



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**Estimación matemática del modelo de deformación presísmica y postsísmica
producida por efectos del sismo M7.8 del 2016, Pedernales, Ecuador.**

TRABAJO DE TITULACIÓN.

AUTOR: Ontaneda Vallejo, Christian Sebastian

DIRECTOR: Serrano Agila, Richard Germán, PhD

LOJA – ECUADOR

2018



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2018

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Doctor.

Richard Germán Serrano Agila.

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: **Estimación matemática del modelo de deformación presísmica y postsísmica producida por efectos del sismo M7.8 del 2016, Pedernales, Ecuador** realizado por **Ontaneda Vallejo Christian Sebastian**, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, mayo del 2018

f) _____

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo **Ontaneda Vallejo Christian Sebastian** declaro ser autor del presente trabajo de titulación: Estimación matemática del modelo de deformación presísmica y postsísmica producida por efectos del sismo M7.8 del 2016, Pedernales, Ecuador, de la Titulación de Ingeniería Civil, siendo PhD. Richard Germán Serrano Agila director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f) _____
Autor: Ontaneda Vallejo Christian Sebastian
Cédula: 1105203820

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a:

A mis padres, hermanos, y amigos por su apoyo incondicional y ejemplo de amor filial, a mi papá Nixon Ontaneda por ser mi ejemplo modelo de vida, a mi mamá Janneth por ser el pilar más importante y por demostrarme su inmenso cariño.

A mis hermanos Paulina y Esteban por ser mis consejeros y por estar a mi lado en todo momento.

A mis amigos y compañeros por brindarme su amistad y aprecio.

AGRADECIMIENTO

Principalmente a Dios, quien me dio la entereza, sapiencia y fortaleza para encarar todos los escollos presentados a lo largo de estos años.

Al PhD. Richard Germán Serrano Agila, director de mi proyecto de fin de titulación, por ser mi consejero y brindarme la ayuda necesaria para la elaboración del presente proyecto de investigación.

A mi familia, por su entrega, sacrificio, comprensión y aliciente fundamental para ser cada día mejor.

INDICE DE CONTENIDOS

| | |
|---|-----|
| APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN | ii |
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS..... | iii |
| DEDICATORIA | iv |
| AGRADECIMIENTO | v |
| INDICE DE CONTENIDOS | vi |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | ix |
| ÍNDICE DE TABLAS | xi |
| RESUMEN | 1 |
| ABSTRACT..... | 2 |
| INTRODUCCIÓN | 3 |
| CAPÍTULO I: | 5 |
| ESTADO DEL ARTE..... | 5 |
| 1.1 Introducción | 6 |
| 1.2 Sismo..... | 7 |
| 1.3 Componentes constitutivos de un sismo..... | 7 |
| 1.3.1 Foco..... | 7 |
| 1.3.2 Epicentro..... | 7 |
| 1.3.3 Ondas sísmicas..... | 8 |
| 1.4 Placas de subducción | 9 |
| 1.5 Geodesia..... | 11 |
| 1.6 Sistema de referencia | 11 |
| 1.6.1 Marco de referencia | 11 |
| 1.7 REGME..... | 12 |
| 1.7.1 GNSS Global Navigation Satellite Systems | 13 |
| 1.7.2 Posicionamiento Preciso de Punto (PPP)..... | 14 |
| 1.8 Series Temporales..... | 15 |
| 1.8.1 Series temporales GPS..... | 16 |
| 1.9 Método de regresión lineal..... | 18 |

