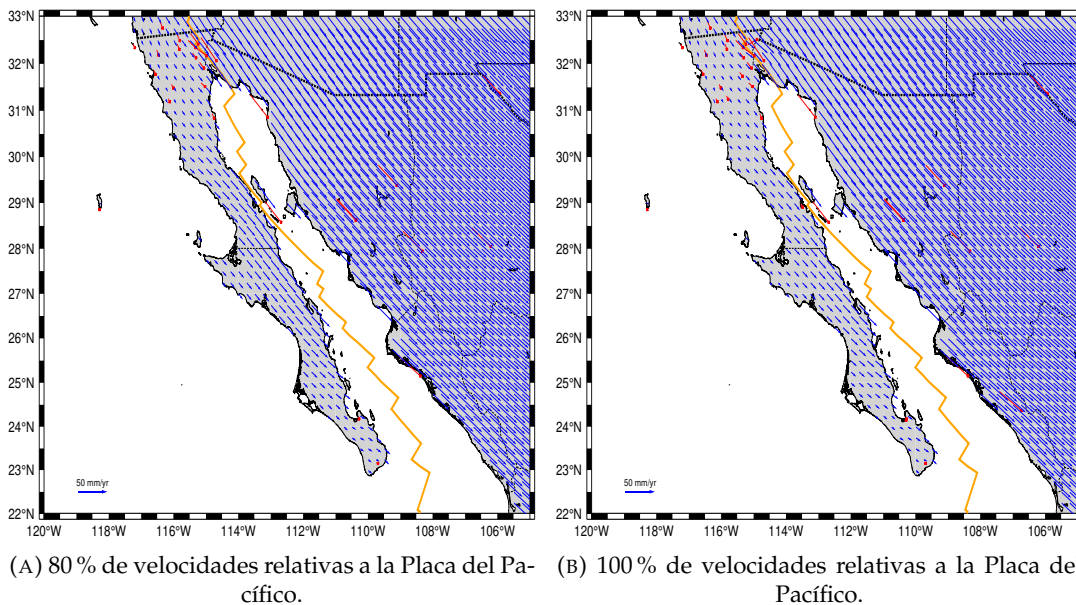


FIGURA 4.26: Modelo de Velocidades horizontales respecto a la Placa del Pacífico, interpoladas mediante funciones de Green con un coeficiente de Poisson de 0.5 considerando acoplamiento elástico. Vectores rojos: velocidades obtenidas del procesamiento en GAMIT/GLOBK. Vectores azules: Velocidades interpoladas en un grid de 15' x 15' de arco.

Con el 80 % de velocidades conocidas, seleccionadas de forma aleatoria, se realiza un nuevo modelo de velocidad interpolada, con el fin de evaluar y validar el comportamiento del modelo NW-MEXVEL relativo a la Placa del Pacífico generado con el 100 % de velocidades conocidas, el cual se muestra en la Figura 4.26b y 4.26a, donde es más evidente el movimiento de la Placa Norteamericana con un desplazamiento en dirección Sureste continuo, definiendo de mejor manera el límite de placa, como lo es en la zona del Norte de Baja California cercano a la falla de San Andrés,

donde los vectores del modelo de velocidad tienden a ser paralelos a las fallas transformantes a lo largo del Golfo de California y los vectores sobre la Península de Baja California (Placa del Pacífico) disminuyen en velocidad.

Asimismo se han evaluado las distribuciones de frecuencia de las velocidades estimadas en los modelos relativos a la Placa del Pacífico, generados con el 80 % y el 100 % de velocidades conocidas. La Figura 4.27 muestra la distribución de los residuales los cuales tienen un comportamiento similar al de una distribución normal en la componente Este y Norte, donde la mayor frecuencia acumulada en la componente Norte está en valores de -1 a 0 mm/año y en la componente Este de -2 a 1 mm/año.

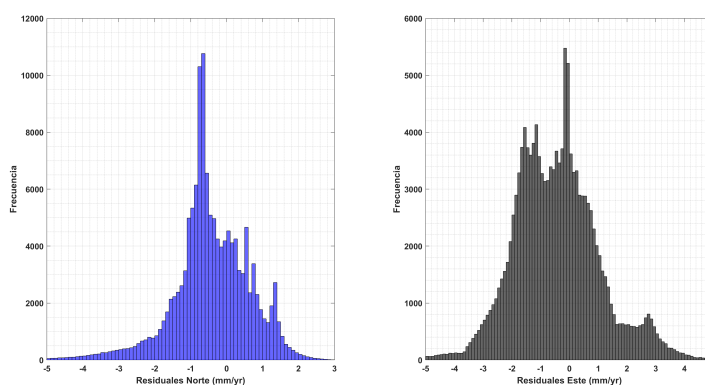


FIGURA 4.27: Residuales horizontales del Modelo NW-MEXVEL relativo a la Placa del Pacífico considerando el modelo generado con el 100 % de las observaciones como modelo de validación respecto al modelo generado con el 80 % de velocidades conocidas.

De igual forma se compararon las velocidades interpoladas del modelo estimado con el 80 % de velocidades conocidas como valores de entrada contra el modelo generado con el 100 % de velocidades conocidas, donde la Figura 4.28a, muestra que la componente Norte del modelo con el 80 % de datos de entrada, estima una menor frecuencia de velocidades en el mismo intervalo que cuando se aplica en 100 % de los datos, por otro lado, el comportamiento para la componente Este no muestra diferencia significativa (Figura 4.28b) como se observa en los gráficos de correlación de la Figura 4.28c y Figura 4.28d, que para la componente Este se tiene un coeficiente de correlación de 0.9968 para el mejor ajuste lineal correspondiente a la ecuación $y = 0.9195x + 0.4880$ y un coeficiente de correlación de 0.9961 para el mejor ajuste lineal correspondiente a la ecuación $y = 0.9233x - 1.0509$. Asimismo se ha calculado el error medio cuadrático (RMSE) con base en la Ecuación 4.3 obteniendo un valor de 0.046 mm/año para la componente Este y de 0.051 mm/año para la componente Norte, por lo que la estimación de las velocidades relativas a la Placa del Pacífico son similares en ambas componentes, siendo fiable para desplazamiento relativos a la Placa del Pacífico mayores a los 0.068 mm/año. La Tabla B.1 del Apéndice B muestra una sección de los datos del grid de prueba. En el Apéndice B.3 se muestran los códigos para la generación de los modelos.

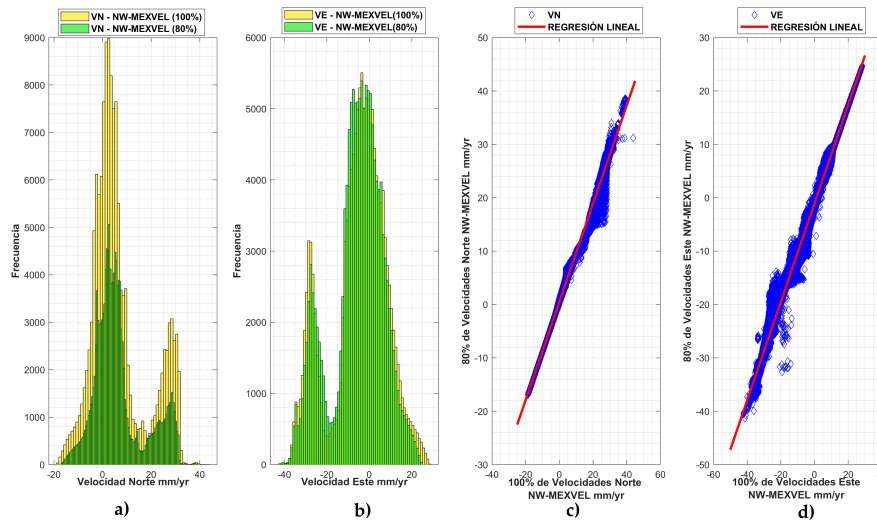


FIGURA 4.28: Validación punto a punto del modelo generado con el 80 % de las velocidades conocidas respecto al modelo generado con el 100 % de velocidades conocidas. a) Histograma de velocidad en la componente Norte. b) Histograma de velocidad en la componente Este. c) Correlación entre las componentes Este-Este. d) Correlación entre las componentes Norte-Norte.

4.6.3. Modelo de velocidad cortical para el NW de México - Relativo a la Placa Norteamericana

De manera similar se ha realizado el modelo de velocidad cortical relativo a la Placa Norteamericana con el objetivo de evidenciar el desplazamiento de la Placa del Pacífico y de forma particular de la Península de Baja California así como de la Isla Guadalupe. Para ello se han realizado dos modelos: el primero utilizando el 80 % de velocidades conocidas relativas a la Placa Norteamericana como se muestra en la Figura 4.29a, el cual será el modelo de prueba. El segundo modelo que se muestra en la Figura 4.29b se ha generado con el 100 % de las velocidades conocidas relativas a la Placa Norteamericana, con el cual se realizará la validación punto a punto, es decir, probar el modelo y su resultado al aplicar sólo el 80 % de datos respecto al 100 %, análogo a una validación cruzada.

Para ambos modelos realizados los vectores de desplazamiento muestran una dirección en sentido Noroeste en todos los vectores de desplazamiento modelados y localizados en la Península de Baja California y en la Isla Guadalupe, que son las principales zonas de interés sobre la Placa del Pacífico. Asimismo los vectores cercanos al límite de placas, son paralelos al fallamiento transformante a lo largo de toda la Península de Baja California. Por otro lado los vectores cercanos al límite de placa sobre la Placa Norteamericana, muestran un desplazamiento en sentido Noroeste también paralelos al fallamiento transformante, sin embargo, al ser considerada como placa fija, los vectores de velocidad tienden a valores de cero e incluso con la inversión de velocidad muestran un cambio de dirección, es por ello que hacia el

Noreste (NE) los vectores de desplazamiento tienen un cambio de dirección, y dado que el modelo considera una superficie elástica sujeta a las fuerzas aplicadas por las velocidades en las estaciones GPS, es que se observa una supuesta formación de dos bloques con diferente velocidad y sentido, no obstante no es recomendable realizar alguna interpretación sobre esta placa, ya que es la misma placa considerada fija para la interpretación de los desplazamientos en la Placa del Pacífico.

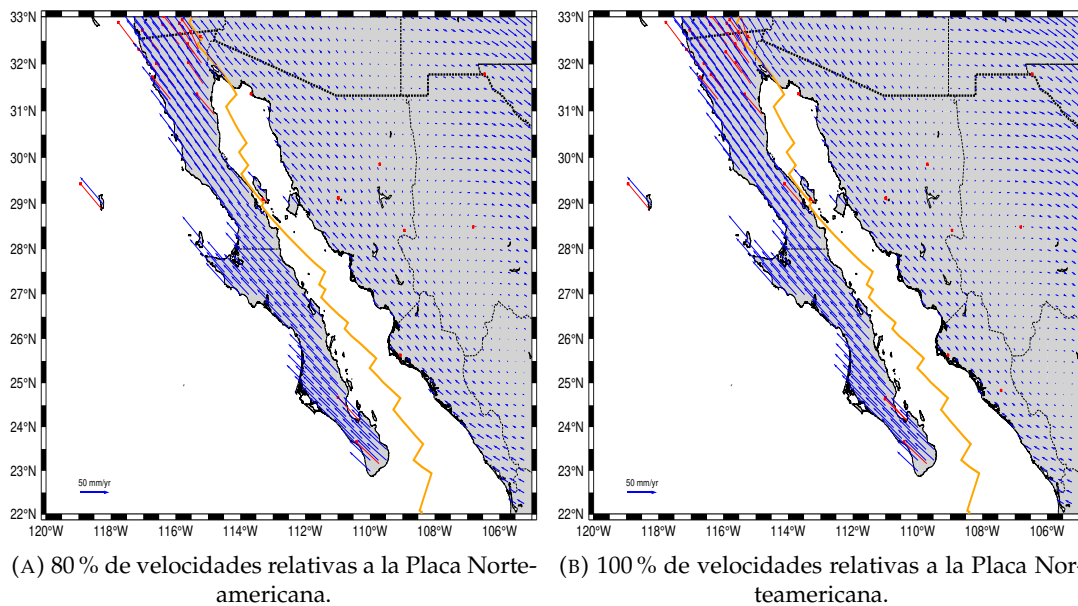


FIGURA 4.29: Modelo de Velocidades horizontales respecto a la Placa Norteamericana, interpoladas mediante funciones de Green con un coeficiente de Poisson de 0.5 considerando acoplamiento elástico. Vectores rojos: velocidades obtenidas del procesamiento en GAMIT/-GLOBK. Vectores azules: Velocidades interpoladas en un grid de $15' \times 15'$ de arco.

Con el fin de evaluar el modelo generado con el 80 % de velocidades conocidas se han generado los residuales respecto al modelo con el 100 % de velocidades conocidas, como se muestra en la Figura 4.30, donde el comportamiento es similar a una distribución normal en ambas componentes, concentrando la mayor acumulación de frecuencia entre valores de -1 a 1 mm/año en la componente Norte y para la componente Este con valores similares -2 y 0 mm/año. En ambas componentes llegan a existir diferencias de hasta 5 mm/año entre el modelo generado con el 80 % de velocidades conocidas y el del 100 % de velocidades, sin embargo las frecuencias acumuladas dentro de estas diferencias (5 mm/año) son mínimas, considerando como referencia las frecuencias acumuladas en los residuales menores a 1 mm/año, por lo que los residuales no son significativos en cantidad y podrían ser despreciables, dando certeza de que el modelo generado con el 80 % de velocidades conocidas tiende a manifestar un desplazamiento similar al modelo original (100 % de velocidades conocidas).

