

# **Universidad Autónoma de Sinaloa**

Facultad de Informática Culiacán

Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio

Posgrado en Ciencias de la Información



**ESTUDIO DE DEFORMACIONES EN LA CORTEZA TERRESTRE  
UTILIZANDO ESTACIONES PERMANENTES DE REDES GPS EN MÉXICO  
PARA EL PERIODO 2014-2018**

## **TESIS**

Para obtener el grado de  
Maestro en ciencias de la Información  
Con acentuación en: Geodesia y Geomática

Jorge Padilla Velazco

## **DIRECTORES**

Xóchitl Guadalupe Torres Carrillo  
Guadalupe Esteban Vázquez Becerra

Culiacán, Sinaloa, México

Noviembre de 2019

## **Agradecimientos y dedicatorias**

A mi directora de tesis la Dra. Xóchitl Guadalupe Torres Carrillo por sus enseñanzas y siempre estarme aconsejando durante todo este trabajo de tesis.

A mi codirector de tesis el Dr. Guadalupe Esteban Vázquez Becerra por haberme guiado al inicio del procesamiento, por su apoyo y asesoría durante todo el trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo de beca recibido durante mis estudios de maestría.

A Rosendo Romero Andrade por haberme ayudado a aprender a utilizar GAMIT/GLOBK y darme consejos durante el procesamiento de los datos.

A mis compañeros de Posgrado que estuvieron dándome consejos para la realización de la tesis, especialmente a mi compañero René Vázquez por brindarme su ayuda y consejos este trabajo de tesis y por ser con quien más platicaba de este tema.

Al M.C. Gerardo Beltrán Gutiérrez, quien era el encargado del servidor con el que estuve trabajando durante todo el procesamiento de los datos además de siempre brindar ayuda y solucionar los problemas que ocurrían cuando el servidor no funcionaba.

Agradezco a mi familia que siempre estuvo ahí apoyándome y motivándome para que terminara la tesis a tiempo. Y especialmente a mi hermana con quien siempre hablaba cuando no encontraba solución a problemas.

A mis amigos que siempre estuvieron apoyándome y a quienes les mandaba capturas de los avances que realizaba y cada vez que hacía algún cambio interesante en la tesis.

Y especialmente quiero agradecer a mi gata Michelle que siempre ha estado ahí en mis peores y mejores momentos, por ser con quien he pasado la mayor parte del tiempo durante la realización de esta tesis y por ser tan cálida y amorosa con sus ronroneos y amor que tiene para dar.

## Tabla de Contenido

<b>AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS</b> .....	<b>I</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>IV</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>X</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XI</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.4 HIPÓTESIS .....	3
1.5 ANTECEDENTES .....	3
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>10</b>
2.1 TECTÓNICA DE PLACAS .....	10
2.1.1 <i>Límite divergente</i> .....	11
2.1.2 <i>Límite convergente</i> .....	13
2.1.3 <i>Límite transformante</i> .....	15
2.1.4 <i>Sismicidad</i> .....	16
2.2 TECTÓNICA EN MÉXICO.....	18
2.2.1 <i>Características del límite convergente en México</i> .....	20
2.2.2 <i>Características del límite transformante en México</i> .....	21
2.2.3 <i>Sismicidad en México</i> .....	22
2.3 EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS) .....	24
2.3.1 <i>Conceptos básicos sobre el GPS</i> .....	25
2.3.2 <i>Señales GPS</i> .....	26
2.3.3 <i>Funcionamiento del GPS</i> .....	27
2.3.4 <i>Fuentes de error en el GPS</i> .....	28
2.4 TÉCNICAS DE POSICIONAMIENTO GPS .....	31
2.4.1 <i>Posicionamiento Puntual Preciso (PPP)</i> .....	32
2.4.2 <i>Posicionamiento Diferencial</i> .....	32
2.5 REDES DE ESTACIONES GPS .....	33

2.6	MARCO DE REFERENCIA.....	34
<b>3.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>37</b>
3.1	SOFTWARE CIENTÍFICO GAMIT/GLOBK.....	38
3.2	HARDWARE UTILIZADO.....	39
3.3	SELECCIÓN DE LOS DATOS GPS .....	40
3.4	PRE-PROCESAMIENTO.....	42
3.4.1	<i>Marco de referencia .....</i>	<i>42</i>
3.4.2	<i>Tratamiento previo de los datos GPS .....</i>	<i>44</i>
3.4.3	<i>Tipos de Archivos.....</i>	<i>45</i>
3.5	CONFIGURACIÓN INICIAL DEL PROCESAMIENTO CON GAMIT .....	48
3.6	PROCESAMIENTO CON GAMIT.....	49
3.7	PROCESAMIENTO CON GLOBK.....	50
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS.....</b>	<b>52</b>
4.1	RESULTADOS SÍSMICOS.....	52
4.2	DIFERENCIAS SÍSMICAS.....	56
4.3	SERIES DE TIEMPO DE LAS ESTACIONES GPS.....	58
4.4	VELOCIDADES DE LAS ESTACIONES GPS .....	75
4.5	VELOCIDADES RELATIVAS DE LAS ESTACIONES GPS.....	80
4.6	ESTABILIDAD DE LAS ESTACIONES GPS.....	81
4.7	CORRELACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LAS ESTACIONES GPS .....	88
4.8	ANÁLISIS DE LAS ESTACIONES GPS.....	91
4.9	CORRELACIÓN ENTRE SERIES DE TIEMPO GPS Y DE SISMOS .....	93
4.10	UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES GPS DE LA ZONA DE SUBDUCCIÓN .....	93
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>96</b>
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>101</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>106</b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Tabla de las estaciones GPS utilizadas con la cantidad de días de mediciones por años.....	41
<b>Tabla 2.</b> Posiciones y velocidades de las estaciones implementadas para el marco de referencia ITRF2014 Época 2010. ....	43
<b>Tabla 3.</b> Diferencias entre los ambientes tectónicos en México. ....	57
<b>Tabla 4.</b> Tabla de posición y Velocidades de las estaciones procesadas relativas al modelo de placas NOAM en el ITRF14.....	77
<b>Tabla 5.</b> Tabla comparativa de velocidades resultantes para cada modelo de placas donde además se muestra la magnitud total de los vectores de velocidad. ....	80
<b>Tabla 6.</b> Comparación de valores promedio de WRMS y NRMS dados por las estaciones que se encuentran en las 3 zonas dadas por los límites entre las dos placas. ....	82
<b>Tabla 7.</b> Valores de WRMS, y NRMS para todas las estaciones en el límite transformante en la Placa de Norteamérica.....	87
<b>Tabla 8.</b> Valores de WRMS, y NRMS para todas las estaciones en el límite transformante en la Placa del Pacífico.....	87
<b>Tabla 9.</b> Se muestran los valores de WRMS, y NRMS para todas las estaciones en el límite convergente y valores RMS promedio por cada componente, estación y zona. ....	88
<b>Tabla 10.</b> Valores WRMS para las estaciones más estables y menos estables que se encuentran en las 3 zonas dadas por los límites entre las dos placas..	89
<b>Tabla 11.</b> Valores NRMS para las estaciones más estables y menos estables que se encuentran en las 3 zonas dadas por los límites entre las dos placas..	89

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Velocidades de los sitios GPS relativos al ITRF2000. Tomada de Márquez-Azúa et al. (2004). .....	6
<b>Figura 2.</b> Velocidades residuales de los sitios GPS de INEGI y Sitios GPS en las islas Socorro y Clarión, relativos a la placa del Pacífico (CLAR, SOCC, LPAZ y MEXI) o la placa de Norteamérica (todos los demás sitios). Tomada de Márquez-Azúa et al. (2004).....	7
<b>Figura 3.</b> Este mapa tomado de Tarbuck et al. (2005) ilustra las direcciones y las velocidades del movimiento de las placas en centímetros al año.....	11
<b>Figura 4.</b> Modelo de Fusión Parcial tomado de Turcotte et al. (2002).....	12
<b>Figura 5.</b> Modelo de límite convergente tomado de Turcotte et al. (2002). .....	14
<b>Figura 6.</b> Modelos de zonas de convergencia entre placas tomado de Tarbuck et al. (2005).....	15
<b>Figura 7.</b> Modelo de límites de placa transformante tomado de Turcotte et al. (2002). .....	16
<b>Figura 8.</b> Tipos de fallas y sus mecanismos focales con figuras tomadas y modificadas de Tarbuck et al. (2005).....	18
<b>Figura 9.</b> Mapa México donde se muestra la influencia de 5 placas tectónicas generado con datos tomados de <a href="http://www.conabio.gob.mx">http://www.conabio.gob.mx</a> .....	19
<b>Figura 10.</b> Profundidad de la placa subducida en el centro de México. Tomada de Ferrari et al. (2012). .....	21
<b>Figura 11.</b> Sistema de fallas del límite transformante en México. Tomada de Plattner et al. (2007). .....	22
<b>Figura 12.</b> Cuatro zonas sísmicas en México definidas por el Servicio Geológico Mexicano. Figura tomada de ( <a href="https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html">https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html</a> ).....	24
<b>Figura 13.</b> Esquema metodológico de la estrategia del procesamiento de datos GPS con el software GAMIT/GLOBK.....	38
<b>Figura 14.</b> Servidor HP ProLiant ML350p Gen8. El disco duro externo de 2 TB se encuentra conectado a uno de los puertos USB del Servidor. ....	39

<b>Figura 15.</b> Mapa del territorio Mexicano en el que se muestran en distinto color las ubicaciones de las estaciones utilizadas para el procesamiento de los datos GPS. ....	42
<b>Figura 16.</b> Imagen generada por AUSPOS donde se muestran en círculos amarillos las estaciones utilizadas y triángulos negros las estaciones de referencia generadas por el Software. ....	44
<b>Figura 17.</b> Mecanismos focales de sismos en México con datos obtenidos del Global CMT Catalog ( <a href="https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html">https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html</a> ). ....	53
<b>Figura 18.</b> Epicentros de Sismos en México obtenidos del catálogo de sismos del Servicio Sismológico Nacional ( <a href="http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/">http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/</a> ). ....	54
<b>Figura 19.</b> Perfiles sísmicos de la zona de límite transformante. ....	55
<b>Figura 20.</b> Perfiles sísmicos de la zona de límite transformante. ....	56
<b>Figura 21.</b> Serie de tiempo de la estación USMX. ....	59
<b>Figura 22.</b> Serie de tiempo de la estación TNHM. ....	60
<b>Figura 23.</b> Serie de tiempo de la estación TNTB. ....	61
<b>Figura 24.</b> Serie de tiempo de la estación TNCU. ....	62
<b>Figura 25.</b> Serie de tiempo de la estación TNBA. ....	63
<b>Figura 26.</b> Serie de tiempo de la estación IPAZ. ....	64
<b>Figura 27.</b> Serie de tiempo de la estación PALX. ....	65
<b>Figura 28.</b> Serie de tiempo de la estación MEXI. ....	66
<b>Figura 29.</b> Serie de tiempo de la estación INEG. ....	67
<b>Figura 30.</b> Serie de tiempo de la estación MMX1. ....	68
<b>Figura 31.</b> Serie de tiempo de la estación CN25. ....	69
<b>Figura 32.</b> Serie de tiempo de la estación PENA. ....	70
<b>Figura 33.</b> Serie de tiempo de la estación UTON. ....	71
<b>Figura 34.</b> Serie de tiempo de la estación OAX2. ....	72
<b>Figura 35.</b> Serie de tiempo de la estación TNMS. ....	73
<b>Figura 36.</b> Serie de tiempo de la estación UCOE. ....	74
<b>Figura 37.</b> Mapa de velocidades relativas al modelo ITRF14 para el periodo 2014-2018. ....	76

<b>Figura 38.</b> Mapas de velocidades relativas al modelo de placas NOAM en el ITRF14 para el periodo 2014-2018. ....	78
<b>Figura 39.</b> Mapas de velocidades al modelo de placas PCFC en el ITRF14 para el periodo 2014-2018. ....	79
<b>Figura 40.</b> Mapa de densidades que ilustra la densidad de sismos ocurridos en México para el periodo 2014-2018. ....	83
<b>Figura 41.</b> Mapa en México donde se indica la elevación en metros dadas por el modelo digital de elevaciones mundial ETOPO. ....	84
<b>Figura 42.</b> Mapa de México donde se ilustra la profundidad en metros de la corteza terrestre utilizando el modelo de Moho CRUST 1.0. ....	85
<b>Figura 43.</b> Gráfica que muestra la relación entre la densidad de sismos y el NRMS. ....	90
<b>Figura 44.</b> Gráfica que muestra la relación entre la densidad de sismos y el WRMS. ....	90
<b>Figura 45.</b> Gráfica que muestra la relación entre los valores de NRMS y la profundidad de la corteza. ....	91
<b>Figura 46.</b> Ubicación de las estaciones y sus vectores de velocidad en la zona de subducción y los bloques donde se encuentran situadas. Los datos fueron tomados de Ferrari et al. (2012) y Rosas-Elguera et al. (1996). ....	95
<b>Figura 47.</b> Serie de tiempo de la estación ALBH. ....	106
<b>Figura 48.</b> Serie de tiempo de la estación AMC2. ....	107
<b>Figura 49.</b> Serie de tiempo de la estación BREW. ....	108
<b>Figura 50.</b> Serie de tiempo de la estación CIT1. ....	109
<b>Figura 51.</b> Serie de tiempo de la estación DRAO. ....	110
<b>Figura 52.</b> Serie de tiempo de la estación GLPS. ....	111
<b>Figura 53.</b> Serie de tiempo de la estación GOLD. ....	112
<b>Figura 54.</b> Serie de tiempo de la estación JPLM. ....	113
<b>Figura 55.</b> Serie de tiempo de la estación MANA. ....	114
<b>Figura 56.</b> Serie de tiempo de la estación MONP. ....	115
<b>Figura 57.</b> Serie de tiempo de la estación NANO. ....	116
<b>Figura 58.</b> Serie de tiempo de la estación NIST. ....	117

Índice de figuras

<b>Figura 59.</b> Serie de tiempo de la estación PIE1 .....	118
<b>Figura 60.</b> Serie de tiempo de la estación SCUB.....	119
<b>Figura 61.</b> Serie de tiempo de la estación SSIA.....	120
<b>Figura 62.</b> Serie de tiempo de la estación VNDP.....	121

**Lista de abreviaturas**

**AUSPOS:** *Australian Processing Online Service.*

**CDDIS:** *Crustal Dynamics Data Information System.*

**CORS:** *Continuously Operating Reference Station.*

**DORIS:** *Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite.*

**GPS:** *Global Positioning System.*

**IGS:** *International GNSS Service.*

**INEGI:** *Instituto Nacional de Estadística y Geografía.*

**LLR:** *Lunar Laser Ranging.*

**RINEX:** *Receiver INdependent Exchange.*

**SLR:** *Satellite Laser Ranging.*

**SOPAC:** *Scripps Orbit and Permanent Array Center.*

**TlalocNet:** *Trans-boundary, Land and Atmosphere Long-term Observational and Collaborative Network.*

**UNAVCO:** *University NAVSTAR Consortium.*

**VLBI:** *Very Long Baseline Interferometry.*

## Resumen

En este trabajo de investigación se determinaron los desplazamientos horizontales y verticales de 16 estaciones permanentes que realizan observaciones a los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) en México para el periodo 2014-2018. Con el objetivo de definir un marco de referencia estable se utilizaron también otras 16 estaciones de control localizadas fuera del área de estudio. Para ello, se analizaron con fines comparativos los diferentes ambientes tectónicos en México tomando como referencia a la Placa Tectónica de Norteamérica. En el límite transformante, las estaciones sobre la Placa Tectónica del Pacífico reportan vectores de velocidad muy similares entre sí, de -20 a -40 mm/año en la componente este y aproximadamente 30 mm/año en la componente norte, con excepción de MEXI, que tiene una magnitud menor en la componente norte de 17 mm/año y en la componente este de -21 mm/año. En el límite transformante, las estaciones sobre la Placa Tectónica de Norteamérica presentan vectores de velocidad cercanos a 0 mm/año en la componente este y 1 mm/año en la componente norte con excepción de TNTB con un movimiento de -1 mm/año en la componente norte. En el límite convergente, todas las estaciones sobre la Placa Tectónica de Norteamérica excepción de OAX2 presentan movimiento hacia el sureste variando las magnitudes y direcciones de los vectores de velocidad que van desde los 3.9 mm/año hasta los 11 mm/año. La magnitud y dirección distinta de los vectores resultantes de las estaciones que se ubican en la zona de subducción, puede estar relacionado con su ubicación sobre distintos bloques corticales con diferentes edades y geodinámica. En las series de tiempo se puede observar que las estaciones que se encuentran en el límite convergente con excepción de TNMS son las que más presentan más inestabilidad. La mejor estabilidad se obtuvo en el límite transformante, en las placas Tectónicas de Norteamérica y del Pacífico.

### **Abstract**

In this research work, we determined the horizontal and vertical displacements using data from 16 continuous Global Positioning System (GPS) stations located in Mexico for the 2014-2018 period. In order to define a stable reference frame, 16 control stations located outside the study area were also considered. Different tectonic environments in Mexico were analyzed for comparative purposes, considering the North American Plate as reference. Regarding the transform boundary, stations on the Pacific Tectonic Plate report velocity vectors very similar to each other, ranging from -20 to -40 mm/year in the east component and near to 30 mm/year in the north component. MEXI (Mexicali) station was the exception, reporting 17 mm/year in the north component and -21 mm/year in the east component. On the other hand, in the transform boundary, the stations on the North American Plate report velocity vectors close to 0 mm/year in the east component and 1 mm / year in the north component with the exception of TNTB (Topolobampo) with a movement of -1 mm/year in the north component. In addition, in the convergent boundary, all stations on the North American Plate except for OAX2 (Oaxaca) show movement towards the southeast, varying the magnitudes and directions of the velocity vectors ranging from 3.9 mm/year to 11 mm/year. The magnitude and different direction of the resulting vectors of the stations that are located in the subduction zone may be related to their location on different cortical blocks with different ages and geodynamics. Finally, it can be observed in the generated time-series that most of the stations relies in the convergent boundary with the exception of TNMS (Mascota) and they are the ones that show the most instability. The best stability was obtained in the transform boundary, which is related to the North American and Pacific plate.

## **Capítulo 1**

### **1. Introducción**

#### **1.1 Justificación**

La corteza de la Tierra está dividida en placas rígidas de diferentes espesores llamadas placas tectónicas, que se encuentran en movimiento debido a la convección en el manto superior, e interactúan entre sí dando origen a tres tipos de límites tectónicos (Divergente, Convergente y Transformante). En el territorio Mexicano se encuentran dos tipos de ambientes tectónicos: El ambiente tectónico Convergente entre las placas de Cocos y de Rivera y la placa de Norteamérica, y el ambiente tectónico Transformante entre la placa de Norteamérica y la placa del Pacífico. En la placa de Norteamérica es donde se encuentra la mayor parte de México, y es ahí donde ocurre gran parte de la actividad tectónica y sísmica. Además de que México se encuentra bisectado por el Cinturón Volcánico Transmexicano que se extiende del este al sureste a través de México a lo largo de 1000 km, ubicándose por encima del contorno de profundidad de 80 a 100 km de las placas subducidas de Rivera y de Cocos (Pardo y Suárez, 1995).

Debido a la tectónica activa en México, ocurren deformaciones en la corteza terrestre. Existen diversas técnicas geodésicas espaciales de medición (GPS, VLBI, SLR, LLR y DORIS) para determinar posiciones y con ello los desplazamientos dados por estas deformaciones. Una de estas técnicas con mayor utilización es la GPS, la cual mediante la utilización de estaciones de referencia permite determinar un posicionamiento tridimensional preciso de puntos localizados sobre la superficie terrestre.

Existen 2 tipos de monitoreo de desplazamientos con GPS, utilizando estaciones de operación continua o permanentes y estaciones temporales. Grandes redes de estaciones GPS alrededor del mundo proveen información espacial y temporal en los procesos de deformación de la superficie que incluyen movimiento de placas, movimiento de la corteza debida a sismos, tensión tectónica, ajuste isostático, carga superficial y el modelado troposférico con determinación del

vapor de agua. En México existen distintas redes que manejan datos de estaciones GPS permanentes y de libre acceso (UNAVCO, CORS, INEGI, TlalocNet, IGS, SOPAC, CDDIS) que tienen distintos propósitos, entre ellos está el determinar las deformaciones que ocurren en la corteza. También ayudan a la determinación de las velocidades de estación, desplazamientos co-sísmicos y movimientos de relajación post-sísmicos medidos con sistemas GPS en estaciones geodésicas que permiten el modelado de deformaciones corticales recientes con una alta resolución.

Generalmente, con el propósito de lograr un procesamiento óptimo de los datos GPS, el software a utilizar se basa en observaciones de doble diferencia (o posicionamiento relativo) (Blewitt, 1989), o solución de posicionamiento puntual preciso (PPP *solution*) (Zumberge et al., 1997). El monitoreo y estudios a través de las mediciones en estaciones de GPS presenta una gran ventaja ya que estos otorgan información reciente y de alta precisión utilizando las técnicas adecuadas (Blewitt, 1993). Además el acceso a esta información es rápido comparado con otros métodos (VLBI, SLR, LLR y DORIS).

## **1.2 Planteamiento del problema**

Aunque los movimientos tectónicos se mantienen relativamente constantes, ocurren episodios sísmicos que alteran las series de tiempo. Estos sismos se generan principalmente entre los límites de placas tectónicas, especialmente en el ambiente de límite convergente. Por lo que existen distintas tasas de velocidades y direcciones registradas por las estaciones GPS aun estando dentro de la misma placa (Márquez-Azúa y DeMets, 2009). Por lo descrito anteriormente en México se han estudiado los desplazamientos durante los sismos (Hutton et al., 2001), y durante extensos periodos de tiempo (Márquez-Azúa y DeMets, 2003, Márquez-Azúa y DeMets, 2009).

Es importante tener un monitoreo y análisis de los movimientos que se presentan en la corteza, pues las tasas de velocidades de las estaciones presentan variaciones a través del tiempo debido a las deformaciones originadas por sismos, por lo que el objetivo principal de este trabajo de investigación es la

determinación de desplazamientos corticales utilizando estaciones permanentes de distintas redes GPS que operan en México para el periodo 2014-2018. Para ello se obtendrá el posicionamiento diario de las estaciones aplicando la técnica GPS de posicionamiento diferencial, con el propósito de calcular los vectores de desplazamiento para cada estación y así realizar un análisis representativo de los diferentes ambientes tectónicos en México.

### **1.3 Objetivos**

#### **Objetivo General**

Determinación de desplazamientos horizontales y verticales mediante estaciones permanentes GPS en México para el periodo 2014-2018.

#### **Objetivos Específicos**

- Obtener el posicionamiento diario de las estaciones aplicando técnicas GPS.
- Calcular los vectores de desplazamiento para cada estación.
- Realizar un análisis comparativo de los diferentes ambientes tectónicos en México.
- Hacer una comparación de modelos de tectónica de placas.

### **1.4 Hipótesis**

Las tasas de velocidad y direcciones de desplazamiento entre los límites convergente y transformante en México son diferentes. Bajo la premisa de que las velocidades relativas de las placas del Pacífico, de Cocos y de Rivera, así como sus características corticales son distintas a la placa de Norteamérica que es donde se encuentra asentado la mayor porción de México.

### **1.5 Antecedentes**

De las investigaciones pioneras sobre la deformación de la corteza regional (a lo largo de la Península de Baja California) se llevó a cabo inicialmente desde principios de 1990, cuando Dixon et al. (1991) fueron los iniciadores de realizar mediciones GPS en sitios ubicados alrededor del Golfo de California en México, específicamente en Cabo San Lucas, Bahía de Concepción y Mazatlán con el

objetivo de dar cuenta del movimiento relativo entre las placas Tectónicas del Pacífico y de Norteamérica.

Sin embargo, la primera vez que se aplicó el GPS para la determinación del movimiento de las placas a nivel mundial fue en 1997 por (Larson et al., 2007), anteriormente la sismo tectónica a nivel mundial había sido determinada a partir de anomalías magnéticas a y datos batimétricos estableciendo un modelo global llamado NUVEL-1 (Demets et al., 1990), en el que se describe el movimiento geológico de 12 placas en todo el mundo. Blewitt (1993) concluye que se pueden medir deformaciones utilizando GPS en una escala local con precisiones de 0.1 mm, a escala global con 1 cm de precisión, y que el movimiento de la corteza cerca de los polos puede determinarse con una precisión de 15 mm, además de que por primera vez se logró el registro de desplazamientos, pre-sísmicos, co-sísmicos y post-sísmicos.

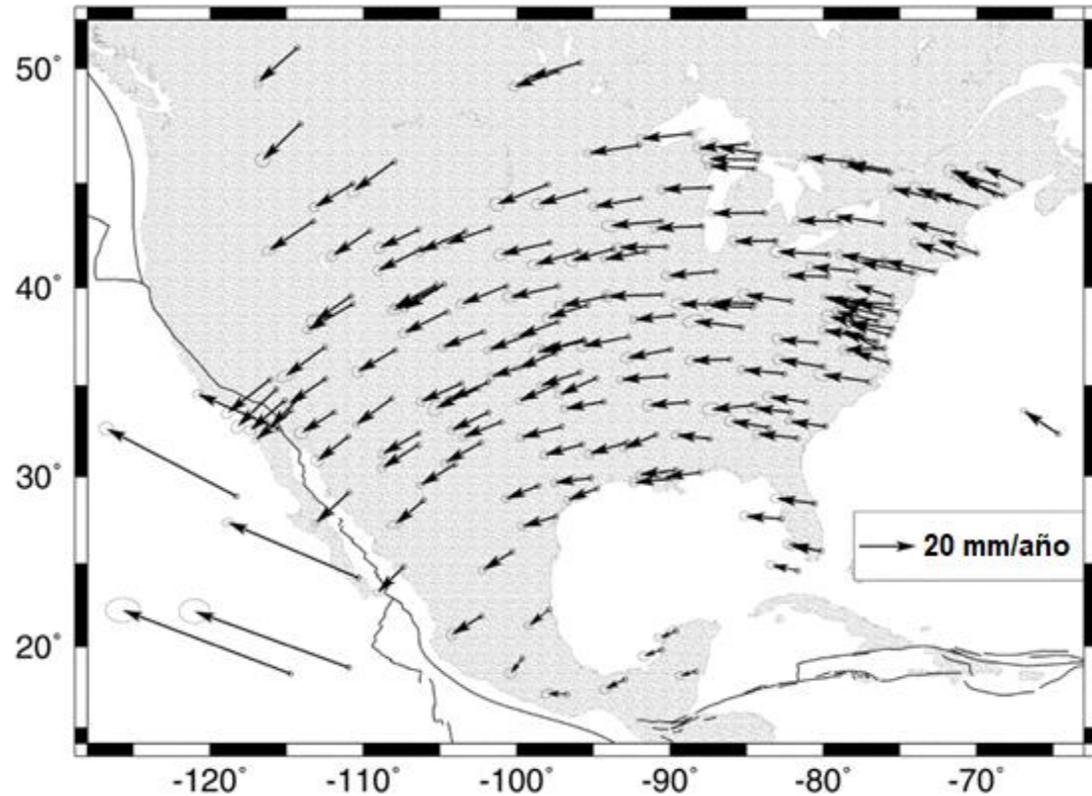
Hutton et al. (2001) establecen que existe una relación entre las deformaciones y el ciclo sísmico. Para esta observación se usaron los registros de los desplazamientos corticales horizontales y verticales derivados de las mediciones de GPS en 26 sitios en el occidente de México para estudiar la cinemática y dinámicas co-sísmicas y post-sísmicas del terremoto Colima-Jalisco de 1995 ocurrido el 9 de octubre con magnitud de 8.0 a lo largo de la Fosa de América Central. Otro trabajo reciente para la determinación de este tipo de deformaciones en México es el de Gonzalez-Ortega et al. (2014) donde se llevaron a cabo varias campañas de levantamientos de GPS de puntos de referencia preexistentes y de reciente establecimiento dentro de los 30 km de la ruptura originada durante el terremoto El Mayor-Cucapah (Mw 7.2) con deformación post-sísmica en la misma dirección que los desplazamientos co-sísmicos, las series de tiempo indican una disminución gradual en las velocidades post-sísmicas.

En el mismo sentido Lowry et al. (2001), utilizando estaciones GPS temporales de la red del estado de Guerrero, identificaron un deslizamiento transitorio o lento en la llamada “brecha de Guerrero”, con más de 5 m acumulados desde el último

sismo mayor en 1998 con una magnitud de 6.5. También se observó que los desplazamientos más lentos denominados asísmicos pueden ocurrir en la zona de subducción mexicana en los estados de Guerrero y Oaxaca (Franco et al., 2005) teniendo desplazamientos de 6 cm en 6 meses (Larson et al., 2007).

En lo que respecta a la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) de INEGI, se ha determinado el movimiento de sus estaciones desde 1993 hasta 2008, utilizando datos de 13 estaciones de la RGNA usando la técnica Posicionamiento Puntual Preciso (PPP) con el Software GIPSY encontrando diferencias en las velocidades de las estaciones situadas en distintas zonas y comparando modelos de placas tectónicas con los resultados (Márquez-Azúa y DeMets, 2003, Márquez-Azúa y DeMets, 2009).

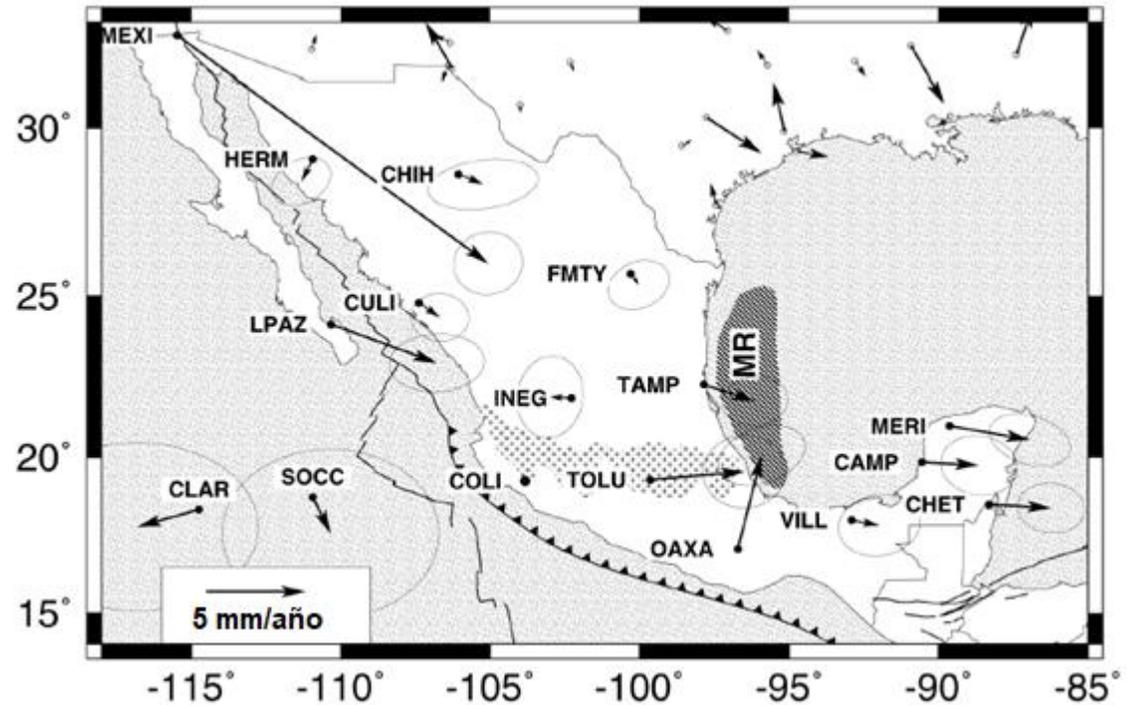
En el trabajo de Márquez-Azúa et al. (2004), se pueden observar los vectores de velocidad calculados para las estaciones de la RGNA. En la Figura 1 se muestran los movimientos de las estaciones GPS relativos al ITRF2000, donde las estaciones presentan un movimiento similar al movimiento esperado de las placas en las que se sitúan. Debido a que es difícil interpretar los resultados obtenidos ya que las estaciones se encuentran referenciadas al ITRF2000, se empleó un marco de referencia geodésico donde se usaron modelos de movimiento de la placa de Norteamérica y la placa del Pacífico. En la Figura 2, se muestra la aplicación de estos modelos donde fueron calculadas las velocidades residuales de las estaciones residuales de los sitios GPS de INEGI y Sitios GPS en las islas Socorro y Clarión, relativos a la placa del Pacífico (CLAR, SOCC, LPAZ y MEXI) o la placa de Norteamérica (todos los demás sitios).



**Figura 1.** Velocidades de los sitios GPS relativos al ITRF2000. Tomada de Márquez-Azúa et al. (2004).

Estudios recientes de DeMets et al. (2014a) y DeMets et al. (2014b) donde se utiliza la técnica de procesamiento PPP, con datos de 26 estaciones GPS de la RGNA y estaciones de las islas Clarion, Guadalupe y Socorro. Se combinaron velocidades de las nuevas estaciones estimadas para 26 sitios de GPS, incluyendo el lecho marino más antiguo en las partes central, occidental y sur de la placa del Pacífico para evaluar la deformación en el interior de la placa del Pacífico y estimar la viscosidad de la astenosfera debajo de la placa. Otros estudios que se han realizado en México es el de Brudzinski et al. (2016) donde utilizaron datos sísmicos y de GPS de la zona de subducción en México para investigar la posible relación entre terremotos, temblores tectónicos (no volcánicos) y deslizamientos transitorios a lo largo de los 200 km más occidentales esta zona. Para esto también se han realizado imágenes sísmicas del sistema de la zona de subducción de la placa de Cocos, y placa de

Norteamérica (Kim et al., 2012) en el que se muestra información sobre el proceso de subducción de la litosfera oceánica relativamente joven y su compleja geometría debajo de la placa de Norteamérica.



**Figura 2.** Velocidades residuales de los sitios GPS de INEGI y Sitios GPS en las islas Socorro y Clarión, relativos a la placa del Pacífico (CLAR, SOCC, LPAZ y MEXI) o la placa de Norteamérica (todos los demás sitios). Tomada de Márquez-Azúa et al. (2004).

Otro trabajo es el realizado por Munguía et al. (2016) sobre un análisis sísmico en el que se utilizaron estaciones sísmicas temporales. Se analizaron las secuencias de terremotos que ocurrieron en diferentes momentos con epicentros cercanos a San Carlos, Baja California Sur en diferentes periodos, unos ocurridos entre marzo y abril de 1989, octubre de 2000 y junio de 2001, y del 5 al 15 de febrero de 2004 a unos 200 km al oeste del límite de la placa del Pacífico y de Norteamérica donde, se encontró una distribución de sismos que es consistente con el segmento de falla de esa zona y se concluyó que una deformación transtensional se está produciendo en una amplia zona al margen del Pacífico con Baja California.

Dada la gran variedad de técnicas y avances que se han logrado en GPS, se han realizado diversas revisiones de avances en este campo. El más reciente es el de He et al. (2017) donde se realizó una revisión de las metodologías actuales de GPS para producir series de tiempo precisas y sus fuentes de error. Teniendo 25 años de avances en estrategias de procesamiento, métodos de mitigación de errores y modelado de ruido para el procesamiento y análisis de las posiciones diarias de las series de tiempo GPS. También investigaron las fuentes de error asociadas a diferentes paquetes de software y estrategias de procesamiento. Procesando 72 estaciones usando GAMIT para las diferencias dobles y GIPSY para la estrategia de PPP contrastando los resultados y haciendo un análisis combinatorio de ambos métodos. Se demostró que ambos paquetes de software producen resultados muy similares en términos de precisión de las series de tiempo diarias pero obtienen una mejor precisión combinando las cuasi-observaciones de los paquetes de software.

La utilización de un marco de referencia es importante para el estudio de movimientos de la corteza, Bevis et al. (2013) presenta un método para construir y evaluar la estabilidad de un marco de referencia utilizando la Técnica de *Network Positioning*, cuando se transforman las soluciones de velocidad de GPS de un marco de referencia a otro, solo los parámetros de velocidad de traducción de cuadros producen cambios significativos en las velocidades de la estación vertical expresadas en el marco de referencia final. El marco de referencia ITRF2008 (Altamimi et al., 2012) es utilizado en México donde se especifica que toda estación geodésica de propósito horizontal deberá estar referenciada al Marco de Referencia Terrestre Internacional para el año 2008, con datos de la época 2010.0, denominado ITRF2008 época 2010.0. Una densificación regional del ITRF es el de VEMOS2015 de SIRGAS en el que se utilizan 456 Estaciones para el periodo de 2010-2015 (Sanchez y Drewes, 2016). Se presenta el cálculo de un modelo continental de deformación de la corteza continua para América Latina y el Caribe deducido de las mediciones de GNSS (GPS + GLONASS) obtenidas después de los terremotos ocurridos en 2010 en Chile y México.

Existen también otros marcos de referencia que pueden ser utilizados para estudios en la placa de Norteamérica (Blewitt et al., 2013). Se desarrolló un marco de referencia terrestre para estudios geodésicos de deformación de la corteza en la placa de Norteamérica. Este marco de placa fija, designado NA12, se basa en datos de GPS de 1996.0 a 2012.1. Para el procesamiento de los datos GPS de este trabajo se utilizará el marco de referencia ITRF2014 (Altamimi et al., 2017) siendo esta la última versión de la realización del ITRF.

Grandes redes de estaciones GPS alrededor del mundo proveen información espacial y temporal de los procesos de deformación de la superficie terrestre, como la tectónica de placas, la deformación de la corteza debido a sismos las cuales generan discontinuidades en las series de tiempo, para esto se ha desarrollado un método para estimar con precisión estas discontinuidades de posiciones de GPS en épocas específicas (Montillet et al., 2015), basadas en una llamada "serie de desplazamiento". Las series de desplazamiento se obtienen variando la cantidad de datos de GPS antes y después de un evento mientras se estima el desplazamiento. Otros procesos de deformación son los de ajuste isostático, modelado de la tropósfera (Jiang et al., 2014) y carga oceánica (Bos et al., 2015). Estos procesos de deformación pueden ser modelados con cierto grado y parcialmente eliminados con los modelos correctos, funcionales y estocásticos cuando se estiman procesos geofísicos, como tasas tectónicas y señales estacionales.

## Capítulo 2

### 2. Marco Teórico

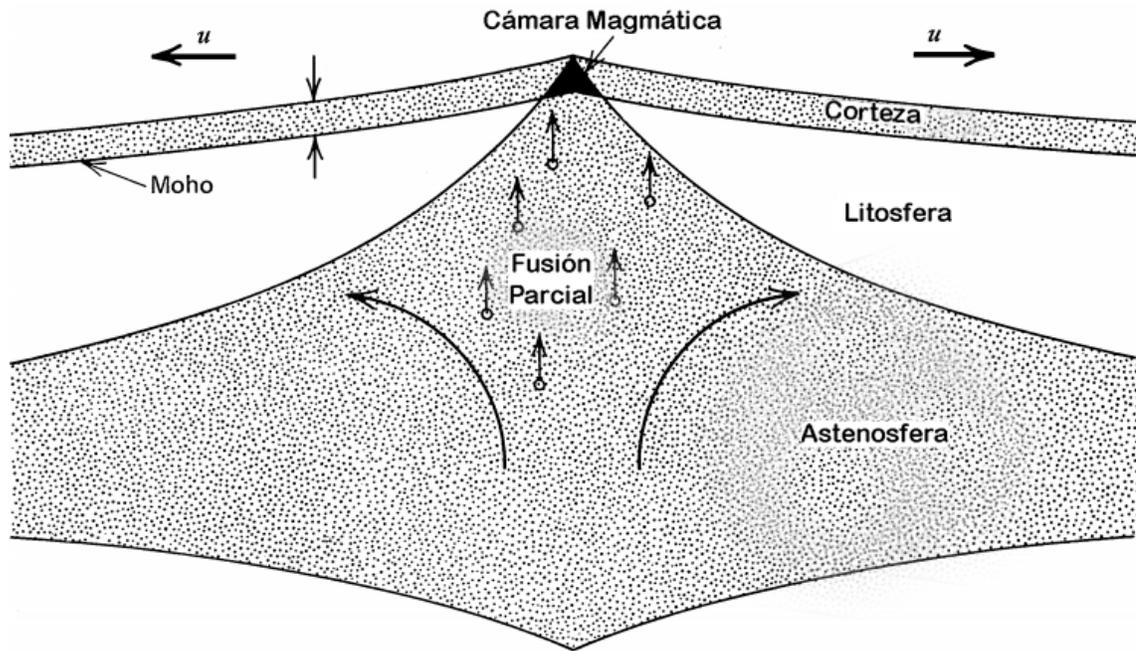
#### 2.1 Tectónica de placas

La tectónica de placas, tiene su origen en el siglo XX con la teoría de la deriva continental propuesta por Alfred Wegener. Es un modelo en el cual la corteza de la Tierra está dividida en placas rígidas de diferentes espesores, que se encuentran en movimiento debido a la convección en el manto superior. Las placas tectónicas tienen distintas velocidades de movimiento como se muestra en la Figura 3, teniendo un promedio de desplazamiento de 10 mm por año. Las velocidades de la expansión del fondo oceánico (como se muestra con flechas y cifras negras) se basan en el espaciado de las franjas magnéticas datadas (anomalías). Las flechas coloreadas muestran los datos sobre el movimiento de placas obtenidas por la Interferometría de Base Larga (VLBI) en localizaciones seleccionadas. Las placas tectónicas están conformadas de rocas frías o en proceso de enfriamiento, se encuentran en constante creación y destrucción. Las placas oceánicas tienen un espesor promedio de 7 kilómetros mientras que las placas continentales tienen un espesor promedio de entre 35 y 40 kilómetros, pero puede superar los 70 kilómetros en algunas regiones montañosas (Tarbuck et al., 2005). A medida que las placas adyacentes divergen (Límite Divergente), las rocas sólidas del manto ascienden para llenar el hueco que dejan creando nueva corteza. Cuando las placas chocan unas contra otras, se deforman y descienden hacia el interior del manto terrestre en un proceso conocido como subducción o límite convergente de placas. Las cordilleras, volcanes, sismos y metamorfismo en las rocas se dan con mayor frecuencia en el límite de placas y son el resultado de grandes desplazamientos horizontales.