| | |
|---|----|
| 1.9.1. Ajuste por mínimos cuadrados..... | 18 |
| CAPÍTULO II: | 20 |
| METODOLOGÍA..... | 20 |
| 2.1 Metodología utilizada. | 21 |
| 2.2 Procesamiento y ajuste de datos GNSS. | 21 |
| 2.2.1 Selección de estaciones..... | 21 |
| 2.2.2 Descarga de datos RINEX. | 22 |
| 2.2.3 Descartar estaciones por falta de datos | 24 |
| 2.2.4 Posicionamiento Puntual Preciso (PPP)..... | 25 |
| 2.3 Creación de Series Temporales..... | 28 |
| 2.3.1 Transformación a coordenadas geodésicas..... | 28 |
| 2.3.2 Modelo de regresión lineal con mínimos cuadrados..... | 30 |
| 2.4 GMT (Generic Mapping Tools)..... | 31 |
| 2.4.1 Módulos para iniciar un mapa..... | 31 |
| 2.4.2 Módulos para inclusión de objetos espaciales | 33 |
| 3.4.3 Representación de puntos | 35 |
| CAPÍTULO III:..... | 36 |
| RESULTADOS..... | 36 |
| 3.1 Series Temporales de las estaciones GNSS de la Red REGME..... | 38 |
| 3.1.1 Estación Las Peñas (LPEC) | 38 |
| 3.1.2 Estación Esmeraldas (ESMR)..... | 39 |
| 3.1.3 Estación El Carmen (ECEC)..... | 40 |
| 3.1.4 Estación Chone (ONEC)..... | 42 |
| 3.1.5 Estación Pajan (PJEC) | 42 |
| 3.1.6 Estación Santa Elena (SEEC) | 43 |
| 3.1.7 Estación Guayas (GUEC) | 44 |
| 3.1.8 Estación Babahoyo (BHEC) | 45 |
| 3.1.9 Estación Alausí (ALEC) | 46 |
| 3.1.10 Estación Riobamba (RIOP)..... | 46 |
| 3.1.11 Estación Ambato (ABEC)..... | 47 |