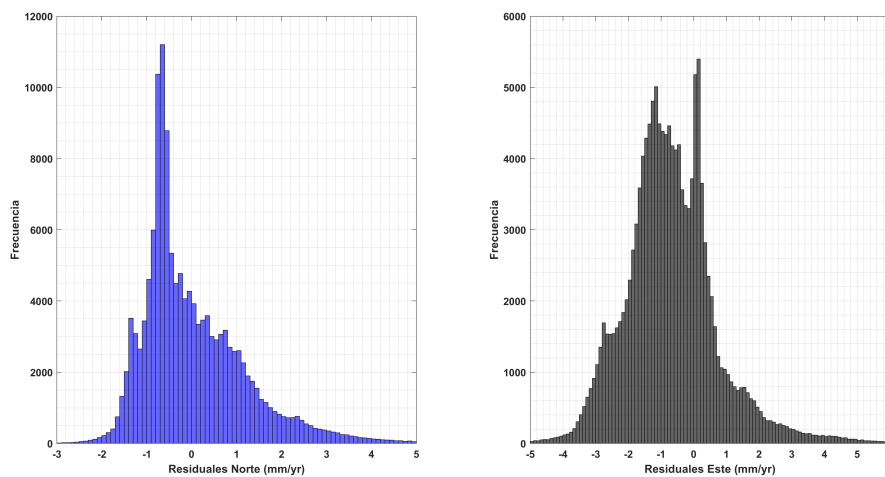


FIGURA 4.30: Residuales horizontales del Modelo NW-MEXVEL relativo a la Placa Norteamericana considerando el modelo generado con el 100 % de las observaciones como modelo de validación.

Por último se ha realizado la validación del modelo de velocidad interpolada, relativo a la Placa Norteamericana mediante la distribución de frecuencias obtenidas en ambos modelos como se muestra en la Figura 4.31a, donde las distribuciones de frecuencias de velocidades son similares entre el modelo con el 100 % de datos conocidos y el modelo generado con sólo el 80 % de velocidades conocidas, por lo que la estimación de la velocidad en la componente Norte relativa a la Placa Norteamericana se estima y comporta equiparablemente entre ambos modelos. Asimismo, la Figura 4.31b representa el comportamiento en la componente Este, donde la distribución de velocidades interpoladas reflejan un comportamiento semejante de ambos modelos, aunque con pequeñas diferencias, sin embargo para poder determinar el porcentaje de semejanza o diferencia se han estimado los correspondientes coeficientes de correlación entre la componente Norte del modelo NW-MEXVEL relativo a la Placa Norteamericana, generado con el 100 % de las velocidades y la componente Norte del mismo modelo obtenido con el 80 % de velocidades. De forma similar se ha calculado el coeficiente de correlación para la componente Este. El resultado de tales coeficientes se muestra en la Figura 4.31c para la componente Norte y en la Figura 4.31d para la componente Este, donde ambos coeficientes gráficamente describen una correlación positiva entre los datos cuyo valor es cercano a uno, es decir una correlación fuerte positiva. La componente Norte con un coeficiente de correlación de 0.996 y la recta de mejor ajuste descrita por $y = 0.9084x - 2.3531$. Por otro lado, la componente Este tiene un coeficiente de correlación de 0.994 descrito por la recta de mejor ajuste por $y = 0.9121x + 1.9161$.

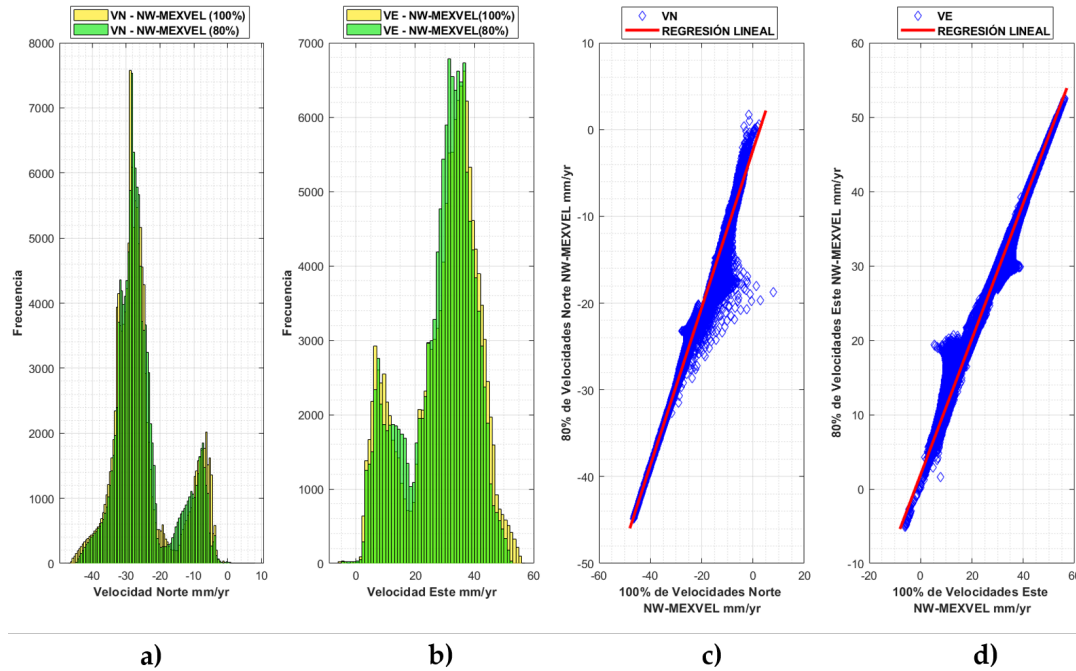


FIGURA 4.31: Validación directa punto a punto del modelo generado con el 80 % de las velocidades conocidas respecto al modelo generado con el 100 % de velocidades conocidas. a) Histograma de velocidad en la componente Norte. b) Histograma de velocidad en la componente Este. c) Correlación entre las componentes Este-Este. d) Correlación entre las componentes Norte-Norte.

Además se ha estimado el error medio cuadrático (RMSE) con base en la Ecuación 4.3, donde se ha considerado el modelo generado con el 100 % de velocidades conocidas como valores de observación y el modelo con el 80 % de velocidades de entrada como valores interpolados. El resultado en la componente Norte es de 0.049 mm/año y para la componente Este un RMSE de 0.046 mm/año, en este sentido se puede decir que el error estimado para ambas componentes es similar al disminuir un 20 % de velocidades conocidas. Con base en lo anterior, el modelo NW-MEXVEL relativo a la Placa Norteamericana muestra fiabilidad en relación a la incertidumbre del error, así como en los correspondientes coeficientes de correlación, siendo dicho modelo fiable para desplazamientos sobre la Placa del Pacífico, y de manera puntual en la Península de Baja California e Isla Guadalupe mayores a los 0.067 mm/año, siendo este el error global estimado.

Finalmente la Tabla B.2 en el Apéndice B, muestra una sección de las velocidades puntuales de cada modelo, correspondiente a las velocidades relativas a la Placa Norteamericana del grid modelado bajo funciones de Green. Asimismo en el Apéndice B.3 se muestran los códigos para la generación de los modelos en formato grid para su libre aplicación.

Capítulo 5

Conclusiones y Discusión

Con base en el análisis e interpretación de las 33 estaciones de operación continua localizadas en el Noroeste de México, pertenecientes a diferentes redes geodésicas de libre acceso, se ha analizado y caracterizado la interacción de las Placas Pacífico - Norteamericana, mediante observaciones geodésicas satelitales GPS. Dando lugar a la obtención de campos de velocidad actuales, considerando 12 años de observación continua. Asimismo se realizó y estimó un modelo de velocidad cortical regional para el Noroeste de México aportando al conocimiento cinemático de la interacción de ambas placas tectónicas y zonas donde no existen estaciones de operación continua.

Derivado del análisis de calidad en las estaciones de operación continua se ha identificado que se ajustan a un mejor desempeño en la recepción de la señal aquellas estaciones con actualizaciones de hardware, software o firmware, mientras que estaciones que no han presentado actualización desde el año 2010 que reporta este análisis, son estaciones que tienden a conservar constantes los valores de los cuatro indicadores de calidad y que con base en la cuidadosa selección de localización y antenas mitigadoras de efecto multitrayectoria, como lo son las antenas tipo Chock Ring y Trimble Zephyr Geodetic (Ray y Senior, 2005) dan lugar a que aquellas estaciones que superan el indicador en dicho efecto no se relacionen con la localización, sino con el ruido presente en las observables de código implícitas en las ecuaciones del cálculo de multitrayectoria. Respecto a la relación señal - ruido, todas las estaciones muestran señales fuertes mayores a 36 dbHz al menos en una banda que con base en los resultados de este estudio es principalmente en la banda L1, esto refuerza que al no existir degradación de la señal, el efecto de multitrayectoria este relacionado al ruido en las observables de código, dando lugar a una relación directamente proporcional entre relación señal - ruido y efecto multitrayectoria, aunque esto no es una regla definida sino el comportamiento identificado en este estudio, ya que en el estado del arte (Zhang y col., 2017; Hatanaka, 2008) se hace mención de una relación inversamente proporcional. En relación a la cantidad de saltos de ciclo por cada mil observaciones se ha identificado que aquellas estaciones que superan 1 salto de ciclo por cada 1000 observaciones, comparten el mismo tipo de receptor por lo que una causa posible es alguna falla en el receptor de la estación como describe Ray y Senior (2005). El cuarto estándar de calidad muestra el porcentaje de integridad de las observaciones posibles, donde todas las estaciones de este análisis a excepción

de dos, se ajustan al estándar de más del 95 % de observaciones posibles, aunque las otras dos estaciones tienen un porcentaje de integridad cercano al propuesto por el IGS. Con base en los indicadores de calidad del IGS, sólo una estación se ajusta a los estándares de calidad propuestos por dicho organismo (MP, SNR, CSR, INT), no obstante 43 de las 46 estaciones superan el 50 % de los indicadores, lo que muestra de forma global que las estaciones de operación continua en este estudio tienen estabilidad y continuidad en los datos generados por lo que son de utilidad para el análisis de deformación cortical terrestre considerando aquellas estaciones con un tiempo de operación continua de al menos 2.5 años.

Por otro lado y derivado del procesamiento con software científico GAMIT/-GLOBK de las 33 estaciones localizadas en el Noroeste de México y 13 del IGS para el ajuste al marco de referencia global ITRF14, se han alcanzado los criterios de calidad que definen un resultado satisfactorio con base en Herring, King y McClusky (2018), como lo es el porcentaje de resolución de ambigüedades de fase que se consideran superiores a los valores recomendados, con un 95.4 % para el carril ancho (WL) y un 92 % para carril estrecho (NL), además los errores medios cuadráticos normalizados (*nrms*) están por debajo del estadístico de chi cuadrada dividido por los grados de libertad de 0.22 logrado un valor promedio para toda la red de procesamiento de 0.179. Además la raíz cuadrática media (*rms*) de los residuales de fase están por debajo de los 10 mm y por lo tanto pueden considerarse como sitios con niveles de ruido no significativos, así como que las incertidumbres estimadas por el módulo GLOBK son menores a los 0.5 mm/año para las tres componentes evaluadas de las 46 estaciones de operación continua, lo que da certeza de un correcto procesamiento bajo la implementación rigurosa de modelos físicos para alcanzar la mejor precisión.

Respecto al análisis de las series temporales de las 33 estaciones localizadas en el Noroeste de México, se realizó la correspondiente limpieza de las series, eliminando valores atípicos mayores a 3σ , así como modelando las discontinuidades o saltos en la serie temporal derivados de actividad sísmica, así mismo se consideró evaluar los efectos estacionales anuales y semianuales que de acuerdo con Blewitt y Lavallée (2002) dan lugar a un sesgo en la velocidad estimada para estaciones con un tiempo de operación menor a los 2.5 años de trabajo continuo. Se ha encontrado que al momento de modelar los efectos estacionales las amplitudes anuales en la estación IHER, con un tiempo de operación de 2.4 años, disminuyen hasta un 60 % en las componentes horizontales y un 30 % en la componente vertical, con diferencia máxima en las componentes horizontales de 0.23 mm/año y en la componente vertical de 0.22 mm/año, adicionalmente el implementar el algoritmo *real sigma* permite una estimación realista de las incertidumbres de velocidad, al combinar ruido blanco más ruido correlado temporalmente (*random walk noise*). Por otro lado, en aquellas estaciones donde se haya identificado alguna actividad sísmica es necesario realizar un

ajuste de tendencia considerando el cálculo mediante TSVIEW, ya que podría sesgarse la estimación de la velocidad, así como no modelar los efectos estacionales, a pesar de que sea una estación con un tiempo de operación prolongado, ejemplo en este estudio es la estación HER2, que de forma experimental se analizó la máxima variación al no realizar el ajuste de tendencia por desplazamiento co-sísmico y efectos estacionales, que en la componente Este llegó a una diferencia de 0.80 mm/año, por lo que un mal tratamiento en la serie temporal puede dar lugar a sesgos significativos, permitiendo una interpretación errónea. Por otro lado, los efectos estacionales tienden a disminuir conforme la estación incrementa en tiempo de operación continua, es decir, menor diferencia en velocidad además de incertidumbres realistas mínimas, como la estación IMIP con más de 11 años de operación continua que muestra variaciones en velocidad menores a los 0.02 mm/año para las tres componentes (E,N,U) e incertidumbre en la componente Norte de ± 0.07 mm/año en la componente Este ± 0.04 mm/año y para la componente vertical de ± 0.18 mm/año. En relación a los campos de velocidad generados mediante la estimación de velocidades e incertidumbres realistas, se ha buscado caracterizar los desplazamientos ajustados a un marco global, así como los movimientos relativos a cada placa tectónica analizada en el Noroeste de México. Se han identificado las velocidades promedio de desplazamiento de cada bloque analizado, es decir, considerando el ajuste al marco global ITRF14, la Placa del Pacífico se desplaza a 47.20 mm/año mientras que la Placa Norteamericana con 12.88 mm/año, sin embargo al ser un marco global el desplazamiento es absoluto por lo que una mejor interpretación entre ambas placa tectónicas es su movimiento relativo. En este sentido se han estimado los correspondientes campos de velocidad que han permitido la evaluación y actualización de los desplazamientos en el Noroeste de México. Por otro lado, se comparó la velocidad promedio estimada a cada campo de velocidad, dando como resultado para la Placa del Pacífico una velocidad de 44.73 mm/año en dirección Noroeste relativa a la Placa Norteamericana y una velocidad de 45.34 mm/año en dirección Sureste para la Placa Norteamericana relativa a la Placa del Pacífico, describiendo un desplazamiento lateral derecho reportado previamente en el estado del arte. Con base en estos resultados y los publicados en modelos tectónicos globales (NUVEL 1-A y MORVEL), la diferencia es de 1 a 4 mm/año para la Placa Norteamericana, y para la Placa del Pacífico entre 5 y 6 mm/año, localizándose esta diferencia en el tercer intercuartil, por lo que la discrepancia esta dentro del rango de velocidades con las que se estimó el desplazamiento como si fueran bloques. Además la estimación en este estudio es de forma regional bajo datos discretos a diferencia de los modelos tectónicos globales (DeMets, Gordon y Argus, 2010), siendo una respuesta probable a la diferencia de velocidad, así como de efectos de deformación local que en las estaciones de operación continua puedan presentarse.