El movimiento de las placas tectónicas es conducido por corrientes de convección dentro del manto superior en combinación con cambios de densidad en las placas. El cambio de densidad se produce debido a que las rocas sólidas en la astenosfera son lo suficientemente calientes para ser capaces de deformarse libremente y comportarse como un líquido a escalas de tiempo



corteza oceánica. La roca volcánica (basalto) se acumula en la base de las placas en expansión, convirtiéndose en parte de ellas.



**Figura 4.** Modelo de Fusión Parcial tomado de Turcotte et al. (2002).

Los límites divergentes están caracterizados por fuerzas de tensión que producen fisuras, fallas normales y valles de rift. Las tensiones que son aplicadas en los límites de una placa pueden ser transmitidas a través del interior de la placa. Las rocas debajo de la litosfera son lo suficientemente calientes para que la fluencia del estado sólido pueda ocurrir. Esta fluencia provoca que se comporten como un líquido en escalas de tiempo geológico.

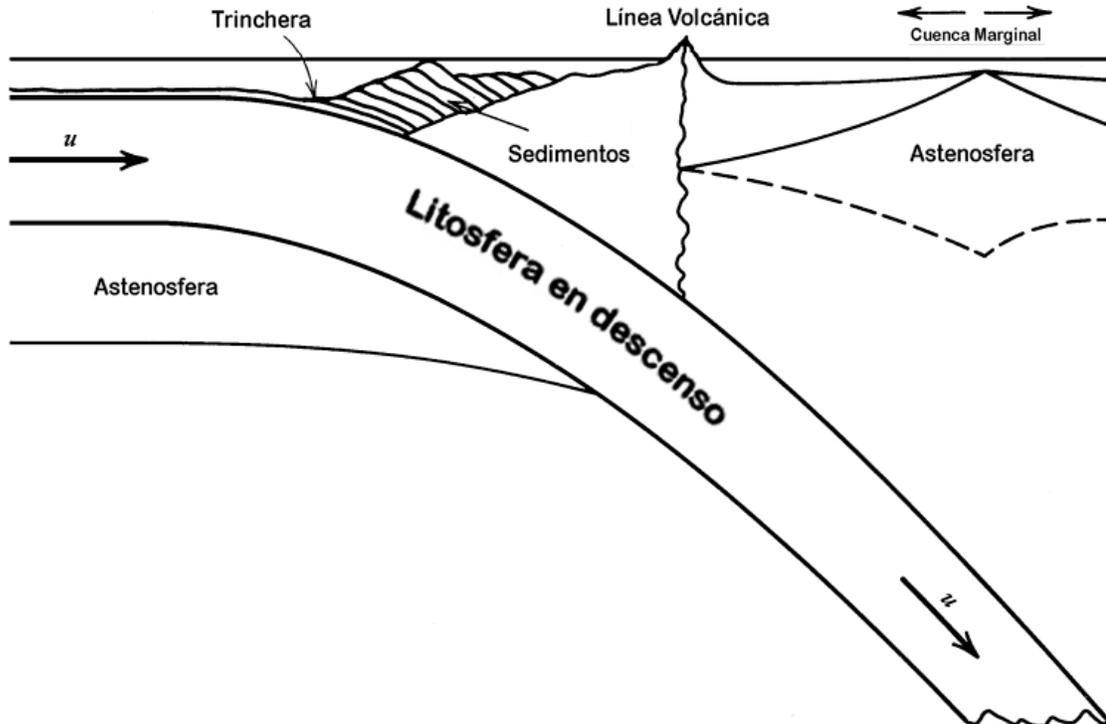
La elevación de la dorsal oceánica también proporciona una fuerza de cuerpo que hace que las placas se alejen de la dorsal. Cuando las placas se mueven lejos unas de otras la litosfera se adelgaza y la astenosfera se eleva por una ancha región. Estas zonas son conocidas como zonas de rift continental o dorsales oceánicas, dependiendo si la ruptura se da en la corteza continental u oceánica.

Cuando el manto ascendente por liberación de presión y cambio de densidad, su temperatura equivale a la temperatura de solidificación, entonces la fusión parcial de roca del manto ocurre (Figura 4). El vulcanismo en el límite divergente es generado por estos procesos. El magma producido por la fusión parcial debajo de la dorsal es más ligero que la roca del manto, y las fuerzas de empuje hacia arriba conducen el magma hacia la superficie en las proximidades de la dorsal. Se forman las cámaras magmáticas, el calor se pierde en el fondo marino, y este magma se solidifica para formar la corteza oceánica.

### **2.1.2 Límite convergente**

Las placas tectónicas están siendo continuamente creadas en las dorsales oceánicas, pero el tamaño de la tierra no aumenta, su superficie permanece constante. Para compensar esta creación las placas tectónicas son consumidas en el límite convergente ilustrado en la Figura 5 donde se muestra el proceso de subducción entre una placa oceánica descendiendo por debajo de una placa continental, donde ( $u$ ) representa la velocidad de propagación de la placa. A esta zona donde una placa tectónica desciende profundamente en el manto es llamada zona de subducción. Una velocidad típica de subducción es 0.1 m/año así que un gran sismo con un desplazamiento de 10 metros puede ser esperado a que ocurra cerca de intervalos de 100 años.

A medida que la corteza oceánica se aleja de una dorsal oceánica, se enfría y se vuelve más densa, la corteza oceánica se vuelve pesada, y al chocar con una placa de corteza continental menos densa, la corteza oceánica tiende a subducir por debajo de ella. La placa subducida se va destruyendo en el manto conforme avanza la subducción. El empuje negativo de las rocas densas de la litosfera descendiente resulta en una fuerza de cuerpo hacia abajo. Debido a que la litosfera se comporta elásticamente puede transmitir tensiones y comportarse como una guía de tensión. La fuerza de cuerpo que actúa en la placa descendiente es transmitida hacia la placa superficial la cual es jalada hacia la trinchera oceánica.



**Figura 5.** Modelo de límite convergente tomado de Turcotte et al. (2002).

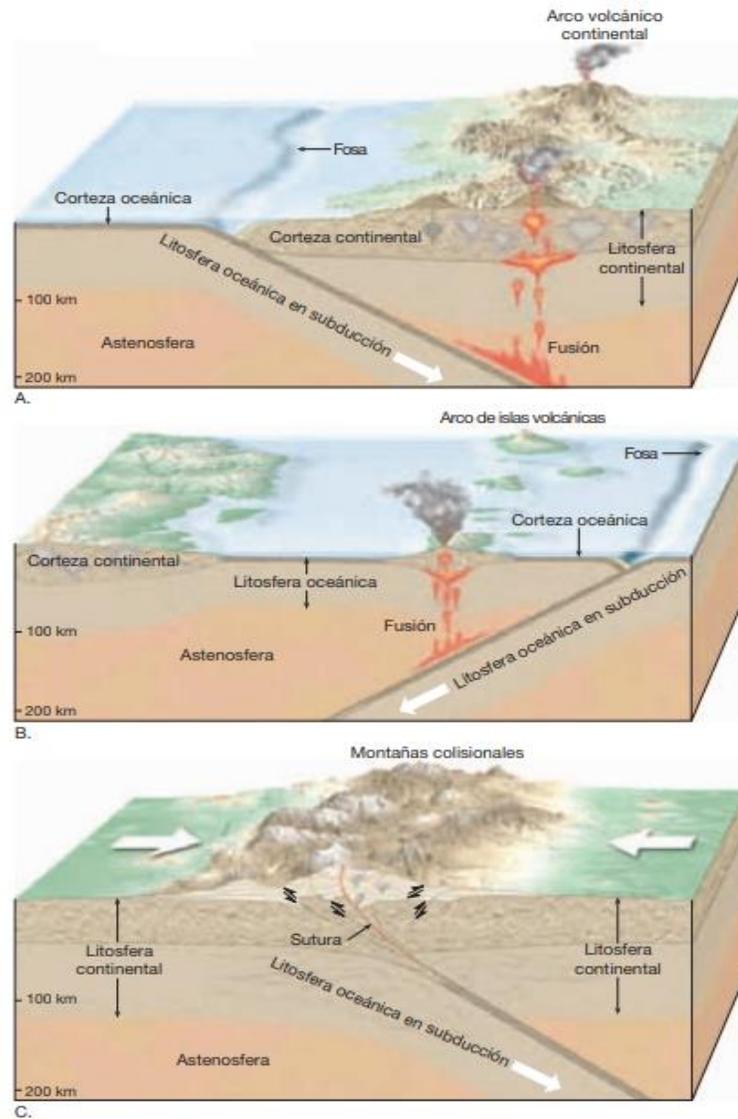
En el límite convergente, cuando la placa tectónica converge con una más delgada, la que tenga menor flotabilidad desciende comúnmente por debajo de la otra placa. Aunque en este límite se presenten características muy similares, existen diferencias por lo que se clasifican en 3 tipos como se observa en la Figura 6.

Convergente entre placas oceánica/continente (Figura 6A). Cuando una placa oceánica converge con una placa continental. Al ser más densa la placa oceánica subduce por debajo de la placa continental.

Convergente entre placas oceánica/oceánica (Figura 6B). Cuando dos placas oceánicas convergen y una subduce por debajo de la otra.

Convergente entre placas continental/continental (Figura 6C). Cuando dos placas continentales convergen generando una zona de colisión continental, en donde debido a sus cortezas gruesas y con mayor flotabilidad ninguna subduce por debajo de la otra. En esas zonas la corteza engrosa, es deformada por

compresión, sus rocas son metamorfoseadas y levantadas. Las altas elevaciones son debidas a la combinación de cabalgaduras y equilibrio isostático.

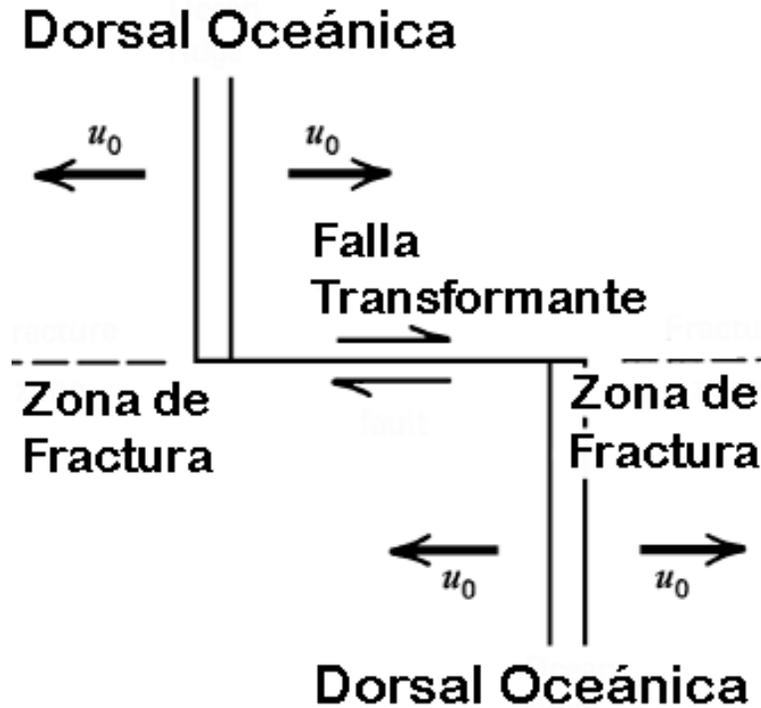


**Figura 6.** Modelos de zonas de convergencia entre placas tomado de Tarbuck et al. (2005).

### 2.1.3 Límite transformante

En algunos casos, las placas tectónicas se deslizan una con respecto a otra a lo largo de fallas transformantes. En el límite transformante, las placas se deslizan horizontalmente una al lado de la otra y la litosfera no se crea ni se destruye. Estos límites son llamados transformantes porque ellos conectan otros límites de

placas en varias combinaciones. En la Figura 7 se muestran conectados dos límites de dorsales oceánicas por una falla transformante. Los segmentos de dorsal se encuentran casi perpendiculares a la dirección de extensión, mientras que las fallas transformantes se encuentran paralelas a la dirección de extensión.



**Figura 7.** Modelo de límites de placa transformante tomado de Turcotte et al. (2002).

Un sistema de dorsales oceánicas no es una línea continua, sino una serie de segmentos de dorsales conectados y desplazados por fallas transformantes.

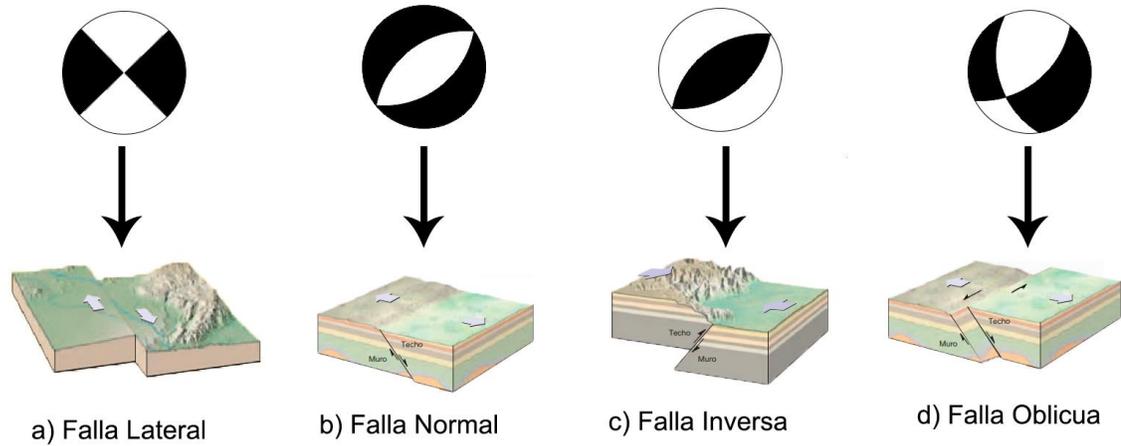
La velocidad relativa a través de una falla transformante es el doble de la velocidad de propagación de la dorsal. Esta velocidad relativa da como resultado sismicidad entre las secciones de dorsales adyacentes en la falla transformante. También hay un movimiento vertical en las fallas transformantes.

#### 2.1.4 Sismicidad

Los sismos ocurren porque los materiales son sometidos a tensiones hasta su punto de quiebre en el que se liberan las tensiones generando vibraciones en la

tierra. Estos se producen con frecuencia a lo largo de fallas. La energía que liberan es irradiada en todas direcciones. La zona en el interior de la tierra donde se produce el desplazamiento inicial es llamada foco. Y el punto sobre la superficie que está directamente encima del foco es llamado epicentro. Para representar gráficamente la dirección de deslizamiento en un sismo y la orientación de la falla en la cual ocurren se tienen los mecanismos focales (Figura 8).

Se utiliza la información de sismogramas para calcular el mecanismo focal mostrándose como un símbolo llamado “pelota de playa”. Los cuadrantes negros contienen el eje de tensión, y los cuadrantes blancos contienen el eje de presión. En la Figura 8 se muestran los mecanismos focales correspondientes al tipo de falla en el que ocurre desplazamiento en un sismo. En la Figura 8a se muestra el mecanismo focal de una falla lateral donde el movimiento es paralelo y horizontal entre los bloques. En la Figura 8b se muestra el mecanismo focal de una falla normal donde el movimiento es vertical, perpendicular y en extensión entre los bloques. En la Figura 8c se muestra el mecanismo focal de una falla inversa, al igual que en la falla normal, el movimiento vertical, perpendicular pero con fuerzas de compresión entre bloques. En la Figura 8d se muestra el mecanismo focal de una falla oblicua donde se ilustra que el deslizamiento también puede tener componentes de movimiento horizontal y vertical.



**Figura 8.** Tipos de fallas y sus mecanismos focales con figuras tomadas y modificadas de Tarbuck et al. (2005).

## 2.2 Tectónica en México

El territorio Mexicano se encuentra asentado en 5 placas tectónicas, la mayor parte del territorio se encuentra en la placa de Norteamérica, seguido de la placa del Pacífico y en menor medida las placas Rivera, Cocos y Caribe (Figura 9). La actividad tectónica es producida en mayor parte en la placa de Norteamérica, debido a su interacción con la placa del Pacífico (Limite Transformante) y Placas Rivera y de Cocos (Límite Convergente). Situándose una pequeña parte de Chiapas en la placa del Caribe.



**Figura 9.** Mapa México donde se muestra la influencia de 5 placas tectónicas generado con datos tomados de <http://www.conabio.gob.mx>.

Utilizando mediciones geodésicas de una red permanente GPS se han detectado “sismos silenciosos” a lo largo del segmento de la placa de Cocos que interactúa con la placa De Norteamérica (Kostoglodov et al., 2003). Debido a que esta zona presenta una deformación considerable principalmente donde se ubican los estados de Guerrero, Oaxaca, Michoacán y Colima, las mediciones de las estaciones GPS registran desplazamientos que no se ajustan al modelo de tectónica de placas de la placa de Norteamérica.

En el noroeste de México, en el ambiente tectónico de límite transformante entre la placa de Norteamérica y la placa del Pacífico tiene tasas de velocidades alrededor de 48 mm/año, y al suroeste de México en el límite convergente entre la placa de Norteamérica y las placas de Rivera y Cocos tiene velocidades que van desde los 20 mm/año hasta 80 mm/año cerca la frontera México-Guatemala (Márquez-Azúa y DeMets, 2009) y hasta 120 mm/año en la zona de subducción en el estado de Guerrero (Larson et al., 2007).

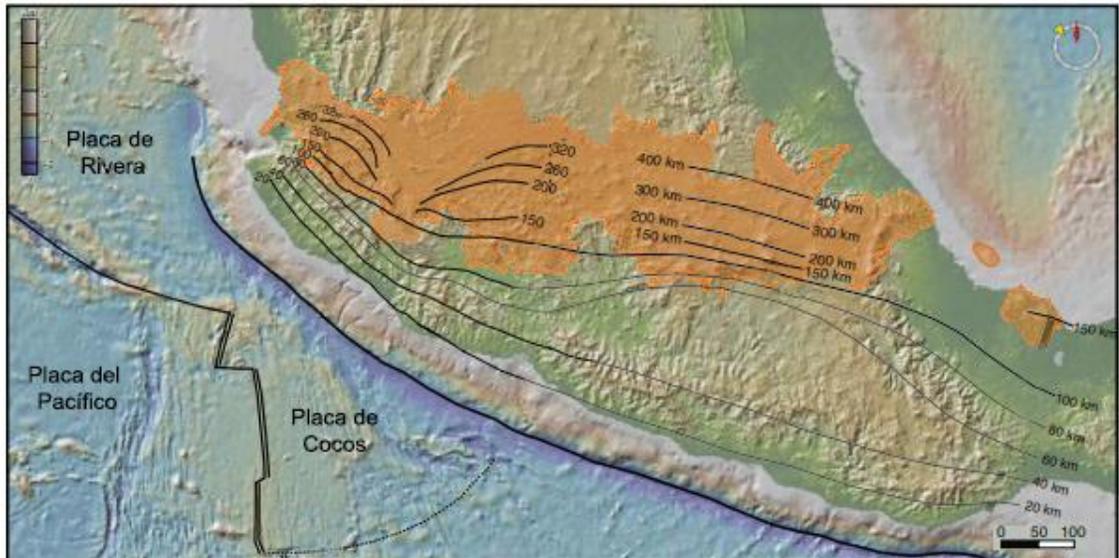
### **2.2.1 Características del límite convergente en México**

La configuración geomorfológica actual de México es consecuencia de la interacción entre las placas de Norteamérica de Cocos, de Rivera y del Pacífico. Las placas de Cocos y de Rivera están siendo continuamente asimiladas en un proceso de subducción por debajo de la Placa de Norteamérica creando una fosa oceánica que se conoce como Trinchera de Acapulco o Mesoamericana. En la zona del Golfo de México y del caribe, se tienen esfuerzos tectónicos de separación cortical, conocidos como distensivos en consecuencia del desplazamiento de la Placa de Norteamérica hacia el oeste, y de la placa del Caribe hace el este.

La placa de Norteamérica, en el pasado asimiló la placa de Farallón, generándose cinturón que migra hacia el noroeste en el interior del continente. Esta asimilación de la placa de Farallón por la placa de Norteamérica dio como origen otras microplacas que son: La placa Juan de Fuca, Placa de Rivera, Placa de Cocos, y la placa Nazca (Severinghaus y Atwater, 1990).

El Cinturón Volcánico Transmexicano tuvo origen hace aproximadamente 20 millones de años. Esta zona se encuentra en proceso de emersión afectada por efectos de distensión que generan sistemas estructurales de fosas y pilares en algunos lugares. La estructura del Cinturón Volcánico Transmexicano está constituida por valles y cuencas, y se encuentra gobernada por sistemas de fracturas y de fallas de tensión, por lo que es sísmicamente activa.

La zona de subducción presenta variaciones laterales en la profundidad de la corteza oceánica subducida (Figura 10). Teniendo ángulos de subducción de  $\sim 30^\circ$  en el extremo oeste. Rumbo al este el ángulo de subducción disminuye hacia los  $\sim 25^\circ$ . En la parte central del Cinturón Volcánico Transmexicano la geometría de la placa oceánica es sub-horizontal conociéndose como una subducción plana. El origen del segmento de subducción plana en el centro de México se desconoce. Se han mencionado diversos factores, entre los principales se encuentra , la edad de la placa subducida, la subducción de la meseta oceánica y una placa superior de anulación rápida (Ferrari et al., 2012).



**Figura 10.** Profundidad de la placa subducida en el centro de México. Tomada de Ferrari et al. (2012).

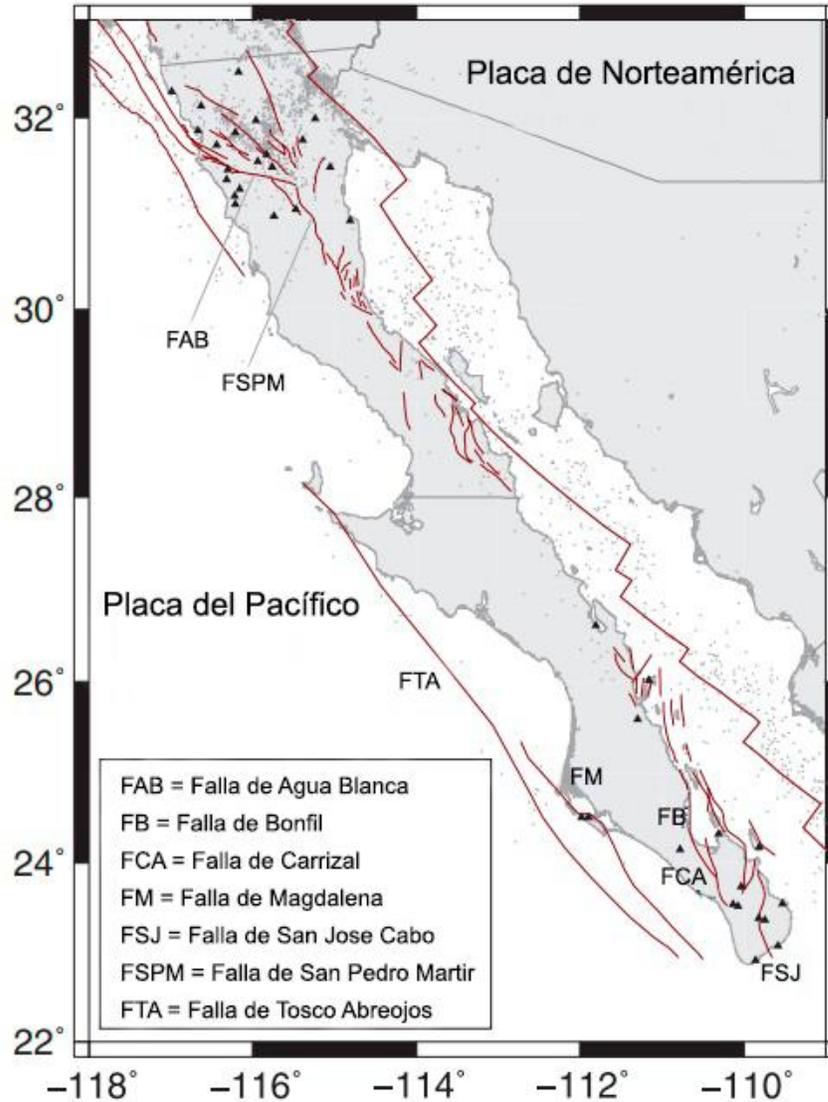
### 2.2.2 Características del límite transformante en México

En el noreste de México, la parte norte de la península de Baja California está afectada por un sistema de fallas transformante llamado el Sistema San Andrés. Son una proyección en la superficie de fallas transformantes de la dorsal oceánica asimiladas por la placa de Norteamérica (Figura 11).

El Golfo de California es parte del límite transformante entre la placa del Pacífico y la Placa de Norteamérica (Atwater y Stock, 1998). En él se forma un segmento único de límite de placas donde en el pasado la convergencia de la placa de Farallón con la placa de Norteamérica fue reemplazada por la propagación de la placa del Pacífico y la Placa de Norteamérica y varios segmentos de fallas transformantes. La placa de Farallón subdujo hace 29 Ma por debajo de la placa de Norteamérica y fue fragmentada hace 22.7 Ma cuando la dorsal que se extiende entre el límite de la Placa del Pacífico y la Placa de Farallón, alcanzó la trinchera en la zona de subducción (Barckhausen et al., 2001).

Como consecuencia la placa del Pacífico hizo contacto con la placa de Norteamérica reemplazando así el límite Convergente entre la placa de Farallón con la placa de Norteamérica por uno transformante entre la placa del Pacífico y

la Placa de Norteamérica. Con el paso del tiempo el límite entre estas dos placas se extendió hacia el norte y sur fragmentando la placa de Farallón en distintas Microplacas: La placa Juan de Fuca, Placa de Rivera, Placa de Cocos, y la placa Nazca (Lonsdale, 2005).



**Figura 11.** Sistema de fallas del límite transformante en México. Tomada de Plattner et al. (2007).

### 2.2.3 Sismicidad en México

El estudio de los sismos en México comenzó a principios del siglo XX, el primero de abril en 1904 cuando se creó la Asociación Sismológica Nacional dando como

siguiente paso la fundación del Servicio Sismológico Nacional el 5 de septiembre en 1910. En ese mismo año se inauguró la red sismológica mexicana con 9 estaciones sismológicas y desde entonces se ha mantenido una observación continua de los sismos. Actualmente el Servicio Sismológico Nacional cuenta con 35 estaciones sismológicas donde se reportan en promedio 4 sismos por día de magnitudes mayores a 3.0.

México es una Zona Sísmica debido a los ambientes tectónicos en los que se encuentra, el ambiente tectónico de límite Convergente entre la placa de Norteamérica con las placas de Rivera y Cocos, y el ambiente tectónico de límite Transformante entre la Placa de Norteamérica y la Placa del Pacífico, como se ha mencionado anteriormente. La Placa de Norteamérica se separa de la placa del Pacífico, interactúa con la del Caribe y converge con las de Rivera y Cocos, de aquí la incidencia de sismos.

En la Figura 12 se muestra que los estados con mayor sismicidad en México son: Colima, Jalisco, Oaxaca, Chiapas, Guerrero y Michoacán debido a que se encuentran en la zona de límite de placas de las placas de Cocos y Rivera que subducen con la placa de Norteamérica. Seguido de la zona del límite transformante en la Península de Baja California, Sonora y parte de Sinaloa. La zona A es una zona donde no se tienen registros históricos de sismos, no se han reportado sismos en los últimos 80. Las zonas B y C son zonas intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentemente. La zona D es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente y. La incidencia de la sismicidad en estas zonas se debe a que los materiales de la corteza se encuentran sometidos a tensiones, hasta exceder sus límites elásticos y producirse un quiebre durante el cual se liberan tensiones acumuladas y la energía se irradia en todas direcciones generando así estos sismos. No existe un promedio exacto del número de sismos por año ya que el registro de estos va aumentando conforme avanza el tiempo. Teniendo un total de 7608 sismos en el 2014 y 30193 sismos en el 2018 (<http://www2.ssn.unam.mx:8080/estadisticas/>). El promedio de sismos con

magnitudes mayores a 6.0 se mantiene estable, teniendo aproximadamente un promedio de 30 sismos por año.



**Figura 12.** Cuatro zonas sísmicas en México definidas por el Servicio Geológico Mexicano. Figura tomada de (<https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html>).

### 2.3 El Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

El Sistema de Posicionamiento Global, por sus siglas en inglés GPS (Global Positioning System) es un sistema que utiliza posiciones conocidas de satélites para obtener posiciones desconocidas en tierra, mar, aire y espacio. Fue desarrollado en 1973 por el sistema de defensa de los estados unidos y puesto en completa operación en 1993 con fines militares para la obtención de posición, velocidad y la precisa coordinación de tiempo en un sistema de referencia común. La señal del satélite es continuamente marcada con su propio tiempo de transmisión, de modo que cuando se recibe el periodo de tránsito de la señal se puede medir con un receptor sincronizado.

Las velocidades de estación, los desplazamientos co-sísmicos y los movimientos de relajación post-sísmicos medidos con Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) en estaciones geodésicas permiten el modelado de deformaciones corticales recientes con una alta resolución espacial.

La extracción de señales geofísicas de las series de tiempo de coordenadas del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es una práctica bien establecida que ha llevado a una gran comprensión de cómo se deforma la Tierra. A menudo se encuentran pequeñas discontinuidades en tales series de tiempo y se pueden rastrear ya sea a una deformación a gran escala (es decir, sismos) o discontinuidades debido a cambios en el equipo y / o fallas. La estimación de estos desplazamientos permite con precisión la identificación de las estimaciones de deformación cosísmica en el primer caso, y la eliminación de señales no deseadas en el último caso, lo que permite estimar las velocidades tectónicas con mayor precisión.

### **2.3.1 Conceptos básicos sobre el GPS**

Para la obtención de la posición se utilizan como mínimo cuatro satélites que completan una rotación cada 12 horas aproximadamente y orbitan la tierra a una altura aproximada de 22,000 Km. El GPS usa pseudorángos derivados de la señal de transmisión del satélite. El pseudorango es derivado ya sea de la medición del tiempo de recorrido de la señal multiplicada por su velocidad o por la medición de la fase de la señal. En ambos casos son empleados los relojes del receptor y del satélite. Estos relojes nunca están perfectamente sincronizados, en su lugar se obtienen los pseudorángos donde la sincronización del reloj o error del reloj es tomado en cuenta. Cada ecuación contiene 4 variables desconocidas: los tres puntos de coordenadas contenidos en el pseudorango y el error del reloj. En consecuencia, se necesitan cuatro satélites para resolver estas cuatro variables desconocidas. El concepto de GPS asume que cuatro o más satélites pueden verse desde cualquier lugar de la tierra las 24 horas del día.

Los sistemas GPS tienen una estructura definida que consiste en tres segmentos (Hofmann-Wellenhof, 2001):

El segmento espacial: Consiste en la constelación de satélites con sus señales de transmisión.

El segmento de control: Consiste en las estaciones de control maestro terrestre encargadas del monitoreo del segmento espacial para la determinación y predicción de la órbita y los relojes, sincronización de los satélites y aplicación de correcciones en la posición orbital y temporal de los satélites.

Segmento de usuario: Está compuesto de los equipos receptores GPS que reciben las señales emitidas por el segmento espacial.

### **2.3.2 Señales GPS**

Los pseudorangs son derivados de las señales transmitidas por los satélites, utilizando una estimación del tiempo de viaje de la señal hasta el punto del receptor GPS. Estas señales son emitidas en forma de ondas electromagnéticas generadas por una fuerza eléctrica oscilante propagadas como campos eléctricos y magnéticos autopropagados en forma de onda transversal a través del espacio tiempo transportando energía. Para generar estas ondas electromagnéticas se tienen osciladores a bordo de los satélites GPS. Los osciladores generan una frecuencia fundamental de 10.23 MHz que se reduce intencionalmente en 0.005 Hz para que los efectos relativistas sean compensados.

Las señales son transmitidas en dos frecuencias portadoras en la banda L, son generadas mediante multiplicaciones enteras de la frecuencia fundamental y están moduladas por códigos (L1 y L2) para proporcionar lecturas del reloj del satélite al receptor y transmitir información como parámetros orbitales (Hofmann-Wellenhof, 2001). Estas frecuencias denotadas como:

Portadora L1. Con frecuencia de 1575.42 MHz, transmite los códigos encriptados C/A (Coarse/Adquisition), P (Precise) y un mensaje de navegación.

Portadora L2. Con frecuencia de 1226.6 MHz. Transmite información militar encriptada por el código P.

Los códigos corresponden a los valores binarios 0 o 1 consistiendo en una secuencia de estados +1 o -1, llamada modulación bifásica. Esta se realiza mediante un cambio de 180 grados en la fase de la portadora cuando se produce un cambio de estado en el código.

El código C/A (Coarse/ Acquisition), también llamado Código Civil tiene 1/10 la frecuencia fundamental y se repite cada milisegundo.

El Código P (o protegido) tiene la frecuencia fundamental y se repite aproximadamente una vez cada 266,4 días. El código P es encriptado por el Código W al Código Y cuando es implementado el A-S. El A-S (Anti-Spoofing o Anti-Engaño) es un tratamiento de la señal para que los receptores no sean engañados por señales falsas tomadas como verdaderas.

### **2.3.3 Funcionamiento del GPS**

El principio del funcionamiento del GPS se basa en un problema geométrico donde a partir de un mínimo de cuatro satélites de los cuales se conocen sus coordenadas emiten señales obtenidas por un receptor (Hofmann-Wellenhof, 2001). Es necesario conocer las coordenadas de los satélites y tomar en cuenta la sincronización de los relojes del receptor y de los satélites. Al conocerse la posición de los satélites con cierta precisión estas emiten señales a intervalos regulares y con suficiente intensidad para viajar largas distancias. El receptor en tierra obtiene estas señales en un instante dado con su reloj sincronizado con los satélites. La señal obtenida tiene desfases de tiempo, este tiempo corresponde al tiempo de propagación de la señal enviada por el satélite al receptor. Con un único satélite es posible determinar una media de distancia relativa entre dos puntos, el receptor puede estar situado en cualquier sitio alrededor del satélite a esa distancia. Un satélite más agrega un círculo donde es posible que se encuentre el receptor. Un tercer satélite resuelve la posición obteniéndose dos lugares posibles donde se encuentre el receptor. El 4to satélite es necesario para la sincronización de los relojes.

### **2.3.4 Fuentes de error en el GPS**

Es importante tener en cuenta la presencia de diversas fuentes de error asociadas a mediciones con receptores GPS. Algunas se consideran aleatorias y otras de carácter natural. Son diversos los factores que provocan los errores en las mediciones disminuyendo así la calidad de las mediciones. Como ejemplo de errores en mediciones GPS se tienen: Errores orbitales por la geometría de los satélites, Multipath, desfase de los relojes de los satélites, SA, AS, efectos relativistas y desplazamiento del centro de fase, variaciones en las antenas y errores atmosféricos. Los errores atmosféricos se producen ya que antes de llegar al receptor en la superficie terrestre la señal propagada en forma de ondas electromagnéticas atraviesa tres zonas con distintas propiedades físicas: el vacío, la ionósfera y la tropósfera (Leick et al., 2015). Esto causa un retardo aumentando el tiempo de propagación de las ondas electromagnéticas desde el satélite al receptor comparado con el tiempo de propagación en el vacío debido al cambio de densidades que existen en los medios de propagación.

#### **2.3.4.1 Error ionosférico**

La ionosfera es la capa de la atmósfera ionizada provocada por la radiación solar que se extiende desde los 50 km hasta 1000 km sobre la tierra.

Las ondas electromagnéticas viajan a través del medio ionizado por la presencia de electrones libres en el campo electromagnético de la tierra causando una dispersión no lineal. En la ionosfera se produce un retardo en la señal antes de ser recibidas por los receptores GPS. Dependiente de la frecuencia esta señal es modelada y enviada por los satélites permitiendo a los receptores GPS aplicar las correcciones del tiempo de propagación de la señal. El retardo de la señal depende del TEC (*Total Electron Content*) a lo largo de la trayectoria de propagación de la señal y la frecuencia, dependiendo de las frecuencias L1 y L2 y el ángulo de elevación. Existen varias técnicas para la mitigación de este error, por ejemplo las técnicas de GPS diferencial y la combinación *ionosphere-free* con el uso de receptores de doble frecuencia diferenciando las mediciones de los

pseudorangs obteniendo una estimación de los retrasos de la señal L1 y L2 en la ionosfera.

#### **2.3.4.2 Error Troposférico**

La troposfera es la capa de la atmósfera que se encuentra desde la superficie de la tierra hasta los 50 km de altura. Es la capa anterior a la ionosfera, por lo que esta no se encuentra ionizada. En esta capa es donde se produce la refracción troposférica de la señal GPS. Es un medio no dispersivo respecto a ondas de radio con frecuencia mayores a los 15 GHz, por lo que la utilización de métodos de doble frecuencia no es posible. Este error afecta al posicionamiento diferencial y puntual. Generalmente este efecto es mitigado utilizando GPS diferencial para líneas base cortas. Existen varios modelos que son empleados para eliminar la mayor parte de este efecto los cuales son:

La componente seca que es fácil de modelar, siendo proporcional a la densidad de las partículas en la atmósfera, representando aproximadamente el 90% del total de la refracción troposférica. Utilizando mediciones de temperatura y presión puede ser modelada con una precisión del 2 cm correspondiente al 2% del error.

La componente húmeda, siendo más compleja de modelar debido a que el vapor de agua es menos uniforme. Representa el 10% del total de la refracción troposférica y depende mucho de las condiciones meteorológicas debido a la naturaleza del desplazamiento de los electrones y a la naturaleza polar de las moléculas de agua.

#### **2.3.4.3 Errores de Sincronización**

Debido al retardo de la propagación de las señales existen diferencias entre los relojes del satélite y los relojes del receptor afectando 30-60 m de distancia por cada 0.1-0.2 microsegundos. El receptor GPS está equipado con relojes de cuarzo de bajo costo y por lo tanto imprecisos y los satélites GPS incorporan relojes atómicos muy precisos.

#### **2.3.4.4 Errores de la Órbita**

La constelación del sistema GPS consta con 24 satélites en órbita a una altura aproximada de 22,000 km y completan una rotación cada 12 horas. El error de estas órbitas es de alrededor de 1-5 m en promedio. Las órbitas precisas son calculadas con hasta 5-10 cm.

#### **2.3.4.5 Disponibilidad Selectiva (SA)**

La disponibilidad Selectiva es la desestabilización sistemática del error del reloj del satélite disminuyendo la calidad de las efemérides de navegación. Fue dada con el objetivo de negar el acceso a la precisión del sistema GPS de uso civil debido a circunstancias estratégicas y políticas del momento. Fue eliminada totalmente el 2 de Mayo del 2000.

#### **2.3.4.6 Multitrayectoria (Multipath)**

Como su nombre lo indica, el Multipath es causado por la reflexión de la señal en superficies cercanas al receptor siendo recibidas en más de una ruta. Como consecuencia, la señal del receptor tiene desplazamientos relativos proporcionales a la longitud de la ruta. No existen modelos generales para el efecto del multipath debido a la arbitrariedad de las diferentes situaciones geométricas. Sin embargo el multipath puede ser estimado utilizando una combinación del código L1 y L2 en la medición de la fase portadora. El principio está basado en el hecho de que la troposfera, el error de los relojes y la influencia del código de los efectos relativista están influenciados en misma medida. Este efecto puede ser reducido en mayor medida seleccionando cuidadosamente la ubicación de la antena evitando efectos reflexivos que provoquen ruido en las mediciones y utilizando modelos de antenas con diseños especiales.

#### **2.3.4.7 Antiengaño (AS)**

El Anti-Spoofing o Antiengaño es un tratamiento de la señal para que los receptores no sean engañados por señales falsas tomadas como verdaderas. El código P es encriptado por el Código secreto denominado W dando como resultado Código Y. Este código no está disponible a los usuarios civiles.

#### **2.3.4.8 Efectos Relativistas**

El campo de gravedad que produce la tierra causa efectos relativistas en la órbita de los satélites, da lugar a una curvatura espacio-temporal de la señal del satélite por lo que se debe aplicar una corrección.

Los efectos relativistas en la órbita del satélite GPS son causados por el campo de gravedad de la Tierra, el cual causa una aceleración (perturbadora) que puede calcularse. En un campo de gravedad más intenso la oscilación de un reloj es más lenta. Por lo que estando más cerca al centro de masas de la tierra el tiempo pasa más lento. Esta diferencia de paso del tiempo es lo que causa el desajuste de los relojes de los receptores y de los satélites.