Finalmente, se realizó la propuesta de modelo de velocidad cortical, el cual se ha denominado NW-MEXVEL con el fin de identificar características de deformación

en áreas donde no existen estaciones de operación continua, calculado bajo propiedades de elasticidad típica definida por el coeficiente de Poisson con valor de 0.5, aplicando al conjunto de velocidades horizontales el algoritmo de interpolación manipulado por funciones de Green. Mientras que la validación punto a punto se realizó comparando la solución generada por el modelo GEODVEL 2010. Con ello, se identificó que el modelo NW-MEXVEL al ser estimado con datos regionales caracteriza de mejor forma las velocidades cercanas a los límites interplaca a diferencia del modelo global, teniendo como RMSE del grid de 15' x 15' de arco en la componente Este de 0.052 mm/año y para la componente Norte de 0.116 mm/año por lo que el modelo podría estimar de forma fiable desplazamientos mayores a los 0.127 mm/año, siendo este el error global estimado, con coeficientes de correlación positivos de más del 98 % en ambas componentes. Además para evidenciar las características de desplazamiento, se realizó un modelo NW-MEXVEL relativo a la Placa Norteamericana y uno más relativo a la Placa Pacífico, ambos considerando una validación punto a punto con el modelo generado con el 100 % de velocidades conocidas y comparado contra el comportamiento del modelo obtenido con el 80 % de velocidades conocidas, porcentaje análogo a una validación cruzada. En el modelo interpolado con funciones de Green relativo a la Placa del Pacífico, muestra como los vectores sobre la Placa Norteamericana son paralelos al fallamiento transformante en dirección Sureste así como las islas del Golfo de California (San Ángel y Tiburón) lo que concuerda con la pertenencia de ambas islas al movimiento de la Placa Norteamericana, mientras que las velocidades en la Península de Baja California disminuyen. De forma opuesta, el modelo relativo a la Placa Norteamericana disminuye en velocidad los vectores sobre la misma placa tectónica y en la Placa Pacífico los vectores muestran el desplazamiento paralelo al fallamiento transformante en dirección Noroeste aún en la Isla Guadalupe. En ambos modelos se han identificado coeficientes de correlación superiores al 98 % en las velocidades de cada componente, y con base en el RMSE de cada modelo, se tiene fiabilidad en desplazamientos sobre la Placa del Pacífico mayores a los 0.068 mm/año y para la Placa Norteamericana fiabilidad para desplazamientos mayores a los 0.067 mm/año incluso en las islas del Golfo de California (San Ángel y Tiburón) y la Isla Guadalupe sobre la Placa del Pacífico, por lo que el modelo regional propuesto ha demostrado fiabilidad en la estimación de velocidad, principalmente en los límites de placa con una menor incertidumbre al modelo global de referencia, dado el uso de velocidades puntuales en zonas críticas de estimación como lo son velocidades en islas que pertenezcan a una placa o estén sobre la placa, así como velocidades cercanas a los límites de placa.

5.1. Aporte científico - social

Los avances en el ámbito geodésico están en relación a la forma, figura, campo de gravedad y orientación de la Tierra así como sus variaciones temporales. Recientemente en el año 2015 la Asamblea General de las Naciones Unidas ha adoptado la resolución de un Marco de Referencia Geodésico Global (GGRF) con el fin de proveer a los tomadores de decisiones de productos y servicios de la más alta calidad y fiabilidad en lo referente a los cambios en el sistema terrestre, manejo en desastres naturales, monitoreo del nivel del mar y cambio climático, siendo algunas de las principales preocupaciones a nivel social que buscan atenderse bajo los requerimientos de globalización e interoperabilidad de servicios y productos espaciales.

Con este preámbulo, este estudio ha realizado una caracterización geodinámica bajo observaciones geodésicas satelitales considerando aportar al conocimiento cinemático de la corteza terrestre en el Noroeste de México, con la propuesta de un modelo de velocidad cortical bajo los fundamentos de interpolación por funciones de Green y acoplamiento elástico, con la finalidad de observar desplazamientos en áreas donde no existan estaciones de operación continua GNSS. Se ha identificado que es posible determinar con alta fiabilidad desplazamientos absolutos al ITRF14 mayores a los 0.127 mm/año y relativos a la Placa Pacífico de 0.068 mm/año y para la Placa Norteamericana de 0.067 mm/año, mejorando la determinación de desplazamientos en el área de estudio en relación a los modelos tectónicos globales generados bajo observaciones geológicas principalmente. Es así que el modelo propuesto denominado NW-MEXVEL contribuye a caracterizar las variaciones temporales que la corteza terrestre pueda presentar durante el periodo analizado. Por otro lado, esta primer propuesta de modelo de velocidad cortical puede favorecer en la toma de decisiones en relación a la actualización de marco de referencia que México ha adoptado para las múltiples actividades desarrolladas en el país, considerando que este estudio se llevó a cabo en el ITRF14 (vigente durante el desarrollo de esta tesis) a diferencia del legal en México (ITRF08 época 2010.0).

Durante la finalización de este trabajo, ha sido liberada una actualización para migrar al ITRF2020, por lo que este análisis, realizado en un marco de referencia distinto al legal en México, muestra evidencia del adecuado ajuste y precisión en el ITRF14 para el Noroeste de México, lo que puede favorecer en la decisión de migrar a un marco de referencia actual y por lo tanto contribuir en los objetivos hacia un Marco de Referencia Geodésico Global, así como en los propios del país, como lo son: cartografía, límites nacionales e internacionales, subsidencia y desplazamientos de terrenos, tectónica de placas, deformaciones corticales, entre otros.

5.2. Trabajo Futuro

Derivado del los resultado obtenidos se plantean los siguientes trabajos futuros:

- Analizar el tiempo probable por el que el modelo NW-MEXVEL puede ser válido.
- Replicar el experimento a zonas de mayor cobertura como lo puede ser todo el territorio Mexicano.
- En presencia de actividad sísmica de gran magnitud actualizar las velocidades para el modelo de interpolación.
- Incorporar al análisis, velocidades procesadas por instituciones que cuenten con redes geodésicas de no libre acceso con el fin de refinar el modelo NW-MEXVEL.
- Aplicar otra técnica de procesamiento GNSS como PPP para actualizar el campo de velocidad y modelo de velocidad regional NW-MEXVEL
- Analizar la factibilidad de aplicación del software PRIDE PPP-AR
- Realizar un análisis de bloques bajo el algoritmo de K-medias (*K-means*)
- Considerar el análisis de la componente vertical para futuras actualizaciones del modelo 2D a 3D.

5.3. Productos generados

Ponencias

16/01/2023. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Tema: Caracterización Geodinámica de las placas Pacífico - Norteamericana en el noroeste de México a través de observaciones GPS.

07/01/2022. Programa de difusión de la oferta educativa de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa. Tema: Mi Futuro en la Geomática y Geodesia.

12/11/2021. Reunión Anual 2021 Unión Geofísica Mexicana. Tema: Análisis de calidad de las observaciones GPS y su impacto en el posicionamiento preciso. caso de estudio: redes geodésicas GNSS de libre acceso en México.

Cartel

31/10/2023. Análisis estadístico – comparativo de línea base geodésica a través de receptores GNSS de bajo costo y mediciones electrónicas de distancia con fines topógrafo – geodésicos. Reunión Anual 2022 **Unión Geofísica Mexicana (RAUGM 2022)**.

Artículos

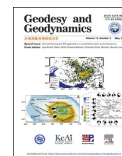
Hernández-Andrade, D., Romero-Andrade, R., Sharma, G., Trejo-Soto, M. E., and Cabanillas-Zavala, J. L. (2022). Quality assessment of Continuous Operating Reference Stations (CORS) - GPS stations in Mexico. *Geodesy and Geodynamics*, 13. [https : //doi.org/10,1016/j.geog,2021,12,003](https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.12.003)

Hernández-Andrade, D., Lacy-Pérez de los Cobos, M. C., Romero-Andrade, R., Trejo-Soto, M. E. (2023). Statistical comparison of geodetic baseline for topographic-geodetic purposes using Low-cost GNSS receiver and Electromagnetic Distance Measurement. *Journal of Surveying Engineering*, xx. [https : //doi.org/xx.xxxx/](https://doi.org/xx.xxxx/)



Contents lists available at ScienceDirect

Geodesy and Geodynamics

journal homepage: <http://www.keaipublishing.com/geog>

Quality assessment of Continuous Operating Reference Stations (CORS) - GPS stations in Mexico

Daniel Hernández-Andrade ^{a,*}, Rosendo Romero-Andrade ^{a,*}, Gopal Sharma ^b,
Manuel E. Trejo-Soto ^a, Juan L. Cabanillas-Zavala ^a

^a Faculty of Earth and Space Sciences, Autonomous University of Sinaloa, 80013, Culiacán Rosales, Sinaloa, Mexico

^b North Eastern Space Applications Centre, Umiam, 793103, Meghalaya, India



ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 May 2021

Accepted 20 December 2021

Available online 10 February 2022

Keywords:

Multipath effect

Signal-to-Noise ratio

Cycle slip

Integrity

Regional quality indicators

IGS indicators

ABSTRACT

The present analysis provided the quality assessment of 65 Continuous Operating Reference Stations (CORS) situated in and around Mexico using the data of about ten years (January 2010 to January 2020). To accomplish the assessment, we considered 4 quality indexes for performing the quality check, including the multipath effect on L1 and L2 bands, signal-to-noise ratio in both bands, cycle slips, and integrity. Meanwhile, a new reference parameter named regional values for Mexico (RVM) was calculated for the stations situated in Mexico. Additionally, an exhaustive analysis of the quality indicators in the worst and best cases was performed. The signal degradation was proved by a long-term time series and crustal deformation analysis in GAMIT/GLOBK platform. The results showed a strong correlation between integrity, cycle slips and daily observations time, and the multipath effect is strong in the case of outdated systems. The study indicates that the estimated quality indexes and values could be the basis for establishing new CORS in Mexico, and the errors corrections which cannot be mitigated in the post-processing stage would greatly help utilize the data for different scientific applications. The results were supported by deformation analysis in part of Baja California Peninsula in Mexico indicating northern and eastern velocity vector of -3.08 ± 0.02 mm/yr, -7.85 ± 0.02 mm/yr and -0.07 ± 0.03 mm/yr, -9.33 ± 0.02 mm/yr respectively at MPR1 and INEG stations.

© 2022 Editorial office of Geodesy and Geodynamics. Publishing services by Elsevier B.V. on behalf of KeAi Communications Co. Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introduction

With the advance of the Global Navigations Satellite System (GNSS) and permanent geodetic networks, studies such as crustal deformation and geodynamic [1–6], monitoring and mapping [7], ionospheric total electron content (TEC) variations before the occurrence of earthquakes have been carried out [8–15] due to the high accuracy in positioning and a well-known structured signal in GNSS data [16]. Seismic and geodetic data were also used to

determine the velocity field in collision intraplate zones for tectonic study and to evaluate of the strain accumulations [17–19]. One of the main aspects to consider in the GNSS related applications is the quality check of the GNSS observations [17–21]. The GNSS signals are affected by different factors such as systematic errors, antenna phase center, ephemeris errors, cycle slips, multipath effect, ionospheric and tropospheric effects, receiver noise, and other factors to degrade the results leading to erroneous estimates [20–25]. Many organizations have installed CORS worldwide, which can share GNSS data such as Global Positioning System (GPS) and other constellations enabling researchers to carry out the scientific analysis. GNSS data are being shared through different geodetic global networks such as International GNSS Service (IGS) and regional networks such as National Geodetic Survey (NGS), University NAVSTAR Consortium (UNAVCO) and Active National Geodetic Network (RGNA). With the introduction of many constellations like Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), Galileo, GLO-NASS, and Beidou/Compass, the received signals in the geodetics

* Corresponding author.

E-mail address: r.romero11@info.uas.edu.mx (R. Romero-Andrade).

Peer review under responsibility of Institute of Seismology, China Earthquake Administration.



Production and Hosting by Elsevier on behalf of KeAi

<https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.12.003>

1674-9847/© 2022 Editorial office of Geodesy and Geodynamics. Publishing services by Elsevier B.V. on behalf of KeAi Communications Co. Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

**Statistical comparison of geodetic baseline for topographic-geodetic purposes
using Low-cost GNSS receiver and Electromagnetic Distance Measurement**

Daniel Hernández Andrade¹, María Clara de Lacy Pérez de los Cobos², Rosendo Romero
Andrade³, and Manuel E. Trejo Soto⁴

¹Faculty of Earth and Space Sciences, Autonomous University of Sinaloa, Mexico.

²Department of Applied Mathematics and Data Science, University of San Pablo Ceu, Madrid,
Spain.

³Faculty of Earth and Space Sciences, Autonomous University of Sinaloa, Mexico.

Corresponding Author. Email: r.romero11@info.uas.edu.mx

⁴Faculty of Earth and Space Sciences, Autonomous University of Sinaloa, Mexico.