#### **2.3.4.9 Desplazamiento del centro de fase y variaciones en las antenas**

El desplazamiento del centro de fase es el punto en el cual las mediciones de la señal de radio están referidas y generalmente no son idénticas al centro geométrico de la antena (Leick et al., 2015). El desplazamiento depende de la elevación, el acimut y la intensidad de la señal del satélite. El verdadero centro de fase de la antena puede ser distinto al centro indicado por el fabricante. El desplazamiento del centro de la antena está dado simplemente por falta de precisión en la serie de producción de equipos. Para obtener este desplazamiento se hace una investigación basada en pruebas de mediciones, por ejemplo rotando la antena en un laboratorio. El centro de fase varía con respecto a la señal entrante. Existen diferentes características de las antenas cónicas en espiral, microstrip, dipolo y de hélice. Funciones simples para un apropiado modelado pueden ser hechas en pruebas de laboratorio.

### **2.4 Técnicas de posicionamiento GPS**

Se han desarrollado técnicas para calcular coordenadas de manera muy precisa por debajo del centímetro. Existe Software de procesamiento GPS de tipo científico desarrollado por instituciones de investigación que implementan estas técnicas de procesamiento como BERNESE, GAMIT-GLOBK, y GIPSY OASIS. Generalmente se basan en observaciones de doble diferencia (o posicionamiento relativo) o solución de posicionamiento puntual preciso (PPP).

En el trabajo de He et al. (2017) se realizó una investigación de las fuentes de error asociadas a diferentes paquetes de software y estrategias de procesamiento. Procesando 72 estaciones usando GAMIT para las diferencias dobles y GIPSY para la estrategia de PPP contrastando los resultados y haciendo un análisis combinatorio de ambos métodos. Se demostró que ambos paquetes de software producen resultados muy similares en términos de precisión de las series de tiempo diarias pero obtienen una mejor precisión combinando las cuasi-observaciones de los paquetes de software.

#### **2.4.1 Posicionamiento Puntual Preciso (PPP)**

La primera estrategia, Posicionamiento Puntual Preciso, se introdujo como una forma de estimar de forma individual y eficiente las posiciones de las estaciones directamente con respecto a una red de referencia global por Zumberge et al. (1997). El PPP calcula las posiciones "absolutas" en cualquier ubicación en la superficie de la Tierra. Una estación desconocida está posicionada directamente con respecto a un marco terrestre específico utilizando observaciones no diferenciadas que se define por las órbitas de los satélites GPS. No existen limitaciones de distancia entre las estaciones de GPS ya que las coordenadas y los parámetros relacionados se estiman independientemente.

#### **2.4.2 Posicionamiento Diferencial**

El segundo caso se denomina posicionamiento de red (Network Positioning), donde las líneas de base entre todas las estaciones observadas se estiman simultáneamente (Blewitt, 1989). La estrategia de posicionamiento de red puede eliminar casi por completo el reloj satelital GPS combinado y el error de reloj del receptor. Los errores debidos a la refracción troposférica e ionosférica también se pueden mitigar parcialmente en las redes locales. Para una red regional pequeña, los trayectos del satélite / receptor muestrean la misma porción de la atmósfera y se puede suponer que los efectos atmosféricos son similares. Esta suposición disminuye a medida que aumenta la distancia entre las estaciones. La desventaja es que la diferenciación de las señales de GPS reduce el número

de observaciones, lo que lleva a más apariciones de problemas mal planteados al estimar la posición de los receptores con la inversión de la matriz.

## **2.5 Redes de estaciones GPS**

Los geodestas han deseado durante mucho tiempo medir los movimientos de la corteza con diversos propósitos científicos. Uno de esos usos sería predecir sismos mediante la medición de ciertos precursores de movimiento en la tierra. El GPS es una herramienta ideal para este tipo de estudios, ya que es relativamente económico, portátil y altamente preciso.

El NGS (Servicio Geodésico Nacional) de los Estados Unidos ha medido una serie de puntos ampliamente espaciados en la parte este de su territorio utilizando receptores geodésicos GPS de doble frecuencia. Esta red se revisa periódicamente para que se pueda medir el movimiento de la corteza. Por lo general, esta información se puede utilizar para proporcionar información de ubicación de plantas nucleares, así como para proporcionar una red de alta precisión para fines generales. La red NGS está vinculada a los receptores GPS ubicados en los sitios de seguimiento de VLBI, o está referenciada a ellos.

Varios otros grupos han medido redes similares para determinar el movimiento de la corteza continental en todo el mundo. El GPS es una herramienta geodésica en el sentido de que proporciona mediciones vectoriales precisas en distancias largas y cortas. Para aplicaciones de post proceso o en tiempo real, las estaciones de monitoreo se pueden organizar en redes operativas permanentes que se denominan redes de control activo. La red IGS que funciona como una red de control pasivo también puede considerarse como una red de control activa a escala global.

Otro ejemplo de una red de control activa es la Red de estaciones de referencia de operación continua (CORS) administrada por el NGS. El NGS proporciona los datos para aplicaciones de post procesado. La red CORS es un esfuerzo cooperativo de propósitos múltiples que involucra a organizaciones gubernamentales, académicas y privadas. Los sitios son de propiedad y operación independiente. Cada agencia comparte sus datos con NGS, y NGS a

su vez analiza y distribuye los datos de forma gratuita. A partir de agosto de 2015, la red CORS cuenta con casi 2,000 estaciones, contribuidas por más de 200 organizaciones diferentes, y la red continúa expandiéndose.

En el caso particular de México existen distintas redes que manejan datos de estaciones GPS permanentes y de libre acceso (CORS, IGS, UNAVCO, INEGI, TlalocNet, SOPAC, CDDIS) que tienen distintos propósitos, entre ellos está el determinar las deformaciones que ocurren en la corteza. La red con mayor relevancia es la red de INEGI llamada Red Geodésica Nacional Activa (RGNA). La RGNA es el conjunto de estaciones de operación permanente que registran los datos del Sistema Global de Navegación por Satélite, se encuentran distribuidas estratégicamente por todo el territorio nacional, y materializan el Sistema Geodésico Nacional en su vertiente horizontal, y proporcionan servicios de posicionamiento geodésico a los usuarios mediante datos en línea y coordenadas de la más alta exactitud posicional en el país. De entre esas redes se analizaron la cantidad de días de medición por año que ofrecen sus estaciones para encontrar las que contengan la mayor cantidad de datos, las redes seleccionadas fueron la de UNAVCO y CORS.

El Centro de datos de UNAVCO maneja las tareas de administración datos y productos de GPS / GNSS de miles de estaciones permanentes distribuidas globalmente y diez mil sitios de campaña distribuidos globalmente. También proporciona un almacenamiento seguro a largo plazo para los productos de datos y datos GPS / GNSS y mantiene los metadatos en una base de datos con capacidad de búsqueda. Los datos y productos de datos están disponibles para la comunidad científica y para el público.

## **2.6 Marco de referencia**

La Tierra está cambiando constantemente de forma. Para entenderse en contexto, cuando se observa el movimiento de la corteza terrestre, se debe hacer referencia. Un marco de referencia terrestre proporciona un conjunto de coordenadas de algunos puntos ubicados en la superficie de la Tierra. Se puede

usar para medir la tectónica de placas, el hundimiento regional o la carga y / o se puede usar para representar la Tierra cuando se mide su rotación en el espacio

El GPS es una herramienta importante que puede ser utilizada para modelar y observar los procesos geodinámicos pero es importante la utilización de otros métodos de medición, por ejemplo los usados por el ITRF (GPS, VLBI, SLR y DORIS), ya que estos manejan una mayor precisión sobre todo si se utiliza la combinación de todos estos (Altamimi et al., 2012). Ya se ha comprobado que utilizando las técnicas adecuadas pueden alcanzarse precisiones bastante buenas en comparación con los otros métodos (Blewitt, 1993). Para esto la utilización de los modelos es un factor bastante importante ya que ayudan a disminuir los errores que puedan presentarse en las estaciones entonces así puede calcularse la velocidad con la que se desplaza la estación pero se es necesario que se conozcan los desplazamientos del área para que se puedan aplicar las correcciones que se requieran. Para esto se tienen los modelos globales de desplazamientos de placas tectónicas en los que se pueden determinar los desplazamientos por movimiento de las placas en puntos sobre la superficie terrestre. Estos modelos pueden ser determinados utilizando diversas técnicas en las que se utilizan datos magnéticos, datos batimétricos para el caso del NUVEL-1 (Demets et al., 1990), el GPS, VLBI, SLR y DORIS para el ITRF(Altamimi et al., 2012), o solo usando mediciones GNSS para el caso del modelo regional de SIRGAS el VEMOS (Sanchez y Drewes, 2016). También existen otro tipo de deformación en la superficie terrestre, las deformaciones no tectónicas, que son las deformaciones de mareas terrestres, oceánicas, polares, carga atmosférica, fluctuaciones de no marea de la superficie del mar y aguas subterráneas. La mitigación de estos errores mejora la serie de tiempo de las posiciones diarias del receptor, permitiendo la detección de señales geofísicas a nivel submilimétrico.

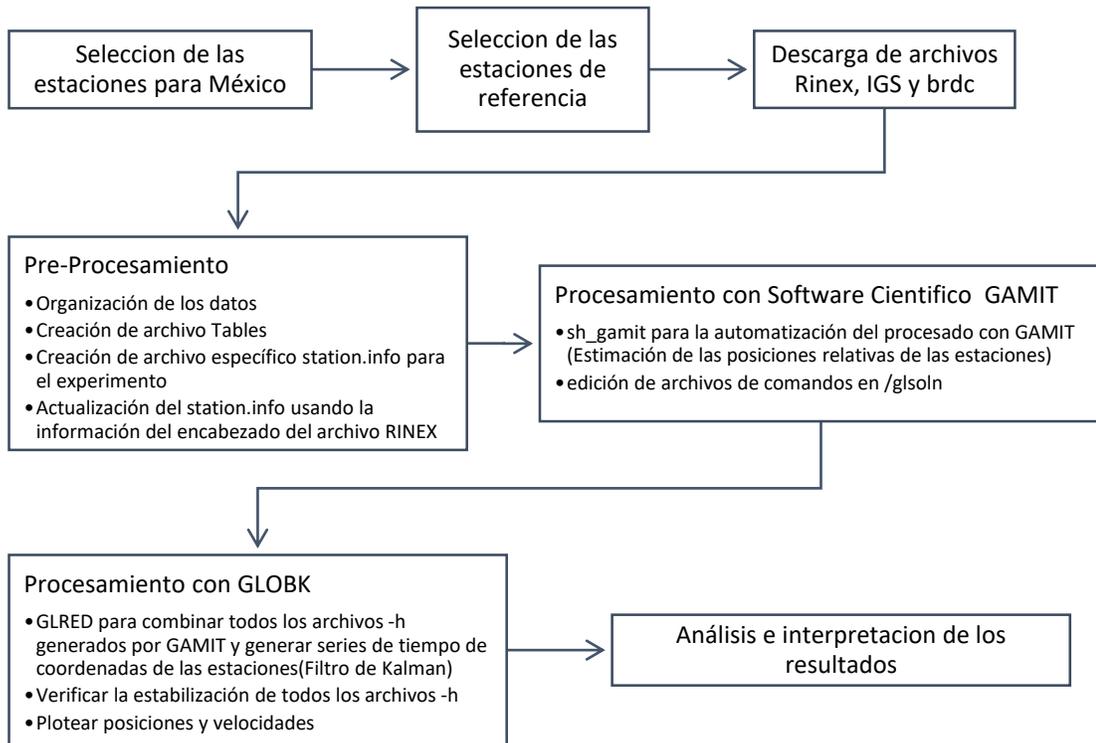
El marco de referencia utilizado para este trabajo de tesis es el ITRF2014 (Altamimi et al., 2017). El modelo ITRF2014 es una realización mejorada del Sistema de referencia terrestre internacional (ITRS) y se ha demostrado que es

de mayor calidad que las versiones anteriores de ITRF. Incluye dos innovaciones principales relacionadas las señales estacionales (anuales y semestrales) presentes en la serie de tiempo de posiciones de la estación y deformaciones post-sísmicas. Es una versión actualizada de soluciones reprocesadas basadas en las 4 diferentes técnicas de la geodesia espacial (GPS, VLBI, SLR y DORIS). Se utilizaron 124 sitios geodésicos alrededor de todo el planeta para el cálculo de sus series de tiempo y velocidades distribuidos. Su componente Z puede oscilar en particular entre 0 y más de 1 mm al año.

## Capítulo 3

### 3. Materiales y métodos

Como se muestra en el esquema metodológico (Figura 13) primero se realizó la descarga de datos de estaciones en México para el periodo 2014-2018, esto incluye las estaciones para el sistema de referencia y los archivos de efemérides precusas (igs) y globales de navegación (brdc); una vez obtenidos estos datos fueron ordenados y almacenados en sus carpetas correspondientes. Archivos especiales de entrada (ejemplo: tables) requeridos para el procesamiento fueron obtenidos, y actualizados mediante comandos o descarga de estos. Al tener todos los archivos en orden se realizó el procesamiento con el Software Científico GAMIT para obtener el posicionamiento relativo de las estaciones utilizando la técnica de diferencias dobles (Blewitt, 1989) a lo que prosiguió la edición de los archivos de comando del software GLOBK y GLORG, para procesar y obtener posiciones de cada estación y con esto generar las series de tiempo. Estas fueron corregidas de valores anómalos utilizando el programa tsview de MATLAB. Además para tener un conocimiento acerca de la tectónica y sismicidad reciente en México fueron descargados datos de epicentros de sismos en México obtenidos del catálogo de sismos del Servicio Sismológico Nacional (<http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>). Datos de Mecanismos focales de sismos en México con datos obtenidos del Global CMT Catalog para el periodo 2014-2018 obtenidos utilizando datos del tensor del momento sísmico, para trazar perfiles sísmicos utilizando secciones transversales de 100 Km de ancho a través de los dos ambientes tectónicos en México. Estos perfiles fueron graficados junto con modelos de profundidad de la corteza terrestre utilizando una cuadrícula de 1x1 grado y una interpolación del modelo CRUST 1.0 (Laske G, 2012) y un mapa de elevación del terreno utilizando un modelo digital de elevaciones mundial ETOPO (C. Amante, 2009).



**Figura 13.** Esquema metodológico de la estrategia del procesamiento de datos GPS con el software GAMIT/GLOBK.

### 3.1 Software científico GAMIT/GLOBK

La primera parte para el análisis de los datos consiste en usar la técnica de diferencias dobles en las observaciones GPS para estimar las coordenadas de las estaciones a través del software científico GAMIT y luego generar series de tiempo utilizando el software GLOBK en un sistema de referencia donde se combinan los resultados geodésicos generados por GAMIT. En conjunto es el paquete llamado GAMIT/GLOBK (Herring et al., 2010). Es un paquete de análisis GNSS desarrollado en el MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), el CfA (*Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics*), SIO (*Scripps Institution of Oceanography*) y la ANU (*Australian National University*), para estimar coordenadas y velocidades, representaciones estocásticas o funcionales de

deformaciones post-sísmicas, retrasos atmosféricos, orbitas de satélites y parámetros de orientación terrestre.

### 3.2 Hardware utilizado

El hardware que se utilizó para el procesamiento de datos es un servidor HP ProLiant ML350p Gen8 (Figura 14).

- Procesador: Intel Xeon E5-2609V2 (2.5 GHz, 10 MB de caché, 4 núcleos)
- Memoria RAM: 4 GB DDR3
- Disco duro Externo 2TB



**Figura 14.** Servidor HP ProLiant ML350p Gen8. El disco duro externo de 2 TB se encuentra conectado a uno de los puertos USB del Servidor.

### 3.3 Selección de los datos GPS

Para la realización del procesamiento de los datos se buscaron las redes geodésicas GPS que ofrezcan datos de estaciones de medición continua para el periodo 2014-2018 y el Territorio Mexicano (UNAVCO, CORS, INEGI, TlalocNet, IGS, SOPAC, CDDIS). De entre esas redes se analizaron la cantidad de días de medición por año que ofrecen sus estaciones para encontrar las que contengan la mayor cantidad de datos, las redes seleccionadas fueron la de UNAVCO y CORS.

Los datos utilizados fueron datos RINEX de estaciones de redes GPS para México de UNAVCO y CORS. Los archivos RINEX por sus siglas en inglés "*Receiver INdependent EXchange*", es un formato de archivos que se generan en cada estación GPS proveniente de la observación satelital. Está orientado a almacenar de manera estandarizada, medidas proporcionadas por los receptores GPS que constan de las medidas de la fase portadora L1 y/o L2, pseudodistancias, satélites observados, tipo y altura de antena, entre otros.

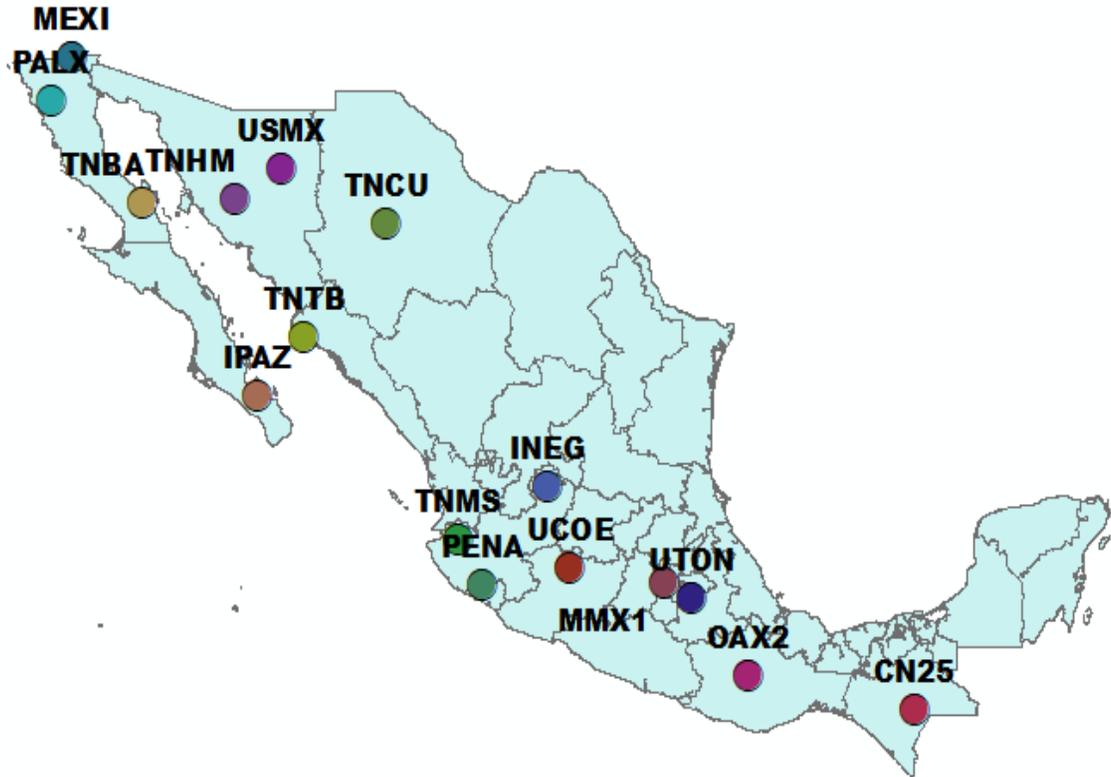
Los datos RINEX a procesar fueron descargados de las páginas de las redes vía servidores ftp utilizando el software FileZilla Client. Las condiciones para seleccionar las redes y las estaciones fueron las siguientes:

- Para facilitar el proceso de descarga primero se buscaron las redes que contengan la mayor cantidad de estaciones, ya que las estaciones tienden a compartir redes y los datos de estas pueden ser descargados desde múltiples servidores.
- Estaciones GPS en el área de México
- Más de 2.5 años de mediciones, de preferencia 5 años para el periodo 2014-2018 (Tabla 1). Esto se debe a que con más de 4.5 años las estimaciones no son necesarias y menores a 2.5 años es el mínimo recomendado (Blewitt y Lavallee, 2002).
- Más de 300 días de medición por año por estación.

Una vez establecidas esas condiciones de selección se realizó otra selección en la que se seleccionaron 8 estaciones por cada uno de los dos ambientes tectónicos que existen, 16 estaciones GPS en total (Figura 15).

**Tabla 1.** Tabla de las estaciones GPS utilizadas con la cantidad de días de mediciones por años.

<b>ESTACIÓN</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>
<b>INEG</b>	362	365	352	352	365
<b>IPAZ</b>	365	365	347	346	365
<b>OAX2</b>	365	353	350	353	360
<b>MEXI</b>	365	365	338	340	365
<b>MMX1</b>	359	360	366	365	348
<b>CN25</b>	316	365	366	365	365
<b>PALX</b>	365	365	366	365	365
<b>PENA</b>	365	362	366	354	286
<b>TNBA</b>	34	365	366	364	365
<b>TNCU</b>	167	365	366	365	365
<b>TNHM</b>	169	365	366	365	365
<b>TNMS</b>	117	365	366	348	365
<b>UCOE</b>	340	364	364	365	365
<b>USMX</b>	270	365	366	365	365
<b>UTON</b>	284	365	366	365	364
<b>TNTB</b>	0	329	366	365	0



**Figura 15.** Mapa del territorio Mexicano en el que se muestran en distinto color las ubicaciones de las estaciones utilizadas para el procesamiento de los datos GPS.

### 3.4 Pre-Procesamiento

#### 3.4.1 Marco de referencia

Las coordenadas de las estaciones de las redes geodésicas GPS, se publican con respecto a un marco de referencia y en una época de tiempo específica. Las coordenadas publicadas para una estación con respecto al marco de referencia, sólo son válidas para la fecha específica. El marco de referencia utilizado para este trabajo de tesis es el ITRF2014 (Altamimi et al., 2017).

Como siguiente paso para realizar este estudio también se recopilaron e incluyeron los datos de 16 estaciones GPS localizadas fuera del área de estudio con el objetivo de definir un marco de referencia estable para ser procesado con GLOBK.

En este proceso se obtiene una estabilización mediante la minimización de cada solución diaria a partir de un grupo de estaciones seleccionadas. Esta estabilización se realiza una iteración para eliminar estaciones de las cuales sus posiciones no son consistentes con las coordenadas ya definidas por el marco de referencia establecido, además de realizarse una rotación y traslación de las coordenadas. Al final se obtienen las series de tiempo derivada de la combinación de soluciones diarias. Las estaciones que se utilizaron son estaciones de la Red IGS de áreas sin deformación dadas por AUSPOS (Dawson et al., 2001) mostradas en la Figura 16 y el modelo NA12 (Blewitt et al., 2013) en el interior de la placa de Norteamérica con posiciones y velocidades mostradas en la Tabla 2 y sus series de tiempo mostradas en las Figuras 47 a la 62.

Las estaciones de referencia son las siguientes:

- Para AUSPOS son: ALBH, AMC2, BREW, DRAO, GLPS, GOLD, JPLM, MANA, MONP, NANO, NIST, SCUB, SSIA, VNDP.
- Para NA12: AMC2, CIT1, PIE1.

**Tabla 2.** Posiciones y velocidades de las estaciones implementadas para el marco de referencia ITRF2014 Época 2010.

Estación	X (m)	Y (m)	Z (m)	Vx (mm/año)	Vy (mm/año)	Vz (mm/año)
ALBH	-2341333	-3539050	4745791	-0.00998	-0.00087	-0.005
AMC2	-1248596	-4819428	3976506	-0.01483	0.00052	-0.00474
BREW	-2112007	-3705352	4726827	-0.01463	0.00027	-0.00727
CIT1	-2491490	-4660803	3559129	-0.02854	0.02423	0.00945
DRAO	-2059165	-3621108	4814432	-0.01555	-0.00075	-0.00615
GLPS	-33801.4	-6377517	-82154.3	0.05098	0.00024	0.01033
GOLD	-2353614	-4641385	3676976	-0.01594	0.00553	-0.004
JPLM	-2493305	-4655215	3565498	-0.02853	0.02421	0.00943
MANA	407981.9	-6222926	1333529	0.00683	0.00822	0.01045
MONP	-2386247	-4802359	3444902	-0.03059	0.02515	0.01327
NANO	-2335727	-3451608	4812010	-0.01087	-0.00117	-0.00421
NIST	-1288398	-4721697	4078625	-0.01523	-0.00021	-0.00419
PIE1	-1640917	-5014781	3575447	-0.01362	0.00036	-0.00532
SCUB	1474538	-5811243	2168959	-0.00605	0.00088	0.00439
SSIA	95567.04	-6197786	1500591	0.00577	0.00043	0.00891
VNDP	-2678090	-4525437	3597432	-0.03011	0.03318	0.01915



**Figura 16.** Imagen generada por AUSPOS donde se muestran en círculos amarillos las estaciones utilizadas y triángulos negros las estaciones de referencia generadas por el Software.

### 3.4.2 Tratamiento previo de los datos GPS

Al descargarse los archivos GPS de observación vienen en formato comprimido Hatanaka, o RINEX comprimido con extensión .d en lugar de .o como los de observación. Los principales beneficios de tener los archivos de observación comprimidos es que requieren un almacenamiento significativamente menor ocupando entre un 25% y un 30% del espacio de almacenamiento del archivo original. Lo que da como resultado una carga de red significativamente reducida. Además las transferencias para la descarga de datos son mucho más rápidas y el almacenamiento reducido permite una mayor cantidad de datos en línea. El programa para descomprimir estos archivos es el convertidor `crx2rnx`. Ejecutando desde la línea de comandos en Windows se especifica la ruta y se ejecuta el programa donde se encuentran los archivos de observación a descomprimir de la forma `crx2rnx archivo_hatanaka`. Como resultado se crean los archivos RINEX en el directorio de trabajo.

Antes del procesamiento los datos fueron tratados con el software TEQC (Test of Quality Check), proporcionado por UNAVCO, el cual permite leer archivos nativos de receptores GNSS y traducir los datos a otros formatos, editar y corregir archivos de cabecera RINEX y verificar la calidad de los datos GPS y/o GLONASS con o sin los archivos de navegación con efemérides. Es importante tener las mediciones en los mismos intervalos de muestreo ya que estos pueden generar saltos en series de tiempo, además de reducir la carga de trabajo al procesar los datos. Se eligió el intervalo de 30 segundos para estandarizar el tiempo de observación además de reducir la carga de trabajo a la mitad. También se eliminaron el resto de las constelaciones dejando solo la GPS dado que la versión 6.10 de GAMIT/GLOBK que es la utilizada para el procesamiento de los datos no integra todas las constelaciones

La utilización de la línea de comando en TEQC queda de la siguiente forma:

```
teqc.exe +out archivo_salida.año -O.obs L1C1L2P2D1 -R -S -E -C -J -O.dec 30  
archiva_entrada.año
```

- Siendo teqc.exe donde se especifica que es el programa en la línea de comandos que se utilizará.
- +out para redirección de la salida estándar a archivos específicos
- -O.obs L1C1L2P2D1 especifica la lista de los observables deseados y el orden deseado, dejando solo los observables L1, C1, L2, P2 Y D1.
- -R -S -E -C -J elimina el resto de las constelaciones GNSS en caso de haberlas
- -O.dec 30 especifica el intervalo de medición deseado en segundos, para este caso 30 segundos.

### **3.4.3 Tipos de Archivos**

Además de los archivos RINEX se requieren otros archivos para el procesamiento de datos, estos son: archivos de efemérides brdc, archivos de órbitas finales igs, y la información del archivo tables.

- Los archivos de efemérides globales brdc, son archivos de navegación que contienen mensajes únicos de efemérides o posiciones satelitales para cada día. Un gran porcentaje de sitios GPS proporciona datos de navegación además de datos de navegación. El CDDIS (*Crustal Dynamics Data Information System*) crea archivos de transmisión diaria a partir de estos archivos de navegación transmitidos por las estaciones. Los archivos efemérides diaria son combinación de los archivos de navegación de varios sitios individuales en un solo archivo no redundante que pueden ser utilizados en lugar de los muchos archivos de navegación individuales.
- Los centros de análisis de IGS proporcionan soluciones de órbita satelital al CDDIS, de las cuales se produce un producto combinado, que luego se archiva en el CDDIS. Estas soluciones combinadas son consideradas los productos oficiales de IGS. Se tienen como resultado tres tipos de soluciones que están disponibles en tres formas: ultra-rápida, rápida y final. El producto ultra rápido, es útil para aplicaciones en tiempo real; La solución ultrarrápida incluye órbitas satelitales observadas y pronosticadas. Las soluciones IGS finales, consisten en archivos de órbita diarios, generados semanalmente aproximadamente 13 días después del final de la semana de la solución. Todos los archivos de soluciones de órbita utilizan el formato del Producto Estándar Extendido 3 (SP3c). Los productos finales son la base para el Sistema de Referencia IGS y tienen la mejor precisión.
- Los archivos de tables se obtienen del mismo software científico GAMIT/GLOBK y contienen información necesaria previa al procesamiento, como: parámetros del procesamiento (process.defaults); las estaciones que se de desean considerar y cómo se manejarán los meta datos (sites.defaults); nombres y datos de las estaciones a utilizar, tipo de antena, altura etc (station.info); modelos de mareas terrestres, solares, carga oceánica etc. Los ocho tipos de archivos y datos de control se encuentran listados abajo:
- process.defaults: Este archivo especifica el ambiente de cómputo, fuentes para datos internos y externos, archivos de órbitas, tiempo de inicio e intervalo de muestreo, y las instrucciones para guardar los resultados

- `sites.defaults`: Este archivo se encarga de especificar cuales estaciones locales e IGS serán usadas y cómo serán manejados los metadatos.
- `station.info`: Este archivo contiene información sobre el receptor, tipo de antena y valores de altura de los instrumentos en función del tiempo para todas las ocupaciones de las estaciones que se usarán. A pesar de que puede ser generado durante el procesamiento con `sh_gamit`, en caso de que una antena dada no se encuentre en el listado puede ser actualizado con el comando `sh_upd_stnfo` para llevar a cabo el registro de la nueva antena y así optimizar el tiempo de trabajo.
- Archivos de coordenadas: `sh_gamit` maneja en el directorio de experimento dos archivos de coordenadas a priori. `lfile` define las coordenadas aproximadas de las estaciones GPS a utilizar y los archivos que finalizan en `.apr` contienen las coordenadas cartesianas (posición y velocidad) las cuales se mantendrán sin cambios durante el procesamiento.
- `sestbl.` y `sittbl.` : En estos archivos se especifican el control para el procesamiento de los datos (`sestbl`) y los constreñimientos de las estaciones (`sittbl.`)
- `autcln.cmd`: Controla la limpieza de datos en `autcln`. Este archivo usualmente no requiere edición a no ser que se encuentren datos inusuales durante el procesamiento.
- Archivos globales. También es importante tener en mente la forma en la que los archivos contienen datos externos, metadatos de medición, y archivos de comandos que pasan de su ruta original al directorio de procesamiento. Los archivos globales, los cuales contienen información útil para varios levantamientos residen el directorio `gg/tables`, pero están asociados por `sh_gamit` en el directorio de proyecto `/tables` y dentro del directorio de días. Estos archivos globales incluyen:
  - Tablas EOP del IERS: `ut1. Pole`
  - Tablas de nutación (IERS/IGS standards) `nutabl.`
  - Efemerides Lunar-solar `luntab. soltab.`
  - GPST - UTC `leap.sec`

- Códigos de los receptores y antenas IGS rcvant.dat
- Códigos de los receptores y antenas definidos por el usuario codes1 guess\_rcvant.dat
- Dimensiones mecánicas de antenas en tierra hi.dat
- Bloque satelital #s, PRN #s, masas snav.dat
- Modelos del centro de fase de las antenas antmod.dat
- Sesgos de código P1-C1, P1-P2 dcb.dat
- Funciones de mapeado empírico ZHD y (MF) gpt.grid
- Dependencia Espacio-Tiempo ZHD y MF map.grid, map.list
- Carga oceánica otl.grid, otl.list
- Carga atmosférica loading atl.grid, atl.list
- Carga atmosférica sin mareas loading atml.grid, atml.list

### **3.5 Configuración inicial del procesamiento con GAMIT**

Habiendo realizado la obtención y el tratamiento previo de los datos se prosiguió a crear el directorio del proyecto organizándose en carpetas y subcarpetas de la siguiente manera:

Como carpeta principal se tiene de la siguiente manera.

/Nombre del Proyecto/

Dentro de esta carpeta se crearon carpetas con la siguiente estructura y nombres, donde las carpetas 2014 a 2018 contienen los datos por cada año de procesamiento.

/2014 /2015 /2016 /2017 /2018 /tables /vsoln /emed\_rinex

Dentro de las carpetas por años los archivos brdc, igs, RINEX y de tables se organizaron de la siguiente manera. /brdc /igs /rinex /tables. El resto de archivos y carpetas fueron generados automáticamente durante el procesamiento.

Utilizando el sh\_setup se creó el directorio de tables que ahora contiene copias de los archivos estándar de gg/tables (process.defaults, sestbl. station.info, autcln.cmd, sites.defaults y sittbl.).

Con `sh_upd_stnfo` se actualizó la información de `station.info` utilizando información de las cabeceras de los archivos RINEX que no se encuentran en el `station.info` del MIT. Este proceso dura aproximadamente 10 días por cada año de datos.

### 3.6 Procesamiento con GAMIT

Una vez obtenida la actualización del `station.info` se obtuvieron las soluciones diarias con `sh_gamit` donde se produce la solución llamada “loosely constrained solution” junto con sky plots de datos de fase como un registro del procesamiento:

```
sh_gamit -expt <nombre_experimento> -s <año> <día_inicio> <día_final> -pres  
ELEV -orbit IGSF -copt x k p -dopts c ao >&! sh_gamit_año.log
```

- -expt indica el nombre del experimento
- -s especifica el intervalo de mediciones
- -pres ELEV grafico de fase vs elevación como skyplots
- orbit indica el tipo de orbita
- IGSF son órbitas finales IGS
- -copt Lista de archivos a comprimir en el directorio de día
- -dopts Lista de archivos a borrar del directorio de día

Este proceso dura aproximadamente 8 días por cada año de datos.

Luego se editaron los archivos en `/gsoln` que son: `globk_comb.cmd` para proveer la entrada para GLRED y `glorg_comb.cmd` para especificar cuales sitios serán usados para definir el marco de referencia.

- El archivo de comandos `globk` (`globk_comb.cmd`) controla las acciones de GLOBK a través del uso de comando de tres tipos:
  - Nombres de los archivos: Los archivos reutilizables por el programa y los archivos que contienen las coordenadas a priori de las estaciones, información de efemérides satelitales, y comandos de *earthquake/rename*.
  - Opciones de salida: que son usadas para adaptar la salida para una ejecución deseada

- Especificación de las incertidumbres y la naturaleza estocástica de los parámetros en la solución. Estos comandos también determinan cuales parámetros serán usados, y cómo la solución en los archivos-h es tratada.
- El archivo de comandos glorg (glorg\_comb.cmd) controla las acciones de GLOBK para definir los parámetros de origen de traslación y rotación. Permite definir el marco de referencia de la solución después que los datos hayan sido combinados por GLOBK e imponer otros constreñimientos de estaciones.

### 3.7 Procesamiento con GLOBK

El paso posterior al procesamiento con GAMIT es la utilización de GLOBK donde se hicieron los cálculos de posición y velocidades de las estaciones. Primero se usó sh\_glred que usa los resultados de GAMIT para producir series de tiempo del día a día o archivos -h combinado que puede combinarse aún más con los de otras épocas para estimar las velocidades de las estaciones.

```
sh_glred -s <año1> <día1> <año2> <día2> -expt <nombre_experimento> -opt H  
G T >&! sh_glred_año.log
```

- -opt define las opciones de procesamiento
- H Ejecuta htoglb en todos los archivos ascii presentes o asociados con glfpt creando un archivo gdl para cada día distado en los archivos-h
- G Ejecuta glred para combinación usando globk\_comb.cmd y glorg\_comb.cmd
- T Genera gráficas de series de tiempo del programa tssum, invocado por sh\_plotpos

Luego se verificó la estabilización de todos los archivos -h usando el comando “grep 'POS STAT' \*.org”

y por último se generaron los archivos para graficar las series de tiempo de las posiciones con

```
glred 6 globk_rep.prt globk_rep.log exme.gdl globk_long.cmd
```

y velocidades con

```
globk 6 globk_vel.prt globk_vel.log exme.gdl globk_long.cmd VEL
```

Para grandes redes geodésicas GPS, particularmente aquellas que incluyen estaciones permanentes con discontinuidades y movimientos no lineales debidos a sismos las herramientas tsvview y velview pueden ser herramientas bastante útiles.

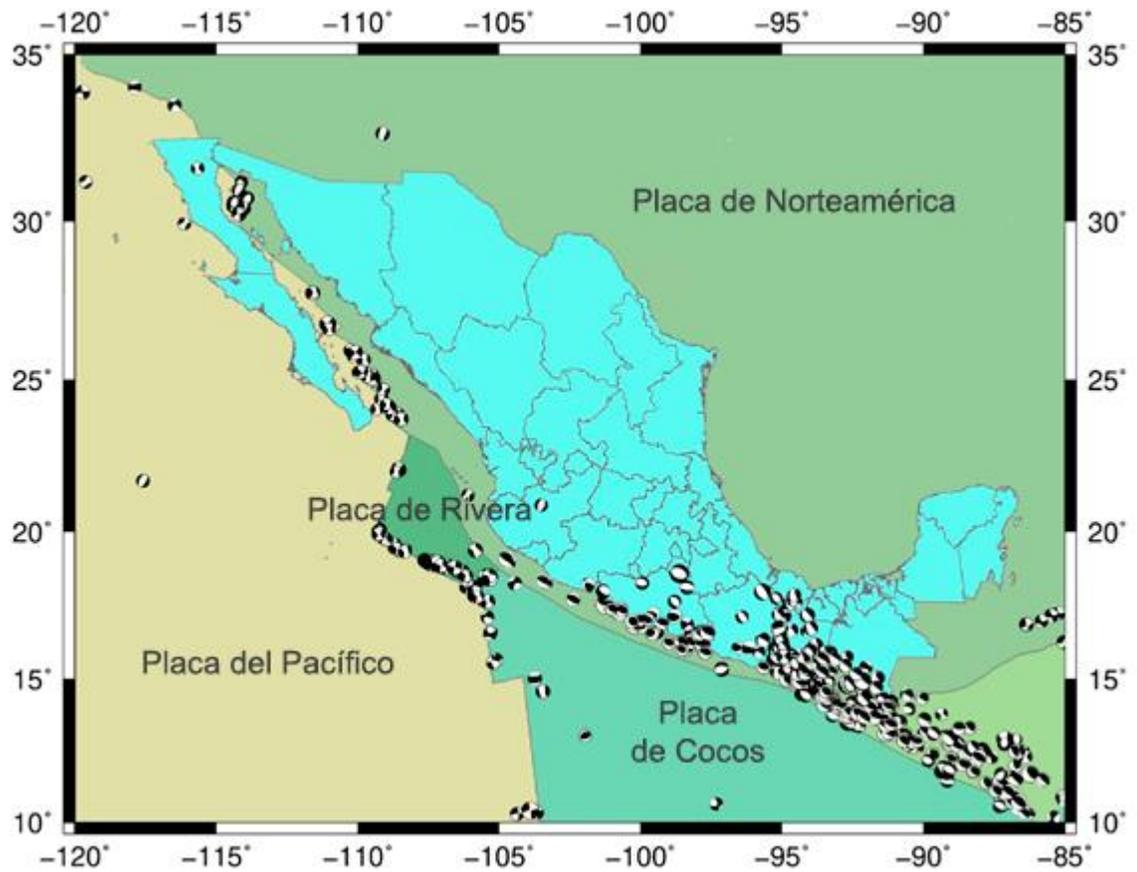
Utilizando los archivos de salida generados por GLRED se usó la herramienta tsvview para evaluar la calidad de las series de tiempo y generar los archivos de control para GLOBK que eliminarán las malas estimaciones de posiciones de los sitios y tomarán en cuenta los saltos en las series de tiempo. Para obtener las series de tiempo corregidas se han eliminado cualquier estimación de la posición con un error de máximo 20 mm y con un criterio de rechazo de valor atípico automático de 3 Sigma utilizado en una corrección iterativa. Además fueron modelados los efectos de señales anuales y semianuales. Los archivos de control generados por tsvview se reprocesaron las velocidades usando GLOBK y usando el comando `sh_exgk -f <archivo de entrada globk org> -vel <archivo de velocidades de salida>` se obtuvieron los archivos de salida para velview para ver y evaluar la calidad de los vectores de velocidad generados por GLOBK.