ABSTRACT

The concurrent research compares the results of a geodetic baseline through Global Navigation Satellite Systems (GNSS) measurements with Low-cost GNSS receivers, geodetic receivers and additionally Electronic Distance Measurements (EDM) with a total station, in order to determine whether Low-cost GNSS receivers and antennas are suitable for topographic-geodetic work depending on the precision obtained. Fifteen different campaigns were carried out (October 4 - 8, 2022) with five different combinations of receivers and antennas for the establishment of the baseline: Geodetic GNSS equipment – Geodetic GNSS equipment, Geodetic GNSS equipment – Low-cost GNSS kit, Low-cost GNSS kit – Geodetic GNSS equipment, Low-cost GNSS receiver with geodetic antenna – Low-cost GNSS receiver with geodetic antenna, and Low-cost GNSS kit – Low-cost GNSS kit. It is important to note that the Low-cost GNSS kit includes the C099-F9P application board for ZED-F9P of U-Blox with patch antenna U-Blox ANN-MB-00 multi-band GNSS antenna and ground plane. Similarly, another EDM campaign was realized (October 10,

5.4. Retribución social

- Taller en la Universidad Autónoma de Sinaloa, México (UAS): “Conceptos de alta precisión en GNSS y procesamiento de las observaciones GNSS mediante software científico: PRIDE PPP-AR, RTKLib y CSRS-PPP”



FIGURA 5.1: Impartición de Taller en la Universidad Autónoma de Sinaloa, México (UAS)

- Curso-Taller en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México (BUAP): "Posicionamiento preciso mediante receptores GNSS de bajo coste y procesamiento con software de libre acceso"



FIGURA 5.2: Impartición de Curso-Taller en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México (BUAP)

- Curso-Taller en la Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador (UTPL): "Posicionamiento preciso mediante receptores GNSS de bajo coste y procesamiento con software de libre acceso"

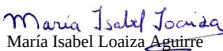


Dra. María Isabel Loaiza, **Directora de Innovación, Formación y Evaluación Docente del Vicerrectorado Académico de la Universidad Técnica Particular de Loja,**

Certifica:

Que el **ING. DANIEL HERNÁNDEZ ANDRADE**, participó en calidad de **EXPOSITOR** del curso **"POSICIONAMIENTO PRECISO MEDIANTE RECEPTORES GNSS DE BAJO COSTO Y PROCESAMIENTO CON SOFTWARE DE LIBRE ACCESO"**, dirigido a los docentes del departamento de Geociencias de la UTPL, del 3 al 10 de abril de 2023, con una duración de 40 horas.

Loja, abril de 2023


María Isabel Loaiza Aguirre
Directora de Innovación, Formación y Evaluación Docente
Vicerrectorado Académico



San Cayetano Alto s/n
Loja-Ecuador
Telf.: (593-7) 370 1444
informacion@utpl.edu.ec
Apartado Postal: 11-01-608
www.utpl.edu.ec

FIGURA 5.3: Impartición de Curso-Taller en la Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador (UTPL)

Apéndice

Apéndice A

Series temporales GPS

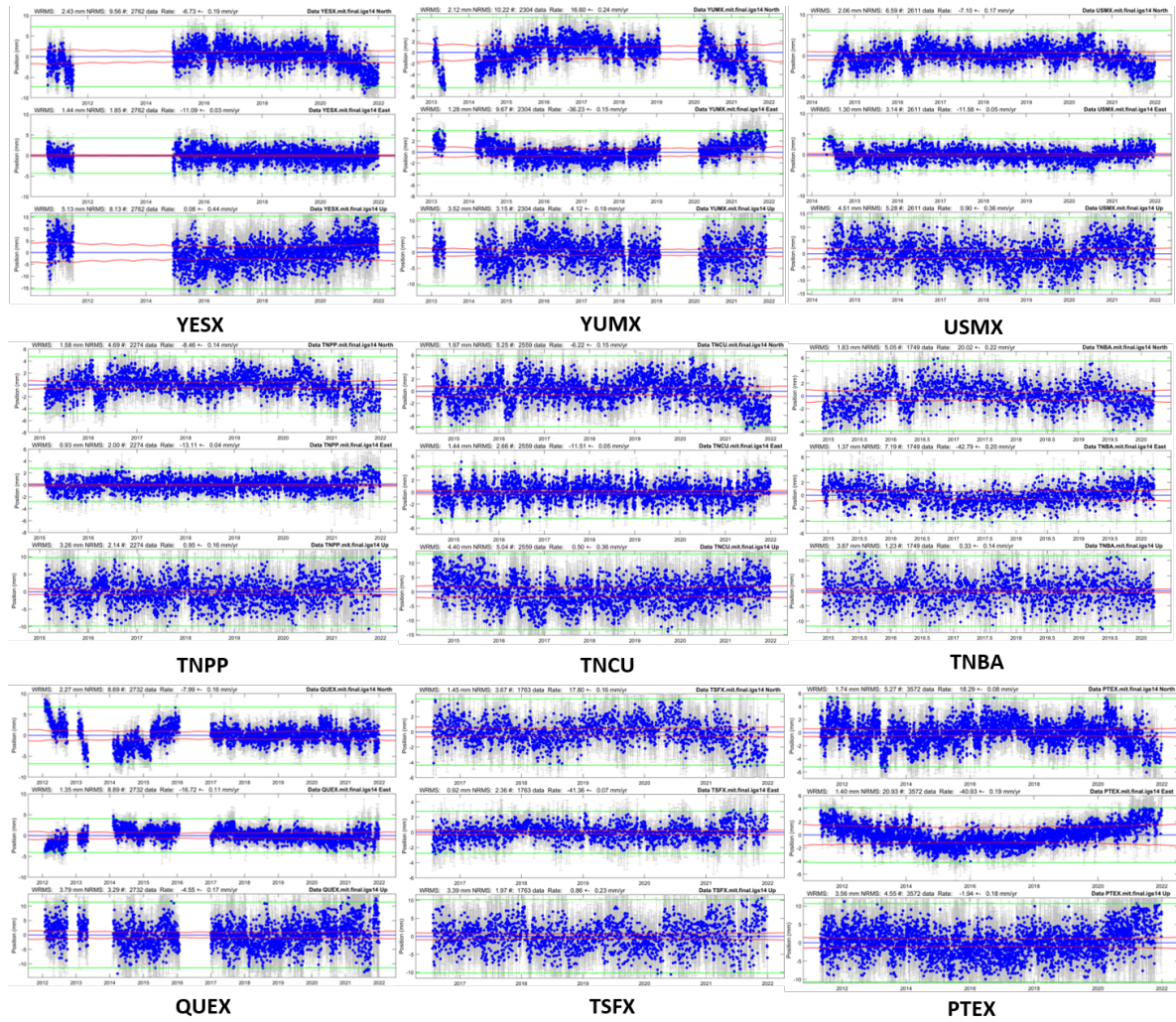


FIGURA A.1: Series temporales analizadas en este estudio con efecto anual y semianual removido ajustadas al marco ITRF14. Estaciones localizadas en el Noroeste de México.

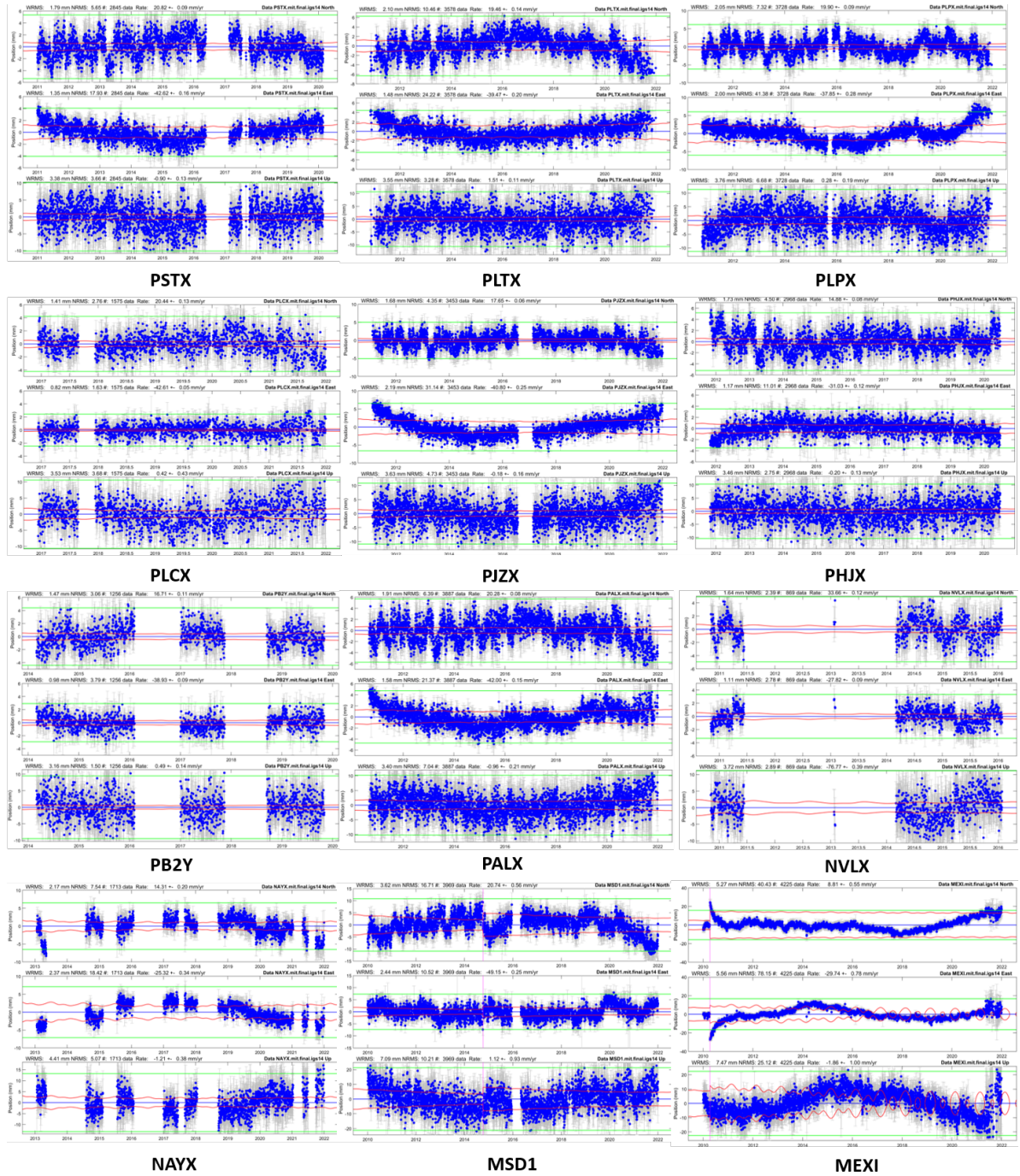


FIGURA A.2: Series temporales analizadas en este estudio con efecto anual y semianual removido ajustadas al marco ITRF14. Estaciones localizadas en el Noroeste de México *continuación*.

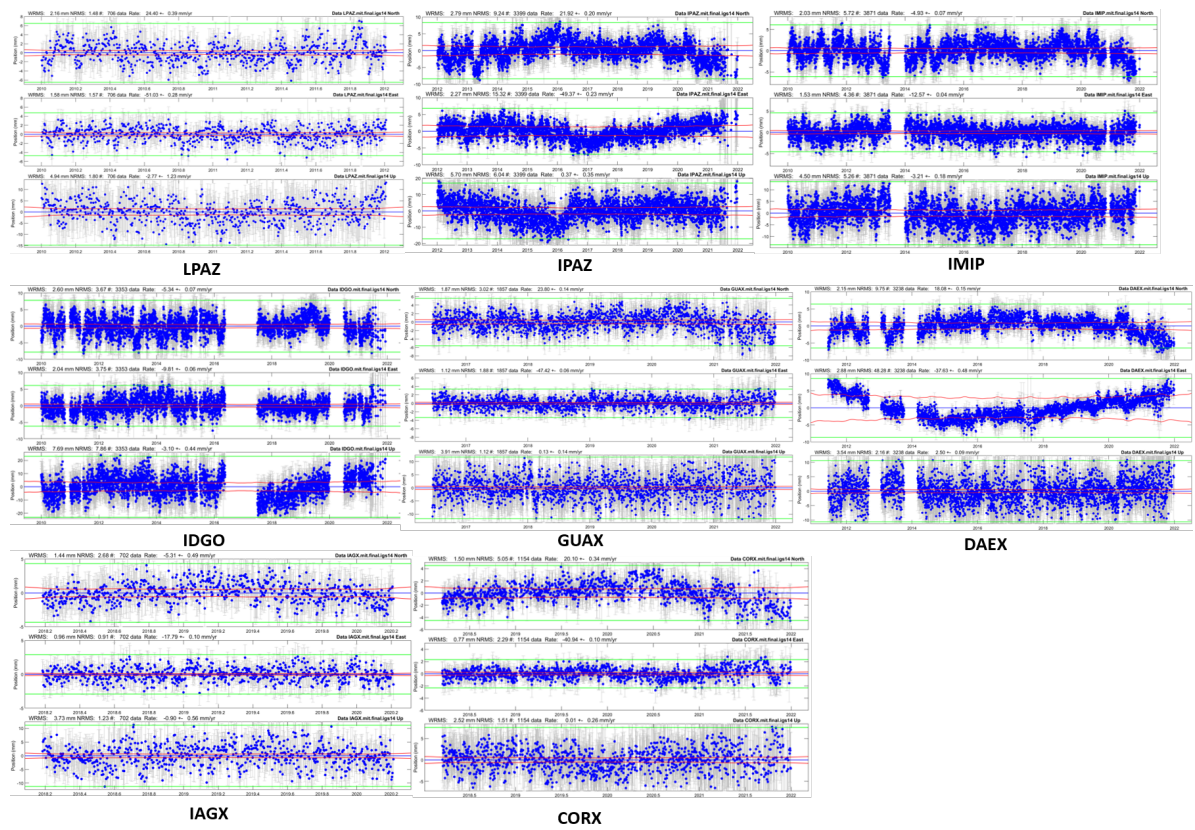


FIGURA A.3: Series temporales analizadas en este estudio con efecto anual y semianual removido ajustadas al marco ITRF14. Estaciones localizadas en el Noroeste de México *continuación*.