## Capítulo 4

### 4. Resultados y análisis

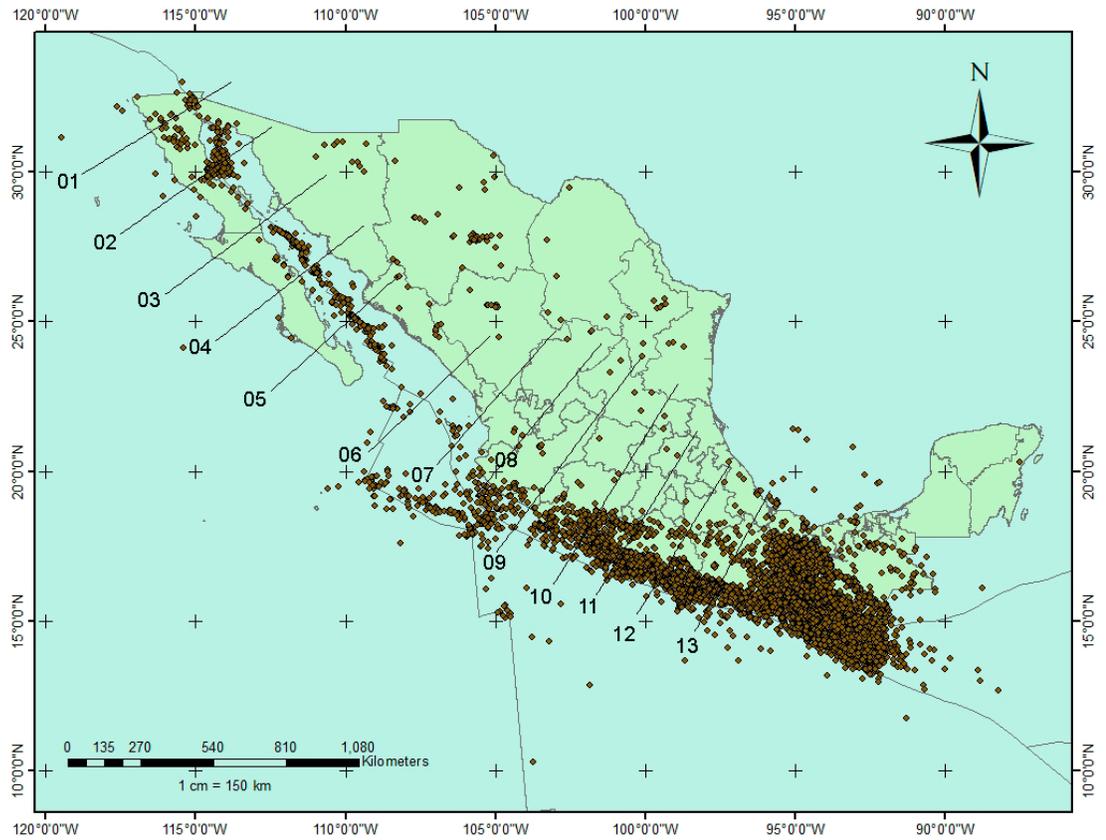
#### 4.1 Resultados sísmicos

Para el análisis sísmico se crearon dos mapas, uno con datos de epicentros y mecanismos focales de sismos ocurridos en México durante el periodo 2014-2018 que se muestran en la Figura 17 y en la Figura 18 se muestra otro mapa con los epicentros de sismos en México para el mismo periodo donde los epicentros se indican con puntos cafés. Las líneas en la Figura 18 representan las secciones transversales de los perfiles sísmicos mostradas en la Figura 19 y 20 con un ancho de 100 KM utilizando datos de la profundidad de los hipocentros. Los mecanismos focales fueron obtenidos utilizando datos del tensor del momento sísmico. En las secciones transversales de los perfiles sísmicos mostrados en las Figuras 19 y 20 fueron graficados los hipocentros de los sismos representados con puntos amarillos con respecto a la profundidad de la corteza terrestre indicada con puntos rojos utilizando una cuadrícula de 1x1 grado y una interpolación del modelo CRUST 1.0 (Laske G, 2012). Los puntos azules indican la elevación del terreno utilizando un modelo digital de elevaciones mundial ETOPO (C. Amante, 2009), la profundidad está en kilómetros y la longitud de las secciones transversales en grados. Se trazaron 13 perfiles a lo largo de distintos ambientes tectónicos. En el límite transformante se trazó uno a lo largo de Baja California pasando por Mexicali, otro perfil se trazó a lo largo de la zona centro de Baja California, y tres perfiles más que atraviesan Baja California Sur, Sonora y parte de Sinaloa. Para los perfiles sísmicos de la zona de límite convergente, se trazó un perfil a lo largo de la zona intermedia entre el límite transformante y el límite convergente en México atravesando la placa de Rivera, también se trazó un perfil que atraviesa una sección de la placa de Rivera atravesando la zona centro de México, y otro perfil cercano a la placa de Rivera atravesando el Cinturón Volcánico Transmexicano y finalmente otros cuatro perfiles que atraviesan la zona de Subducción Mexicana y el Cinturón Volcánico Transmexicano.



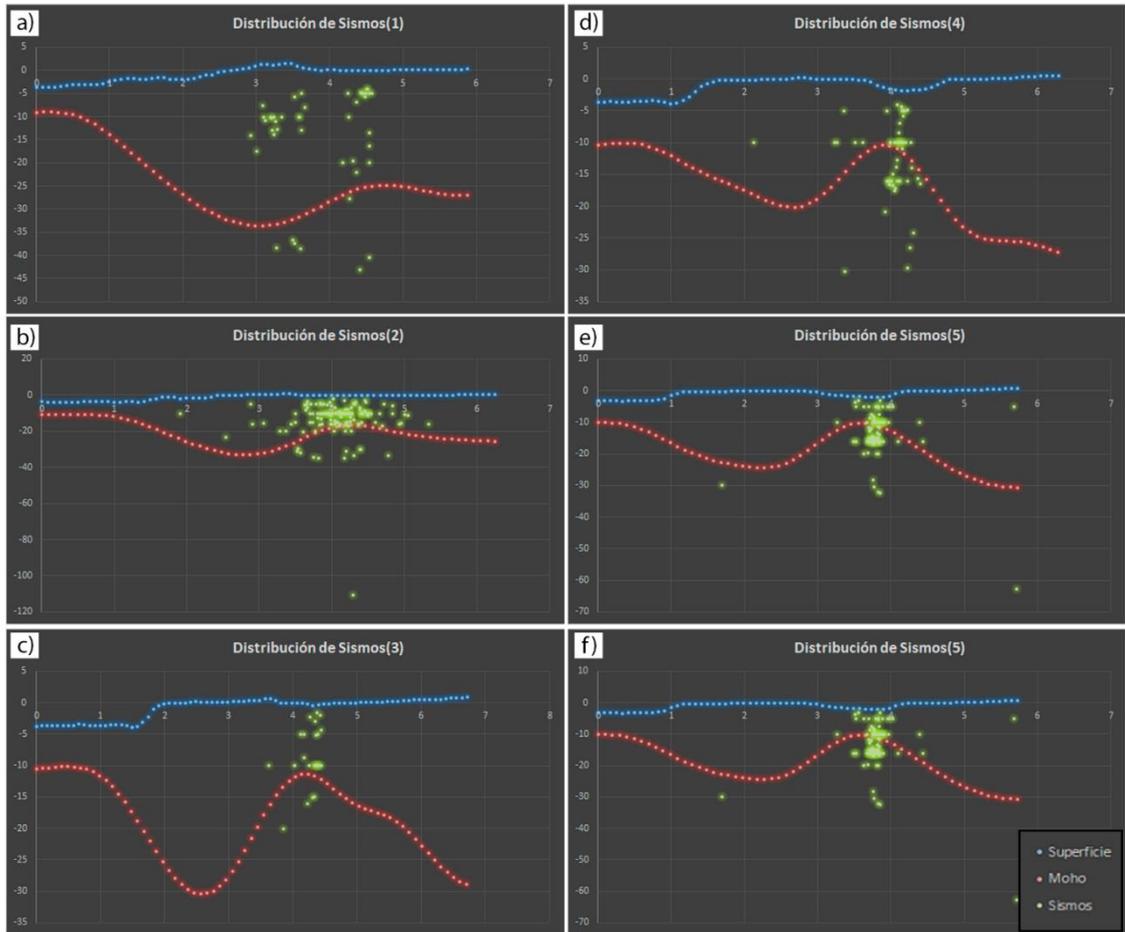
**Figura 17.** Mecanismos focales de sismos en México con datos obtenidos del Global CMT Catalog (<https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>).

## Resultados y análisis

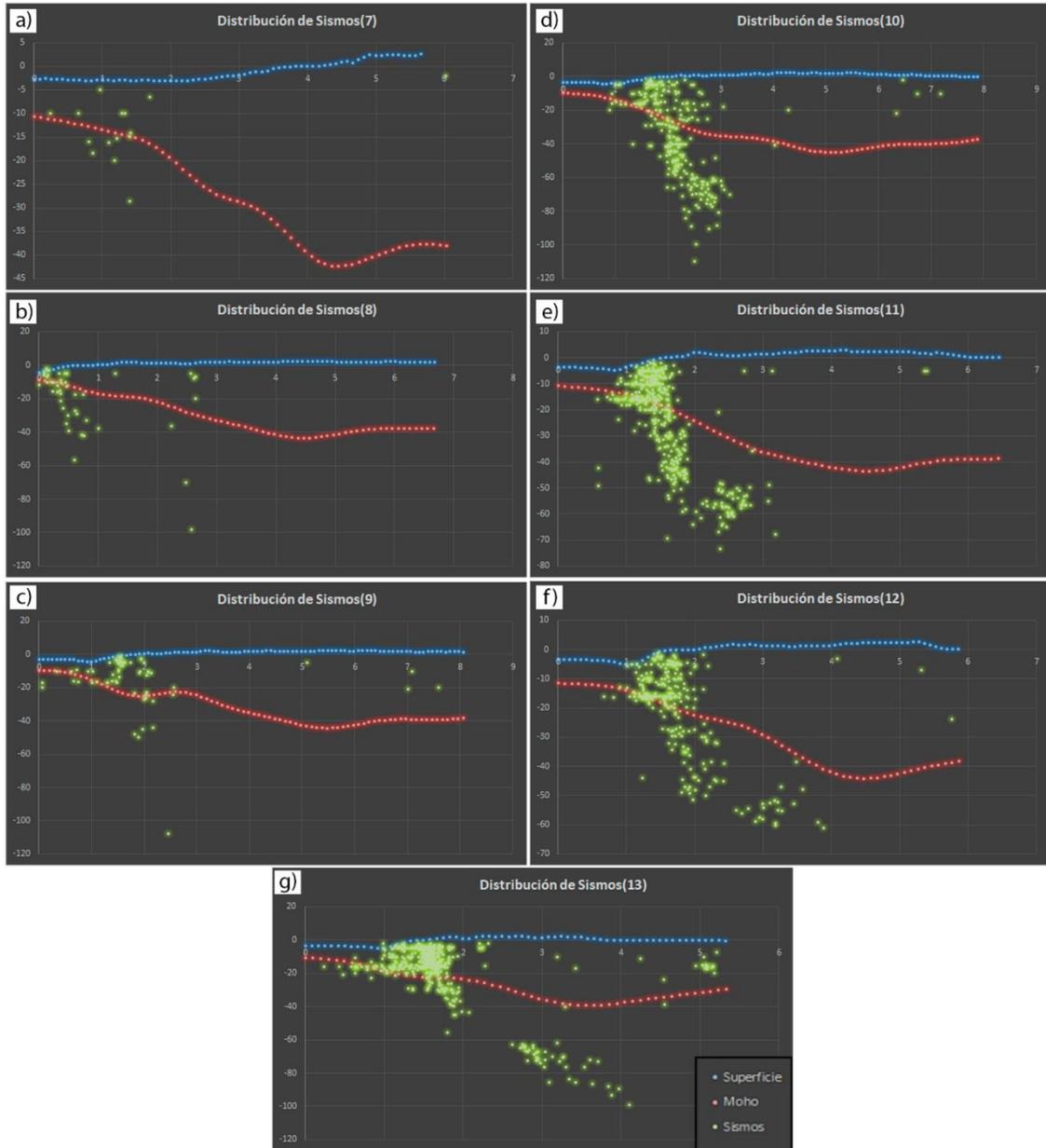


**Figura 18.** Epicentros de Sismos en México obtenidos del catálogo de sismos del Servicio Sismológico Nacional (<http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>).

## Resultados y análisis



**Figura 19.** Perfiles sísmicos de la zona de límite transformante.



**Figura 20.** Perfiles sísmicos de la zona de límite transformante.

#### 4.2 Diferencias sísmicas

Como se muestra en la Figura 17, los sismos en el límite convergente ocurren principalmente en fallas inversas, otros en fallas normales, y en muy pocos casos en fallas laterales. Los sismos en el límite transformante ocurren principalmente en dos zonas, una es a lo largo de Baja California entre Sonora y Sinaloa a lo

largo de fallas laterales, y los que se encuentran entre Baja California y Sonora tienden a ocurrir debido a fallas normales.

En la Figura 18 se muestra que los sismos en el límite convergente se ocurren principalmente en los estados de Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas, notándose un pequeño cúmulo diferente en Jalisco y otros cúmulos hacia el norte con fallas normales formando un hueco entre estas dos zonas. En el límite transformante en la región del Golfo de California se observa una alineación de sismos en correlación con el límite de placas y tres cúmulos en la zona norte de Baja California, y uno de estos fuera de los límites de placas.

Las Principales Diferencias son las siguientes:

**Tabla 3.** Diferencias entre los ambientes tectónicos en México.

	Límite Convergente	Límite Transformante
Profundidad Promedio	39.5445 km	12.8946 km
Profundidad Máxima	213 km	110.5000 km
Desviación Estándar	38.9031 km	9.3124 km
Magnitud Promedio	4.1496	4.1982
Desviación Estándar Magnitud	0.2528	0.3152

Utilizando gráficas de perfiles sísmicos (Figuras 19 y 20) delimitados en la Figura 18 y con los datos numéricos de la Tabla 3 se aprecia que en la zona del límite convergente los sismos ocurren con mayor frecuencia y a mayor profundidad. Los sismos salen fuera del modelo de profundidad de la corteza tendiendo a adoptar la forma de una placa oceánica subduciendo por debajo de la placa continental. En el límite transformante los sismos ocurren con menor frecuencia, y a menor profundidad. Los sismos no presentan una forma tan distinta del modelo de profundidad de la corteza con comparación del límite convergente y tienden a estar principalmente en el límite entre placas. En ambos casos los sismos ocurren con más frecuencia en los lugares que la corteza es más delgada, correspondiente al Límite entre placas.

### **4.3 Series de tiempo de las estaciones GPS**

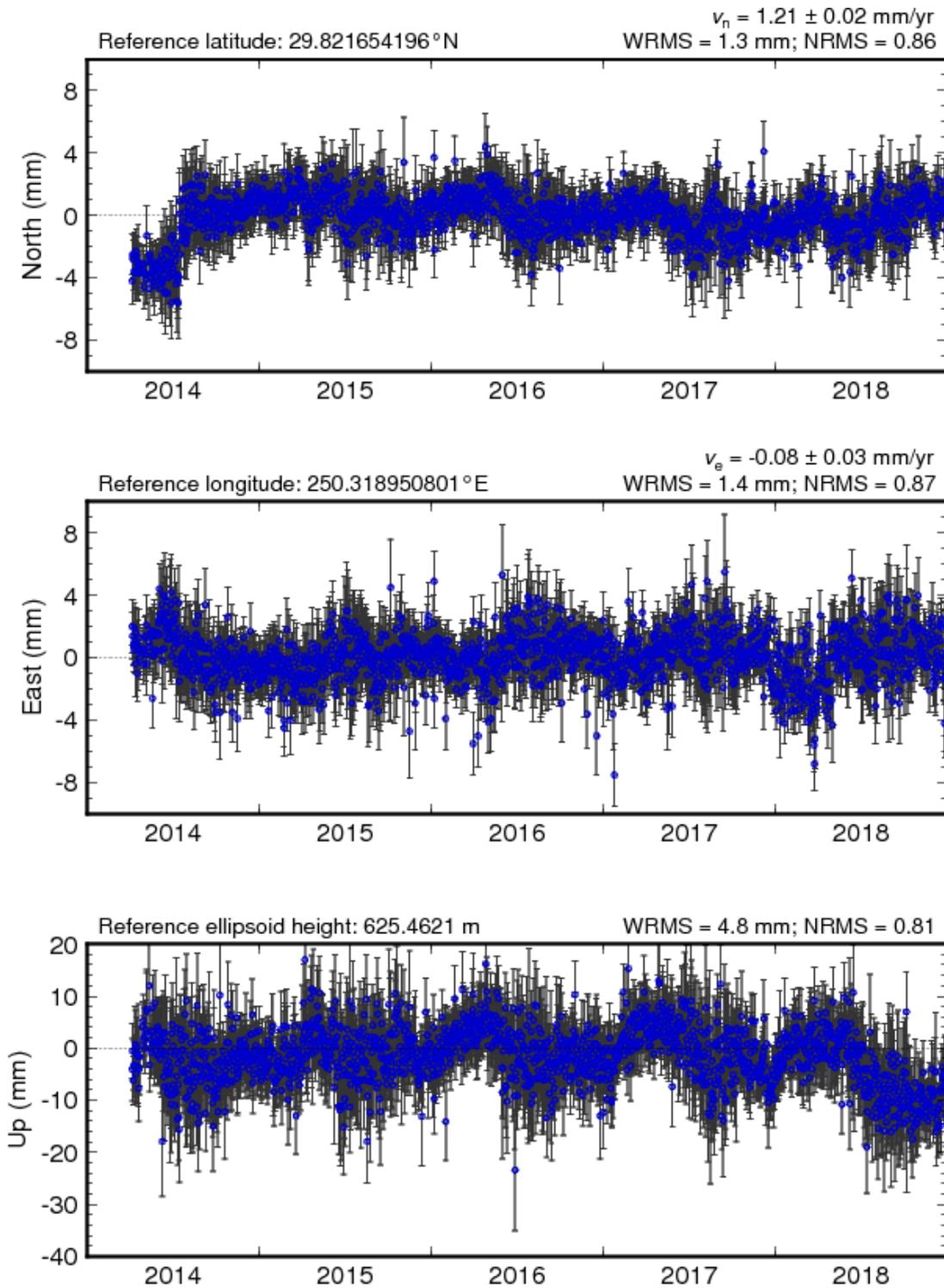
A continuación se muestran las series de tiempo de las 16 estaciones GPS durante el periodo de observación de 5 años 2014-2018. Obtenidas utilizando el software GAMIT/GLOBK en el marco de referencia ITRF2014. Las series de tiempo fueron corregidas utilizando la extensión de MATLAB ggmattlab que contiene las herramientas tsview y velview por esta razón existen algunos huecos en las series de tiempo y debido a esto las mediciones en algunas de las componentes fueron excluidas del procesamiento, pues son errores muy alejados de las líneas de tendencia, debido al proceso anterior surgieron algunos outliers, pero estos no fueron eliminados ya que no afectan el resultado final de las series de tiempo.

En las Figuras 21 a la 24 se muestran las series de tiempo de las estaciones USMX, TNHM, TNTB y TNCU ubicadas en el límite transformante sobre la placa de Norteamérica. Con excepción de la estación TNTB, el resto de las estaciones presentan movimientos hacia el norte con vectores de velocidad cercanos al mm/año. Es probable que la diferencia en la estación TNTB se deba a que no existen datos de mediciones para el primer y el último año del periodo procesado. La falta de datos del último año fue un error durante la descarga de los archivos, pero para los primeros años simplemente no existieron mediciones.

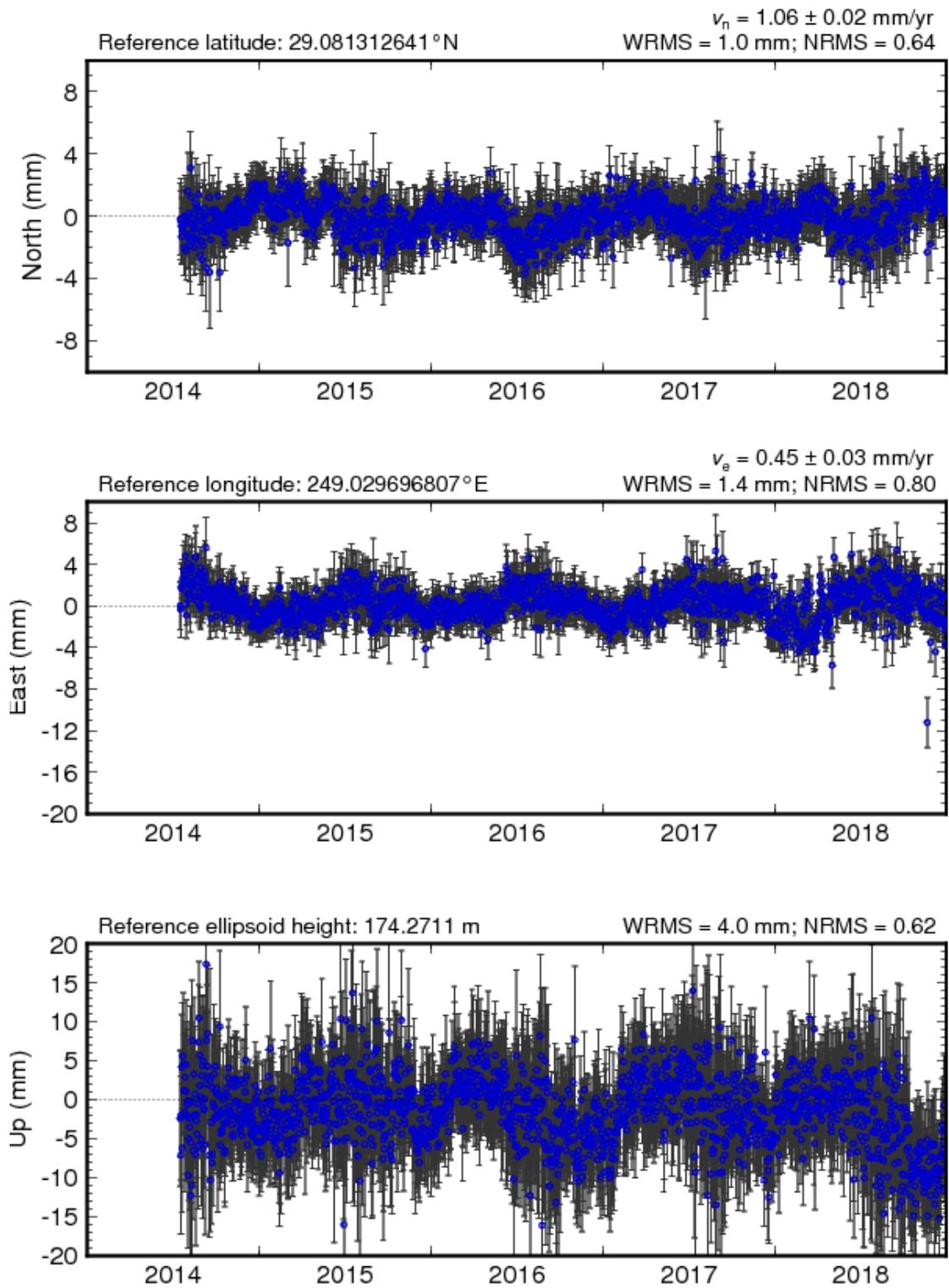
En las Figuras 25 a la 28 se muestran las series de tiempo de las estaciones TNBA, IPAZ, PALX y MEXI ubicadas en el límite transformante sobre la placa del Pacífico, de estas estaciones se obtuvieron mediciones para todos los años, excepto para TNBA, todas presentan el mismo movimiento relativo a la placa del Pacífico con dirección hacia el noroeste y con vectores de velocidad muy similares con excepción de la estación MEXI que tiene un W/NRMS grande, lo que significa que es la menos estable.

En las Figuras 29 a la 37 se muestran las series de tiempo de las estaciones INEG, MMX1, CN25, PENA, UTON, OAX2, TNMS y UCOE que se encuentran en el límite convergente sobre la placa de Norteamérica, de las cuales se obtuvieron datos para todos los años, con excepción de PENA y TNMS, debido

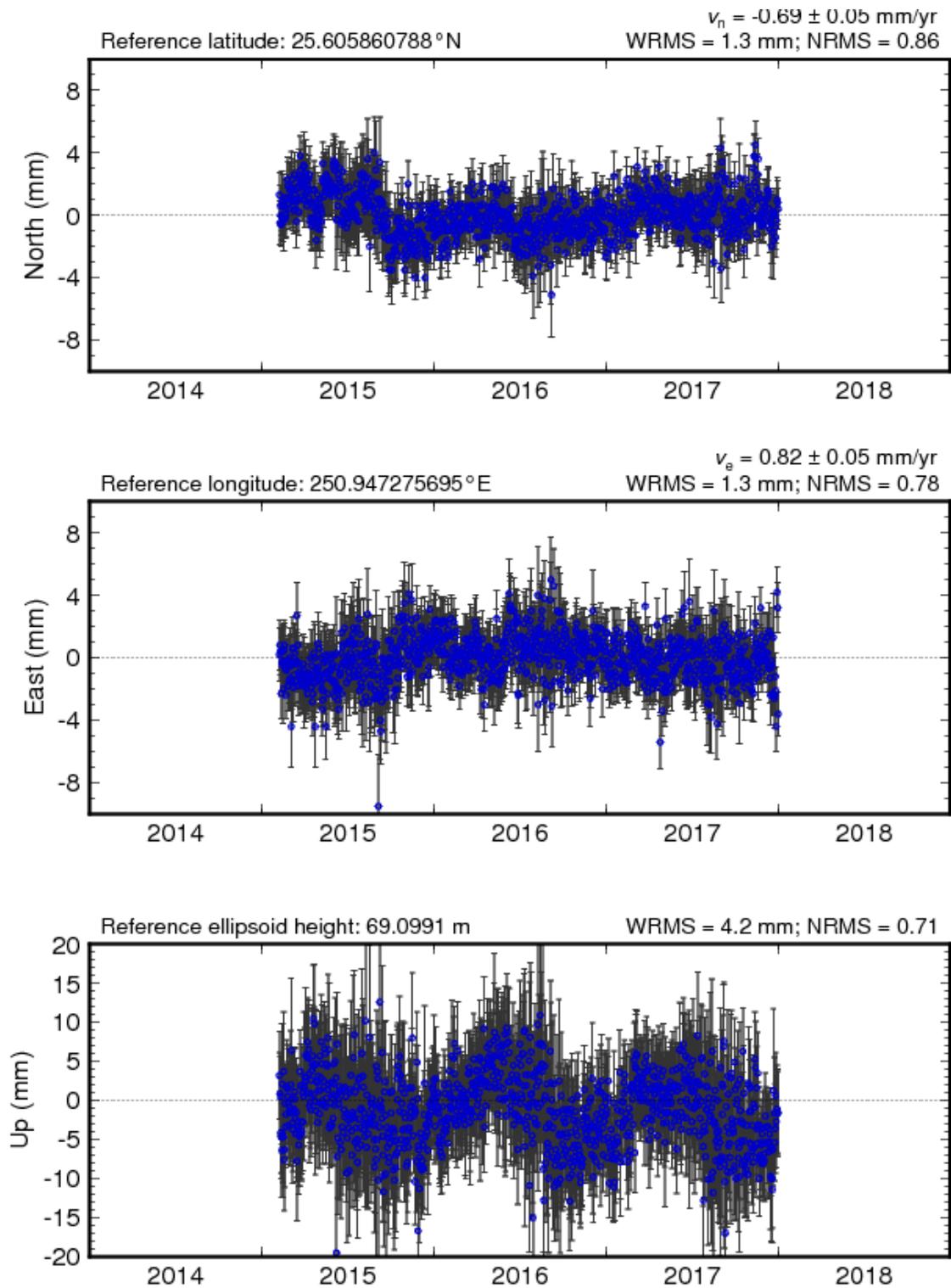
a que todavía no existían datos para esa estación (TNMS) y a que la estación PENA no estuvo funcionando durante un periodo de tiempo analizado.



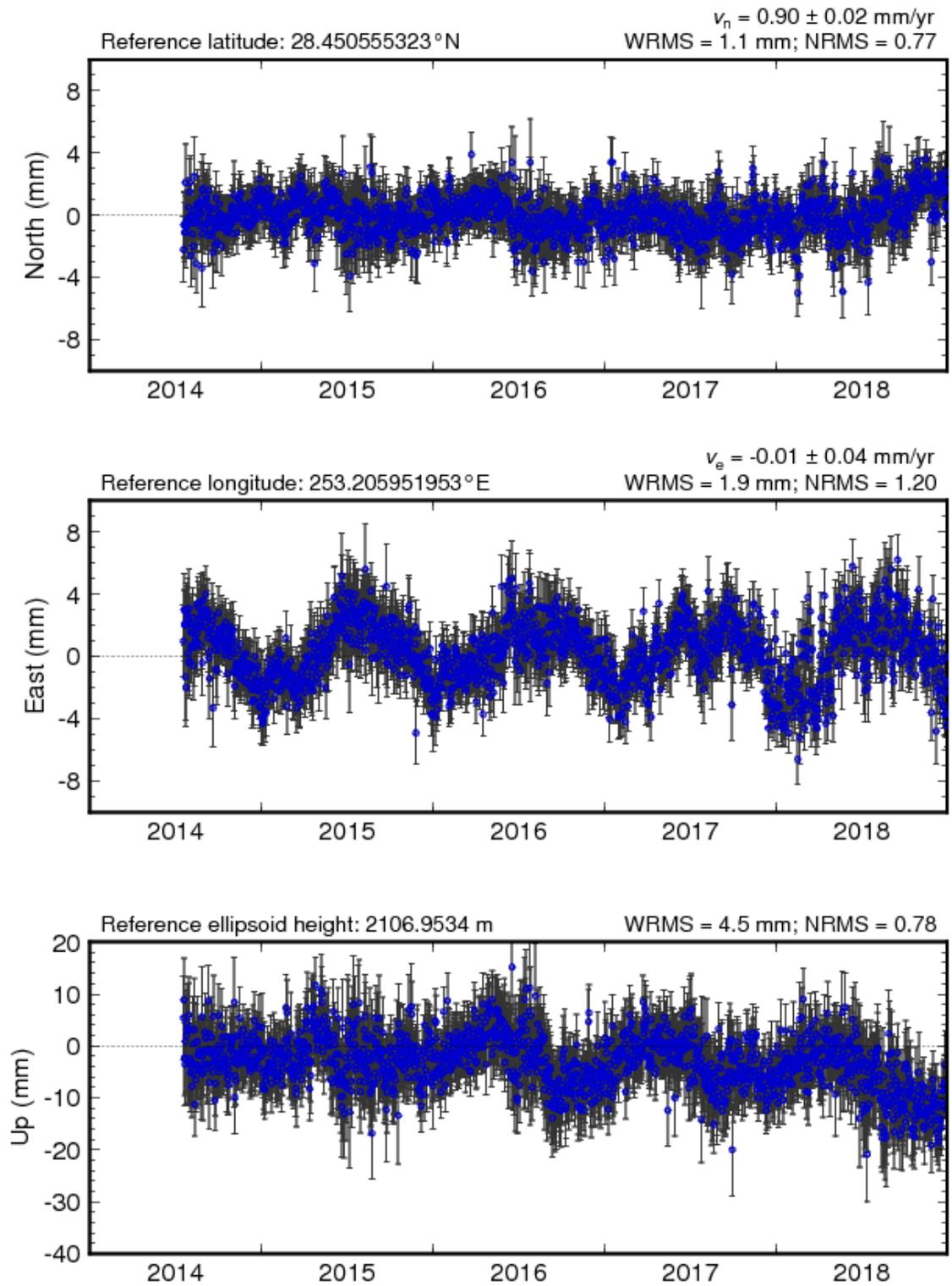
**Figura 21.** Serie de tiempo de la estación USMX.



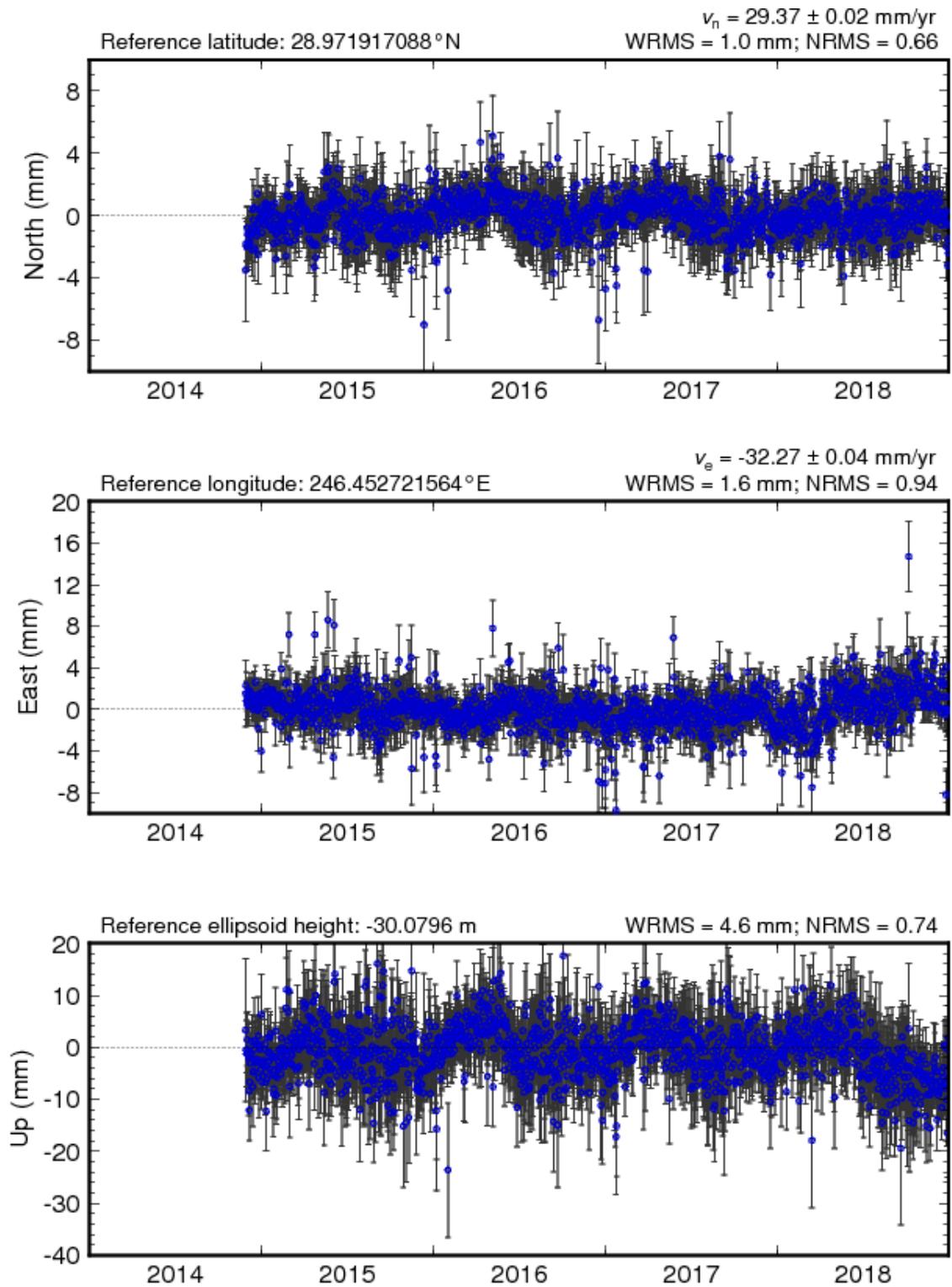
**Figura 22.** Serie de tiempo de la estación TNHM.



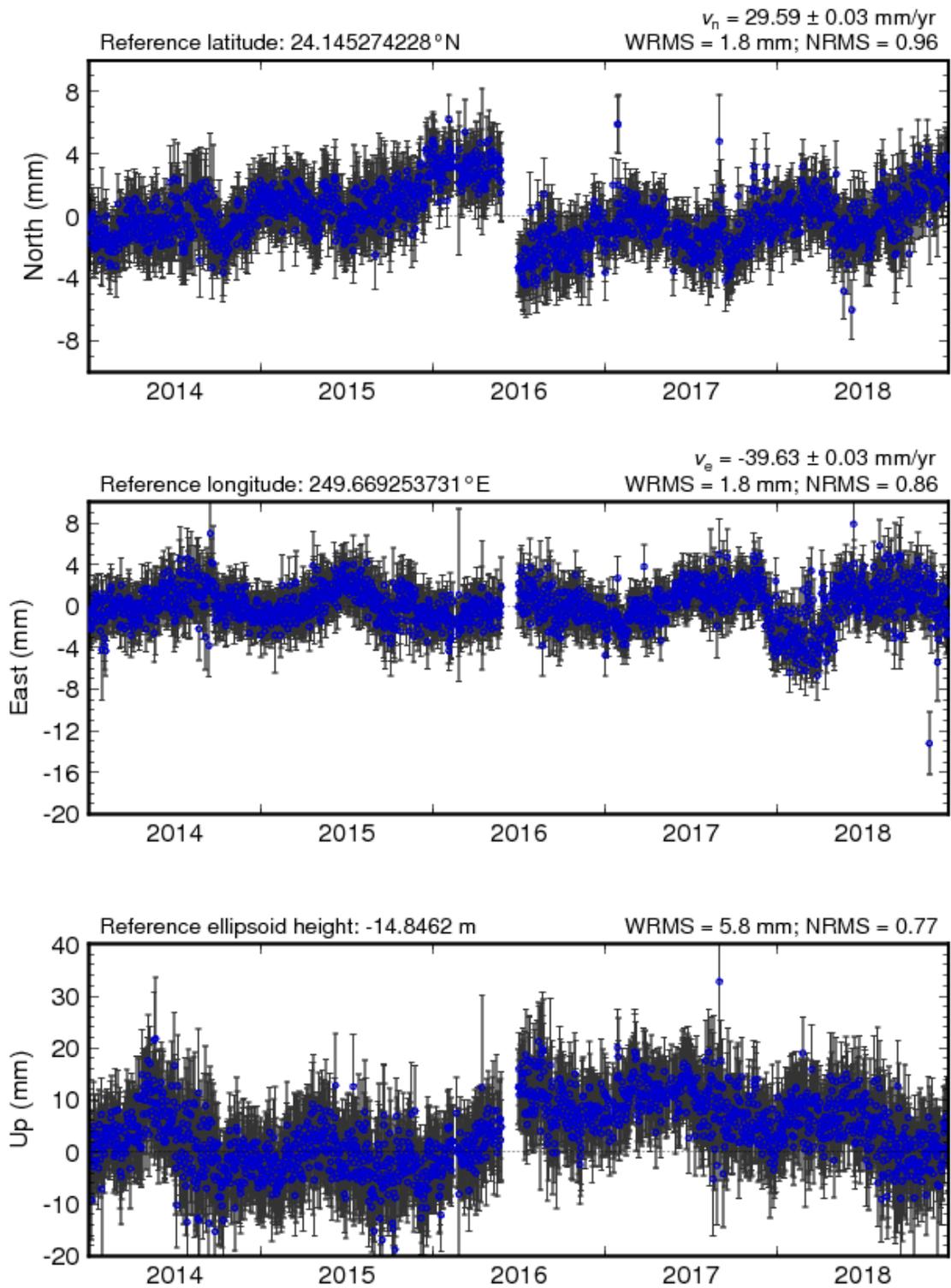
**Figura 23.** Serie de tiempo de la estación TNTB.



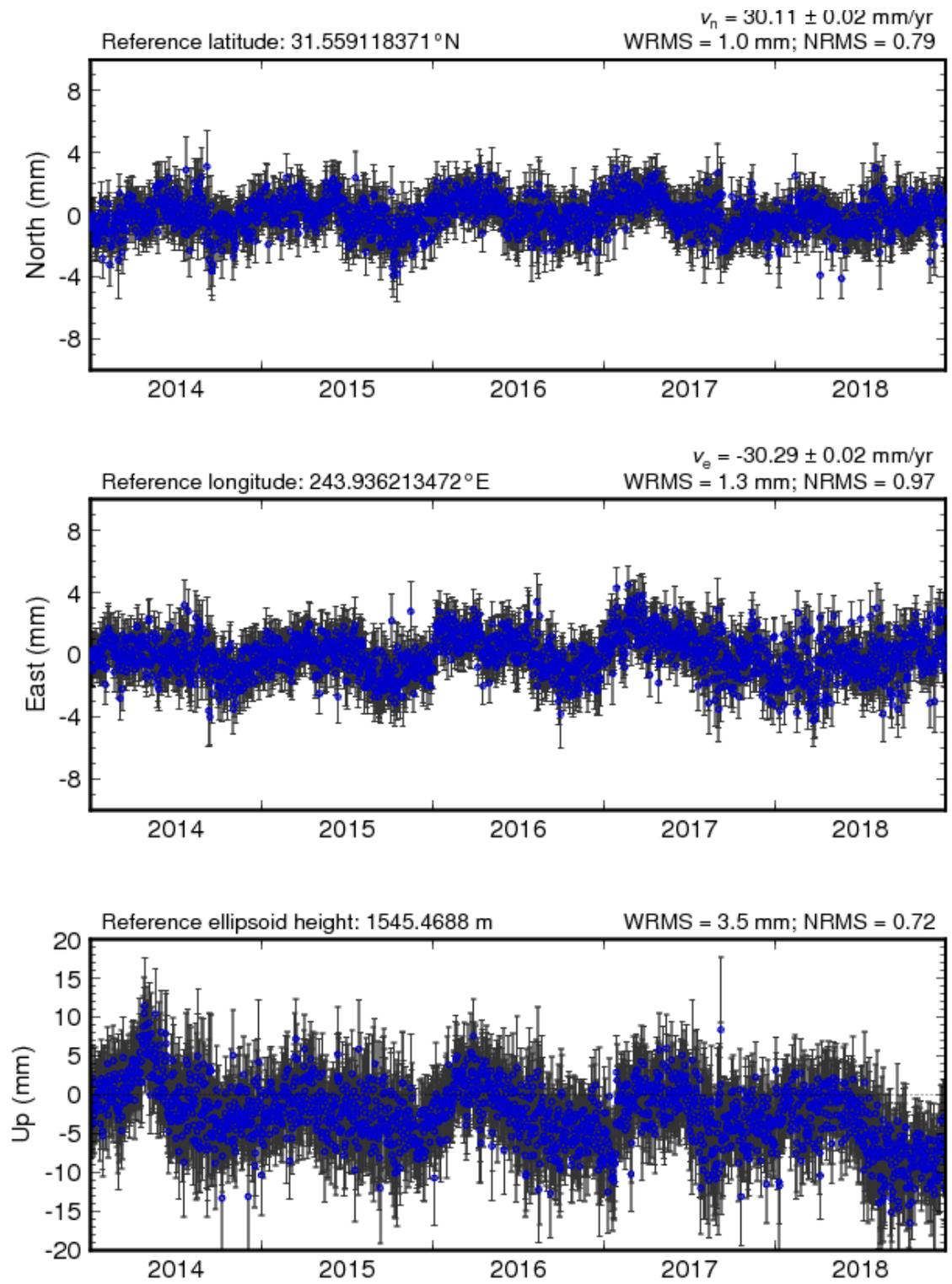
**Figura 24.** Serie de tiempo de la estación TNCU.