Apéndice B

Datos del modelo NW-MEXVEL

B.1. Velocidades del modelo NW-MEXVEL relativas a la Placa del Pacífico

TABLA B.1: Velocidades interpoladas mediante funciones de Green y acoplamiento elástico para el modelo propuesto NW-MEXVEL relativo a la Placa del Pacífico con el 80 % de velocidades conocidas y como datos de validación velocidades generadas con el 100 % de velocidades estimadas

No	Long	Lat	NW MEXVEL PAC 80 %		NW MEXVEL PAC 100 %	
			V_E mm/yr	V_N mm/yr	V_E mm/yr	V_N mm/yr
1	-112.8125	33.1125	-6.83588600159	8.23627948761	-7.71129369736	7.48265028
2	-112.8125	33.0875	-6.88991832733	8.25000667572	-7.74907207489	7.49633073807
3	-112.8125	33.0625	-6.94394922256	8.26331806183	-7.7866396904	7.50957727432
4	-112.8125	33.0375	-6.99798965454	8.27623176575	-7.824010849	7.52239704132
5	-112.8125	33.0125	-7.05204916	8.28876304626	-7.86120033264	7.53479909897
6	-112.8125	32.9875	-7.10613632202	8.30093288422	-7.89822101593	7.54679346085
7	-112.8125	32.9625	-7.16025733948	8.31276226044	-7.93508672714	7.55839300156
8	-112.8125	32.9375	-7.21441650391	8.32427406311	-7.97180843353	7.56961107254
9	-112.8125	32.9125	-7.26861667633	8.33549213409	-8.00839710236	7.58046293259
10	-112.8125	32.8875	-7.32285785675	8.34644317627	-8.04486179352	7.59096574783
11	-112.8125	32.8625	-7.37713813782	8.35715579987	-8.08121013641	7.60113811493
12	-112.8125	32.8375	-7.43145132065	8.36765861511	-8.11744880676	7.61100006104
13	-112.8125	32.8125	-7.48579025269	8.37798309326	-8.15357971191	7.6205739975
14	-112.8125	32.7875	-7.54014396667	8.38816261292	-8.18960571289	7.62988376617
15	-112.8125	32.7625	-7.59449768066	8.39823055267	-8.22552585602	7.63895368576
16	-112.8125	32.7375	-7.64883422852	8.40822315216	-8.2613363266	7.64781141281
17	-112.8125	32.7125	-7.70313119888	8.41817569733	-8.29703140259	7.65648460388
18	-112.8125	32.6875	-7.75736427307	8.42812824249	-8.33260250092	7.66500377655
19	-112.8125	32.6625	-7.8115029335	8.43811798096	-8.36803627014	7.67339944839
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

139081	-112.8125	32.6125	-7.9193611145	8.45837020874	-8.43842697144	7.68995094299
139082	-112.8125	32.5875	-7.97300004959	8.46871376038	-8.47334003448	7.69817495346
139083	-112.8125	32.5625	-8.02638435364	8.47925853729	-8.50803184509	7.70641088486
139084	-112.8125	32.5375	-8.07946205139	8.49004459381	-8.54246902466	7.71469497681
139085	-112.8125	32.5125	-8.13217735291	8.50111484528	-8.57661819458	7.7230629921
139086	-112.8125	32.4875	-8.18446826935	8.51250934601	-8.61043739319	7.73155260086
139087	-112.8125	32.4625	-8.23626804352	8.524269104	-8.64388370514	7.74019908905
139088	-112.8125	32.4375	-8.28750705719	8.53643321991	-8.67690753937	7.74903964996
139089	-112.8125	32.4125	-8.33810806274	8.54904174805	-8.70945644379	7.75811004639
139090	-112.8125	32.3875	-8.38798904419	8.56213188171	-8.74147033691	7.76744508743
139091	-112.8125	32.3625	-8.43706607819	8.57573699951	-8.77288722992	7.77707862854
139092	-112.8125	32.3375	-8.48524665833	8.58989238739	-8.8036403656	7.78704214096
139093	-112.8125	32.3125	-8.53243637085	8.60462760925	-8.83365726471	7.79736614227
139094	-112.8125	32.2875	-8.57853507996	8.61997032166	-8.8628616333	7.80807876587
139095	-112.8125	32.2625	-8.62343883514	8.63594436646	-8.89117336273	7.81920385361
139096	-112.8125	32.2375	-8.66704177856	8.65257072449	-8.91850852966	7.83076238632
139097	-112.8125	32.2125	-8.70923233032	8.66986274719	-8.94477939606	7.84277200699
139098	-112.8125	32.1875	-8.7498960495	8.68783092499	-8.96989440918	7.85524463654
139099	-112.8125	32.1625	-8.78891944885	8.70647907257	-8.99376296997	7.86818742752
139100	-112.8125	32.1375	-8.82618427277	8.72580528259	-9.01629066467	7.88160037994
139101	-112.8125	32.1125	-8.86157417297	8.74579715729	-9.03738117218	7.89547729492
139102	-112.8125	32.0875	-8.89497280121	8.76643657684	-9.05694103241	7.90980434418
139103	-112.8125	32.0625	-8.92626667023	8.78769493103	-9.07487678528	7.92455911636
139104	-112.8125	32.0375	-8.95534610748	8.8095331192	-9.09110069275	7.93970870972
139105	-112.8125	32.0125	-8.98210525513	8.83190250397	-9.10552692413	7.95521068573
139106	-112.8125	31.9875	-9.00644874573	8.8547410965	-9.11807823181	7.9710111618

B.2. Velocidades del modelo NW-MEXVEL relativas a la Placa Norteamericana

TABLA B.2: Velocidades interpoladas mediante funciones de Green y acoplamiento elástico para el modelo propuesto NW-MEXVEL relativo a la Placa Norteamericana con el 80 % de velocidades conocidas y como datos de validación velocidades generadas con el 100 % de velocidades estimadas

No	Long	Lat	NW MEXVEL NA 80 %		NW MEXVEL NA 100 %	
			V_E mm/yr	V_N mm/yr	V_E mm/yr	V_N mm/yr
1	-108.8625	31.3375	34.4995040894	-31.0348434448	33.5782432556	-30.5957355499
2	-107.2375	30.3125	39.8030090332	-31.2681045532	38.6819763184	-30.5957355499
3	-110.9125	33.6375	31.2302131653	-30.5122661591	29.6271858215	-30.5956897736
4	-109.8625	32.3875	32.6062965393	-30.7697982788	31.4126930237	-30.5956859589
5	-109.4625	31.9375	33.2207946777	-30.8765964508	32.1660232544	-30.5952167511
6	-110.3125	32.9125	31.9988937378	-30.6544513702	30.6335983276	-30.5952072144
7	-109.6875	32.1875	32.8601913452	-30.8159103394	31.7302036285	-30.5951919556
8	-108.6875	31.1875	34.9765090942	-31.0766105652	34.0698852539	-30.5950908661
9	-107.0125	30.1375	40.502494812	-31.275100708	39.3401031494	-30.5949573517
10	-105.6625	27.8375	42.2169418335	-31.3268470764	40.9155807495	-30.5946292877
11	-105.7625	28.0375	41.9060554504	-31.3290977478	40.6944160461	-30.5945663452
12	-107.4125	30.4125	39.218624115	-31.2591457367	38.1382369995	-30.594493866
13	-106.9625	30.0875	40.6448287964	-31.2761516571	39.4761199951	-30.5942764282
14	-106.3375	29.0375	41.3601036072	-31.3148899078	40.2550964355	-30.5939712524
15	-111.1125	33.8875	30.9862098694	-30.4641227722	29.3040962219	-30.5939407349
16	-106.9875	30.1125	40.5741958618	-31.2748756409	39.4086265564	-30.593914032
17	-108.5625	31.0875	35.3437461853	-31.1039390564	34.4407272339	-30.5939121246
18	-106.4125	29.2125	41.4803276062	-31.3050174713	40.3437309265	-30.5938415527
19	-106.6625	29.6875	41.3272132874	-31.288274765	40.1489143372	-30.5937671661
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
139081	-110.8125	33.5125	31.3519649506	-30.5333957672	29.7897701263	-30.5935707092
139082	-105.3875	27.2375	42.8926086426	-31.3176040649	41.2948265076	-30.5935459137
139083	-107.7125	30.5625	38.1830787659	-31.2369785309	37.1737174988	-30.5931797028
139084	-106.1875	28.7125	40.9990463257	-31.3355007172	39.9664764404	-30.5930633545
139085	-107.6625	30.5375	38.3570823669	-31.2411365509	37.336391449	-30.593044281
139086	-107.4625	30.4375	39.0481834412	-31.2547931671	37.9800415039	-30.5929203033
139087	-107.7625	30.5875	38.0090560913	-31.2319793701	37.0107460022	-30.5928649902
139088	-109.4875	31.9625	33.1760444641	-30.8674964905	32.1144828796	-30.5928325653
139089	-106.0375	28.4875	41.1118049622	-31.336938858	40.0673713684	-30.5927772522
139090	-110.0375	32.5875	32.361579895	-30.7212028503	31.103477478	-30.5927619934

139091	-107.6125	30.5125	38.5308265686	-31.2446956635	37.4985618591	-30.5926799774
139092	-105.6875	27.8875	42.1408653259	-31.3250846863	40.8627357483	-30.5924892426
139093	-108.8375	31.3125	34.5644683838	-31.0378036499	33.6470222473	-30.5924472809
139094	-105.0125	26.4375	43.3883857727	-31.321598053	41.3277893066	-30.5924129486
139095	-106.6625	31.8625	36.9921264648	-31.0317821503	35.9507789612	-30.5923957825
139096	-107.5625	30.4875	38.7040786743	-31.2479381561	37.6600265503	-30.5923423767
139097	-107.5125	30.4625	38.8766021729	-31.2511863708	37.8205833435	-30.5923156738
139098	-105.7375	27.9875	41.985004425	-31.3259029388	40.7518157959	-30.5921974182
139099	-110.1875	32.7625	32.1599502563	-30.6823577881	30.8445415497	-30.5920982361
139100	-107.8125	30.6125	37.8352470398	-31.2259368896	36.8476905823	-30.5919189453
139101	-109.7125	32.2125	32.8188056946	-30.8057594299	31.6816005707	-30.5917263031
139102	-105.2625	26.9625	43.10414505	-31.3118000031	41.3546295166	-30.5917205811
139103	-105.7125	27.9375	42.0634346008	-31.324672699	40.808052063	-30.5915966034
139104	-109.8875	32.4125	32.5662155151	-30.759059906	31.3652534485	-30.5915527344
139105	-110.5875	33.2375	31.6359100342	-30.5841960907	30.1641578674	-30.5914669037
139106	-110.4625	33.0875	31.7976398468	-30.6138629913	30.3753223419	-30.5912475586

B.3. Interpolación mediante funciones de Green en GMT 6

```
#!/bin/bash
#
# Use real GPS data with uncertainties
#
#D=wus_gps_final_crowell.dat
#D=VEL_ITRF14.dat
#D=VEL_GEODVEL.dat
#D=VEL_NORTH.dat
D=VEL_PACIFIC.dat
#R=-R122.5W/115W/32.7N/38N
R=-R122W/105W/22N/34N
#R=-R118.5W/115.2W/33.0N/34.5N
#
# clean out old files
#
rm -f data.lluv
#
# reformat the data and set the minimum sigma
#
gmt select $D $R -fg | awk '{su=_($5<_.6_?_.6_:_$5);\
sv=_($6<_.6_?_.6_:_$6); print($1,$2,$3,$4,su,sv)}' > data.lluv
```

```

#!/bin/bash
#
#  set the bounds
#
#R=-R122.5W/115W/32.7N/38N
R=-R122W/105W/22N/34N
#R=-R118.5W/115.2W/33.0N/34.5N
#
#  clean out old files
#
rm -f *.nc
rm -f *.grd
rm -f gmt*
#
# Use blockmean to avoid aliasing
gmt blockmean $R -I1m data.lluv -fg -i0,1,2,4 -W > blk.llu
gmt blockmean $R -I1m data.lluv -fg -i0,1,3,5 -W > blk.llv
gmt convert -A blk.llu blk.llv -o0-2,6,3,7 > tmp.lluv
#
# change some of the e-component of the vectors
#
awk '{ if ($1 > -116.6 && $1 < -116.5 && $2 > 33.5 && $2 < 33.7) \
print($1,$2,-$3,$4,5*$5,5*$6); else print($0); } ' < tmp.lluv > blk.lluv
#
#  do the gridding.
#
#gmt gpsgridder $R -I.01 -Gtmp_%s.nc blk.lluv -fg -Vl -Fd4 -r\\
#-Cn700+eigen.txt -S0.50 -W

gmt gpsgridder $R -I.025d -Gtmp_%s.nc blk.lluv -fg -Vl -Fd1 -r\\
-Cn700+eigen.txt -S0.50 -W
#
mv tmp_u.nc GPS_u.grd
mv tmp_v.nc GPS_v.grd
ln -s GPS_u.grd ve_tot.grd
ln -s GPS_v.grd vn_tot.grd
echo "Created_GPS_u.grd_and_GPS_v.grd"

```

```
#!/bin/bash
#
# make a plot of GPS velocity vectors
#
rm -f map_uv.ps map_uv.pdf
#
D=blk.lluv
#R=-R122.5W/115W/32.7N/38N
R=-R120W/105W/22N/33N
#R=-R118.5W/115.2W/33.0N/34.5N
U=GPS_u.grd
V=GPS_v.grd
gmt gmtset FORMAT_GEO_MAP = dddF
gmt select $D $R -fg | awk '{_print($0,"_0_")_}' > data.lluvenct
#
# first make a mask
#
gmt grdlandmask -Gmask.grd -R$U -Df
gmt grdmath $U mask.grd MUL = GPS_u.nc
gmt grdmath $V mask.grd MUL = GPS_v.nc
#
# make the map
#
#gmt pscoast $R -JM7i -P -Glightgray -Ba1f30m -BWSne\\
#-K -Df -X0.7i -Wfaint > map_uv.ps
gmt pscoast $R -JM7i -P -Glightgray -Bx2f30m -By1f30m -BWSne\\
-V -N1/2p,2_1:0p -N2/0p,0/0/0,2_1:0p -K -Df -X0.7i -Wfaint > map_uv.ps
#gmt psxy fault_data.gmt -J -R -W.5 -O -K >> map_uv.ps
gmt psxy tam_fz.east.gmt -J -R -W.5,yellow -O -K >> map_uv.ps
gmt psxy ridge.gmt -J -R -W2,orange -O -K >> map_uv.ps
gmt psxy MAT.xy -J -R -W2,yellow -O -K >> map_uv.ps
gmt psxy trench.gmt -J -R -W2,yellow -O -K >> map_uv.ps
gmt psxy transform.gmt -J -R -W2,red -O -K >> map_uv.ps
gmt psvelo data.lluvenct -J $R -Se.008i/0.95/9 -A9p\\
-W.4,red -O -K >> map_uv.ps
gmt grdvector GPS_u.nc GPS_v.nc -Ix10/10 -J $R -O -K -Q0.05i+e\\
-Gblue -W.4,blue -S120i --MAP_VECTOR_SHAPE=0.2 >> map_uv.ps
#gmt grdvector GPS_u.nc GPS_v.nc -Ix10/10 -J $R -O -K -Q0.03i+e\\
#-Gblue -W.4,blue --MAP_VECTOR_SHAPE=0.2 >> map_uv.ps
#
# Place the scale using a geovector of length RATE
```

```
#
RATE=50 # This is in mm/yr or km/Myr - change to use another scalebar
#echo 120.5W 22.5N 90 ${RATE}k | gmt psxy -R -J -O -K -S=0.08i+e+jc\\
#-Gblue -W1p,blue --MAP_VECTOR_SHAPE=0.2 >> map_uv.ps
echo 118.5W 22.5N 90 ${RATE}mm | gmt psxy -R -J -O -K -S=0.08i+e+jc\\
-Gblue -W1p,blue --MAP_VECTOR_SHAPE=0.2 >> map_uv.ps
echo 118.5W 22.5N ${RATE} mm/yr | gmt pstext -R -J -O\\
-F+f8p+jCB -D0/0.07i >> map_uv.ps

#echo -109 31 15 North American Plate | gmt pstext
#-R -J -O -F+f8p+jCB -D0/0.07i >> map_uv.ps
# make a pdf
#
gmt psconvert map_uv.ps -A -Tf
rm map_uv.ps
open map_uv.pdf
```

```
#!/bin/bash
```

```
gmt grd2xyz GPS_u.grd > GPS_u_grd.xyz
gmt grd2xyz GPS_u.nc > GPS_u_nc.xyz
gmt grd2xyz GPS_v.grd > GPS_v_grd.xyz
gmt grd2xyz GPS_v.nc > GPS_v_nc.xyz
gmt grd2xyz ve_tot.grd > ve_tot_grd.xyz
gmt grd2xyz vn_tot.grd > vn_tot_grd.xyz
#GPS_u.grd GPS_u.nc GPS_v.grd GPS_v.nc map_uv_pci.pdf mask.grd
ve_tot.grd vn_tot.grd
```

Bibliografía

- Agudelo, Gonzalo y col. (2020). «GPS geodetic infrastructure for subsidence and fault monitoring in Houston, Texas, USA». En: *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 382, págs. 11-18. ISSN: 2199899X. DOI: [10.5194/piahs-382-11-2020](https://doi.org/10.5194/piahs-382-11-2020).
- Aktuğ, Bahadır y Ömer Yildirim (2013). «Regularized estimation of euler pole parameters». En: *Earth, Planets and Space* 65.7, págs. 699-705. ISSN: 18805981. DOI: [10.5047/eps.2012.10.004](https://doi.org/10.5047/eps.2012.10.004).
- Altamimi, Z y col. (2023). «ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions». En: *Journal of Geodesy* 97.47. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-023-01738-w>.
- Altamimi, Zuheir y col. (2016). «ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions». En: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. DOI: [10.1002/2016JB013098](https://doi.org/10.1002/2016JB013098). URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2016JB013098>.
- Alva-Valdivia, Luis M. y col. (2021). «Rock magnetic characterization and paleomagnetic directional analysis of Isla San Pedro Nolasco dikes, Gulf of California, Mexico». En: *Bulletin of Volcanology* 83.8. ISSN: 14320819. DOI: [10.1007/s00445-021-01477-w](https://doi.org/10.1007/s00445-021-01477-w). URL: <https://doi.org/10.1007/s00445-021-01477-w>.
- Álvarez, G. D. A. (2008). «GNSS — Global Navigation Satellite Systems». En: *GNSS — Global Navigation Satellite Systems*. DOI: [10.1007/978-3-211-73017-1](https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1).
- Anderson, Greg y col. (2006). «Plate Boundary Observatory Data Management System Critical Design Review Version 1.2». En: March, págs. 1-122.
- Angermann, D., J. Klotz y C. Reigber (1999). «Space-geodetic estimation of the Nazca-South America Euler vector». En: *Earth and Planetary Science Letters* 171.3, págs. 329-334. ISSN: 0012821X. DOI: [10.1016/S0012-821X\(99\)00173-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00173-9).
- Aragón-Arreola, Manuel y Arturo Martín-Barajas (2007). «Westward migration of extension in the northern Gulf of California, Mexico». En: *Geology* 35.6, págs. 571-574. ISSN: 00917613. DOI: [10.1130/G23360A.1](https://doi.org/10.1130/G23360A.1).
- Argus, Donald F. y col. (2010). «The angular velocities of the plates and the velocity of Earth's centre from space geodesy». En: *Geophysical Journal International* 180.3, págs. 913-960. ISSN: 0956540X. DOI: [10.1111/j.1365-246X.2009.04463.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04463.x).
- Balestrieri, Maria Laura y col. (2017). «Onshore and offshore apatite fission-track dating from the southern Gulf of California: Insights into the time-space evolution of the rifting». En: *Tectonophysics* 719-720, págs. 148-161. ISSN: 00401951. DOI:

- 10.1016/j.tecto.2017.05.012. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2017.05.012>.
- Bandy, W, V Kostoglodov y C. Mortera-Gutiérrez (1998). «Southwest migration of the instantaneous Rivera-Pacific Euler pole since 0.78 Ma». En: *Geofísica internacional* 37.3, págs. 153-169. ISSN: 0016-7169. URL: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56837302>.
- Barajas, Arturo Martín (2000). «Volcanismo y extensión en la Provincia Extensional del Golfo de California». En: págs. 72-83.
- Bian, Weiwei, Jicang Wu y Weiwei Wu (nov. de 2020). «Recent crustal deformation based on interpolation of gnss velocity in continental china». En: *Remote Sensing* 12 (22), págs. 1-21. ISSN: 20724292. DOI: [10.3390/rs12223753](https://doi.org/10.3390/rs12223753).
- Blewitt, Geoffrey y David Lavallée (2002). «Effect of annual signals on geodetic velocity». En: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 107.B7, ETG 9-1-ETG 9-11. ISSN: 2169-9356. DOI: [10.1029/2001jb000570](https://doi.org/10.1029/2001jb000570).
- Blewitt, Geoffrey y col. (2016). «MIDAS robust trend estimator for accurate GPS station velocities without step detection». En: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 121.3, págs. 2054-2068. ISSN: 21699356. DOI: [10.1002/2015JB012552](https://doi.org/10.1002/2015JB012552).
- Braun, John J. y col. (2012). «Focused study of interweaving hazards across the Caribbean». En: *Eos* 93.9, págs. 89-90. ISSN: 00963941. DOI: [10.1029/2012E0090001](https://doi.org/10.1029/2012E0090001).
- Brown, Neil y col. (2002). «Quality Control and Integrity Monitoring of the Victorian GPS Reference Station Network». En: *Proceedings FIG XXII International Congress*, págs. 1-5. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.202.4321{\%}0Apapers3://publication/uuid/119959C8-FFB6-438E-B6B5-799D15204A27>.
- Bryan, S E y L Ferrari (2014). «Geological Society , London , Special Publications Online First Pulling apart the Mid to Late Cenozoic magmatic record of the Gulf of California : is there a Comondú Arc ? service Subscribe How to cite Notes Pulling apart the Mid to Late Cenozoic magmatic». En: DOI: [10.1144/SP385.8](https://doi.org/10.1144/SP385.8).
- Cabral-Cano, E. y col. (2018). «TLALOCNet: A continuous GPS-met backbone in Mexico for seismotectonic and atmospheric research». En: *Seismological Research Letters* 89.2A, págs. 373-381. ISSN: 19382057. DOI: [10.1785/0220170190](https://doi.org/10.1785/0220170190).
- Cao, Yongyong y col. (2019). «Application of GNSS displacement monitoring system in measurement of open sea structure». En: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 304.2. ISSN: 17551315. DOI: [10.1088/1755-1315/304/2/022064](https://doi.org/10.1088/1755-1315/304/2/022064).
- Castro, R. R. y col. (2017). «Active tectonics in the Gulf of California and seismicity (M > 3.0) for the period 2002–2014». En: *Tectonophysics* 719-720, págs. 4-16. ISSN: 00401951. DOI: [10.1016/j.tecto.2017.02.015](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.02.015). URL: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.02.015>.
- Castro, Raúl R. y col. (2021). «Seismicity in the Gulf of California, Mexico, in the period 1901–2018». En: *Journal of South American Earth Sciences* 106.December 2020. ISSN: 08959811. DOI: [10.1016/j.jsames.2020.103087](https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103087).

- CORS (2020). - *National Geodetic Survey*. URL: <https://geodesy.noaa.gov/CORS/> (visitado 13-06-2020).
- Cosenza-Murales, B y col. (2021). «Co-seismic and post-seismic deformation for the 1995 Colima-Jalisco and 2003 Tecmán thrust earthquakes, Mexico subduction zone, from modelling of GPS data». En: *Geophysical Journal International* 228.3, págs. 2137-2173. ISSN: 0956-540X. DOI: [10.1093/gji/ggab435](https://doi.org/10.1093/gji/ggab435).
- Craig, Timothy J. y Eric Calais (2014). «Strain accumulation in the New Madrid and Wabash Valley seismic zones from 14 years of continuous GPS observation». En: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 119.12, págs. 9110-9129. ISSN: 21699356. DOI: [10.1002/2014JB011498](https://doi.org/10.1002/2014JB011498).
- Demets, C., Bertha Márquez-Azúa y Enrique Cabral-cano (2014). «A new GPS velocity field for the pacific plate - Part 1: Constraints on plate motion, intraplate deformation, and the viscosity of pacific basin asthenosphere». En: *Geophysical Journal International* 199.3, págs. 1878-1899. ISSN: 1365246X. DOI: [10.1093/gji/ggu341](https://doi.org/10.1093/gji/ggu341).
- Demets, C., Bertha Márquez-Azúa y Enrique Cabral-Cano (2014). «A new GPS velocity field for the Pacific Plate - Part 2: Implications for fault slip rates in western California». En: *Geophysical Journal International* 199.3, págs. 1900-1909. ISSN: 1365246X. DOI: [10.1093/gji/ggu347](https://doi.org/10.1093/gji/ggu347).
- DeMets, Charles y Timothy H Dixon (1999). «New kinematic models for Pacific-North America motion from 3 Ma to present, I: Evidence for steady motion and biases in the NUVEL-1A model». En: *Geophysical Research Letters* 26.13, págs. 1921-1924.
- DeMets, Charles, Richard G. Gordon y Donald F. Argus (2010). «Geologically current plate motions». En: *Geophysical Journal International* 181.1, págs. 1-80. ISSN: 0956540X. DOI: [10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x).
- Dixon, T H y col. (1991). «Preliminary determination of Pacific-North America relative motion in the southern Gulf of California using the Global Positioning System». En: *Geophys. Res. Lett* 18.5, págs. 861-864.
- Dixon, Timothy y col. (2000). «New kinematic models for Pacific-North America motion from 3 Ma to present, II: Evidence for a "Baja California shear zone"». En: *Geophysical Research Letters* 27.23, págs. 3961-3964.
- Dunn, P J y col. (1996). «Crustal deformation around the Gulf of California The Gulf of California Transition Zone The Gulf of California , which separates the Baja peninsula spreading zone of the East Pacific Any changes in the accommodation of the motion in the Gulf are of inter». En: 23.2, págs. 193-196.
- Duque-Trujillo, Jose y col. (2014). «Timing of rifting in the southern Gulf of California and its conjugate margins: Insights from the plutonic record». En: *Bulletin of the Geological Society of America* 127.5-6, págs. 702-736. ISSN: 19432674. DOI: [10.1130/B31008.1](https://doi.org/10.1130/B31008.1).