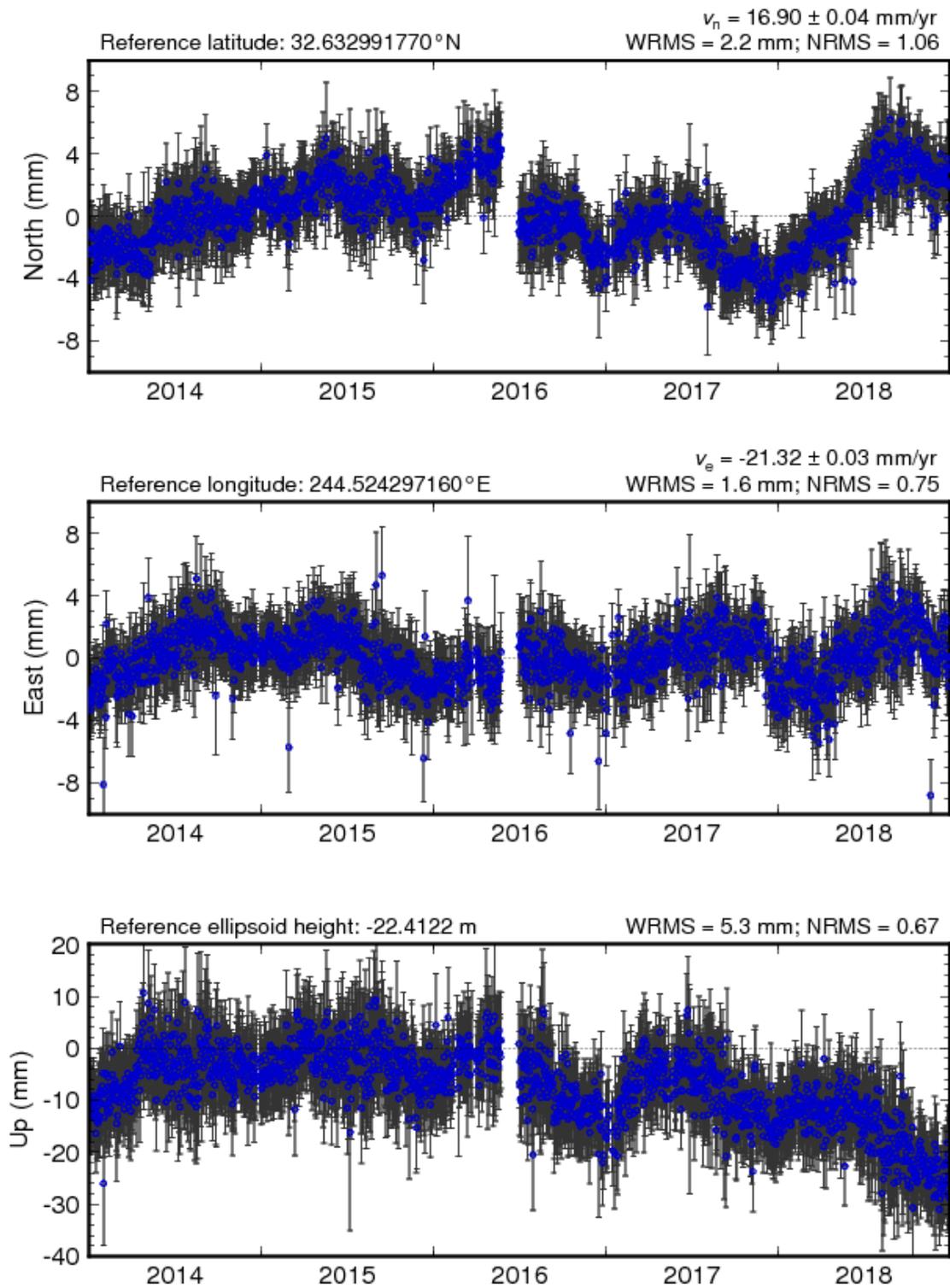
**Figura 25.** Serie de tiempo de la estación TNBA.



**Figura 26.** Serie de tiempo de la estación IPAZ.



**Figura 27.** Serie de tiempo de la estación PALX.



**Figura 28.** Serie de tiempo de la estación MEXI.

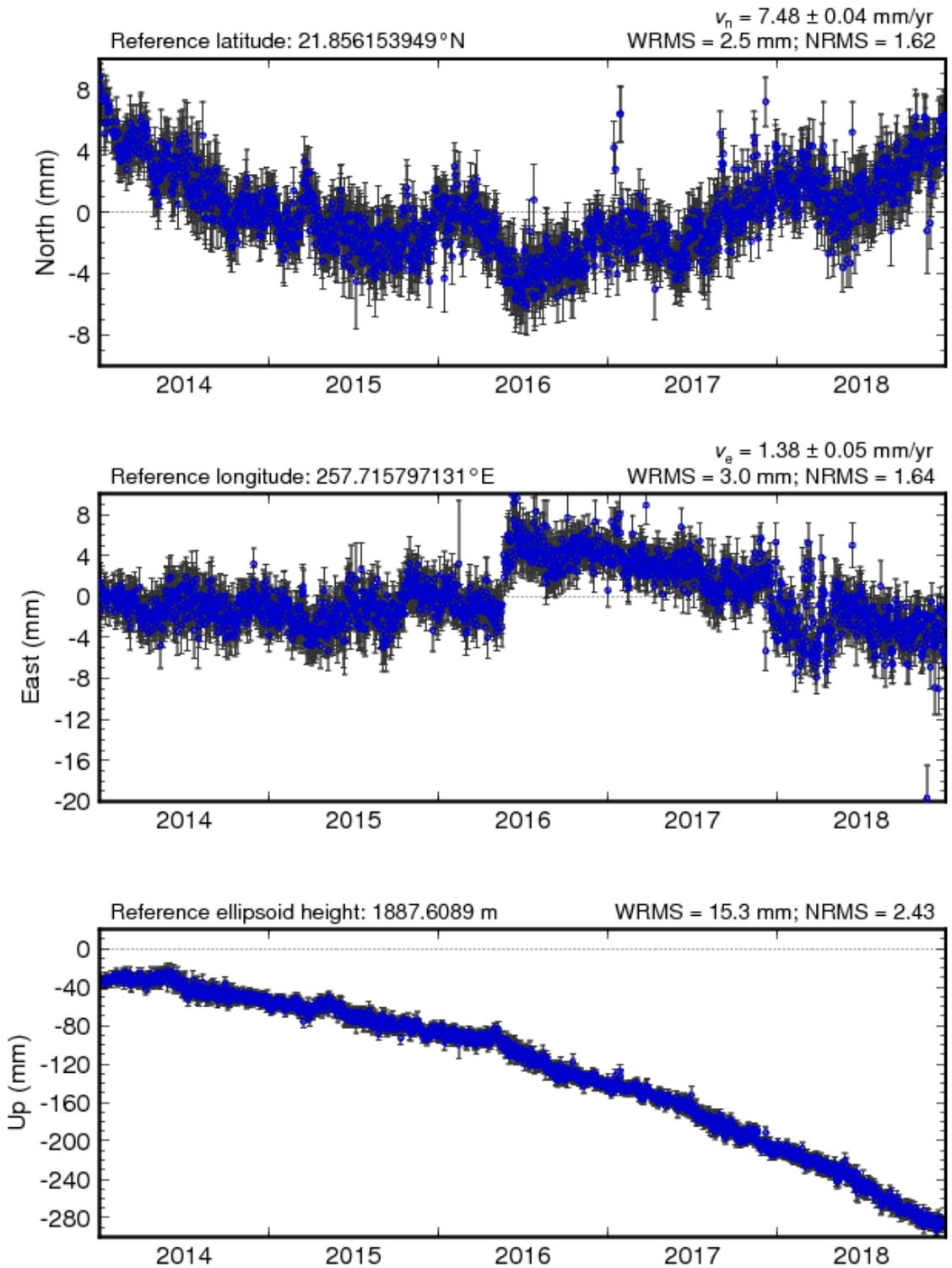
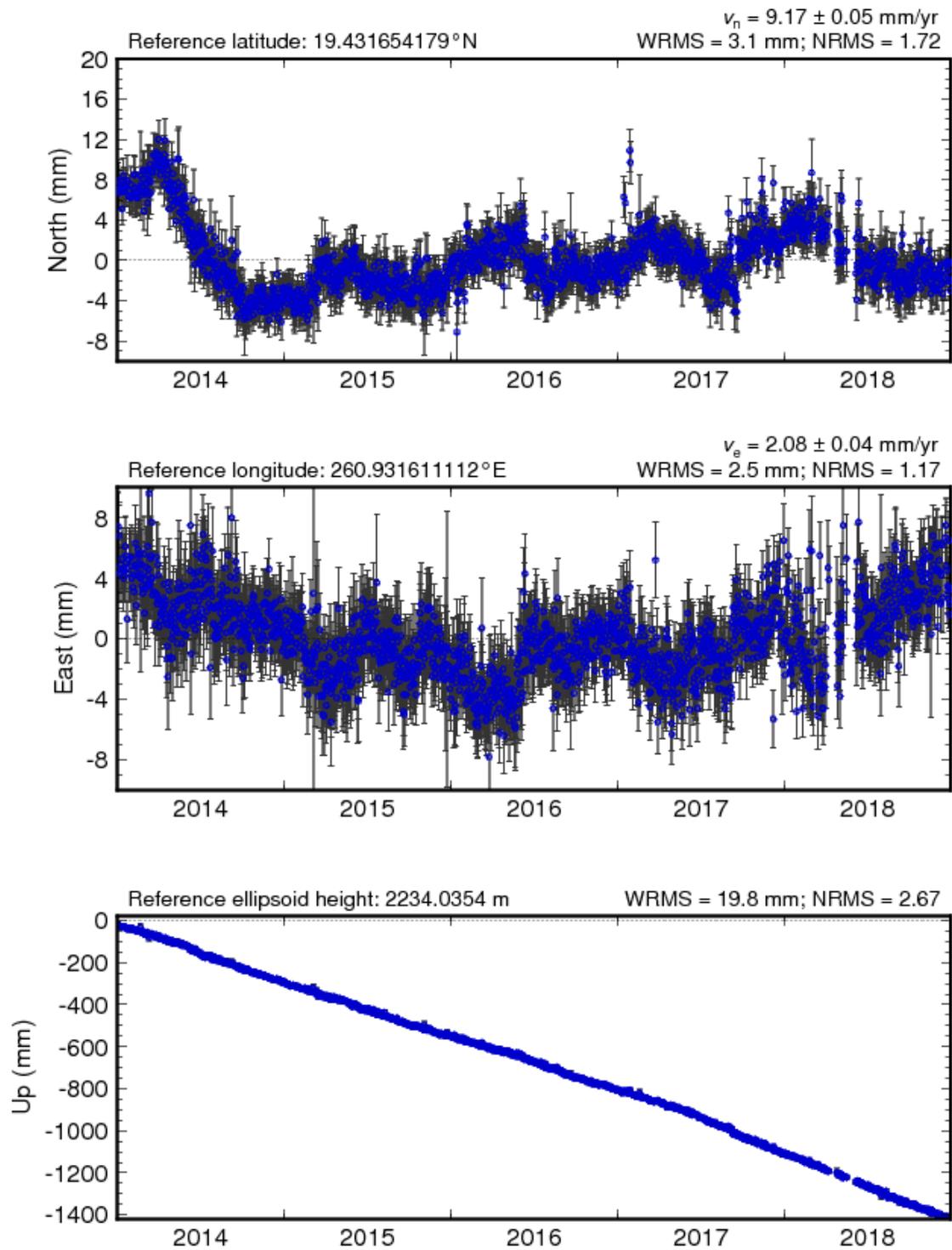


Figura 29. Serie de tiempo de la estación INEG.



**Figura 30.** Serie de tiempo de la estación MMX1.

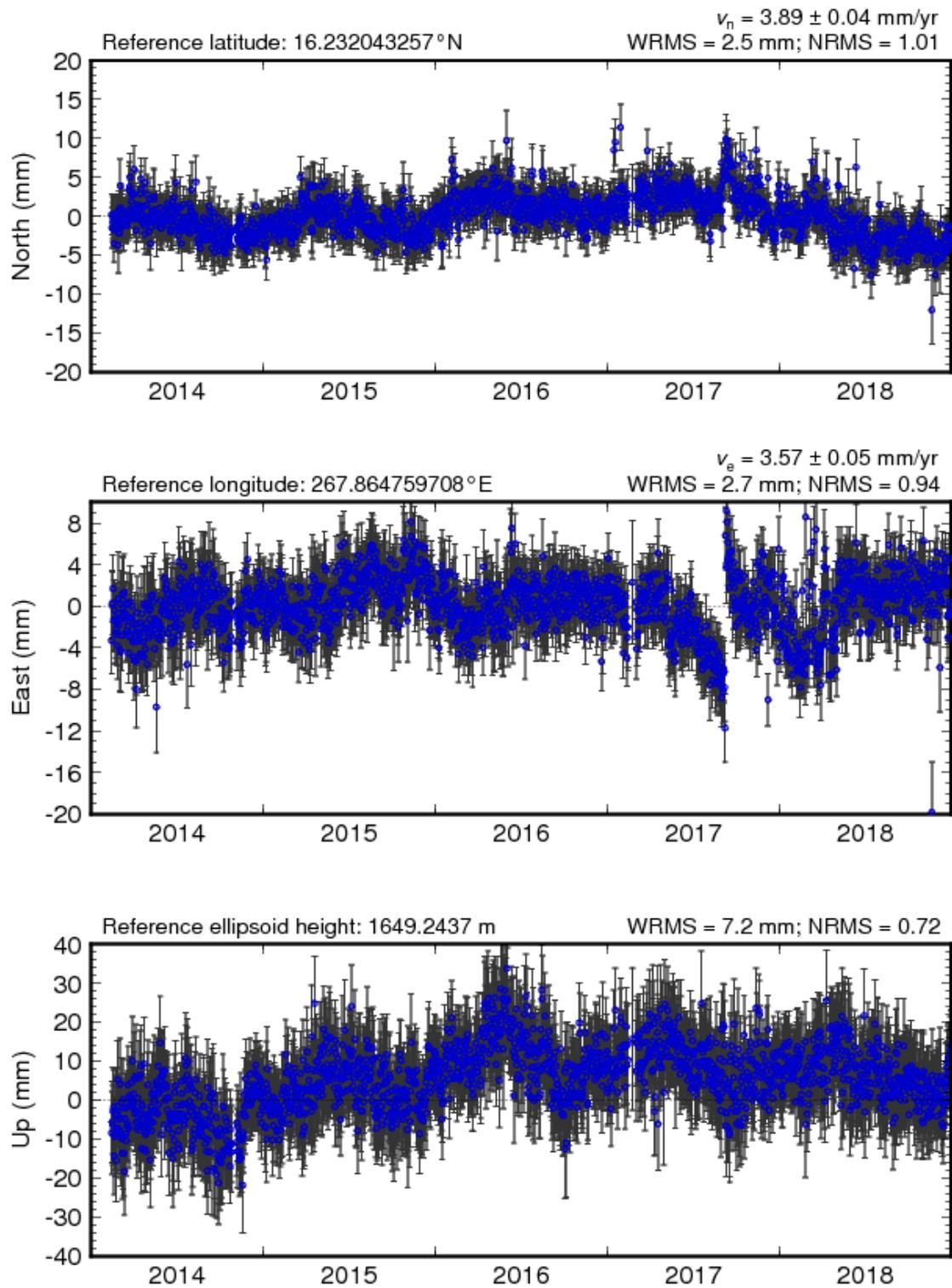


Figura 31. Serie de tiempo de la estación CN25.

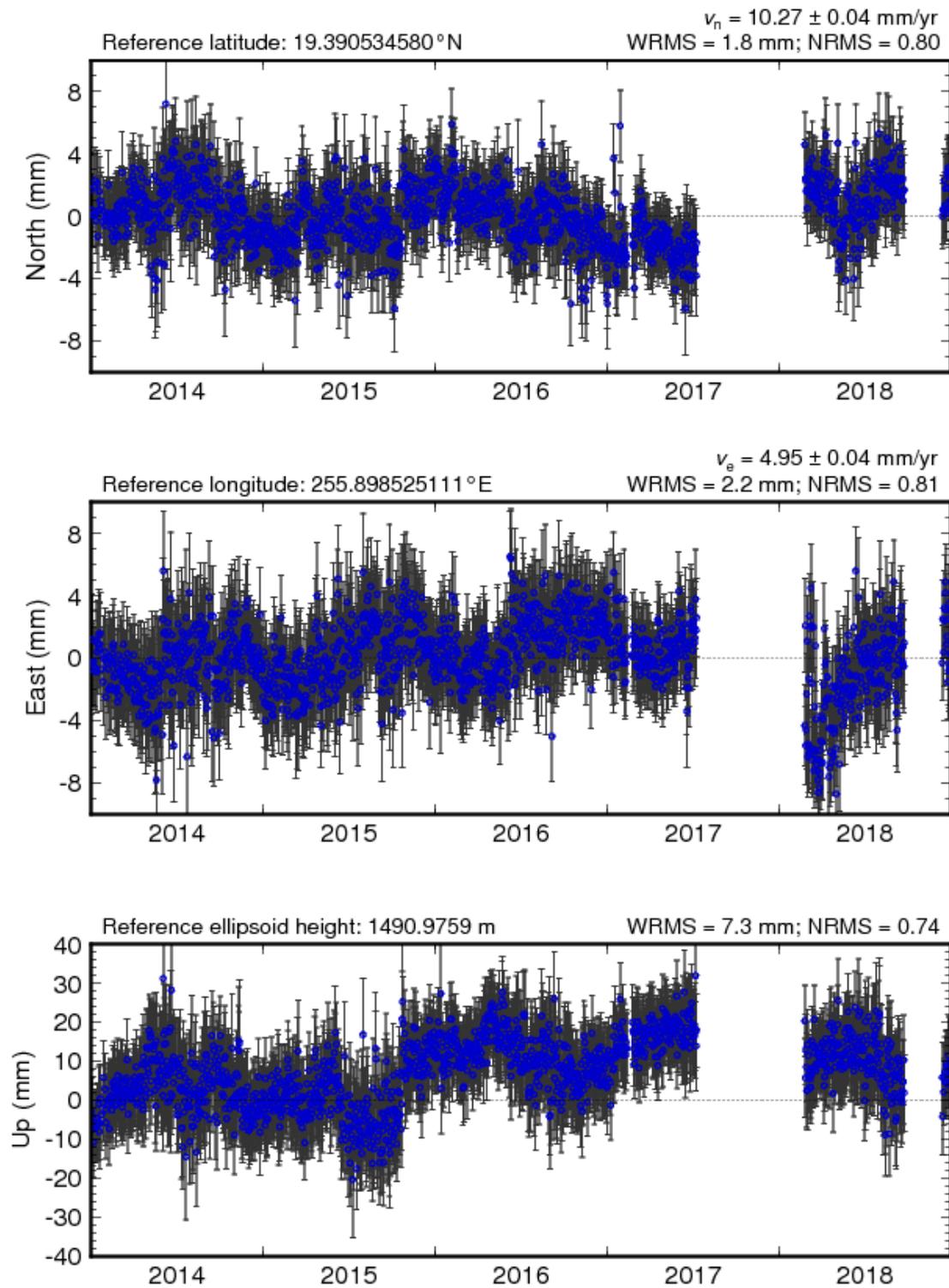
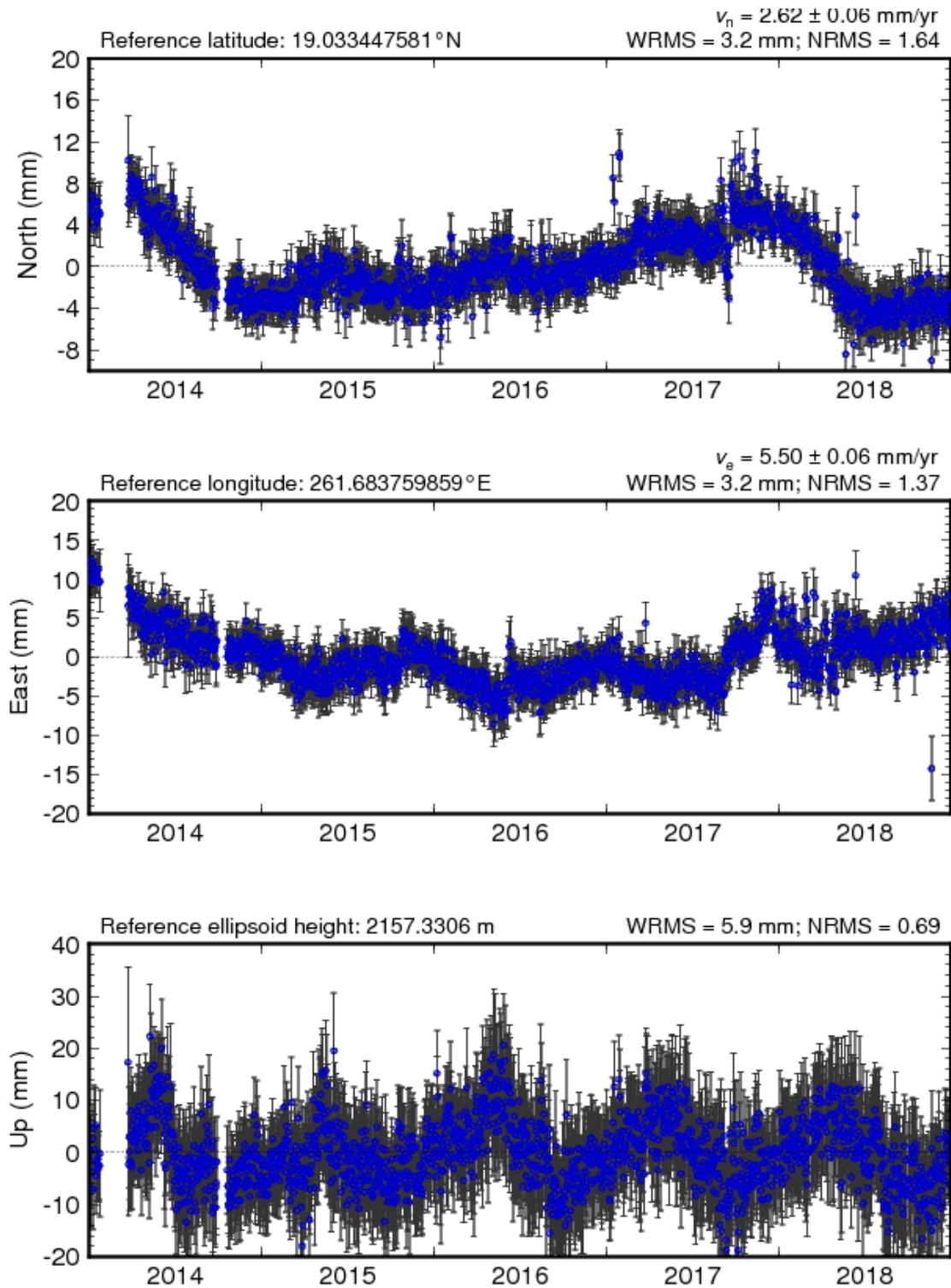
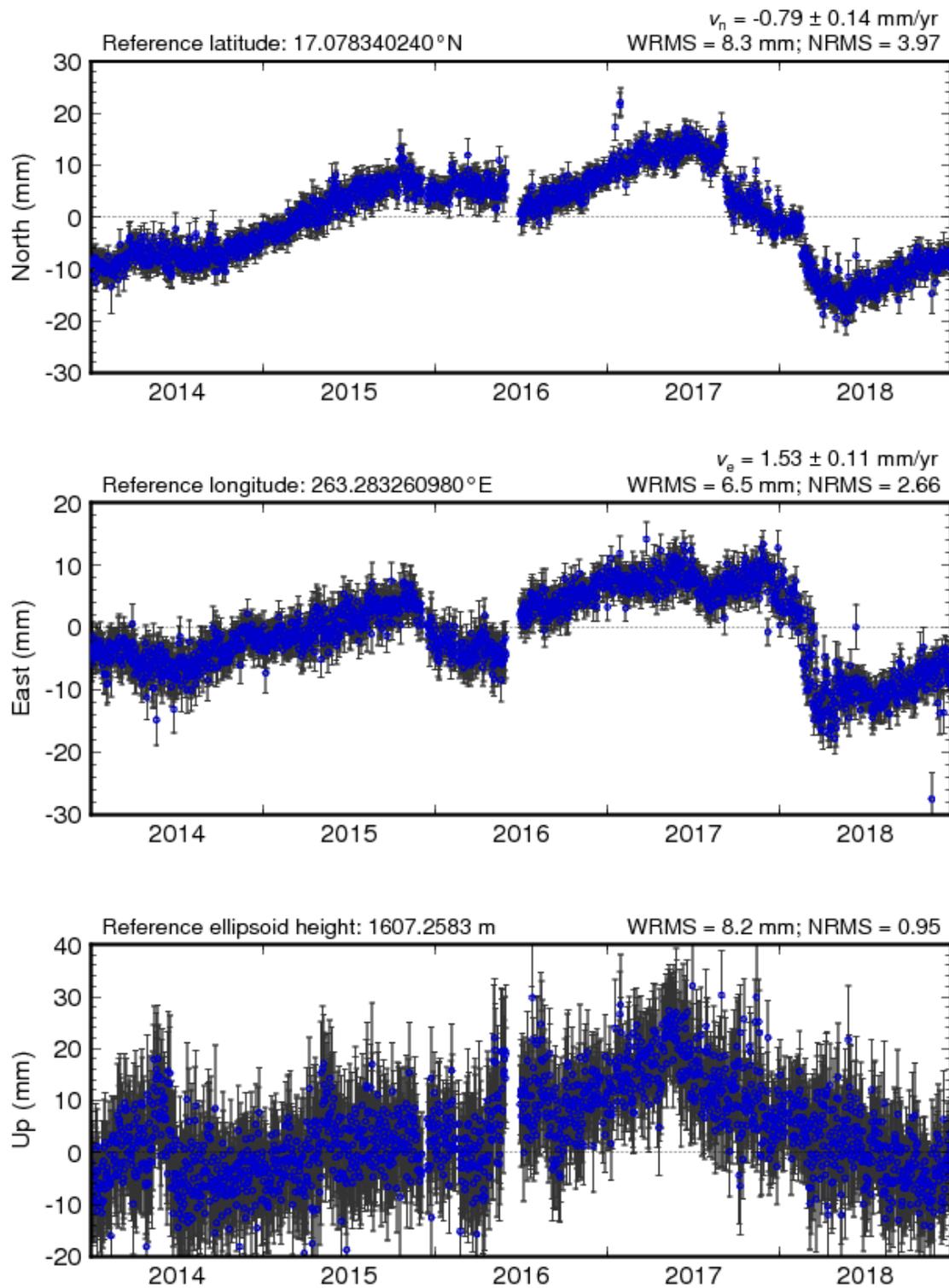


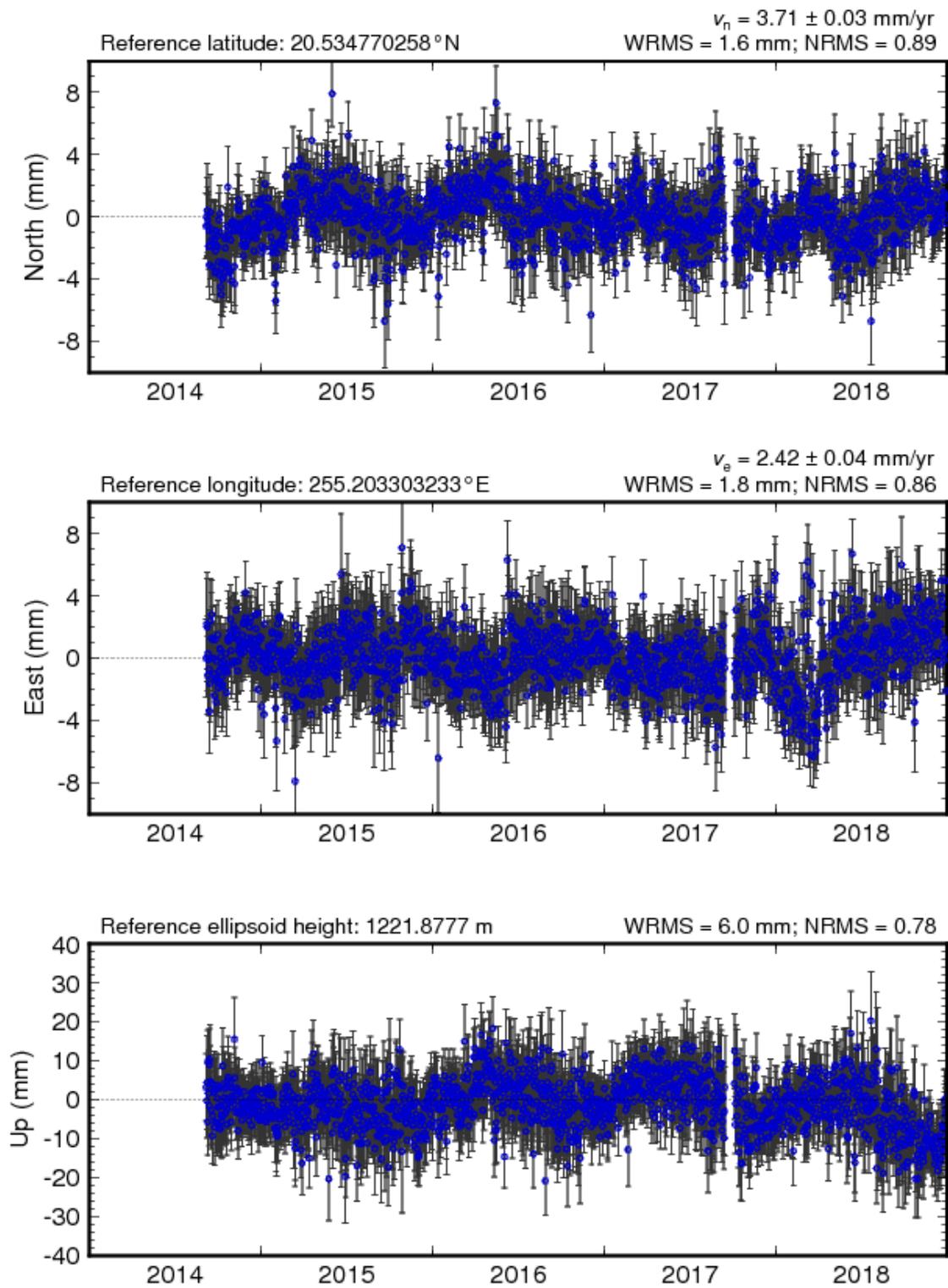
Figura 32. Serie de tiempo de la estación PENA.



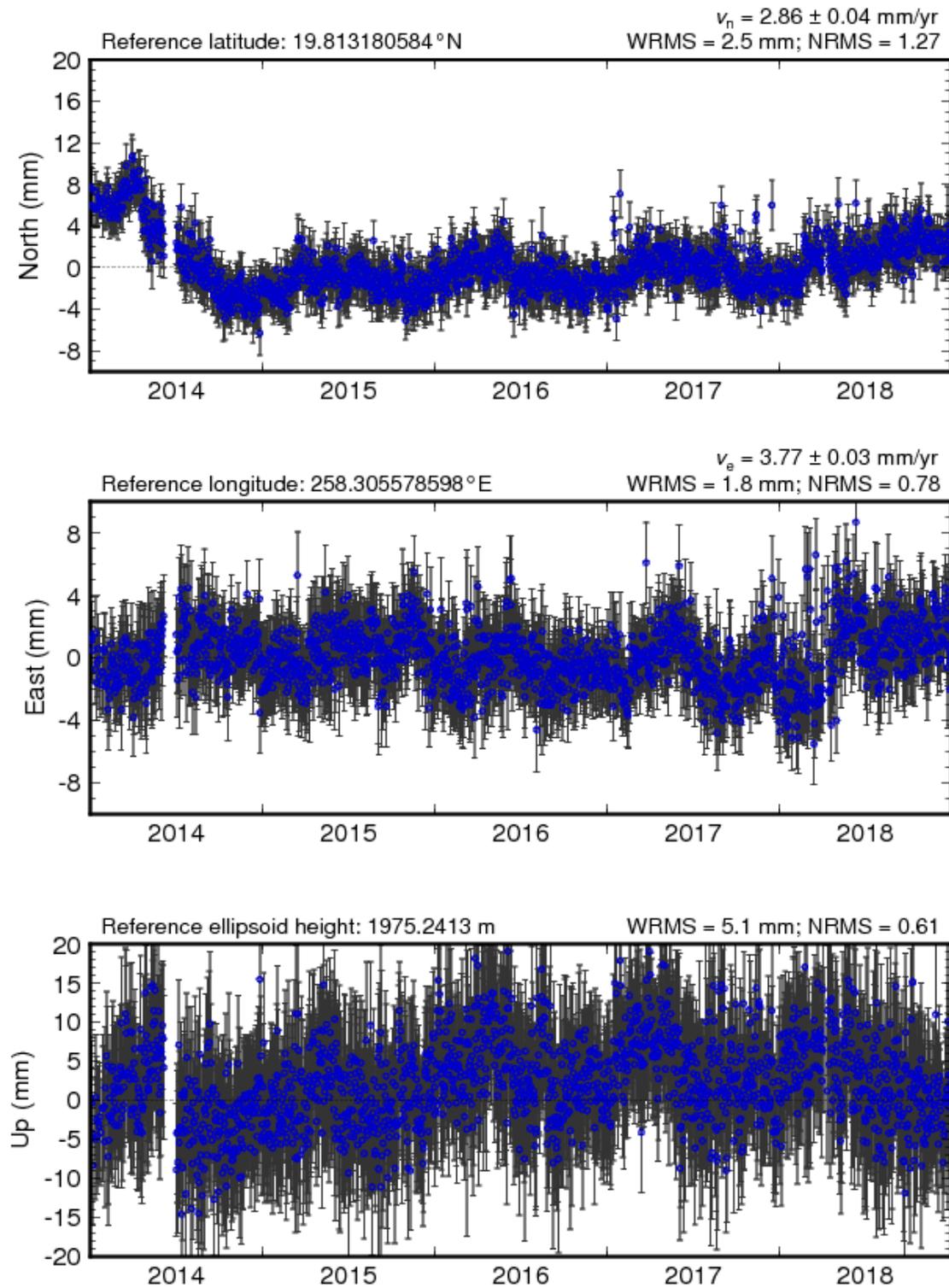
**Figura 33.** Serie de tiempo de la estación UTON.



**Figura 34.** Serie de tiempo de la estación OAX2.



**Figura 35.** Serie de tiempo de la estación TNMS.



**Figura 36.** Serie de tiempo de la estación UCOE.

#### **4.4 Velocidades de las estaciones GPS**

En la Figura 37 se muestra el mapa con velocidades relativas de las estaciones al marco de referencia ITRF2014, se observa que el movimiento de las estaciones es consistente con el desplazamiento de las placas tectónicas, esto se puede ver mejor si se grafican las velocidades residuales de las estaciones relativas a alguna placa tectónica, para esto las series de tiempo fueron recalculadas con relación a la placa de Norteamérica para así obtener sus vectores de velocidad correspondientes y el resultado se muestra en la Tabla 4 y gráfica en la Figura 38. Para tener otra perspectiva de los resultados, los vectores de velocidad también se recalcularon con un movimiento relativo a la placa del Pacífico, como se muestra en la Figura 39. Como se muestra en la Tabla 5 las estaciones situadas en la placa del Pacífico se mueven de acuerdo al desplazamiento de esta placa. Esto se puede ver en los valores de magnitud en la placa del Pacífico que son muy bajos comparados a los valores de magnitud de los vectores de velocidad en referencia a la placa de Norteamérica. Solo la estación de MEXI presenta una diferencia menor de vectores de velocidad de ambas placas comparada con el resto, posiblemente debido a la zona de alta deformación y de transición entre placas donde se encuentra.

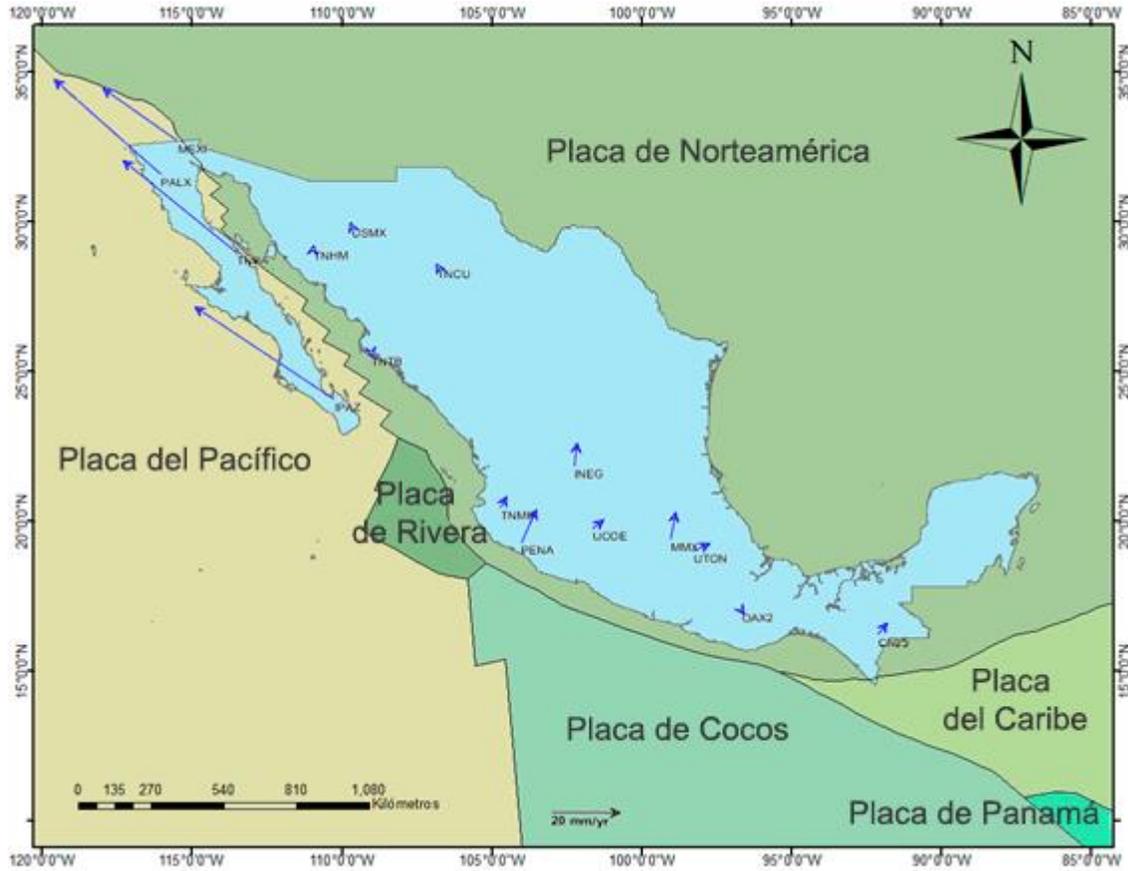
## Resultados y análisis



**Figura 37.** Mapa de velocidades relativas al modelo ITRF14 para el periodo 2014-2018.

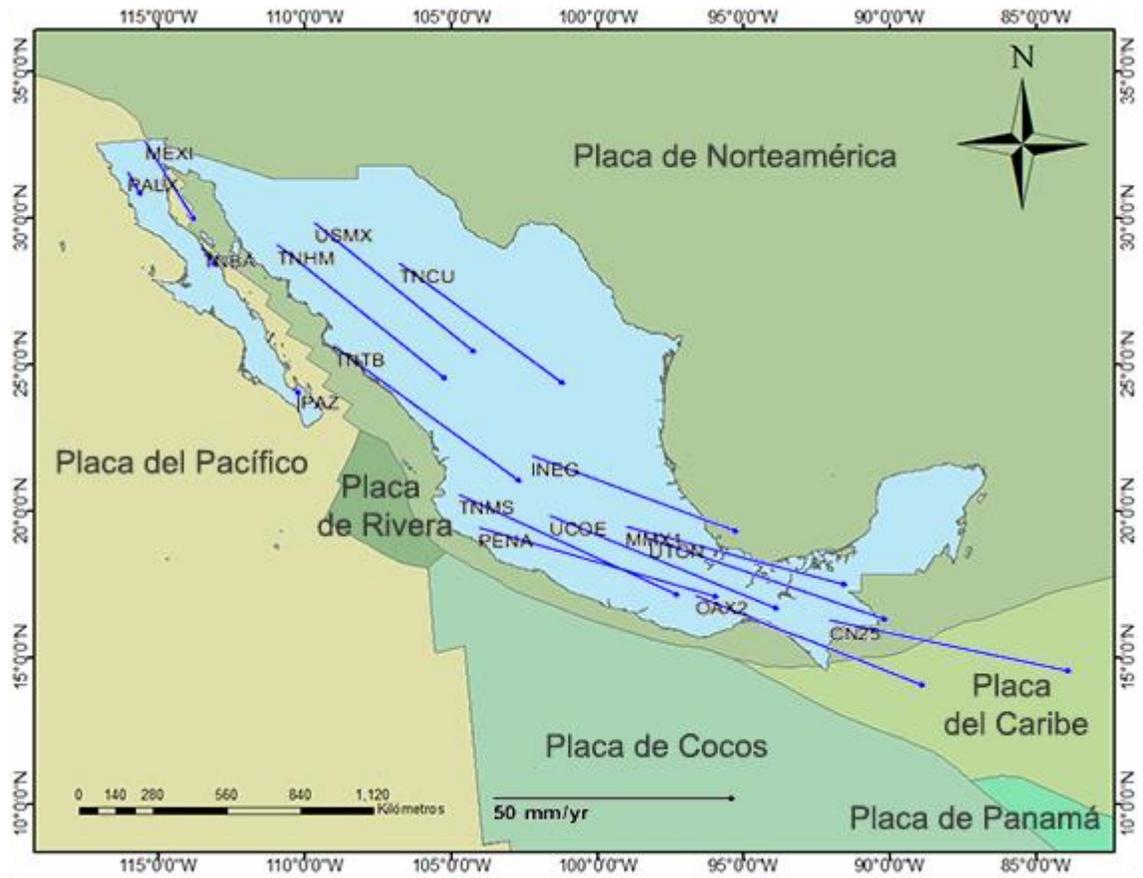
**Tabla 4.** Tabla de posición y Velocidades de las estaciones procesadas relativas al modelo de placas NOAM en el ITRF14.

Estación	Longitud	Latitud	Evel	Nvel	dEv	dNv	E +-	N +-	Rne	Hvel	dHv	H +-
Unidades	grados	grados	mm/yr	mm/yr	mm/yr	mm/yr	mm/yr	mm/yr		mm/yr	mm/yr	mm/yr
CN25	267.8648	16.23204	2.86	3.56	2.86	3.56	0.05	0.04	-0.01	2.73	2.73	0.17
OAX2	263.2833	17.07834	0.79	-1.18	-3.37	-7.3	0.04	0.03	0.013	1.8	1.09	0.14
UTON	261.6838	19.03345	4.95	2.35	4.95	2.35	0.04	0.03	0.048	0.15	0.15	0.15
MMX1	260.9316	19.43165	1.55	8.32	1.55	8.32	0.04	0.03	0.026	-274	-274	0.12
UCOE	258.3056	19.81318	3.25	2.69	3.25	2.69	0.04	0.03	0.035	1.08	1.08	0.14
INEG	257.7158	21.85615	0.95	7.17	-0.29	4.5	0.03	0.03	0.04	-51.9	-25.47	0.1
PENA	255.8985	19.39053	4.5	10.13	4.5	10.1	0.05	0.04	0.024	2.68	2.68	0.19
TNMS	255.2033	20.53477	1.9	3.47	1.9	3.47	0.04	0.04	0.024	0.02	0.02	0.15
TNCU	253.206	28.45056	-0.36	0.65	-0.36	0.65	0.03	0.03	0.045	-1.1	-1.1	0.11
TNTB	250.9473	25.60586	0.12	-0.79	0.12	-0.8	0.06	0.05	0.023	-1.16	-1.16	0.22
USMX	250.319	29.82165	-0.29	0.75	-0.58	-0.8	0.03	0.03	-0	-0.48	0.07	0.12
IPAZ	249.6693	24.14527	-40.1	29.37	-1.07	-2.4	0.03	0.03	0.046	1.6	3.33	0.12
TNHM	249.0297	29.08131	0.15	0.9	0.15	0.9	0.03	0.03	0.037	-0.39	-0.39	0.12
TNBA	246.4527	28.97192	-32.6	29.17	-32.6	29.2	0.04	0.03	0.026	0.02	0.02	0.13
MEXI	244.5243	32.63299	-21.6	16.77	-21.56	16.8	0.03	0.03	0.02	-2.92	-2.92	0.13
PALX	243.9362	31.55912	-30.6	29.94	-30.57	29.9	0.02	0.02	0.051	-0.95	-0.95	0.08



**Figura 38.** Mapas de velocidades relativas al modelo de placas NOAM en el ITRF14 para el periodo 2014-2018.

Resultados y análisis



**Figura 39.** Mapas de velocidades al modelo de placas PCFC en el ITRF14 para el periodo 2014-2018.

**Tabla 5.** Tabla comparativa de velocidades resultantes para cada modelo de placas donde además se muestra la magnitud total de los vectores de velocidad.

Modelo	ITRF		NOAM		PCFC		NOAM	PCFC
Estación	Evel	Nvel	Evel	Nvel	Evel	Nvel	Magnitud	Magnitud
Unidades	mm/año	mm/año						
<b>CN25</b>	2.86	3.56	-5.71	2.29	50.02	-11.56	6.15	51.34
<b>OAX2</b>	0.79	-1.18	-7.94	-4.08	47.43	-20.4	8.93	51.63
<b>UTON</b>	4.95	2.35	-4.45	-1.25	49.4	-18.41	4.62	52.72
<b>MMX1</b>	1.55	8.32	-7.96	4.36	45.62	-13.19	9.07	47.49
<b>UCOE</b>	3.25	2.69	-6.21	-2.24	47.33	-21.13	6.60	51.83
<b>INEG</b>	0.95	7.17	-9.17	2.01	42.65	-17.18	9.39	45.98
<b>PENA</b>	4.5	10.13	-4.76	4.43	49.41	-15.65	6.50	51.83
<b>TNMS</b>	1.9	3.47	-7.75	-2.42	45.54	-22.84	8.12	50.95
<b>TNCU</b>	-0.36	0.65	-12.29	-5.98	34.08	-27.35	13.67	43.70
<b>TNTB</b>	0.12	-0.79	-10.84	-8.18	38.59	-30.6	13.58	49.25
<b>USMX</b>	-0.29	0.75	-12.45	-6.57	33.12	-29.27	14.08	44.20
<b>IPAZ</b>	-40.1	29.37	-50.45	21.53	0.5	-1.47	54.85	1.55
<b>TNHM</b>	0.15	0.9	-11.66	-7.16	34.88	-30.44	13.68	46.29
<b>TNBA</b>	-32.6	29.17	-44.16	20.27	3	-4.13	48.59	5.10
<b>MEXI</b>	-21.6	16.77	-33.8	7.15	10.29	-18.06	34.55	20.79
<b>PALX</b>	-30.6	29.94	-42.52	20.13	2.76	-5.33	47.04	6.00

#### 4.5 Velocidades relativas de las estaciones GPS

Con respecto al ITRF2014:

- Las estaciones en el límite transformante en la placa del Pacífico tienen un movimiento hacia el noroeste con excepción de la estación MEXI, la cual tiene un desplazamiento hacia el norte menor que el resto de las estaciones.
- Las estaciones en el límite transformante en la placa de Norteamérica se mueven hacia el suroeste.
- Las estaciones en el límite convergente en la placa de Norteamérica tienen movimientos distintos a lo esperado con respecto al desplazamiento de la placa de Norteamérica, posiblemente debido a que en el límite convergente existen zonas de la corteza terrestre con una deformación importante.

Con respecto a la placa de Norteamérica NOAM08 ITRF2014:

- Límite transformante, estaciones sobre la placa del Pacífico: Las velocidades residuales de las estaciones PALX, TNBA e IPAZ son muy similares (Entre -20 y -40 mm/año en la componente este y aproximadamente 30 mm/año en la componente norte). La estación MEXI, a pesar de tener la misma dirección de desplazamiento, tiene una magnitud menor en la componente norte de 17 mm/año y en la componente este de -21 mm/año.
- Límite transformante, estaciones sobre la placa de Norteamérica: las 4 estaciones presentan vectores de velocidad pequeños cercanos a 1mm/año en la componente norte y 0 mm/año en la componente este con excepción de TNTB con un movimiento de -1 mm/año en la componente norte.
- Límite convergente, estaciones sobre la placa de Norteamérica: Todas las estaciones con excepción de OAX2 presentan movimiento hacia el sureste variando las magnitudes y direcciones de los vectores de velocidad que van desde los 3.9 mm/año hasta los 11 mm/año.

Con respecto a la placa del Pacífico PCFC08 ITRF2014:

- Todas las estaciones que se encuentran en la placa de Norteamérica se desplazan hacia la misma dirección rumbo al sureste variando ligeramente el ángulo de la dirección y las magnitudes.
- Las estaciones que se encuentran en la placa del Pacífico tienen muy poca velocidad residual relativa a la placa del Pacífico, pero la velocidad aumenta conforme las estaciones se ubican hacia el norte, siendo la de MEXI la que más velocidades residuales tiene llegando con hasta -18 mm/año norte y 10 mm/año este.

#### **4.6 Estabilidad de las estaciones GPS**

En cuanto a las series de tiempo se puede observar que las estaciones que se encuentran en el límite convergente con excepción de TNMS son las que más

presentan movimientos anómalos de estas, esto es comprobado con el siguiente análisis mostrado en la Tabla 6 en el que se usa la estimación del WRMS y el NRMS que representan la precisión con las que se obtuvieron los vectores de velocidad en función de las series de tiempo esto el desfase de las mediciones de las tendencias que se tienen.

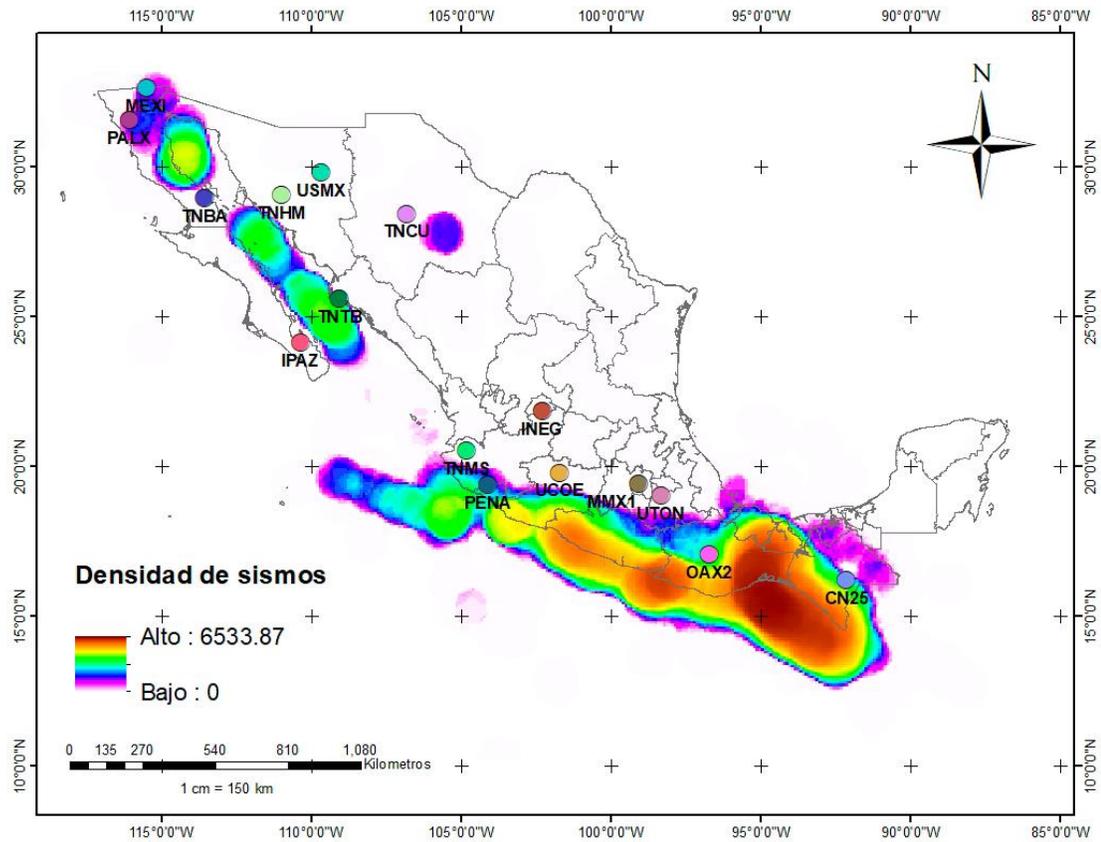
**Tabla 6.** Comparación de valores promedio de WRMS y NRMS dados por las estaciones que se encuentran en las 3 zonas dadas por los límites entre las dos placas.

	Límite Transformante		Límite Convergente
	Placa de Norteamérica	Placa del Pacífico	Placa de Norteamérica
<b>WRMS (mm)</b>	1.34125	1.5375	3.075
<b>NRMS</b>	0.8475	0.87375	1.446875
<b>TWRMS(mm)</b>	1.439375		
<b>TNRMS</b>	0.860625		

La mejor estabilidad se obtuvo en las placas de Norteamérica y del Pacífico, en el ambiente tectónico transformante, en promedio, en ambas placas se obtuvieron mejores precisiones que en el límite convergente en la placa de Norteamérica notándose una diferencia bastante grande entre estas dos zonas.

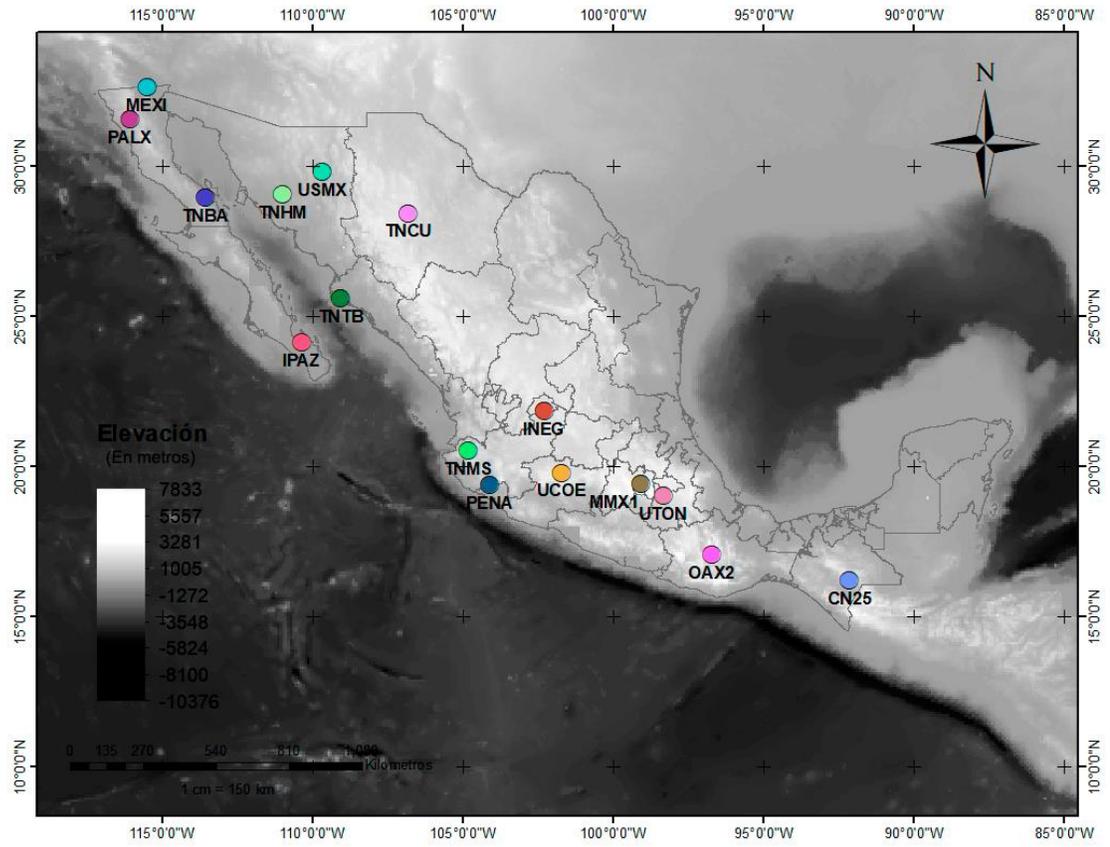
Además se crearon mapas de densidades (Figura 40) con los datos de los sismos ocurridos para ambos periodos para usarlos junto con mapas de alturas (Figura 41) y profundidades de la corteza terrestre (Figura 42) y conseguir una correlación de la estabilización de las estaciones y los datos anteriormente mencionados.

## Resultados y análisis

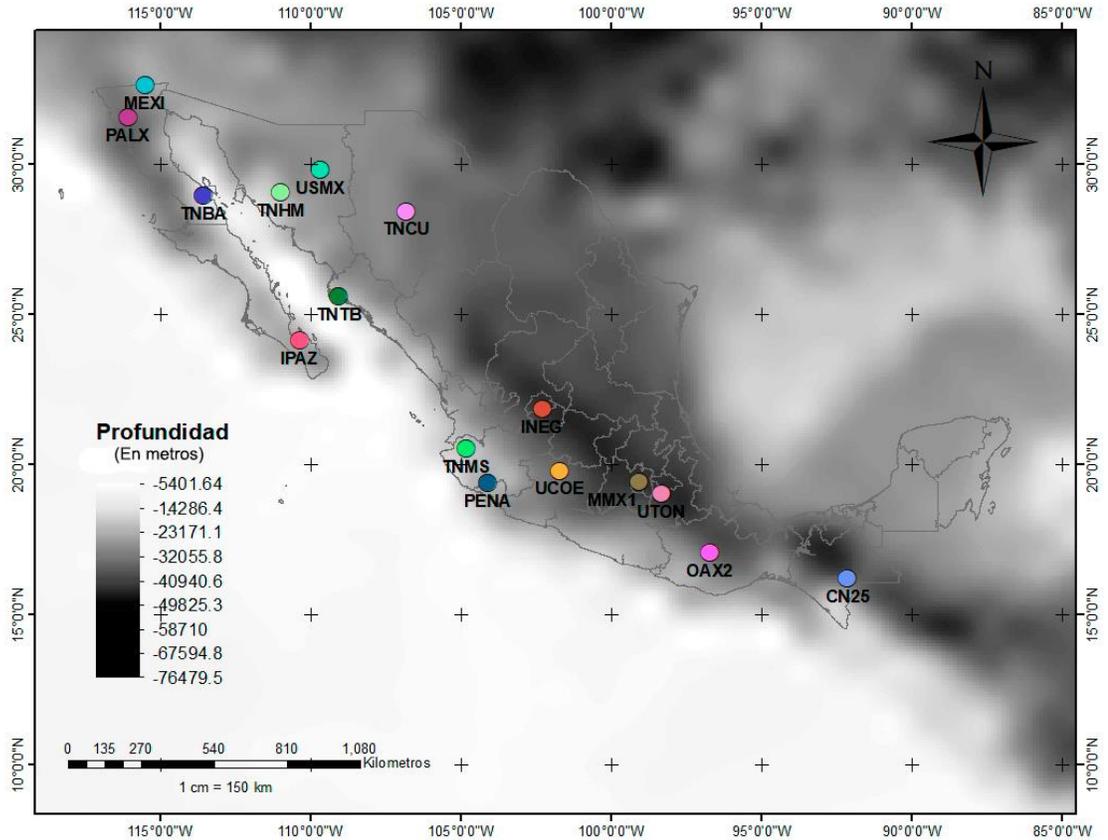


**Figura 40.** Mapa de densidades que ilustra la densidad de sismos ocurridos en México para el periodo 2014-2018.

## Resultados y análisis



**Figura 41.** Mapa en México donde se indica la elevación en metros dadas por el modelo digital de elevaciones mundial ETOPO.



**Figura 42.** Mapa de México donde se ilustra la profundidad en metros de la corteza terrestre utilizando el modelo de Moho CRUST 1.0.

De los mapas se extrajeron los valores puntuales raster por debajo de las estaciones mostrados en las Tablas 7, 8 y 9 que incluyen los valores de WRMS, y NRMS para todas las estaciones en el límite transformante y valores RMS promedio por cada componente, estación y zona. Además se muestran los valores de densidad, superficie y profundidad extraídos de los mapas creados mostrados en las Figuras 40, 41 y 42:

- La estación más estable sobre la placa de Norteamérica fue en el límite transformante (TNHM), y en el límite convergente fue la estación TNMS. La estación MEXI es la menos estable del límite transformante, esto probablemente debido a que se encuentra muy cercana al límite entre la placa del Pacífico y la placa de Norteamérica. En la placa del Pacífico la

estación más estable fue la de PALX, y la menos estable de la placa de Norteamérica en el límite transformante es la estación TNCU, con respecto al límite convergente es la estación OAX2 con un WRMS más grande que el resto, esto se puede observar directamente en la serie de tiempo de la estación.

- Las estaciones en el límite transformante son las que en promedio tienen menores valores obtenidos de los mapas de densidades siendo la estación MEXI la que tiene los valores más altos en la placa del Pacífico junto con TNCU en la placa de Norteamérica y los valores más bajos fueron los de TNHM sobre la placa de Norteamérica e IPAZ en la placa del Pacífico, en promedio se obtuvieron valores más bajos en el límite transformante que en el límite convergente
- Estos resultados de mapas de densidades coinciden en su mayoría con los mejores y peores resultados mostrados por el WRMS y el NRMS en las Tablas 10 y 11. Lo que significa que las estaciones que tienen una mayor densidad de sismos tienen más probabilidad de tener error.
- En el límite convergente la estación que tiene los valores más altos fue la de CN25 seguida de la de OAX2, y los valores más bajos fueron de las estaciones de INEG, UCOE, TNMS y MMX1, los cuales coinciden, aunque en menor medida con los resultados mostrados por el WRMS y el NRMS.

**Tabla 7.** Valores de WRMS, y NRMS para todas las estaciones en el límite transformante en la Placa de Norteamérica

		<b>Límite transformante</b>				
		Placa de Norteamérica				
		USMX	TNHM	TNTB	TNCU	media
<b>NORTE</b>	WRMS (mm)	1.33	1	1.3	1.1	1.1825
	NRMS	0.86	0.64	0.86	0.77	0.7825
<b>ESTE</b>	WRMS (mm)	1.4	1.4	1.3	1.9	1.5
	NRMS	0.87	0.8	0.78	1.2	0.9125
<b>UP</b>	WRMS (mm)	4.8	4	4.2	4.5	4.375
	NRMS	0.81	0.62	0.71	0.78	0.73
<b>PROMEN</b>	WRMS (mm)	1.365	1.2	1.3	1.5	1.34125
	NRMS	0.865	0.72	0.82	0.985	0.8475
<b>KERNEL</b>		0.170787	0	0	16.4283	4.149781
<b>PUNTO</b>		9.11657	0	31.35037	10.5999	12.76673
<b>PUN MAS</b>		5.232191	0	122.6178	9.22768	34.26943
<b>SUPERF (m)</b>		793	218	-1	2060	767.5
<b>PROFU (m)</b>		-27658.7	-22172.8	-18845.2	-31797.7	-25118.6
<b>GROSOR (m)</b>		-26909.2	-21905.8	-18842.2	-29777.8	-24358.7

**Tabla 8.** Valores de WRMS, y NRMS para todas las estaciones en el límite transformante en la Placa del Pacífico

		<b>Límite transformante</b>					
		Placa del Pacífico					
		TNBA	IPAZ	PALX	MEXI	media	mediaT
<b>NORTE</b>	WRMS (mm)	1	1.8	1	2.2	1.5	1.341
	NRMS	0.66	0.96	0.79	1.06	0.8675	0.825
<b>ESTE</b>	WRMS (mm)	1.6	1.8	1.3	1.6	1.575	1.53
	NRMS	0.94	0.86	0.97	0.75	0.88	0.896
<b>UP</b>	WRMS (mm)	4.6	5.8	3.5	5.3	4.8	4.587
	NRMS	0.74	0.77	0.72	0.67	0.725	0.7275
<b>PROMEN</b>	WRMS (mm)	1.3	1.8	1.15	1.9	1.537	1.439
	NRMS	0.8	0.91	0.88	0.905	0.873	0.860
<b>KERNEL</b>		22.079	0	101.392	32.997	39.11733	21.633
<b>PUNTO</b>		12.074	0	48.233	44.622	26.232	19.499
<b>PUN MAS</b>		12.6397	2.032	35.589	30.643	20.226	27.247
<b>SUPERF (m)</b>		-458	2	1165	10	179.75	473.625
<b>PROFU (m)</b>		-13577.5	-23179.5	-33736	-24709.6	-23800.7	-24459.6
<b>GROSOR (m)</b>		-13781.3	-23180.3	-32681.4	-24702.3	-23586.3	-23972.5

**Tabla 9.** Se muestran los valores de WRMS, y NRMS para todas las estaciones en el límite convergente y valores RMS promedio por cada componente, estación y zona.

Límite Convergente									
Placa de Norteamérica									
	INEG	MMX1	CN25	PENA	UTON	OAX2	TNMS	UCOE	media
<b>WRMS NORTE (mm)</b>	2.5	3.1	2.5	1.8	3.2	8.3	1.6	2.5	3.187
<b>NRMS NORTE</b>	1.62	1.72	1.01	0.8	1.64	3.97	0.89	1.27	1.615
<b>WRMS ESTE (mm)</b>	3	2.5	2.7	2.2	3.2	6.5	1.8	1.8	2.962
<b>NRMS ESTE</b>	1.64	1.17	0.94	0.81	1.37	2.66	0.86	0.78	1.278
<b>WRMS UP (mm)</b>	15.3	19.8	7.2	7.3	5.9	8.2	6	5.1	9.35
<b>NRMS UP</b>	2.43	2.67	0.72	0.74	0.69	0.95	0.78	0.61	1.198
<b>WRMS PROME (mm)</b>	2.75	2.8	2.6	2	3.2	7.4	1.7	2.15	3.075
<b>NRMS PROME</b>	1.63	1.445	0.975	0.805	1.505	3.315	0.875	1.025	1.446
<b>KERNEL</b>	0	0	0.451	231.95	1.532	196.1263	0.843045	0	53.863
<b>PUNTO</b>	0	2.265	121.26	78.944	4.332	118.7525	6.767943	6.613	42.367
<b>PUNTO MA</b>	0	1.30012	148.36	66.70	8.788	136.3361	11.32207	6.373	47.397
<b>SUPERF (m)</b>	1991	2246	1622	1190	2149	1916	1722	2075	1863.875
<b>PROFU (m)</b>	-42742	-43083	-36667	-22852	-43025	-35232	-18955	-33959	-34565
<b>GROSOR (m)</b>	-40756	-40834	-35029	-21684	-40879	-33135	-16974	-31875	-32646

#### 4.7 Correlación de la estabilidad de las estaciones GPS

De igual manera se encontró una correlación entre la superficie y profundidad de la corteza con los valores de WRMS y NRMS, existiendo una correlación aún mayor entre los valores del NRMS con la profundidad de la corteza, por lo que se graficaron los valores normalizados y promedios de los mapas de densidades y profundidad de la corteza en función del NRMS encontrando que existe una posible correlación entre los mapas de densidades sísmicas, la profundidad de la corteza y el NRMS, mostrando un valor anómalo en la estación CN25 cuya serie de tiempo se mira estable, y otros 4 posibles valores anómalos de las estaciones INEG, MMX1, UTON y OAX2, las cuales presentan características similares mostrando series de tiempo caóticas, estas estaciones se encuentran alineadas y atraviesan el Cinturón Volcánico Transmexicano, MMX1 e INEG tienen valores en UP anómalos y valores WRMS NRMS altos, lo que puede representar algún efecto de la geodinámica local. Estas estaciones que se salen de la tendencia general, también se muestran en la gráfica en función de sólo la densidad sísmica. La relación entre la estabilidad de las estaciones se logró

mejorar utilizando solamente las profundidades de la corteza sobre la que encuentran las estaciones, de esta manera solo resulta anómala la estación de OAX2 lugar donde también se obtuvieron los valores más altos de densidad de sismos.

**Tabla 10.** Valores WRMS para las estaciones más estables y menos estables que se encuentran en las 3 zonas dadas por los límites entre las dos placas.

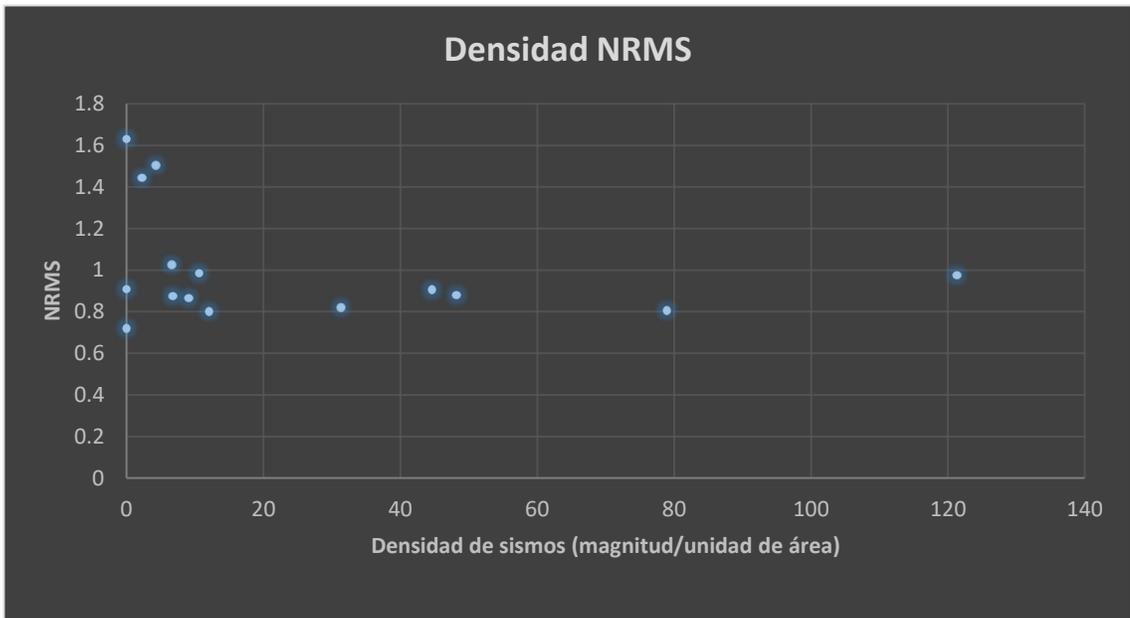
	<b>Límite Transformante</b>			<b>Límite Convergente</b>		
<b>Placa</b>	Placa de Norteamérica		Placa del Pacífico		Placa de Norteamérica	
	ESTACIÓN	WRMS (mm)	ESTACIÓN	WRMS (mm)	ESTACIÓN	WRMS (mm)
<b>Más estable</b>	TNHM	1.2	PALX	1.15	TNMS	1.7
<b>Menos estable</b>	TNCU	1.5	MEXI	1.9	OAX2	7.4

**Tabla 11.** Valores NRMS para las estaciones más estables y menos estables que se encuentran en las 3 zonas dadas por los límites entre las dos placas.

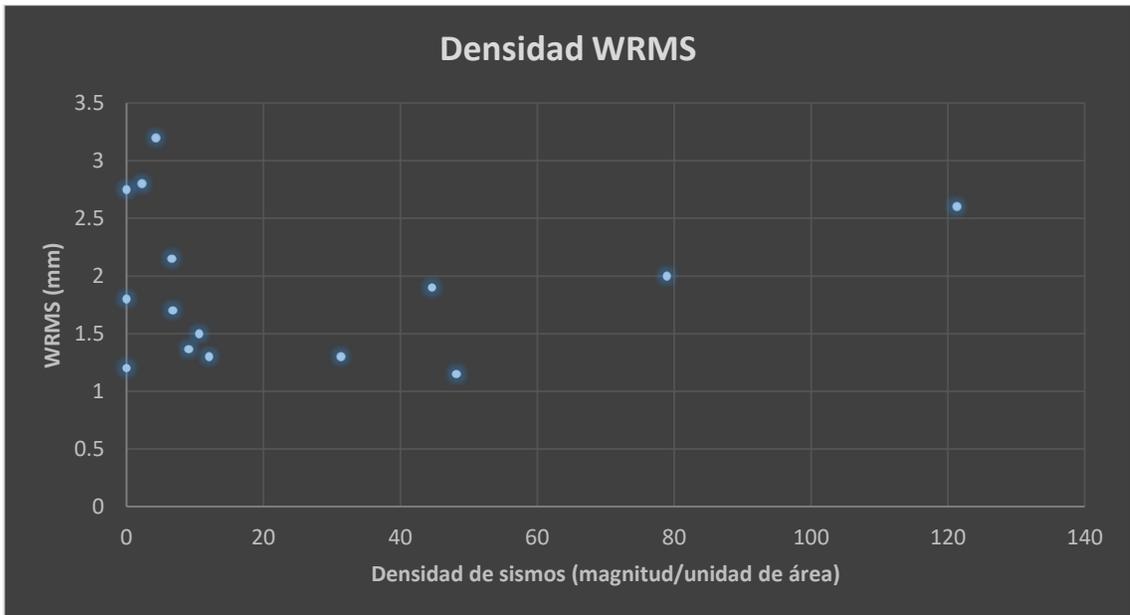
	<b>Límite Transformante</b>			<b>Límite Convergente</b>		
<b>Placa</b>	Placa de Norteamérica		Placa del Pacífico		Placa de Norteamérica	
	ESTACIÓN	NRMS	ESTACIÓN	NRMS	ESTACIÓN	NRMS
<b>Más estable</b>	TNHM	0.72	TNBA	0.8	PENA	0.805
<b>Menos estable</b>	TNCU	0.985	IPAZ	0.91	OAX2	3.315

Como se muestra en la Figura 43, eliminando del análisis las 4 estaciones (INEG, MMX1, UTON, OAX2) se obtuvo una tendencia lineal horizontal de los resultados lo cual implica que no existe correlación directa entre los sismos ocurridos y la estabilidad de las estaciones en los valores de NRMS, sin embargo sí existe una correlación en los valores de WRMS mostrado en la Figura 44, aunque lo más adecuado para llegar a esta conclusión sería el obtener mediciones de un mayor

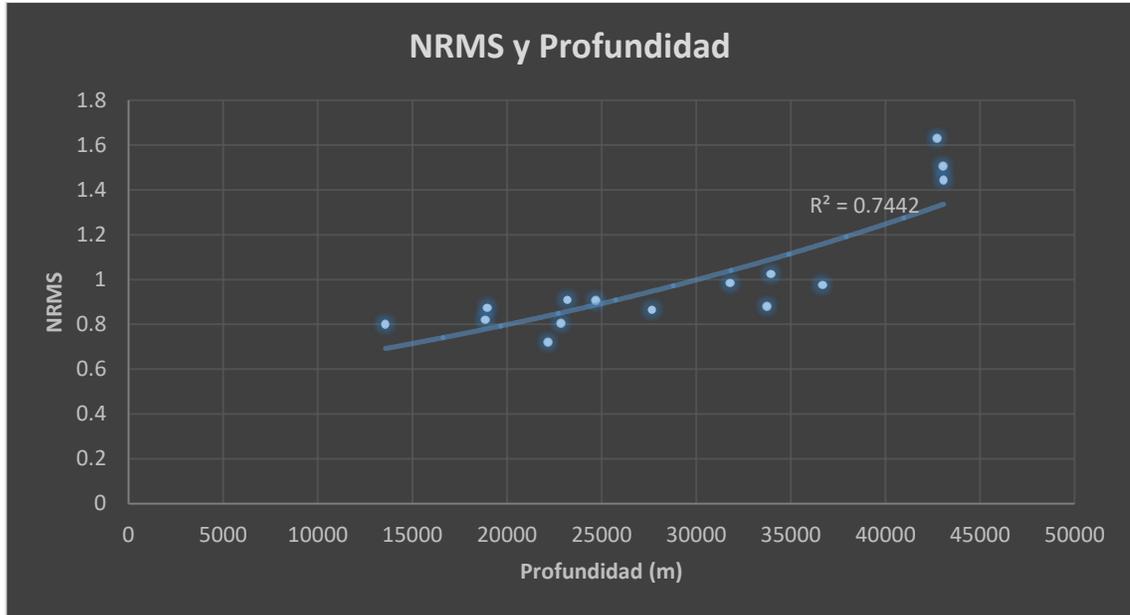
número de estaciones en distintos lugares y añadir otros parámetros que tengan relación con la geodinámica local de la estación.



**Figura 43.** Gráfica que muestra la relación entre la densidad de sismos y el NRMS.



**Figura 44.** Gráfica que muestra la relación entre la densidad de sismos y el WRMS.



**Figura 45.** Gráfica que muestra la relación entre los valores de NRMS y la profundidad de la corteza.

En las Figuras 43 y 44 se puede observar que existe una relación entre la baja estabilidad de las estaciones y la ocurrencia de sismos, mientras estas estaciones no se encuentren a grandes alturas y derivado de esto si existe una relación directa entre la estabilidad de las estaciones y la altura a la que esta se encuentre independientemente de otros factores mostrado en la Figura 45.

#### 4.8 Análisis de las estaciones GPS

Estaciones por encima del hundimiento de la placa:

- UTON y UCOE comparten características en común al encontrarse medianamente lejos de zonas sísmicas, tener vectores de velocidad similares.
- MMX1 e INEG, también comparten características en común ya que tienen vectores de velocidad similares, presentan subsidencia y son los que se encuentran más cercanos de zonas sísmicas son sismos de baja magnitud.
- INEG presenta una subsidencia no lineal que cambia desde los 2.5 cm/año hasta los 8 cm/año dependiendo de las fechas coincidiendo las

primeras velocidades con las calculadas por CORS con 3.25 cm/año probablemente provocada por actividad tectónica o por la extracción de agua en mantos acuíferos.

- MMX1 presenta una subsidencia lineal aproximada de 28 cm por año lo cual coincide con la velocidad en UP dada por CORS que es de 26.27 cm/año. La subsidencia ocurrida en el valle de México es un proceso de hundimiento del terreno que es provocado por la extracción de agua en mantos acuíferos.

Estaciones en la zona de subducción:

TNMS y PENA

- PENA, se comporta de manera similar a OAX2, sin embargo esta estación se ubica en un lugar donde el moho no está a gran profundidad y existen gran cantidad de sismos someros, lo que podría explicar su vector de velocidad similar al de TNMS.
- TNMS comparte características de las estaciones estables y de la estación PENA, situada en una zona donde los sismos no son muy frecuentes y donde la profundidad del moho es aún más somera. Otra característica es que se encuentra alejada de la zona de subducción.

Estación en una alta zona sísmica:

- OAX2 se encuentra entre la zona sísmica del arco volcánico y la zona de subducción siendo la segunda estación que obtuvo el mayor valor de densidad de sismos.

Estaciones en el límite transformante:

MEXI es una estación inestable, se desplaza en la misma dirección que el resto de las estaciones que se ubican sobre la misma placa, con pequeñas variaciones en el vector de velocidad, esto es debido a que se encuentra en la zona de interacción entre la placa del Pacífico y la placa de Norteamérica lo que produce deformaciones y actividad sísmica en la zona.

#### Estación CN25:

La estación CN25 es medianamente estable, con pocos sismos, y un vector de velocidad de baja magnitud. Además de encontrarse en una zona bastante alejada del resto de las estaciones alejada del frente de deformación producida por la zona de subducción en comparación del resto de las estaciones. Otro dato curioso es que el movimiento de la estación coincide con el producido por los mecanismos focales.

El resto de las estaciones (PALX, TNBA, IPAZ, USMX, TNHM, TNCU, TNTB) tuvieron una tendencia estable siguiendo el movimiento de manera lineal sin mucho error.

#### **4.9 Correlación entre series de tiempo GPS y de sismos**

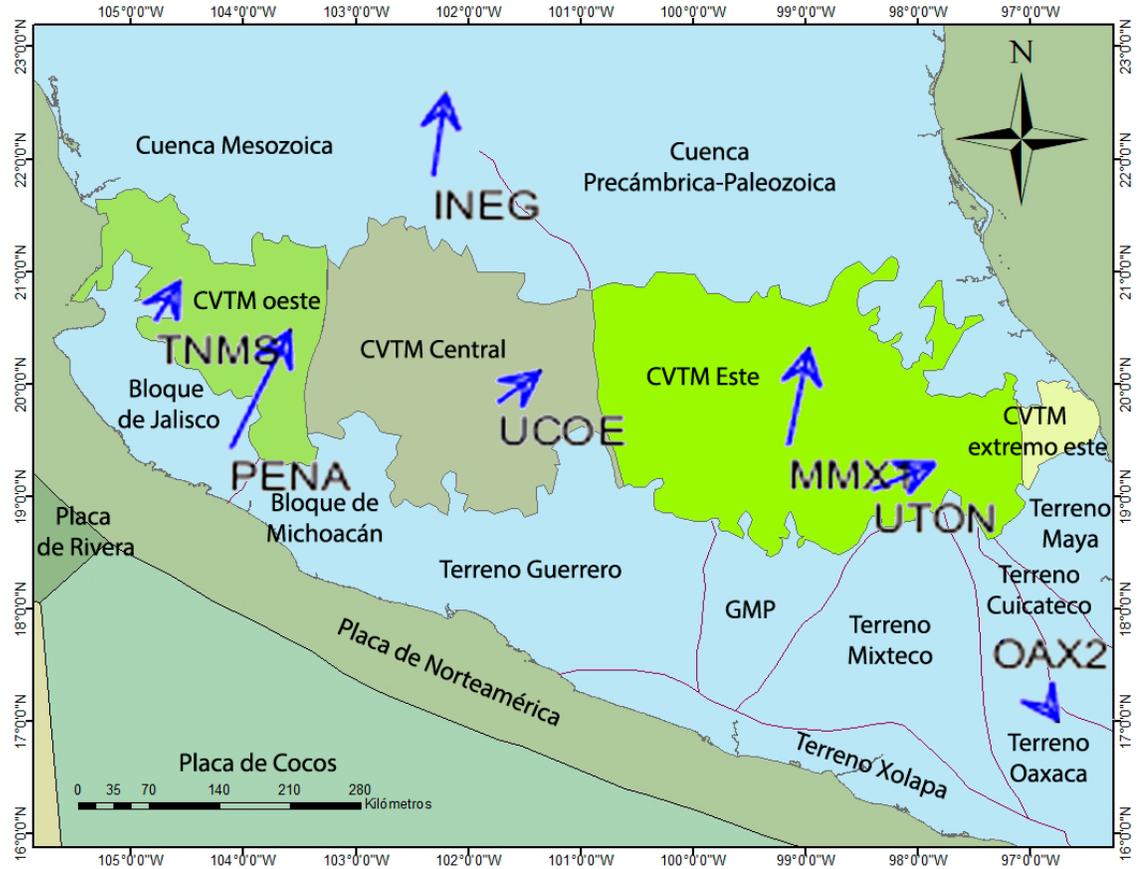
Primero se trató de encontrar una correlación entre el movimiento anómalo de las estaciones con la cantidad y magnitud de los sismos que ocurren alrededor de las ellas. Se extrajeron del mapa sismos con magnitudes mayores a 2.0 localizados a distintos radios de las estaciones, logrando los mejores resultados usando un radio de 50 km. A partir del análisis no se encontró correlación entre las series de tiempo de los sismos y la velocidad de las estaciones. El resultado obtenido sugiere que los sismos y el movimiento anómalo de las estaciones son causados por la deformación que ocurre entre los límites de placas, sin embargo esto no significa que las deformaciones sean causadas por sismos, si no que los sismos son causados por las deformaciones, este argumento se apoya en la observación de que la cantidad de sismos que ocurren no se refleja directamente en el movimiento de las estaciones.