- Dziewonski, A. M., T. A. Chou y J. H. Woodhouse (1981). «Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity». En: *Journal of Geophysical Research* 86.B4, págs. 2825-2852. ISSN: 01480227. DOI: [10.1029/JB086iB04p02825](https://doi.org/10.1029/JB086iB04p02825).
- Ekström, G., M. Nettles y A. M. Dziewoński (2012). «The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes». En: *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 200-201, págs. 1-9. ISSN: 00319201. DOI: [10.1016/j.pepi.2012.04.002](https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002).
- Espíndola, Victor y Xyoli Pérez (2018). «¿Qué son los sismos, dónde ocurren y cómo se miden?» En: *Ciencia* 69, págs. 8-15. URL: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/69{_}3/PDF/QueSonSismos.pdf.
- Estey, Louis H. y Charles M. Meertens (1999). «TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data». En: *GPS Solutions* 3.1, págs. 42-49. ISSN: 15211886. DOI: [10.1007/PL00012778](https://doi.org/10.1007/PL00012778).
- Fernández, Alejandra y Xyoli Pérez-Campos (2017). «Lithosphere thickness in the Gulf of California region». En: *Tectonophysics* 719-720, págs. 17-26. ISSN: 00401951. DOI: [10.1016/j.tecto.2017.06.016](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.06.016).
- Ferrari, Luca, Teresa Orozco-esquivel y Scott E Bryan (2017). «Cenozoic Magmatism and Extension in Western Mexico: Linking the Sierra Madre Occidental Silicic Large Igneous Province and the Comondú Group with the Gulf of California Rift Luca». En: *Earth-Science Reviews*. ISSN: 0012-8252. DOI: [10.1016/j.earscirev.2017.04.006](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.006). URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.006>.
- Ferrari, Luca y col. (2013). «Late Oligocene to middle miocene rifting and synextensional magmatism in the southwestern sierra madre occidental, Mexico: The beginning of the Gulf of California rift». En: *Geosphere* 9.5, págs. 1161-1200. ISSN: 1553040X. DOI: [10.1130/GES00925.1](https://doi.org/10.1130/GES00925.1).
- Fletcher, John M. y col. (2007). «Ridge-trench interactions and the Neogene tectonic evolution of the Magdalena shelf and southern Gulf of California: Insights from detrital zircon U-Pb ages from the Magdalena fan and adjacent areas». En: *Bulletin of the Geological Society of America* 119.11-12, págs. 1313-1336. ISSN: 00167606. DOI: [10.1130/B26067.1](https://doi.org/10.1130/B26067.1).
- Flores Jiménez, Alejandro (2000). *Atmospheric Tomography Using Satellite Radio Signals*. Tesis doctoral, UPC, Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions. URL: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/94192> (visitado 15-07-2023).
- Foster, James (2015). «GPS and surveying». En: *Handbook of Sea-Level Research*, págs. 157-170. DOI: [10.1002/9781118452547.ch10](https://doi.org/10.1002/9781118452547.ch10).
- Fragoso-Irineo, Anaid y col. (2021). «Estimación gravimétrica del grosor cortical en el Golfo de California». En: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 73.1, A270820. ISSN: 14053322. DOI: [10.18268/bsgm2021v73n1a270820](https://doi.org/10.18268/bsgm2021v73n1a270820).
- Fritsche, Mathias, Petra Döll y Reinhard Dietrich (2012). «Global-scale validation of model-based load deformation of the Earth's crust from continental watermass

- and atmospheric pressure variations using GPS». En: *Journal of Geodynamics* 59-60, págs. 133-142. ISSN: 02643707. DOI: [10.1016/j.jog.2011.04.001](https://doi.org/10.1016/j.jog.2011.04.001). URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2011.04.001>.
- Gastil, R Gordon y RH Miller (1993). «Prebatholithic history of peninsular California». En: *The prebatholithic stratigraphy of peninsular California: Geological Society of America Special Paper* 279, págs. 145-156.
- González-Ortega, J. Alejandro, J. Javier González-García y David T. Sandwell (2018). «Interseismic velocity field and seismic moment release in Northern Baja California, Mexico». En: *Seismological Research Letters* 89.2A, págs. 526-533. ISSN: 19382057. DOI: [10.1785/0220170133](https://doi.org/10.1785/0220170133).
- Goudarzi, Mohammad Ali, Marc Cocard y Rock Santerre (2014). «EPC: Matlab software to estimate Euler pole parameters». En: *GPS Solutions* 18.1, págs. 153-162. ISSN: 15211886. DOI: [10.1007/s10291-013-0354-4](https://doi.org/10.1007/s10291-013-0354-4).
- Grewal, Mohinder S, Angus P Andrews y Chris G Bartone (2020). *Global navigation satellite systems, inertial navigation, and integration*. John Wiley & Sons.
- Gurtner, Werner y Lou Estey (2013). «Rinex (The Receiver Independent Exchange Format) Version 3.01. Available at <ftp://igs.org/pub/data/format/rinex301.pdf>». En: June. URL: <http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rinex301.pdf>.
- Haines, A John y col. (2015). *Enhanced surface imaging of crustal deformation: Obtaining tectonic force fields using GPS data*. Springer.
- Hammond, W C, G Blewitt y C Kreemer (2011). «Block modeling of crustal deformation of the northern Walker Lane and Basin and Range from GPS velocities». En: *J. Geophys. Res* 116, pág. 4402. DOI: [10.1029/2010JB007817](https://doi.org/10.1029/2010JB007817). URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010JB007817>.
- Hatanaka, Yuki (2008). «A Compression Format and Tools for GNSS Observation Data». En: *Bulletin of the Geographical Survey Institute* 55, págs. 21-30. URL: <http://web1.gsi.go.jp/common/000045517.pdf>.
- Hauksson, Egill y col. (2014). «Active pacific north america plate boundary tectonics as evidenced by seismicity in the oceanic lithosphere offshore baja california, mexico». En: *Geophysical Journal International* 196.3, págs. 1619-1630. ISSN: 0956540X. DOI: [10.1093/gji/ggt467](https://doi.org/10.1093/gji/ggt467).
- Hegarty, Christopher J. (2012). «GNSS signals - An overview». En: *2012 IEEE International Frequency Control Symposium, IFCS 2012, Proceedings*, págs. 87-93. DOI: [10.1109/IFCS.2012.6243707](https://doi.org/10.1109/IFCS.2012.6243707).
- Hegarty, Christopher J. y Eric Chatre (2008). «This growing civil aviation system is expected to replace a significant number of ground based navigation systems and allow for more efficient use of the world wide airspace». En: *Proceedings of the IEEE* 96.12, págs. 1902-1917. ISSN: 15582256. DOI: [10.1109/JPR0C.2008.2006090](https://doi.org/10.1109/JPR0C.2008.2006090).
- Hernández-Andrade, Daniel y col. (2022). «Quality assessment of Continuous Operating Reference Stations (CORS) - GPS stations in Mexico». En: *Geodesy and Geodynamics* xxxx. ISSN: 16749847. DOI: [10.1016/j.geog.2021.12.003](https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.12.003).

- Herring, T A, R W King y S C McClusky (2018). «Introduction to Gamit/Globk». En: *Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts*.
- Herring, Thomas (2003). «MATLAB Tools for viewing GPS velocities and time series». En: *GPS Solutions* 7.3, págs. 194-199. ISSN: 15211886. DOI: [10.1007/s10291-003-0068-0](https://doi.org/10.1007/s10291-003-0068-0).
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Wasle, E. (2008). «GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more». En: Springer Science and Business Media. Ed. por SpringerWienNewYork.
- Huerta, E., Mangiaterra, A., y Noguera, G. (2005). *GPS. Posicionamiento Satelital*. Vol. 1. 9. Argentina. ISBN: 950-673-488-7.
- IGS (2019). «International gnss service: terms of reference». En: February, págs. 1-10.
- INEGI (2015). «Guía Metodológica de la Red Geodésica Horizontal». En.
- (2017). «Red Geodésica Nacional Activa. Especificaciones para el establecimiento de estaciones.» En.
- (2021). «Diccionario de datos del continuo nacional geológico. INEGI-SGM. Escala 1:250 000». En: *Instituto Nacional de Estadística y Geografía VII. INEGI-SGM*, pág. 43. URL: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842651>.
- Janssen, Volker y col. (2002). «Low-cost GPS-based volcano deformation monitoring at Mt. Papandayan, Indonesia». En: *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 115.1-2, págs. 139-151. ISSN: 03770273. DOI: [10.1016/S0377-0273\(01\)00312-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00312-2).
- Johnston, Gary, Anna Riddell y Grant Hausler (2017). «The International GNSS Service». En: *Springer Handbooks*, págs. 967-982. ISSN: 25228706. DOI: [10.1007/978-3-319-42928-1_33](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1_33).
- Kamatham, Yedukondalu (2018). «Estimation, analysis and prediction of multipath error for static GNSS applications». En: *2018 Conference on Signal Processing And Communication Engineering Systems, SPACES 2018* 2018-Janua, págs. 62-65. DOI: [10.1109/SPACES.2018.8316317](https://doi.org/10.1109/SPACES.2018.8316317).
- Kandregula, Raj Sunil y col. (2021). «Estimation of regional surface deformation post the 2001 Bhuj earthquake in the Kachchh region, Western India using RADAR interferometry». En: *Geocarto International* 0.0, págs. 1-29. ISSN: 10106049. DOI: [10.1080/10106049.2021.1899299](https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1899299). URL: <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1899299>.
- Kouba, Jan, François Lahaye y Pierre Tétreault (2017). «Precise Point Positioning». En: *Springer Handbooks*, págs. 723-751. ISSN: 25228706. DOI: [10.1007/978-3-319-42928-1_25](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1_25).
- Kreemer, C., G. Blewitt y E. C. Klein (2014). «A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model Corn?e». En: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems RESEARCH* 15, págs. 3849-3889. DOI: [10.1002/2014GC005407](https://doi.org/10.1002/2014GC005407). Received.
- Langbein, John (2004). «Noise in two color electronic distance meter measurements revisited». En: *J. Geophys. Res* 109, pág. 4406. DOI: [10.1029/2003JB002819](https://doi.org/10.1029/2003JB002819). URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2003JB002819>.

- Legrand, J y col. (2012). «Comparison of regional and global GNSS positions, velocities and residual time series». En: págs. 95-103.
- Leick, A., Rapoport, L., y Tatarnikov, D. (2015). *GPS Satellite Surveying*. URL: [JohnWileyandSons](http://JohnWileyandSons.com). (visitado 20-10-2020).
- Liu, Mian, Hui Wang y Qingsong Li (2010). «Inception of the eastern California shear zone and evolution of the Pacific-North American plate boundary: From kinematics to geodynamics». En: *Journal of Geophysical Research* 115.B7, págs. 1-12. ISSN: 0148-0227. DOI: [10.1029/2009jb007055](https://doi.org/10.1029/2009jb007055).
- Liu, Teng y col. (2020). «On the application of the raw-observation-based PPP to global ionosphere VTEC modeling: an advantage demonstration in the multi-frequency and multi-GNSS context». En: *Journal of Geodesy* 94.1. ISSN: 14321394. DOI: [10.1007/s00190-019-01332-z](https://doi.org/10.1007/s00190-019-01332-z). URL: <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01332-z>.
- Luna, Marco y col. (2019). «Análisis De La Serie Temporal De La Estación De Monitoreo Continuo Cuez - Regme». En: *Revista Geoespacial* 15.2, pág. 127. ISSN: 1390-3993. DOI: [10.24133/geoespacial.v15i2.1281](https://doi.org/10.24133/geoespacial.v15i2.1281).
- MacDonald, A. E., y Platzer, P. (2020). *Systems and methods for improved atmospheric monitoring and GPS positioning utilizing GNSS tomographic refractivity* - U.S. Patent and Trademark Office. URL: <https://patents.google.com/patent/US10545243B2/en> (visitado 14-12-2020).
- Macias-Iñiguez, I y col. (2021). «Modo de extensión de la corteza y formación del Sistema Extensional de Cerralvo, sur del Golfo de California, a partir de datos de reflexión sísmica en 2D Mode of crustal extension and formation of rift systems in the southern Gulf of California, from». En: págs. 1-17. URL: <https://www.redalyc.org/journal/572/57265259004/html/>.
- Marquez-Azua, B. y C. DeMets (2009). «Deformation of Mexico from continuous GPS from 1993 to 2008». En: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 10.2, págs. 1-16. ISSN: 15252027. DOI: [10.1029/2008GC002278](https://doi.org/10.1029/2008GC002278).
- Márquez-Azúa, Bertha y Charles DeMets (2003). «Crustal velocity field of Mexico from continuous GPS measurements, 1993 to June 2001: Implications for the neotectonics of Mexico». En: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 108.B9, págs. 1-20. ISSN: 2156-2202. DOI: [10.1029/2002jb002241](https://doi.org/10.1029/2002jb002241).
- McCaffrey, Robert (jul. de 2005). «Block kinematics of the Pacific-North America plate boundary in the southwestern United States from inversion of GPS, seismological, and geologic data». En: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 110 (7), págs. 1-27. ISSN: 21699356. DOI: [10.1029/2004JB003307](https://doi.org/10.1029/2004JB003307).
- Meertens, C y col. (2012). «Investigation of Non-Tectonic Signals at GPS Stations». En: *IGS Workshop*.
- Mendoza, L. P. O. y col. (2022). «Horizontal and Vertical Deformation Rates Linked to the Magallanes-Fagnano Fault, Tierra Del Fuego: Reconciling Geological and Geodetic Observations by Modeling the Current Seismic Cycle». En: *Tectonics* 41.1, págs. 1-27. ISSN: 0278-7407. DOI: [10.1029/2021tc006801](https://doi.org/10.1029/2021tc006801).