#### **4.10 Ubicación de las estaciones GPS de la zona de subducción**

La magnitud y dirección distinta de los vectores resultantes de las estaciones que se ubican en la zona de subducción, puede estar relacionado con su ubicación sobre distintos bloques corticales con diferentes edades y geodinámica. El Cinturón Volcánico Transmexicano se encuentra dividido en 4 sectores corticales con diferentes propiedades geológicas (Figura 46): La zona este presenta un movimiento menor al de la zona oeste al igual que las estaciones que se

encuentran ubicadas en esas zonas. Como se muestra en la Figura 46 TNMS se ubica entre los límites del bloque de Jalisco y el Cinturón Volcánico Transmexicano Oeste. PENA se ubica en el bloque de Jalisco. MMX1 y UTON se ubica en la zona Este del Cinturón Volcánico Transmexicano. OAX2 se ubica en la zona límite del terreno de Oaxaca y el terreno Cuicateco. CN25 se encuentra en el terreno Maya. INEG se ubica en la cuenca mesozoica. En la zona central del Cinturón Volcánico Transmexicano la estación UCOE tiene un movimiento relativo al ITRF hacia la trinchera como sería esperado debido a la zona del Cinturón Volcánico Transmexicano donde se ubica. Pero el movimiento destacable es el referido a la placa de Norteamérica que es opuesto al esperado. Aunque es importante mencionar que la velocidad residual resultante puede ser debida a la inestabilidad de la estación. El bloque de Jalisco es el resultado de la tensión aplicada por los límites entre las placas de Rivera, de Cocos y de Norteamérica, y presenta un movimiento hacia el suroeste con relación a la placa de Norteamérica alejándose de esta, que es completamente diferente al de la estación que se ubica en esa zona, por lo que se consideró que la estación PENA se ubica entre la transición del bloque Jalisco y bloque de Michoacán. El bloque de Michoacán, tiene un movimiento hacia el sureste, y en el límite entre estos dos bloques es una zona con gran deformación, además de ubicarse en el límite de las placas subducidas de Cocos y de Rivera.

## Resultados y análisis



**Figura 46.** Ubicación de las estaciones y sus vectores de velocidad en la zona de subducción y los bloques donde se encuentran situadas. Los datos fueron tomados de Ferrari et al. (2012) y Rosas-Elguera et al. (1996).

## Capítulo 5

### 5. Conclusiones y recomendaciones

Se observa que el movimiento de las estaciones es consistente con el desplazamiento de las placas tectónicas, esto se puede ver mejor al analizar las velocidades residuales de las estaciones relativas a alguna placa tectónica. Para esto se utilizaron diferentes modelos de movimiento de placas (PCFC y NOAM) de los cuáles las velocidades relativas más bajas que se obtuvieron fueron las de las estaciones que se sitúan en su respectiva placa como se muestra en la Tabla 5 los valores de menor magnitud de los vectores de velocidad obtenidos fueron con las estaciones IPAZ, MEXI, TNBA, y PALX para la placa del Pacífico y OAX2, INEG, MMX1, CN25, PENA, UTON, UCOE y TNMS para la placa de Norteamérica. Los vectores de velocidad graficados fueron escalados para que se ajustaran al tamaño del mapa de México, de igual manera es mostrada en la parte inferior la referencia de escala en mm para los vectores de velocidad. Como resultado se tiene que las estaciones situadas en la placa del Pacífico se mueven de acuerdo al desplazamiento de esta placa con velocidades relativas que van de los 0 mm a los 5 mm aproximadamente, solo la estación de MEXI presenta un vector de velocidad mayor con 10.29 mm/año en la componente este y -18.06 mm/año en la componente norte. Esto se debe posiblemente a la zona de alta deformación y de transición entre placas donde se encuentra. Con respecto a las estaciones situadas en la placa de Norteamérica, aquellas se ubican en el límite transformante se mueven de acuerdo al movimiento de esta placa con vectores de velocidad cercanos a 0 mm/año en la componente este y 1 mm/año en la componente norte con excepción de TNTB con un movimiento de -1 mm/año en la componente norte. Y las estaciones que se ubican en la zona del límite convergente, se mueven conforme al movimiento de esta placa con velocidades relativas que son mayores a las del resto de las estaciones situadas en diferentes ambientes. Las velocidades relativas a la placa de Norteamérica de las estaciones ubicadas en la zona del límite convergente van desde 1 mm/año hasta los 10 mm/año aproximadamente. Aunque todas las estaciones en esta zona con

excepción de OAX2 tienen un movimiento hacia el noreste, estas tienen distintas magnitudes y direcciones en los vectores de velocidad entre sí, esto puede estar relacionado con su ubicación sobre distintos bloques corticales con diferentes edades y geodinámica.

En comparación a las publicaciones hechas por Bertha Márquez-Azúa (DeMets et al. (2014a), Márquez-Azúa et al. (2004), Márquez-Azúa y DeMets (2009), Márquez-Azúa y DeMets (2003)): Para la placa del pacífico las velocidades de las estaciones MEXI e IPAZ siguen la misma tendencia de aumento de velocidad hacia el norte de las estaciones procesadas, para el caso de MEXI el vector de velocidad es cercano a los 20 mm en ambos casos pero para IPAZ, el vector de velocidad publicado por Bertha Márquez-Azúa es más grande siendo alrededor de los 5 mm, y para este trabajo de tesis teniendo 1.55 mm de magnitud. En ambos casos siguen la misma dirección noreste pero con distintos ángulos. En un trabajo más reciente (DeMets et al., 2014a) IPAZ tiene un vector de velocidad más pequeño, ahora cercano a los 2 mm y un ángulo más cercano al calculado en este trabajo, lo cual podría sugerir que el vector de velocidad de esa estación se está desplazando con el tiempo, moviéndose cada vez con un movimiento similar al de la placa del Pacífico. Para el caso de la placa de Norteamérica, las estaciones situadas más hacia el norte del Cinturón Volcánico Transmexicano son las que tienen un movimiento que encaja mejor con el movimiento dado por el modelo de la placa de Norteamérica y las estaciones más hacia el sur tienen un movimiento con mayor diferencia al modelo de la placa de Norteamérica además de tener más error que las estaciones situadas más al sur del Cinturón Volcánico Transmexicano con excepción de la estación de INEG. En ambos casos la estación INEG tiene un comportamiento irregular similar en el cual se observa una tendencia no lineal y que cambia constantemente de dirección en las series de tiempo.

En cuanto a la estabilidad de las estaciones, se puede observar que existe una relación entre la baja estabilidad de las estaciones y la ocurrencia de sismos causados por la deformación que ocurre entre los límites de placas, sin embargo

esto no significa que la baja estabilidad sea causada por sismos ya que la cantidad de sismos que ocurren no se refleja directamente en el movimiento de las estaciones. Derivado de esto si existe una relación directa entre la estabilidad de las estaciones y la altura a la que esta se encuentre independientemente de otros factores. Se observa que la mayoría de los sismos en el límite convergente ocurren principalmente en fallas inversas, otros en fallas normales, y en muy pocos casos en fallas laterales. Los sismos en el límite transformante ocurren principalmente en dos zonas, una es a lo largo de Baja California entre Sonora y Sinaloa a lo largo de fallas laterales, y los que se encuentran entre Baja California y Sonora tienden a ocurrir debido a fallas normales. El resultado obtenido sugiere que los sismos y el movimiento anómalo de las estaciones son causados por la deformación que ocurre entre los límites de placas, sin embargo esto no significa que las deformaciones sean causadas por sismos, si no que los sismos son causados por las deformaciones, este argumento se apoya en la observación de que la cantidad de sismos que ocurren no se refleja directamente en el movimiento de las estaciones.

Para obtener un mejor resultado en la obtención de los vectores de velocidad es recomendable tener una selección de estaciones de referencia que mejore la propagación de velocidades. Las utilizadas en este trabajo no son completamente estables y fueron seleccionadas las más cercanas a la red procesada por lo que se sugiere tener un análisis de estabilidad de las estaciones de referencia para que mejoren la solución, utilizando las más estables y comparar resultados utilizando las recomendadas por AUSPOS. Otra recomendación es tener la mayor cantidad de años posibles de mediciones, esto es más necesario en las zonas donde se tiene una menor estabilidad ya que al ser sitios inestables la obtención de series de tiempo a corto plazo no indicaría una correcta obtención de vectores de velocidad. Esto es observable en la estación OAX2 ya que es la estación que tiene la menor velocidad residual en el límite convergente, lo que significaría que es la estación que mejor sigue el modelo de placas en relación a la placa de Norteamérica, pero esto no es así ya que tiene un alto valor de inestabilidad mostrado por los valores de WRMS de

7.4 mm y NRMS de 3.32. Se puede observar en las series de tiempo como su vector de velocidad va cambiando su magnitud y dirección en dependencia del intervalo de tiempo que se elija, coincidiendo en una velocidad relativa pequeña para los años medidos. De igual manera sucede el mismo fenómeno en las estaciones donde se tiene gran deformación, lo que causa la inestabilidad de las estaciones y da como resultado vectores de velocidad que tienen un gran cambio a través del tiempo, esto es observable en las series de tiempo del resto de las estaciones que se encuentran en el límite convergente (INEG, MMX1, CN25, PENA, UTON, UCOE) con excepción de TNMS que es fue la que tuvo la estabilidad más alta.

Existen diferentes métodos para calcular series de tiempo de alta precisión, por ejemplo el *white noise*, *flicker noise* y el algoritmo de CATS. Para el caso de este trabajo de tesis fueron utilizadas la técnica implementadas por tsview que consiste en la estimación de la posición con un error dado (20 mm para este caso) y con un criterio de rechazo de valor atípico de 3 Sigma con el 99.7% de las mediciones. En cuanto a los *offsets* estos no fueron analizados a profundidad ya que no se notó que existieran saltos de ciclo producidos por sismos que pudieran alterar las series de tiempo en gran medida con excepción del sismo de Chiapas el 2017 con magnitud de 8.2. Además fueron modelados los efectos de señales anuales y semianuales por esta razón existen algunos huecos en las series de tiempo y debido a esto las mediciones en algunas de las componentes fueron excluidas del procesamiento, pues son errores muy alejados de las líneas de tendencia. Debido al proceso anterior surgieron algunos *outliers*, pero estos no fueron eliminados ya que no afectan el resultado final de las series de tiempo.

La versión de GAMIT/GLOBK con la que se procesaron los datos es la versión 6.10 la cuál soporta únicamente la constelación GPS. Desde la versión 10.6 son soportadas las constelaciones Glonass, Beidou, y Galileo además de la GPS. Lo cual reduce el número de mediciones e impacta en la metodología del procesamiento de los datos ya que los datos tuvieron que ser estandarizados con TEQC para evitar errores durante el procesamiento. Las soluciones dadas por GAMIT son libres

de referencia por lo que GLOBK utiliza sus soluciones y combina los datos de otras redes para estimar posiciones y velocidades en un marco de referencia dado. Si las estaciones de control utilizadas para estas combinaciones no son consideradas en los archivos .apr utilizados para el marco de referencia utilizado entonces se tendrá que realizar procesamiento con distintos marcos de referencia. No es considerado el cambio de ITRF ya que todas las estaciones de referencia se encuentran dentro de las estimaciones del ITRF2014 que es el marco de referencia utilizado, si el periodo de medición fuera mayor y este utilizara estaciones de referencia consideradas en otro ITRF, se necesitaría considerar procesar estaciones con diferentes marcos de referencia.

### Referencias

- Altamimi, Z., Metivier, L. & Collillieux, X. 2012. ITRF2008 plate motion model. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 117.
- Altamimi, Z., Metivier, L., Rebischung, P., Rouby, H. & Collillieux, X. 2017. ITRF2014 plate motion model. *Geophysical Journal International*, 209, 1906-1912.
- Atwater, T. & Stock, J. 1998. Pacific-North America plate tectonics of the Neogene southwestern United States: an update. *International Geology Review*, 40, 375-402.
- Barckhausen, U., Ranero, C. R., Huene, R. v., Cande, S. C. & Roeser, H. A. 2001. Revised tectonic boundaries in the Cocos Plate off Costa Rica: Implications for the segmentation of the convergent margin and for plate tectonic models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106, 19207-19220.
- Bevis, M., Brown, A. & Kendrick, E. 2013. Devising stable geometrical reference frames for use in geodetic studies of vertical crustal motion. *Journal of Geodesy*, 87, 311-321.
- Blewitt, G. 1989. Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baselines up to 2000 Km. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets*, 94, 10187-10203.
- Blewitt, G. 1993. Advances in Global Positioning System technology for geodynamics investigations: 1978–1992. *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology*, 195-213.
- Blewitt, G., Kreemer, C., Hammond, W. C. & Goldfarb, J. M. 2013. Terrestrial reference frame NA12 for crustal deformation studies in North America. *Journal of Geodynamics*, 72, 11-24.
- Blewitt, G. & Lavallee, D. 2002. Effect of annual signals on geodetic velocity. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 107.

## Referencias

- Bos, M. S., Penna, N. T., Baker, T. F. & Clarke, P. J. 2015. Ocean tide loading displacements in western Europe: 2. GPS-observed anelastic dispersion in the asthenosphere. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 120, 6540-6557.
- Brudzinski, M. R., Schlanser, K. M., Kelly, N. J., DeMets, C., Grand, S. P., Marquez-Azua, B. & Cabral-Cano, E. 2016. Tectonic tremor and slow slip along the northwestern section of the Mexico subduction zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 454, 259-271.
- C. Amante, B. W. E. 2009. ETOPO1 1 arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis. In: MEMORANDUM, N. T. (ed.) *NESDIS*.
- Dawson, J., Govind, R. & Manning, J. 2001. Application of the AUSLIG online GPS processing system (AUSPOS) to Antarctica. *Proceeding of Satnav*.
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F. & Stein, S. 1990. Current Plate Motions. *Geophysical Journal International*, 101, 425-478.
- DeMets, C., Marquez-Azua, B. & Cabral-Cano, E. 2014a. A new GPS velocity field for the Pacific Plate - Part 1: constraints on plate motion, intraplate deformation, and the viscosity of Pacific basin asthenosphere. *Geophysical Journal International*, 199, 1878-1899.
- DeMets, C., Marquez-Azua, B. & Cabral-Cano, E. 2014b. A new GPS velocity field for the Pacific Plate - Part 2: implications for fault slip rates in western California. *Geophysical Journal International*, 199, 1900-1909.
- Dixon, T. H., Gonzalez, G., Lichten, S. M., Tralli, D. M., Ness, G. E. & Dauphin, J. P. 1991. Preliminary determination of Pacific-North America relative motion in the southern Gulf of California using the Global Positioning System. *Geophysical Research Letters*, 18, 861-864.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V. & Manea, M. 2012. The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522-523, 122-149.

## Referencias

- Franco, S. I., Kostoglodov, V., Larson, K. M., Manea, V. C., Manea, M. & Santiago, J. A. 2005. Propagation of the 2001-2002 silent earthquake and interplate coupling in the Oaxaca subduction zone, Mexico. *Earth Planets and Space*, 57, 973-985.
- Gonzalez-Ortega, A., Fialko, Y., Sandwell, D., Nava-Pichardo, F. A., Fletcher, J., Gonzalez-Garcia, J., Lipovsky, B., Floyd, M. & Funning, G. 2014. El Mayor-Cucapah ( M-w 7.2) earthquake: Early near-field postseismic deformation from InSAR and GPS observations. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 119, 1482-1497.
- He, X. X., Montillet, J. P., Fernandes, R., Bos, M., Yu, K., Hua, X. H. & Jiang, W. P. 2017. Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources. *Journal of Geodynamics*, 106, 12-29.
- Herring, T., King, R. & McClusky, S. 2010. Introduction to GAMIT/GLOBK. Introduction to GAMIT/GLOBK.
- Hofmann-Wellenhof, B. 2001. *Global Positioning System : Theory and Practice*.
- Hutton, W., DeMets, C., Sanchez, O., Suarez, G. & Stock, J. 2001. Slip kinematics and dynamics during and after the 1995 October 9 M-w=8.0 Colima-Jalisco earthquake, Mexico, from GPS geodetic constraints. *Geophysical Journal International*, 146, 637-658.
- Jiang, W. P., Deng, L. S., Li, Z., Zhou, X. H. & Liu, H. F. 2014. Effects on noise properties of GPS time series caused by higher-order ionospheric corrections. *Advances in Space Research*, 53, 1035-1046.
- Kim, Y., Miller, M. S., Pearce, F. & Clayton, R. W. 2012. Seismic imaging of the Cocos plate subduction zone system in central Mexico. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 13.
- Kostoglodov, V., Singh, S. K., Santiago, J. A., Franco, S. I., Larson, K. M., Lowry, A. R. & Bilham, R. 2003. A large silent earthquake in the Guerrero seismic gap, Mexico. *Geophysical Research Letters*, 30.

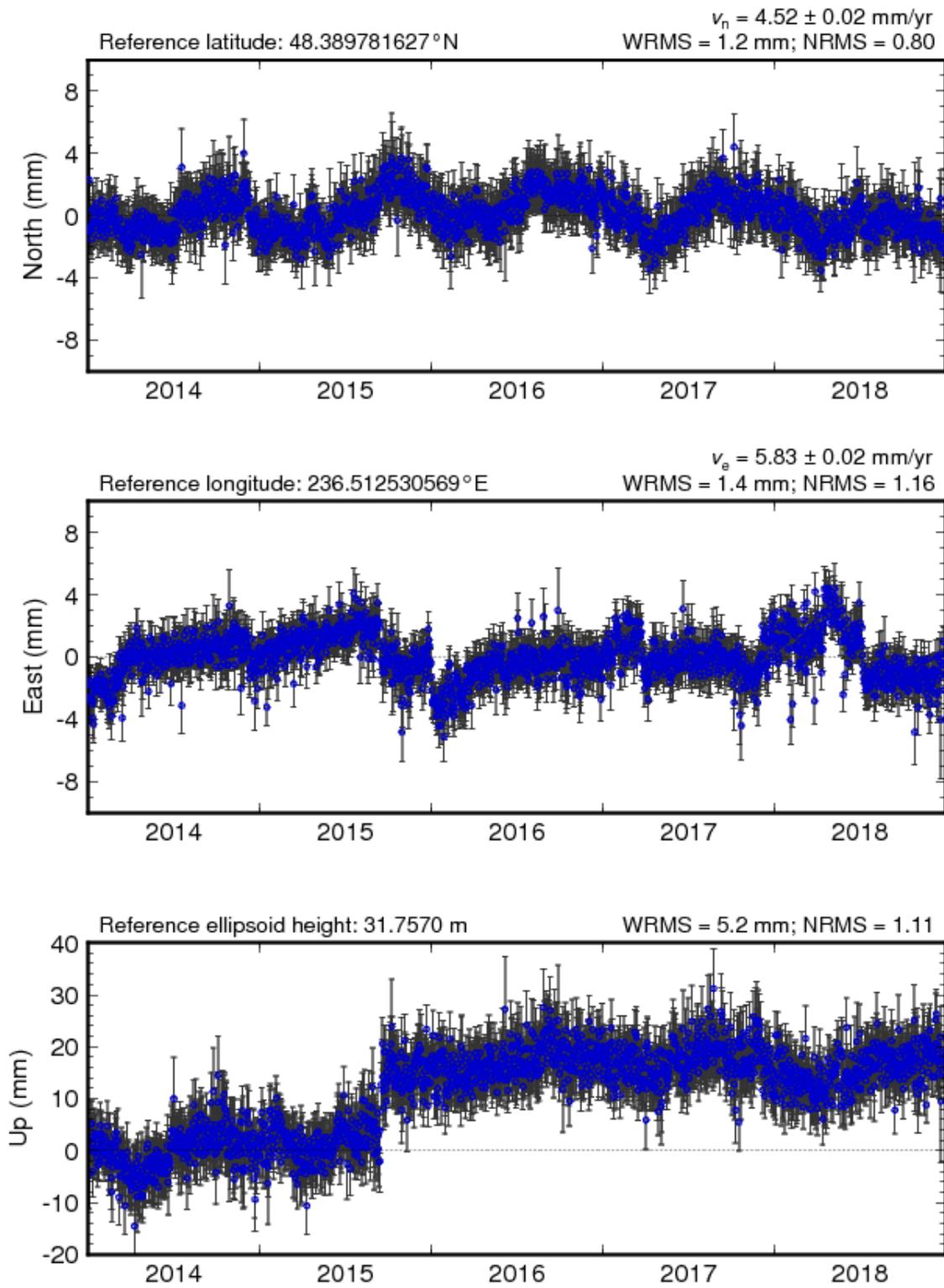
## Referencias

- Larson, K. M., Kostoglodov, V., Miyazaki, S. & Santiago, J. A. S. 2007. The 2006 aseismic slow slip event in Guerrero, Mexico: New results from GPS. *Geophysical Research Letters*, 34.
- Laske G, M. G., Ma Z, Pasyanos ME 2012. CRUST1.0: An Updated Global Model of Earth's Crust. *Geophysical Research Abstracts*, 14.
- Leick, A., Rapoport, L. & Tatarnikov, D. 2015. *GPS satellite surveying*, John Wiley & Sons.
- Lonsdale, P. 2005. Creation of the Cocos and Nazca plates by fission of the Farallon Plate. *Tectonophysics*, 404, 237-264.
- Lowry, A. R., Larson, K. M., Kostoglodov, V. & Bilham, R. 2001. Transient fault slip in Guerrero, southern Mexico. *Geophysical Research Letters*, 28, 3753-3756.
- Márquez-Azúa, B., Cabral-Cano, E., Correa-Mora, F. & DeMets, C. 2004. A model for Mexican neotectonics based on nationwide GPS measurements, 1993-2001.
- Márquez-Azúa, B. & DeMets, C. 2003. Crustal velocity field of Mexico from continuous GPS measurements, 1993 to June 2001: Implications for the neotectonics of Mexico. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 108.
- Márquez-Azúa, B. & DeMets, C. 2009. Deformation of Mexico from continuous GPS from 1993 to 2008. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 10.
- Montillet, J. P., Williams, S. D. P., Koulali, A. & McClusky, S. C. 2015. Estimation of offsets in GPS time-series and application to the detection of earthquake deformation in the far-field. *Geophysical Journal International*, 200, 1205-1219.
- Munguia, L., Gonzalez-Escobar, M., Navarro, M., Valdez, T., Mayer, S., Aguirre, A., Wong, V. & Luna, M. 2016. Active Crustal Deformation in the Area of San Carlos, Baja California Sur, Mexico as Shown by Data of Local Earthquake Sequences. *Pure and Applied Geophysics*, 173, 3631-3644.

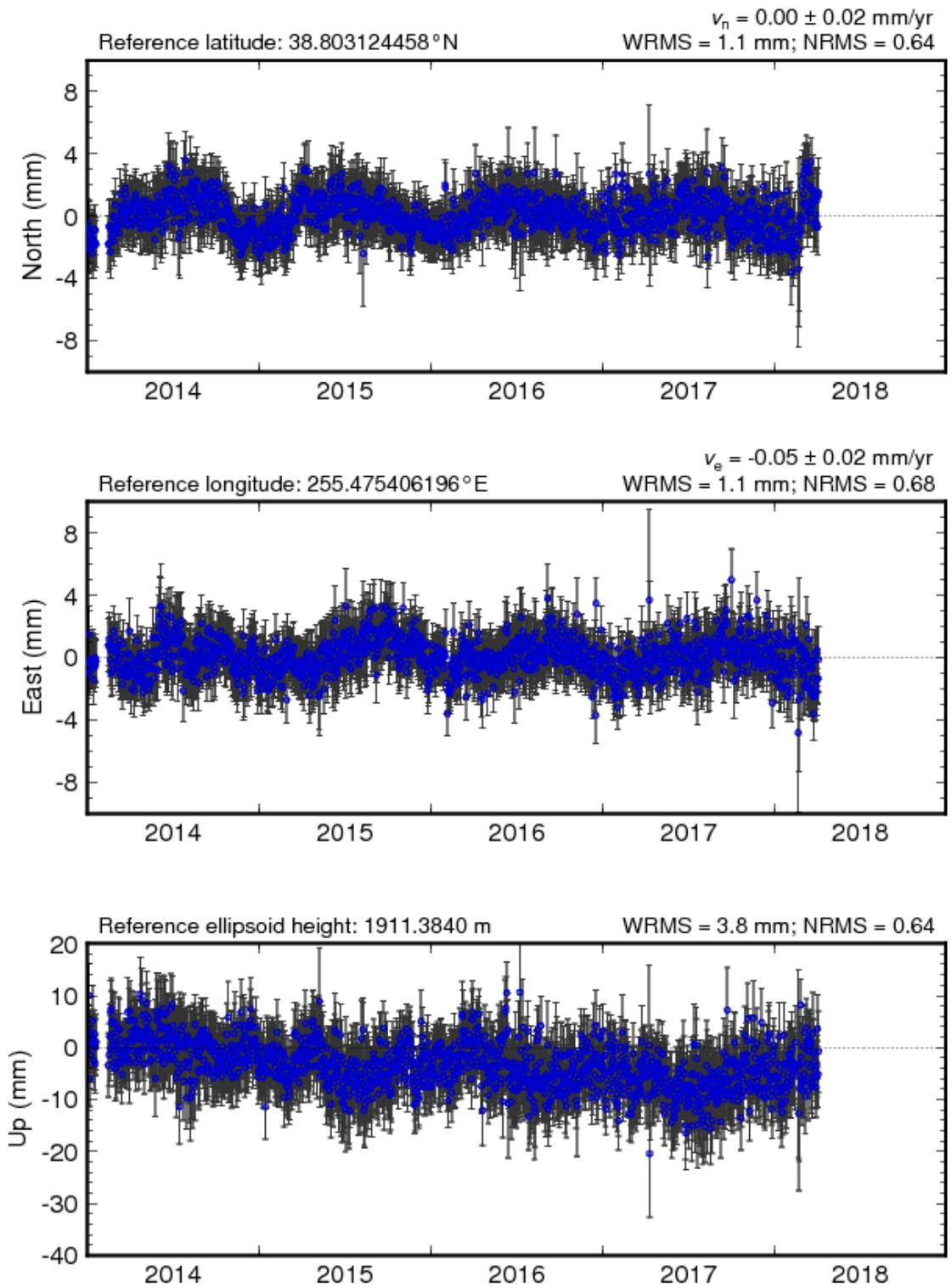
## Referencias

- Pardo, M. & Suárez, G. 1995. Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: Seismic and tectonic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100, 12357-12373.
- Plattner, C., Malservisi, R., Dixon, T. H., LaFemina, P., Sella, G. F., Fletcher, J. & Suarez-Vidal, F. 2007. New constraints on relative motion between the Pacific Plate and Baja California microplate (Mexico) from GPS measurements. *Geophysical Journal International*, 170, 1373-1380.
- Rosas-Elguera, J., Ferrari, L., Garduño-Monroy, V. H. & Urrutia-Fucugauchi, J. 1996. Continental boundaries of the Jalisco block and their influence in the Pliocene-Quaternary kinematics of western Mexico. *Geology*, 24, 921-924.
- Sanchez, L. & Drewes, H. 2016. Crustal deformation and surface kinematics after the 2010 earthquakes in Latin America. *Journal of Geodynamics*, 102, 1-23.
- Severinghaus, J. & Atwater, T. 1990. Cenozoic geometry and thermal state of the subducting slabs beneath western North America. *Basin and range extensional tectonics near the latitude of Las Vegas, Nevada: Geological Society of America Memoir*, 176, 1-22.
- Tarback, E. J., Lutgens, F. K., Tasa, D. & Cientificas, A. T. 2005. *Ciencias de la Tierra*, Pearson Educación Madrid.
- Turcotte, D. L., Schubert, G. & Turcotte, D. L. 2002. *Geodynamics*, Cambridge ; New York, Cambridge University Press.
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M. & Webb, F. H. 1997. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 102, 5005-5017.

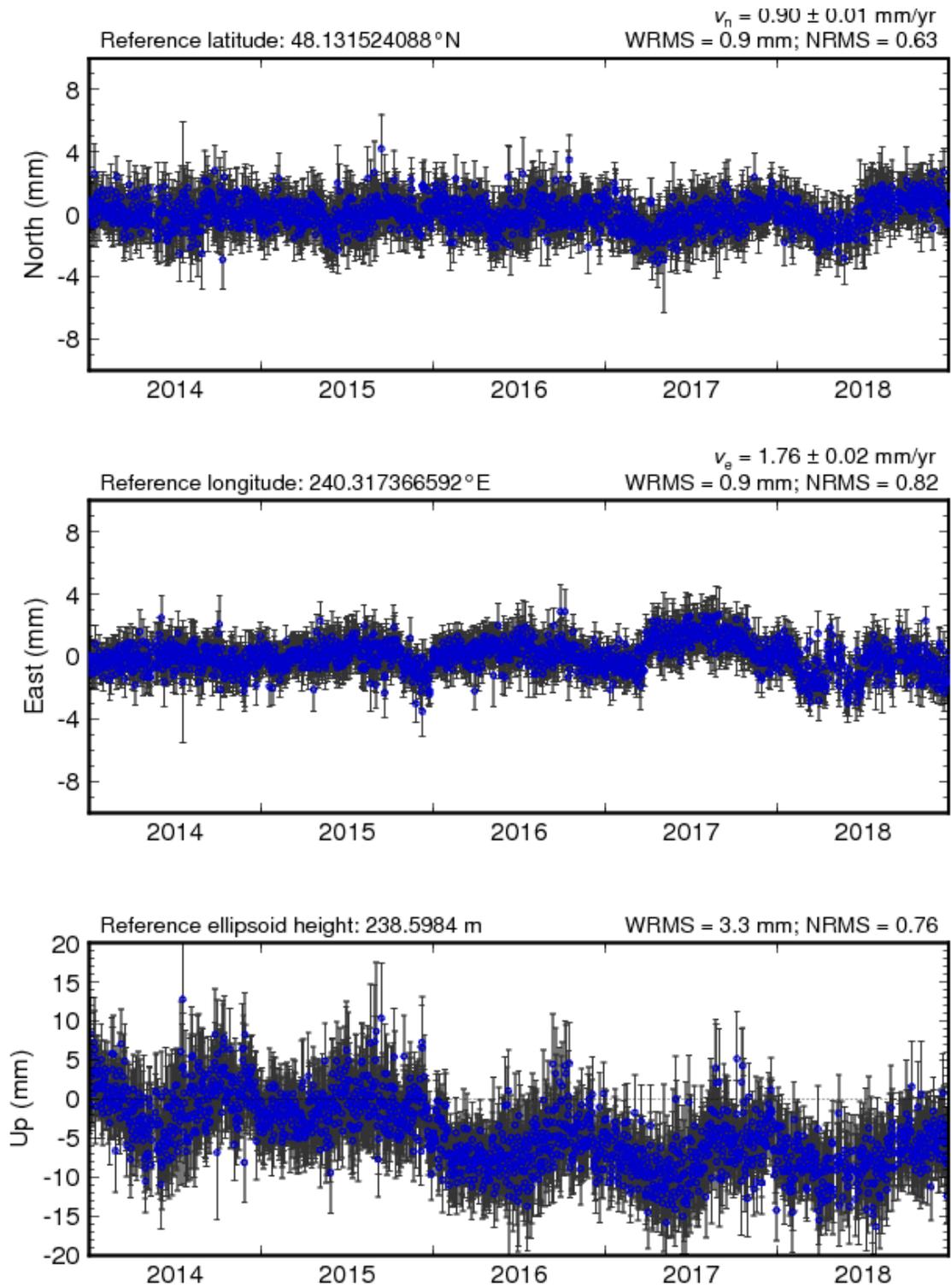
### Anexos



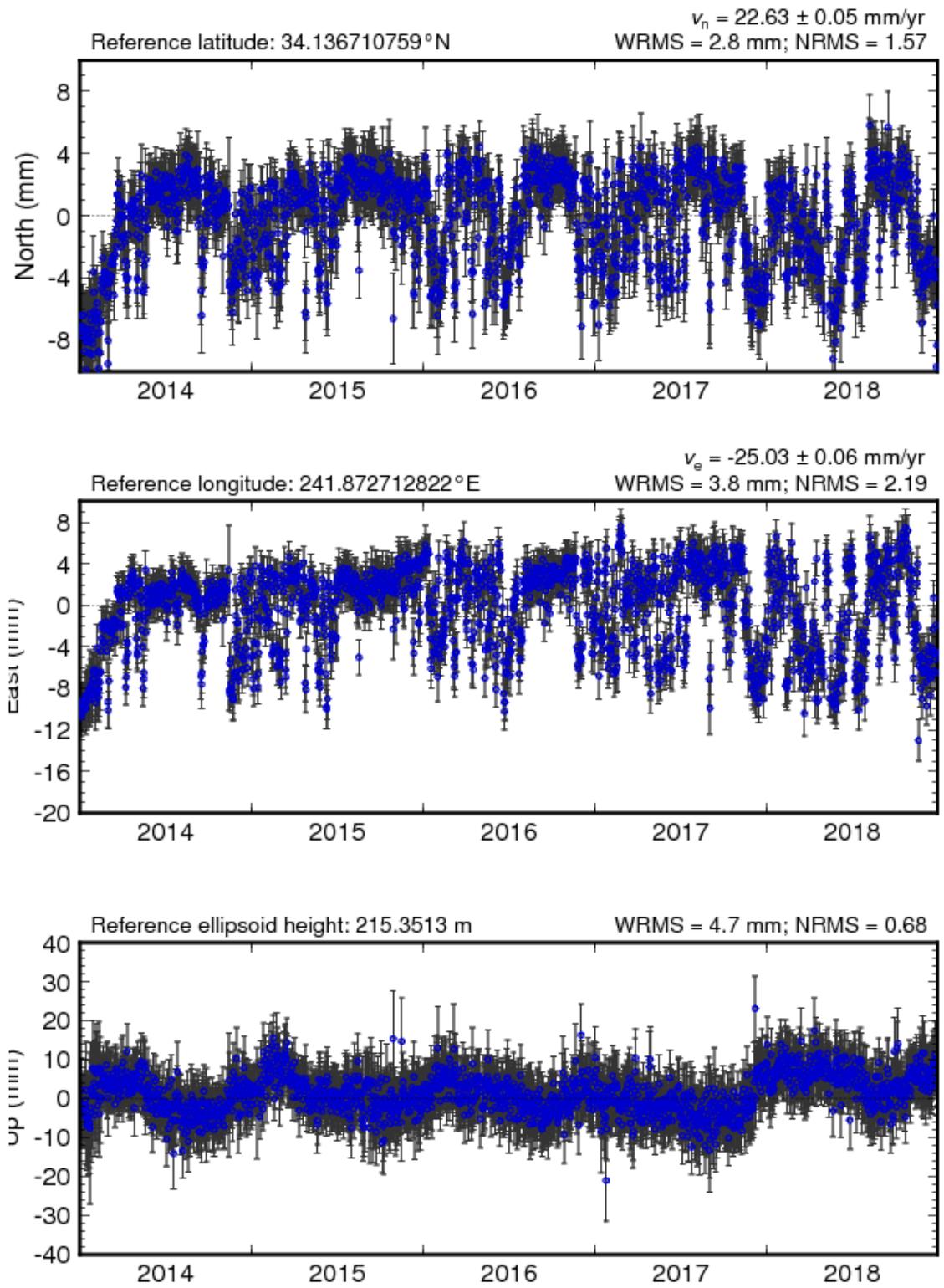
**Figura 47.** Serie de tiempo de la estación ALBH.



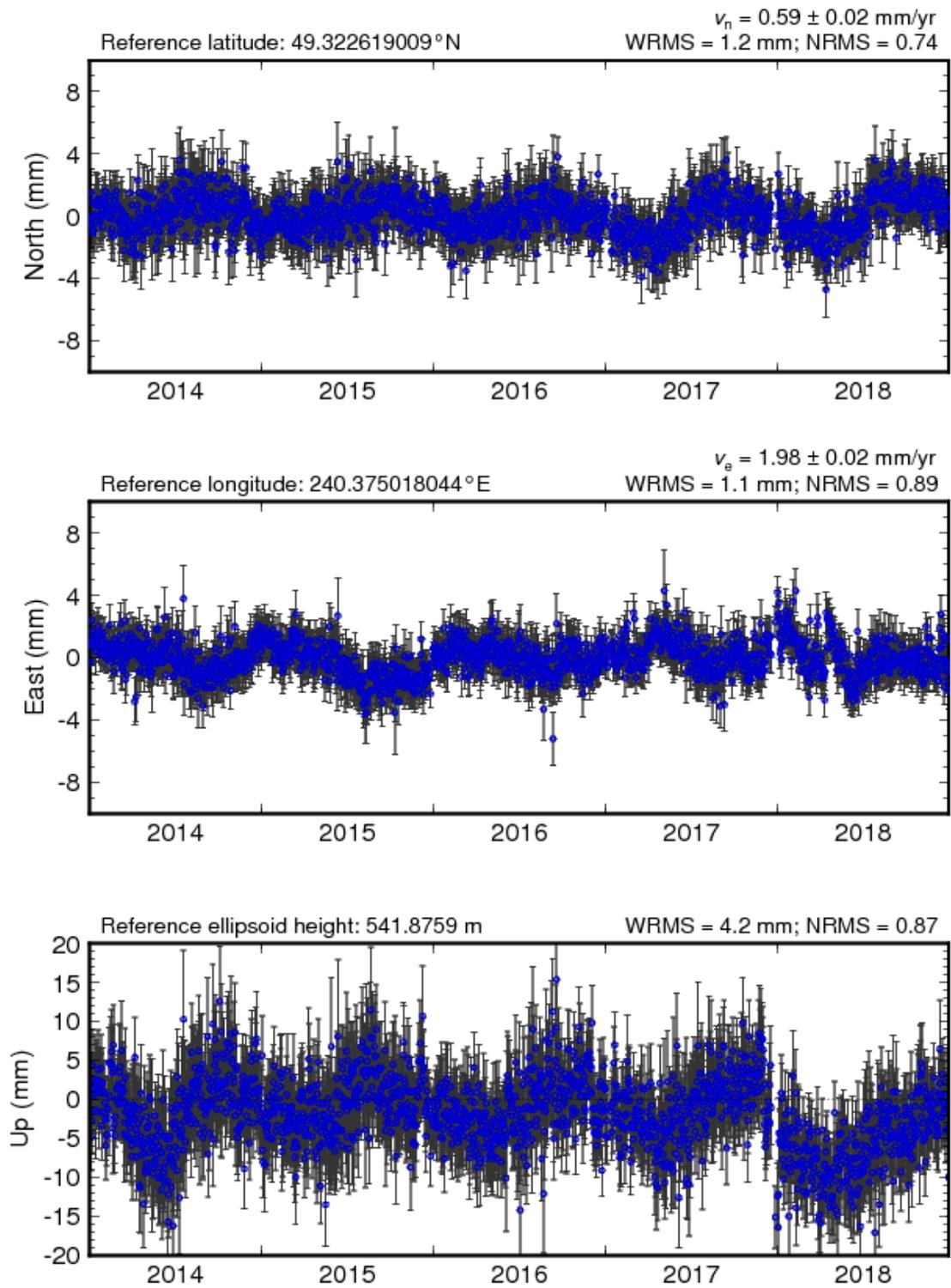
**Figura 48.** Serie de tiempo de la estación AMC2.



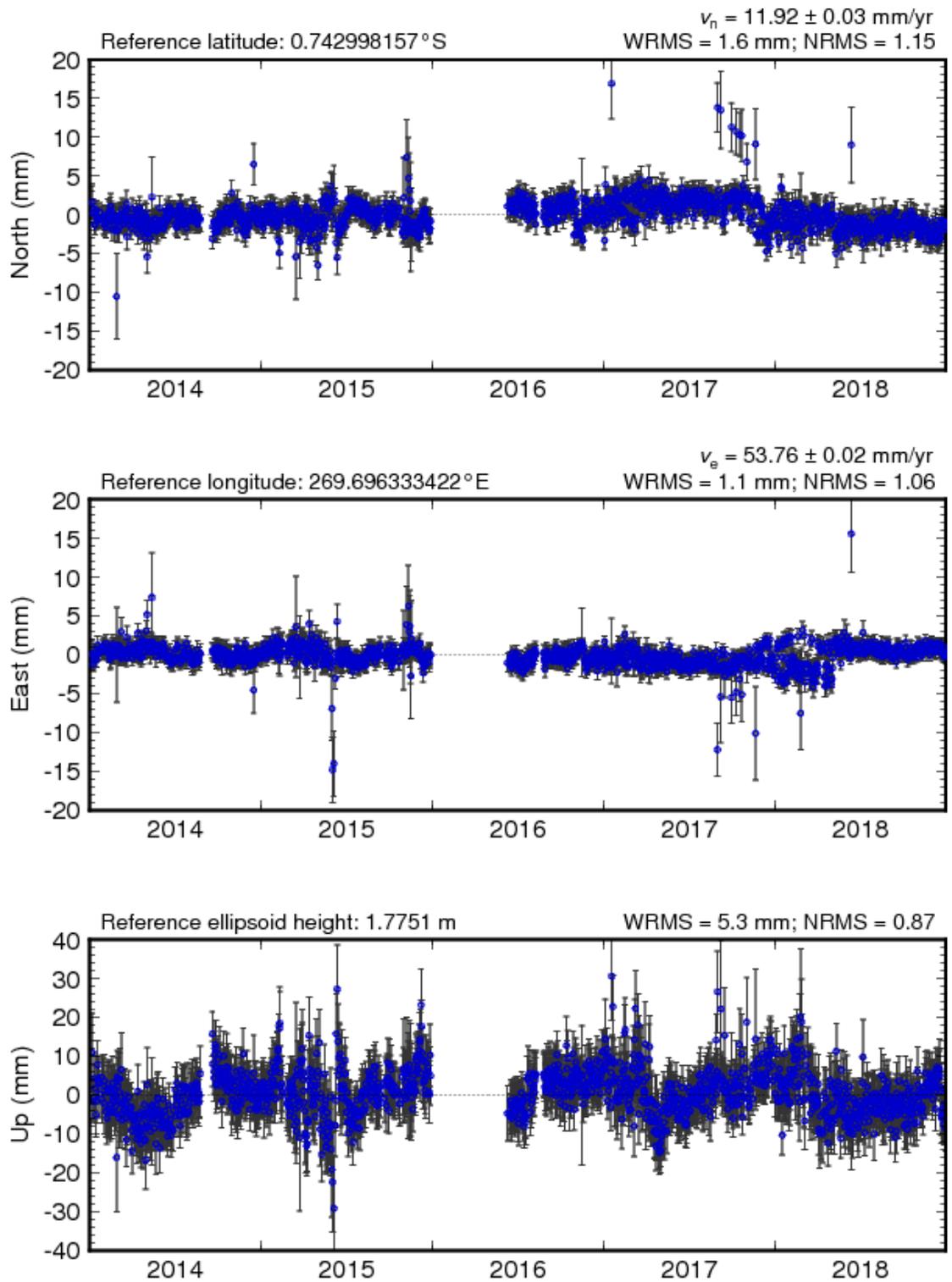
**Figura 49.** Serie de tiempo de la estación BREW.



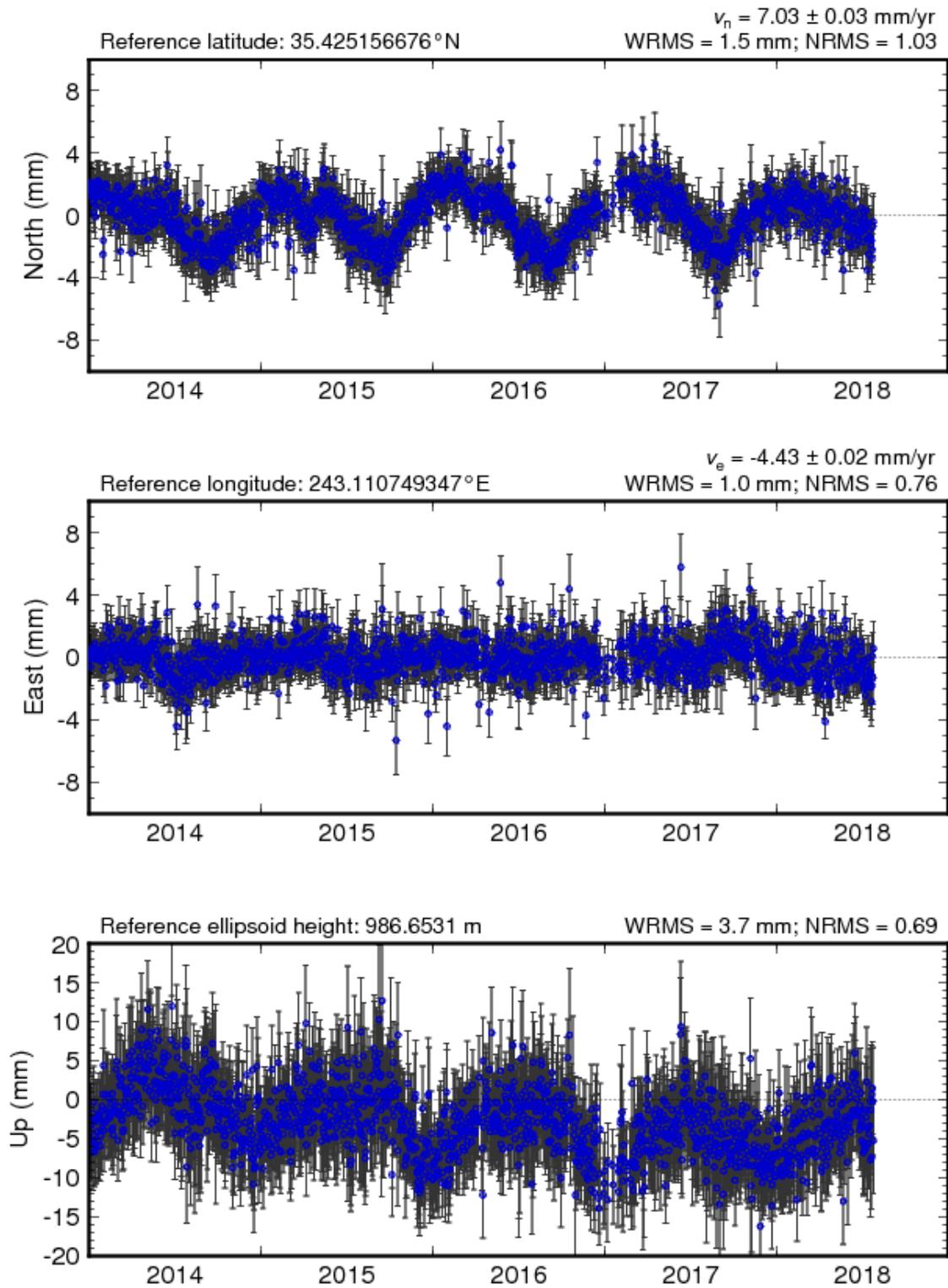
**Figura 50.** Serie de tiempo de la estación CIT1.



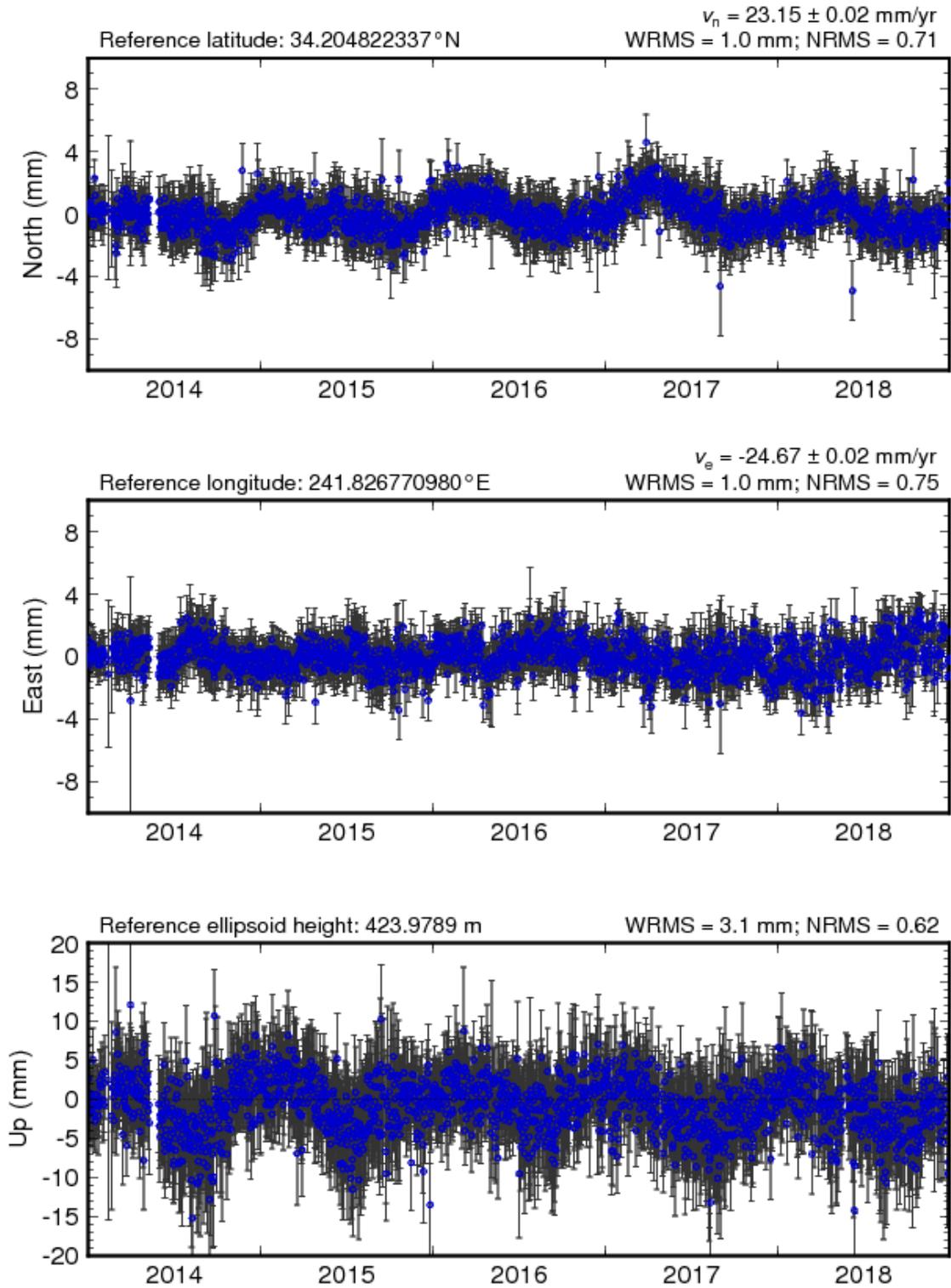
**Figura 51.** Serie de tiempo de la estación DRAO.



**Figura 52.** Serie de tiempo de la estación GLPS.



**Figura 53.** Serie de tiempo de la estación GOLD.



**Figura 54.** Serie de tiempo de la estación JPLM.

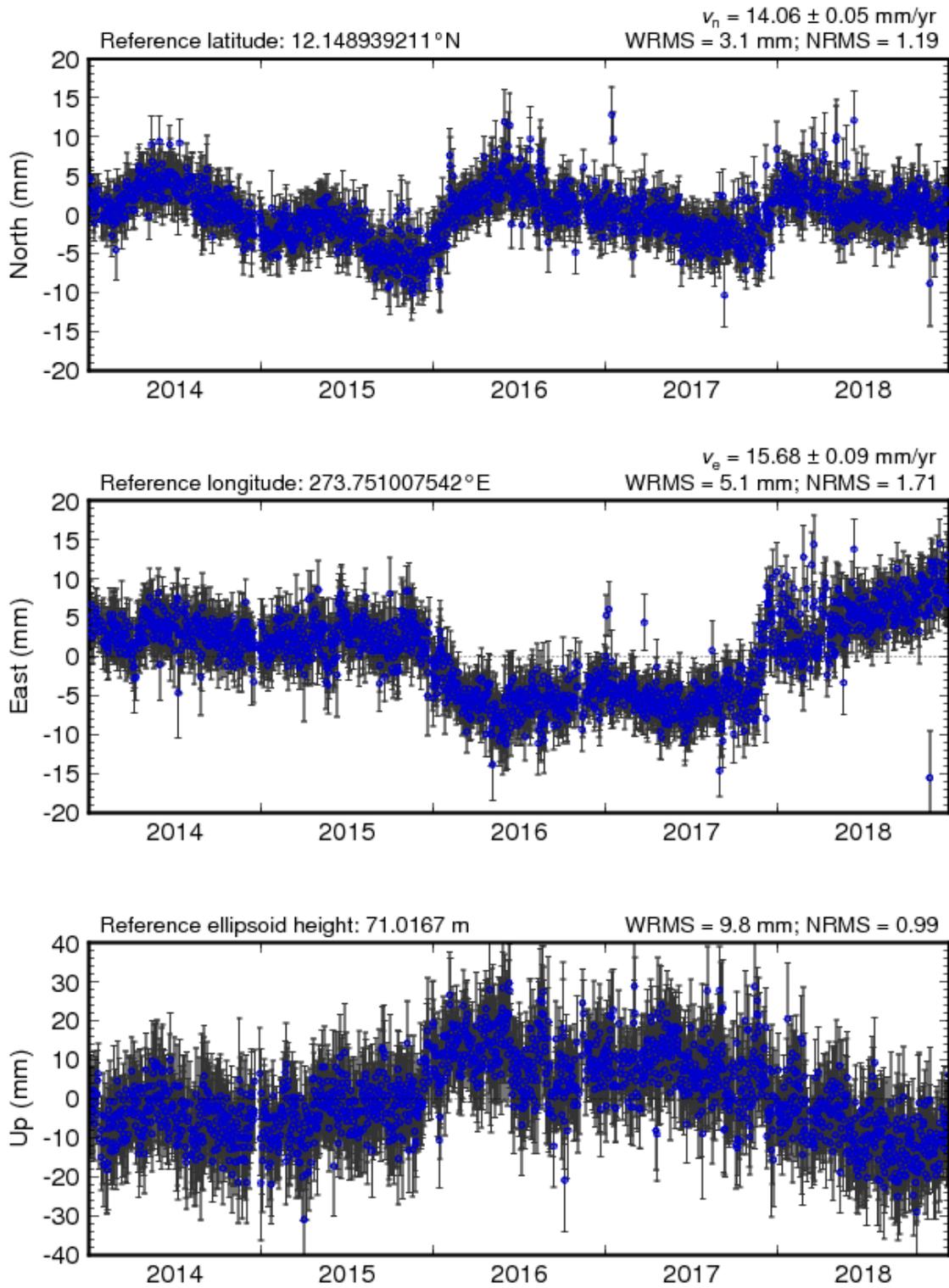


Figura 55. Serie de tiempo de la estación MANA.

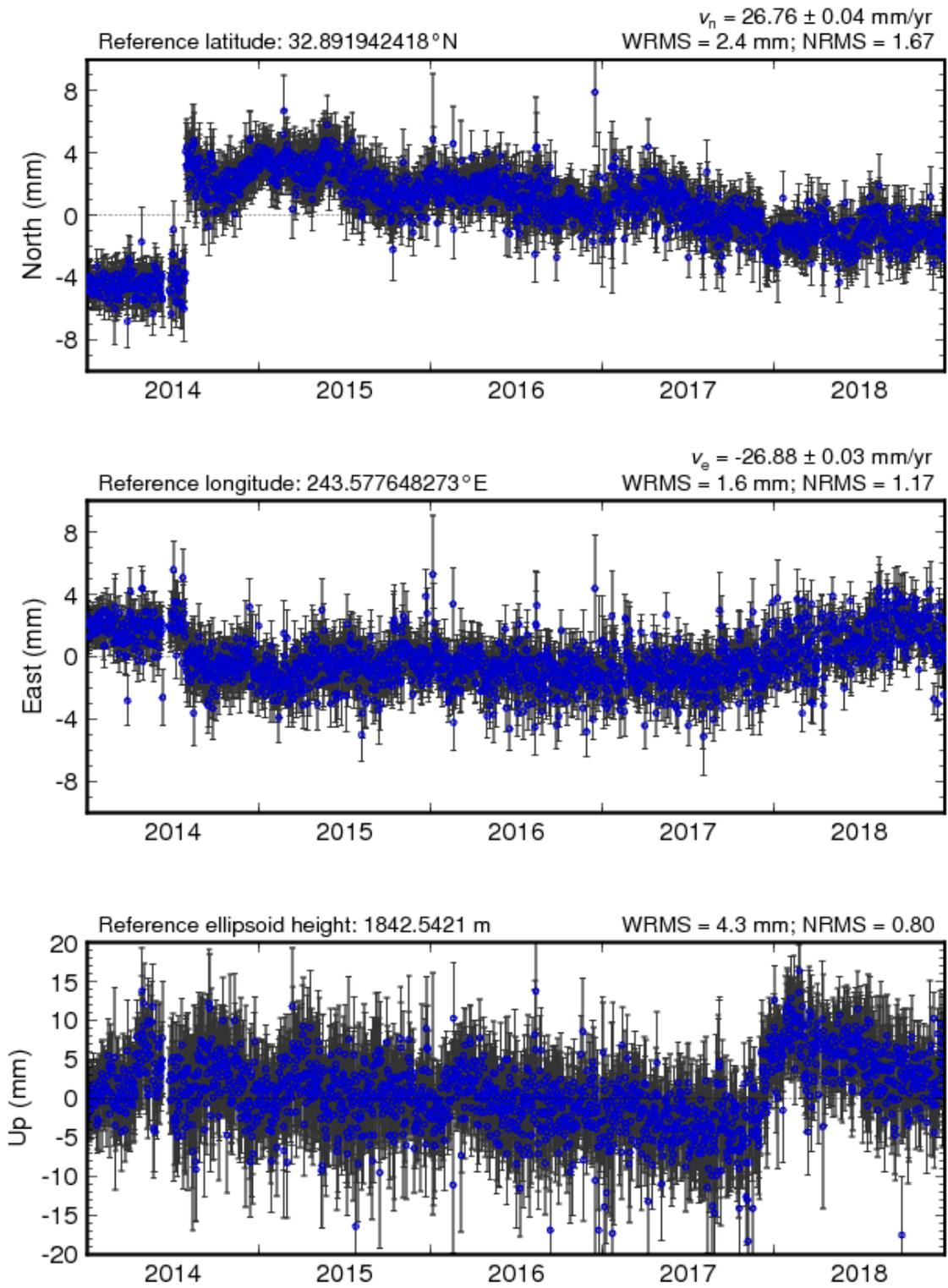


Figura 56. Serie de tiempo de la estación MONP.

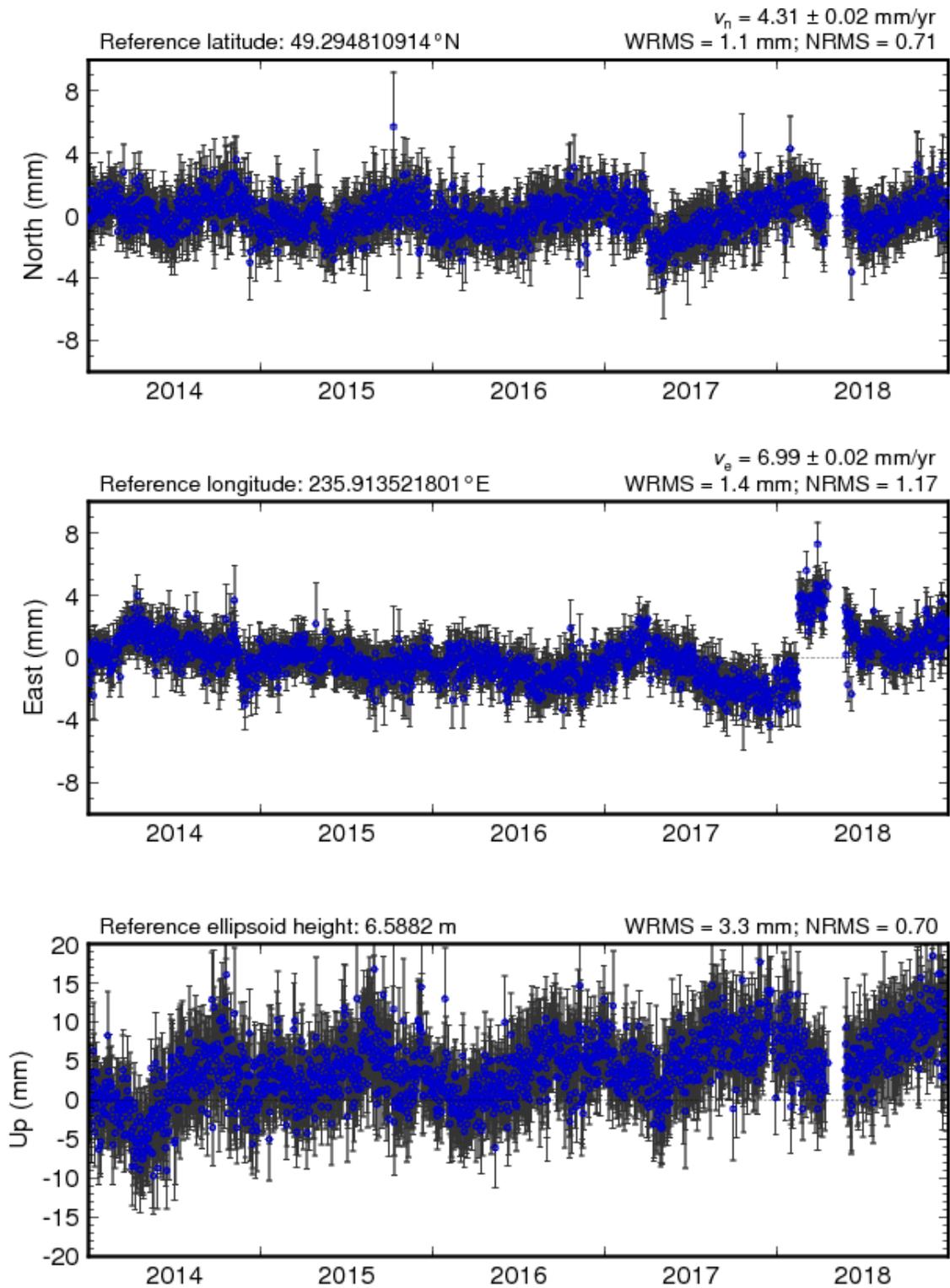
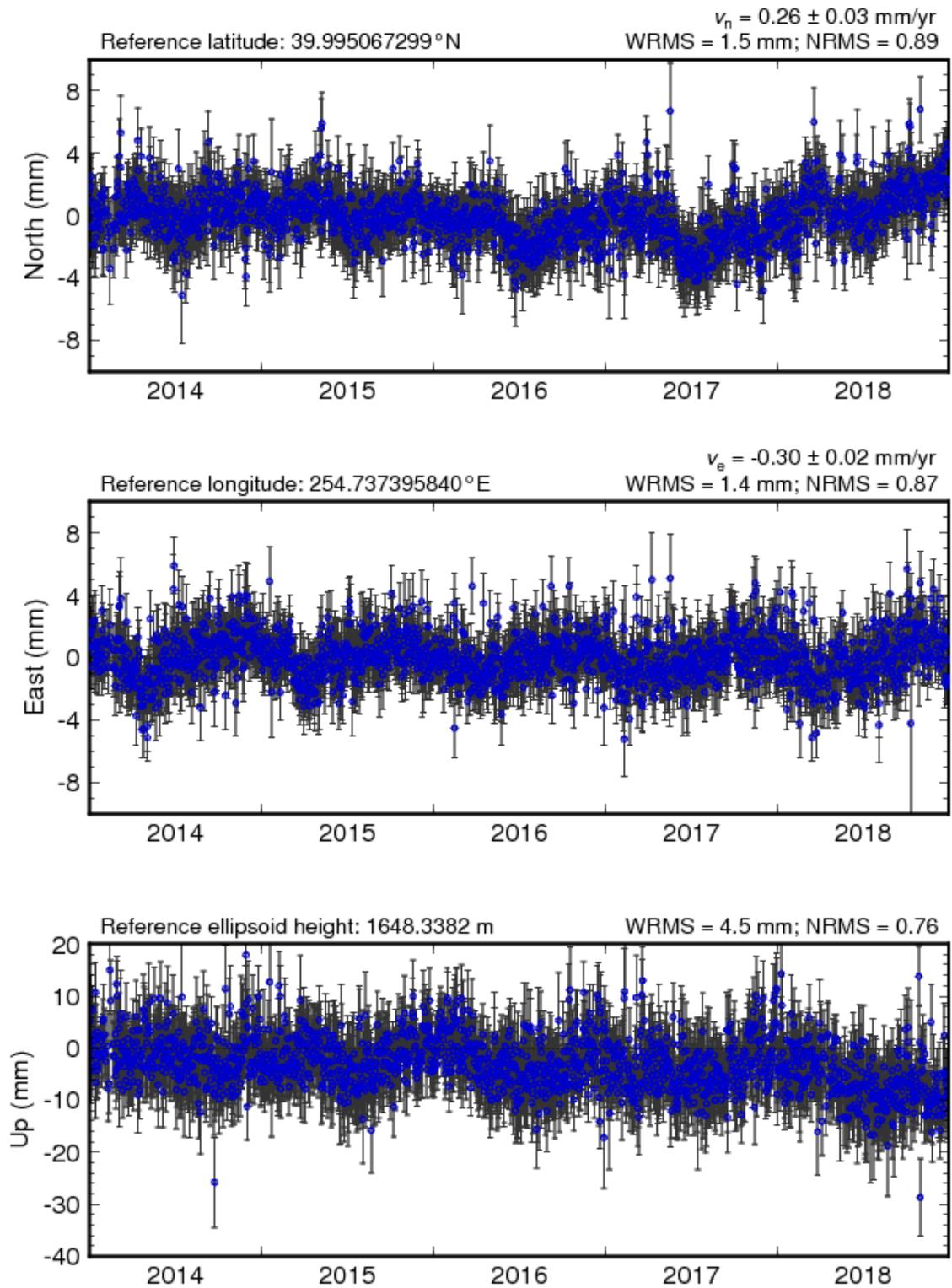


Figura 57. Serie de tiempo de la estación NANO.



**Figura 58.** Serie de tiempo de la estación NIST.

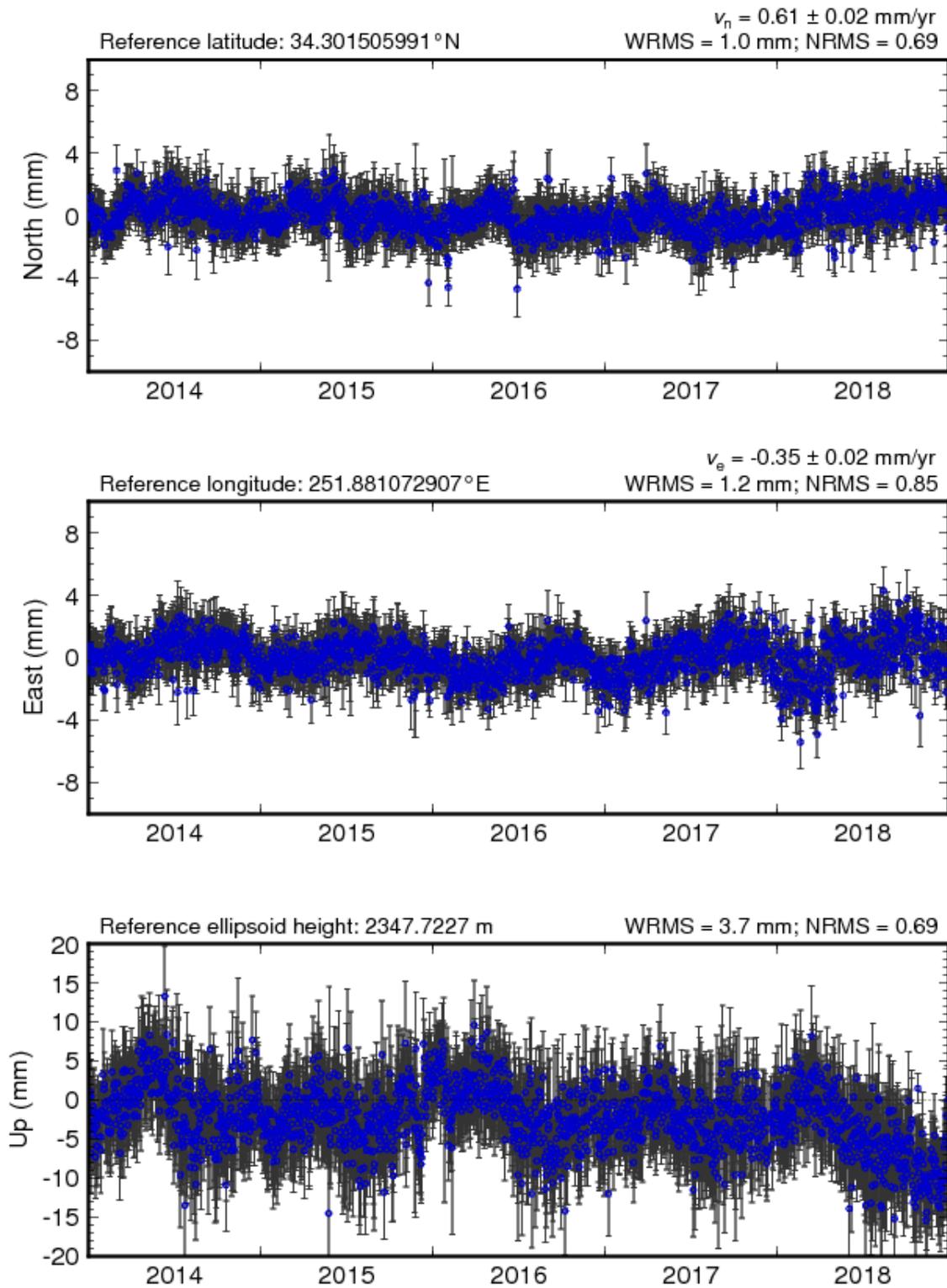


Figura 59. Serie de tiempo de la estación PIE1.

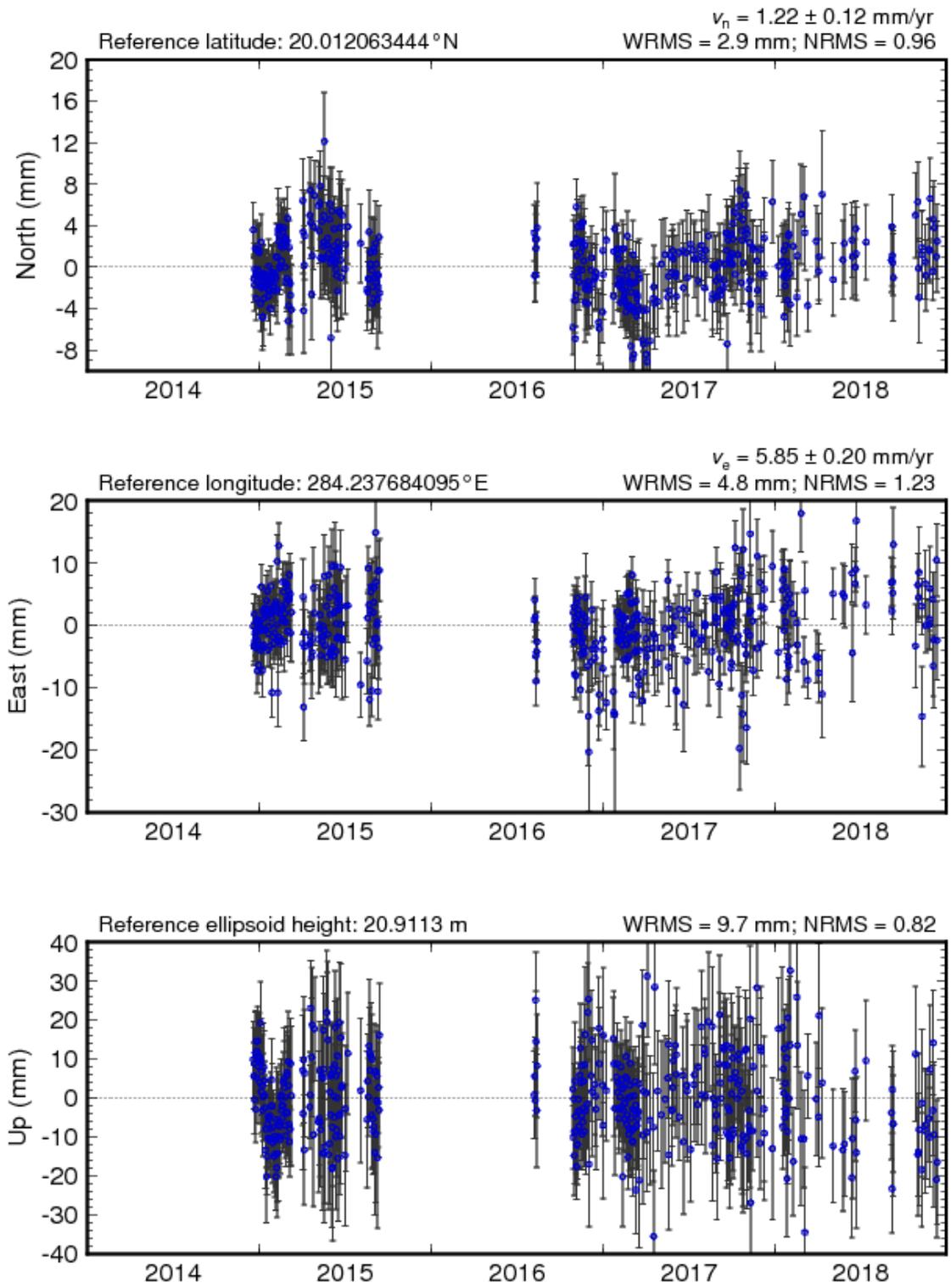
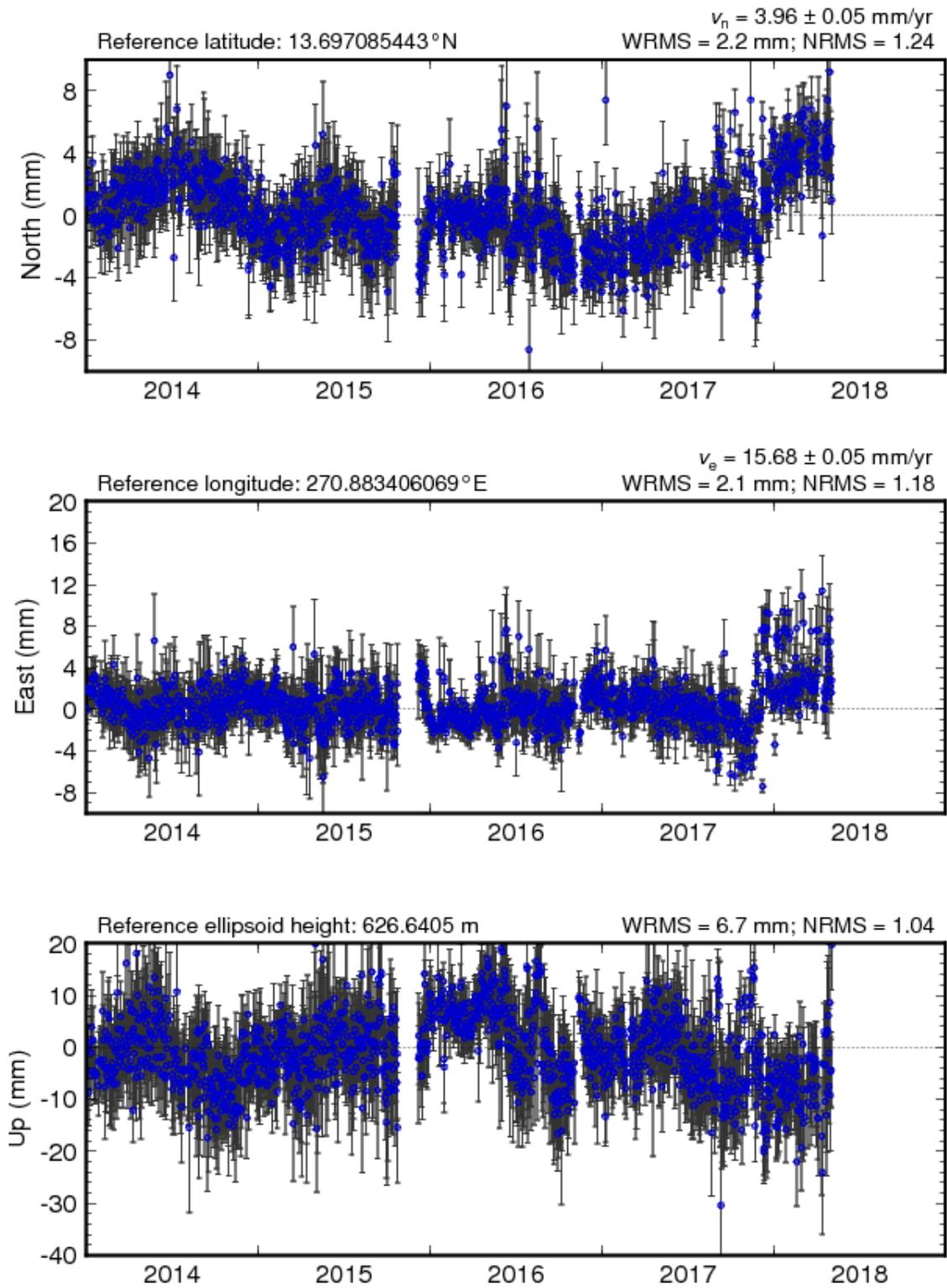
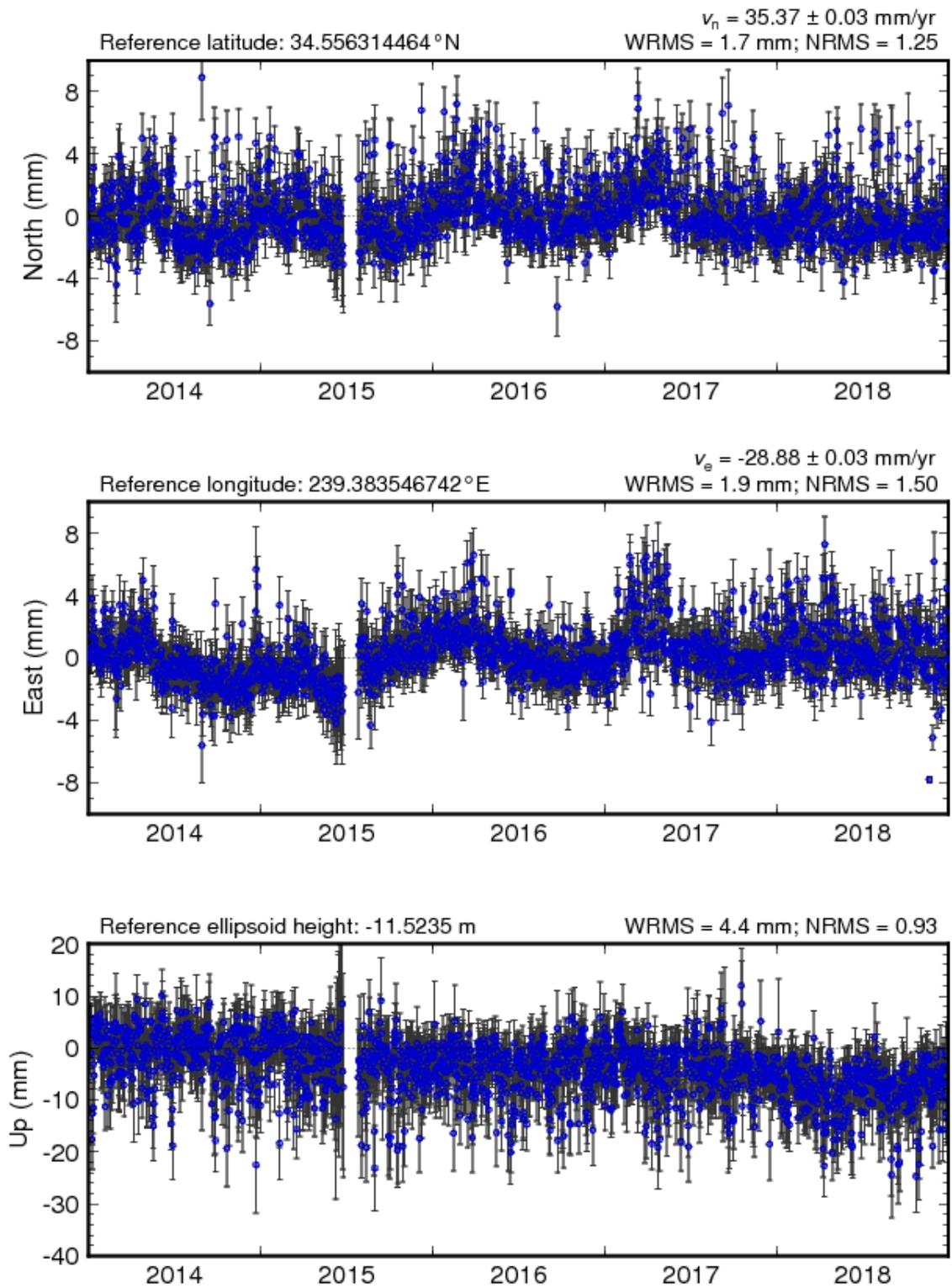


Figura 60. Serie de tiempo de la estación SCUB.



**Figura 61.** Serie de tiempo de la estación SSIA.



**Figura 62.** Serie de tiempo de la estación VNDP.