- Métivier, Laurent y col. (2020). «ITRF2014, Earth Figure Changes, and Geocenter Velocity: Implications for GIA and Recent Ice Melting». En: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 125.2. ISSN: 21699356. DOI: [10.1029/2019JB018333](https://doi.org/10.1029/2019JB018333).
- Michaud, François y col. (2005). «La zona de falla Tosco-Abreojos: un sistema lateral derecho activo entre la placa». En: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 57.1, págs. 53-63. URL: <http://www.scielo.org.mx/pdf/bsgm/v57n1/1405-3322-bsgm-57-01-53.pdf>.
- Miller, M.M. y col. (2017). «2013 – 2018 UNAVCO Project Report Geodesy Advancing Geosciences and EarthScope: GAGE Quarterly Report Y4Q2: 01 January 2017 – 31 March 2017». En: *2013-2018 UNAVCO Project Report March*. ISSN: 23249250. DOI: [10.1029/2017E0067411](https://doi.org/10.1029/2017E0067411). URL: <https://doi.org/10.1029/2017E0067411..>
- Mora-Páez, H. y Audemard, F. (2021). *GNSS Networks for Geodynamics in the Caribbean, Northwestern South America, and Central America*. Vol. 32, págs. 137-144. DOI: [DOI :http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.97215](http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.97215). URL: <http://www.intechopen.com/books/trends-in-telecommunications-technologies/gps-total-electron-content-tec-prediction-at-ionosphere-layer-over-the-equatorial-region{\%}0AInTec>.
- Morillo Barragán, Juan Ramón (2013). «Desarrollo y análisis de la precisión de la red de antenas de referencia GNSS (Sistemas globales de navegación por satélite) de Extremadura: Trazabilidad de flotas de transporte hortofutícola». En: URL: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=39535{\&}info=resumen{\&}idioma=ENG>.
- Murray, Jessica R. y col. (2019). «Regional Global Navigation Satellite System Networks for Crustal Deformation Monitoring». En: *Seismological Research Letters* XX.Xx, págs. 1-21. ISSN: 0895-0695. DOI: [10.1785/0220190113](https://doi.org/10.1785/0220190113).
- National Geodetic Survey (2018). «Guidelines for New and Existing Continuously Operating Reference Stations (CORS) National Geodetic Survey». En: *October May*, págs. 1-31.
- Negrete-Aranda, Raquel, Juan Contreras y Ronald M Spelz (2013). «Viscous dissipation , slab melting , and post-subduction volcanism in south-central Baja California , Mexico». En: págs. 1714-1728. DOI: [10.1130/GES00901.1](https://doi.org/10.1130/GES00901.1).
- Ning, Tong y Gunnar Elgered (2012). «Trends in the atmospheric water vapor content from ground-based GPS: The impact of the elevation cutoff angle». En: *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 5.3, págs. 744-751. ISSN: 19391404. DOI: [10.1109/JSTARS.2012.2191392](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2191392).
- NOAA (2008). *ETOPO1 Global Relief Model*. DOI: [doi : 10 . 7289 / V5C8276M](https://doi.org/10.7289/V5C8276M). URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/>.
- Odolinski, R., P. J.G. Teunissen y B. Zhang (2020). «Multi-GNSS processing, positioning and applications». En: *Journal of Spatial Science* 65.1, págs. 3-5. ISSN: 14498596. DOI: [10 . 1080 / 14498596 . 2020 . 1687170](https://doi.org/10.1080/14498596.2020.1687170). URL: <https://doi.org/10.1080/14498596.2020.1687170>.

- Ostini, Luca (2012). «Analysis and Quality Assessment of GNSS-Derived Parameter Time Series». Tesis doct. Universit"at Bern vorgelegt.
- Plattner, C. y col. (2007). «New constraints on relative motion between the Pacific Plate and Baja California microplate (Mexico) from GPS measurements». En: *Geophysical Journal International* 170.3, págs. 1373-1380. ISSN: 0956540X. DOI: [10.1111/j.1365-246X.2007.03494.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03494.x).
- Plattner, Christina y col. (2015). «Earthquake cycle deformation at the Ballenas transform, Gulf of California, Mexico, from InSAR and GPS measurements». En: *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP SP-731*. February 2016. ISSN: 03796566. DOI: [10.5270/fringe2015.pp366](https://doi.org/10.5270/fringe2015.pp366).
- Ramírez-Ramos, Erik E. y col. (2015). «A crustal velocity model for the Southern Mexicali Valley, Baja California, Mexico». En: *Seismological Research Letters* 86.1, págs. 181-191. ISSN: 19382057. DOI: [10.1785/0220140007](https://doi.org/10.1785/0220140007).
- Ray, Jim y Ken Senior (2005). «Geodetic techniques for time and frequency comparisons using GPS phase and code measurements». En: *Metrologia* 42.4, págs. 215-232. ISSN: 00261394. DOI: [10.1088/0026-1394/42/4/005](https://doi.org/10.1088/0026-1394/42/4/005).
- Reilinger, Robert y col. (2006). «GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions». En: *Journal of Geophysical Research* 111, pág. 5411. DOI: [10.1029/2005JB004051](https://doi.org/10.1029/2005JB004051). URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005JB004051>.
- Remondi, Benjamin William (1984). *Using the global positioning system (GPS) phase observable for relative Geodesy: Modeling, Processing, and results (stellite, timing)*. The University of Texas at Austin.
- Rodríguez-Lozoya, Héctor E y col. (2017). «Attenuation of Coda Waves in the Central Region of the Gulf of California, México». En: *Geofísica internacional* 56.2, págs. 137-145. ISSN: 00167169.
- Saleh, Jarir y col. (2021). «1996-2017 GPS position time series, velocities and quality measures for the CORS Network». En: *Journal of Applied Geodesy* 15.2, págs. 105-115. ISSN: 18629024. DOI: [10.1515/jag-2020-0041](https://doi.org/10.1515/jag-2020-0041).
- Sandwell, David T y Paul Wessel (2016). «From Elasticity». En: págs. 1-7. DOI: [10.1002/2016GL070340](https://doi.org/10.1002/2016GL070340). Received.
- Santamaría-Gómez, A y col. (2011). «Correlated errors in GPS position time series: Implications for velocity estimates». En: *J. Geophys. Res* 116, pág. 1405. DOI: [10.1029/2010JB007701](https://doi.org/10.1029/2010JB007701). URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010JB007701>.
- Sawires, Rashad y col. (2021). «Seismic and geodetic crustal moment-rates comparison: New insights on the seismic hazard of egypt». En: *Applied Sciences (Switzerland)* 11.17. ISSN: 20763417. DOI: [10.3390/app1177836](https://doi.org/10.3390/app1177836).
- Seeber, G. (2008). *Satellite Geodesy Foundations, Methods, and Applications*. Vol. 40. 3, págs. 295-296. ISBN: 3110175495. DOI: [10.11366/sokuchi1954.40.295](https://doi.org/10.11366/sokuchi1954.40.295).

- SGM (2017). *Sismología de México*. URL: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html> (visitado 27-12-2022).
- Sharma, Gopal y col. (2021). «Crustal deformation analysis across Garhwal Himalaya: Part of western Himalaya using GPS observations». En: *Quaternary International* 575-576. May, págs. 153-159. ISSN: 10406182. DOI: [10.1016/j.quaint.2020.08.025](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.08.025). URL: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.08.025>.
- Shen, Z. K. y col. (2011). «A unified analysis of crustal motion in Southern California, 1970-2004: The SCEC crustal motion map». En: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 116.11. ISSN: 21699356. DOI: [10.1029/2011JB008549](https://doi.org/10.1029/2011JB008549).
- Shen, Zheng Kang y col. (ago. de 2015). «Optimal interpolation of spatially discretized geodetic data». En: *Bulletin of the Seismological Society of America* 105 (4), págs. 2117-2127. ISSN: 19433573. DOI: [10.1785/0120140247](https://doi.org/10.1785/0120140247).
- Smith, M. J., Paron, P., y Griffiths, J. S. (2011). *Geomorphological Mapping: Methods and Applications* - Mike J. Smith, Paolo Paron, James S. Griffiths - Google Libros. 15.^a ed. Elsevier. ISBN: 978-0-444-53446-0.
- Sohn, Dong Hyo y col. (2021). «Decaying post-seismic deformation observed on the Korean peninsula following the 2011 Tohoku-oki earthquake». En: *Sensors* 21.13, págs. 1-14. ISSN: 14248220. DOI: [10.3390/s21134493](https://doi.org/10.3390/s21134493).
- Sonnette, L. y col. (2010). «Faulting and fissuring in active oceanic rift: Surface expression, distribution and tectonic-volcanic interaction in the Thingvellir Fissure Swarm, Iceland». En: *Journal of Structural Geology* 32.4, págs. 407-422. ISSN: 01918141. DOI: [10.1016/j.jsg.2010.01.003](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2010.01.003). URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2010.01.003>.
- Souto, María Soledad (2014). «Análisis de calidad y preprocesamiento de datos GNSS de la estación permanente UCOR (Córdoba, Argentina)». En: *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 1.1, pág. 91. ISSN: 2362-2539. URL: <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEfyN/article/view/6971>.
- Suribabu, Donupudi y col. (2022). «Geodetic characterization of active Katrol Hill Fault (KHF) of Central Mainland Kachchh, western India». En: *Geodesy and Geodynamics* December, págs. 1-7. ISSN: 16749847. DOI: [10.1016/j.geog.2021.05.003](https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.05.003). URL: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.05.003>.
- Sánchez, Laura y Hermann Drewes (2020). «Geodetic Monitoring of the Variable Surface Deformation in Latin America». En: *International Association of Geodesy Sympo* 8. DOI: https://doi.org/10.1007/1345_2020_91.
- Teunissen, Peter JG y Oliver Montenbruck (2017). *Springer handbook of global navigation satellite systems*. Vol. 10. Springer.
- Tregoning, P y Van Dam T (2005). «Effects of atmospheric pressure loading and seven parameter transformations on estimates of geocenter motion and station heights from space geodetic observations». En: *J. Geophys. Res* 110, pág. 3408. DOI: [10.1029/2004JB003334](https://doi.org/10.1029/2004JB003334). URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004JB003334>.

- Udias, Agustin y Elisa Bufo (2001). *Principles of seismology*. Cambridge University Press.
- Umhoefer, Paul J (2011). «Why did the Southern Gulf of California rupture so rapidly?— Oblique divergence across hot , weak lithosphere along a tectonically active margin». En: *Geological Society of America Today* 11. DOI: [10.1130/G133A.1](https://doi.org/10.1130/G133A.1).
- UNAM (2017). *Zonas sísmicas de la República Mexicana - Unidad de Apoyo Para el Aprendizaje*. URL: http://uapas2.bunam.unam.mx/ciencias/zonas_sismicas/#test2 (visitado 27-12-2022).
- Van Sickel, Jan y John A. Dutton (2023). *GEOD 862 - GPS and GNSS for Geospatial Professionals*. URL: <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1722> (visitado 25-08-2023).
- Vázquez, G. Esteban, Rick Bennett y Joshua Spinler (2013). «Assessment of Pseudorange Multipath at Continuous GPS Stations in Mexico». En: *Positioning* 04.03, págs. 253-265. ISSN: 2150-850X. DOI: [10.4236/pos.2013.43025](https://doi.org/10.4236/pos.2013.43025).
- Wang, Hu y col. (2022). «Two-Decade GNSS Observation Processing and Analysis with the New IGS Repro3 Criteria: Implications for the Refinement of Velocity Field and Deformation Field in Continental China». En: *Remote Sensing* 14.15. ISSN: 20724292. DOI: [10.3390/rs14153719](https://doi.org/10.3390/rs14153719).
- Wdowinski, Shimon, Yonadav Sudman y Yehuda Bock (jun. de 2001). «Geodetic detection of active faults in S. California». En: *Geophysical Research Letters* 28 (12), págs. 2321-2324. ISSN: 00948276. DOI: [10.1029/2000GL012637](https://doi.org/10.1029/2000GL012637).
- Wessel, P. y col. (2019). «The Generic Mapping Tools Version 6». En: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 20.11, págs. 5556-5564. ISSN: 15252027. DOI: [10.1029/2019GC008515](https://doi.org/10.1029/2019GC008515).
- Williams, Simon D. P. (2004). «Error analysis of continuous GPS position time series». En: *Journal of Geophysical Research* 109.B3, págs. 1-19. ISSN: 0148-0227. DOI: [10.1029/2003jb002741](https://doi.org/10.1029/2003jb002741).
- Xiao, Y. y col. (2020). «Data Quality Check and Visual Analysis of Cors Station Based on Anubis Software». En: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-3/W10*. November 2019, págs. 1295-1300. ISSN: 2194-9034. DOI: [10.5194/isprs-archives-xlii-3-w10-1295-2020](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-3-w10-1295-2020).
- Yan, Haoming y col. (2009). «Contributions of thermal expansion of monuments and nearby bedrock to observed GPS height changes». En: *Geophysical Research Letter*. DOI: [10.1029/2009GL038152](https://doi.org/10.1029/2009GL038152). URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009GL038152>.
- Yanlong, G. y col. (2012). «Application of CORS of GNSS in land subsidence monitoring in Tianjin». En: *Journal of Geodesy and Geodynamics* 5.
- Yeh, T. K. y col. (2007). «Automatic data-quality monitoring for continuous GPS tracking stations in Taiwan». En: *Metrologia* 44.5, págs. 393-401. ISSN: 00261394. DOI: [10.1088/0026-1394/44/5/016](https://doi.org/10.1088/0026-1394/44/5/016).

- Yeh, T. K. y col. (2008). «Identifying the degraded environment and bad receivers setting by using the GPS data quality indices». En: *Metrologia* 45.5, págs. 562-570. ISSN: 00261394. DOI: [10.1088/0026-1394/45/5/010](https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/5/010).
- Zeng, Yuehua (2022). «GPS Velocity Field of the Western United States for the 2023 National Seismic Hazard Model Update». En: *Seismological Research Letters* 93.6, págs. 3121-3134. ISSN: 0895-0695. DOI: [10.1785/0220220180](https://doi.org/10.1785/0220220180).
- Zhang, Ning y col. (2017). «Characteristic of GPS SNR and it's application for snow depth monitoring analysis». En: *Lecture Notes in Electrical Engineering* 437, págs. 175-185. ISSN: 18761119. DOI: [10.1007/978-981-10-4588-2_15](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4588-2_15).
- Zhang, Ruicheng y col. (2020). «Fusion of GNSS and speedometer based on VMD and its application in bridge deformation monitoring». En: *Sensors (Switzerland)* 20.3. ISSN: 14248220. DOI: [10.3390/s20030694](https://doi.org/10.3390/s20030694).
- Zuo, Xiaoqing y col. (2019). «The quality analysis of GNSS satellite positioning data». En: *Cluster Computing* 22, págs. 6693-6708. ISSN: 15737543. DOI: [10.1007/s10586-018-2524-1](https://doi.org/10.1007/s10586-018-2524-1). URL: <https://doi.org/10.1007/s10586-018-2524-1>.