| | |
|---|----|
| 3.1.12 Estación Cotopaxi (CXC) | 48 |
| 3.1.13 Estación Espe (EPEC) | 49 |
| 3.1.14 Estación Carchi (COEC) | 50 |
| 3.1.15 Estación San Cristóbal (SCEC) | 50 |
| 3.2 Mapeo de Resultados en GMT | 55 |
| CONCLUSIONES | 61 |
| RECOMENDACIONES | 63 |
| 4. BIBLIOGRAFÍA | 64 |
| CAPÍTULO V: | 66 |
| ANEXOS | 66 |
| 5.1. Anexo 1: Códigos utilizados en Matlab | 67 |
| 5.2. Anexo 2: Ficha técnica de la estación ESMR | 74 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Elementos de un sismo | 7 |
| Figura 2: Sismograma Típico | 8 |
| Figura 3: Mapa de las placas tectónicas y su dirección de empuje | 9 |
| Figura 4: Red GNSS del Ecuador | 13 |
| Figura 5: Series Temporales GPS Norte, Este y Up, para la estación ALEC (antes del sismo) con sus soluciones diarias y su tendencia lineal mediante ajuste con mínimos cuadrados | 17 |
| Figura 6: Metodología aplicada | 21 |
| Figura 7: Visor de la Red GNSS del Ecuador..... | 22 |
| Figura 8: Visor de la Red GNSS del Ecuador..... | 22 |
| Figura 9: Descarga de datos GNSS | 23 |
| Figura 10: Datos requeridos para la descarga de datos GNSS | 23 |
| Figura 11: Archivo requerido de descarga de datos solicitados..... | 23 |
| Figura 12: Interfaz de Natural Resources Canada | 25 |
| Figura 13: Interfaz de herramientas y aplicaciones de Natural Resources Canada..... | 26 |
| Figura 14: Interfaz para ejecutar el post-procesamiento de los datos RINEX..... | 26 |
| Figura 15: Plantilla de correo emitido por NRCan para la descarga de los resultados..... | 27 |
| Figura 16: Archivos de resultados del procesamiento CSRC-PPP | 27 |
| Figura 17: Coordenadas estimadas cartesianas del archivo .sum..... | 28 |
| Figura 18: Mapa Base del Ecuador elaborado con el módulo para iniciar mapa | 33 |
| Figura 19: Serie Temporal estación LPEC antes y después del evento sísmico | 39 |
| Figura 20: Serie Temporal estación ESMR antes y después del evento sísmico | 40 |
| Figura 21: Serie Temporal estación ECEC antes y después del evento sísmico..... | 41 |
| Figura 22: Serie Temporal estación ONEC antes y después del evento sísmico | 42 |
| Figura 23: Serie Temporal estación PJEC antes y después del evento sísmico..... | 43 |
| Figura 24: Serie Temporal estación SEEC antes y después del evento sísmico | 44 |
| Figura 25: Serie Temporal estación GUEC antes y después del evento sísmico | 45 |
| Figura 26: Serie Temporal estación BHEC antes y después del evento sísmico..... | 45 |
| Figura 27: Serie Temporal estación ALEC antes y después del evento sísmico | 46 |
| Figura 28: Serie Temporal estación RIOP antes y después del evento sísmico | 47 |
| Figura 29: Serie Temporal estación ABEC antes y después del evento sísmico | 48 |
| Figura 30: Serie Temporal estación CXEC antes y después del evento sísmico..... | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 31: Serie Temporal estación EPEC antes y después del evento sísmico | 49 |
| Figura 32: Serie Temporal estación COEC antes y después del evento sísmico | 50 |
| Figura 33: Serie Temporal estación SCEC antes y después del evento sísmico..... | 51 |
| Figura 34: Resultados de las velocidades de desplazamiento de la componente Norte, antes y después del sismo..... | 55 |
| Figura 35: Resultados de las velocidades de desplazamiento de la componente Norte de la estación SCEC, antes y después del sismo | 56 |
| Figura 36: Resultados de las velocidades de desplazamiento de la componente Este, antes y después del sismo..... | 57 |
| Figura 37: Resultados de las velocidades de desplazamiento de la componente Este de la estación SCEC, antes y después del sismo | 58 |
| Figura 38: Resultados de las velocidades de desplazamiento de la componente Up, antes y después del sismo..... | 59 |
| Figura 39: Resultados de las velocidades de desplazamiento de la componente Up de la estación SCEC, antes y después del sismo | 60 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Estaciones de la Red REGME 2015 y 2016, con sus datos disponibles | 24 |
| Tabla 2: Resultados de la Estación LPEC | 38 |
| Tabla 3: Resultados de la Estación ESMR | 39 |
| Tabla 4: Resultados de la Estación ECEC..... | 40 |
| Tabla 5: Resultados de la Estación ONEC | 42 |
| Tabla 6: Resultados de la Estación PJEC | 42 |
| Tabla 7: Resultados de la Estación SEEC..... | 43 |
| Tabla 8: Resultados de la Estación GUEC | 44 |
| Tabla 9: Resultados de la Estación BHEC..... | 45 |
| Tabla 10: Resultados de la Estación ALEC | 46 |
| Tabla 11: Resultados de la Estación RIOP..... | 46 |
| Tabla 12: Resultados de la Estación ABEC..... | 47 |
| Tabla 13: Resultados de la Estación CXEC..... | 48 |
| Tabla 14: Resultados de la Estación EPEC..... | 49 |
| Tabla 15: Resultados de la Estación COEC | 50 |
| Tabla 16: Resultados de la Estación SCEC..... | 50 |
| Tabla 17: Resultados del comportamiento matemático de las estaciones GNSS de la coordenada Norte, antes y después del evento sísmico..... | 52 |
| Tabla 18: Resultados del comportamiento matemático de las estaciones GNSS de la coordenada Este, antes y después del evento sísmico | 53 |
| Tabla 19: Resultados del comportamiento matemático de las estaciones GNSS de la coordenada Up, antes y después del evento sísmico | 54 |

RESUMEN

Un sismo de M7.8 sucedió en Pedernales, Ecuador, a las 18:58 del 16 de abril del 2016. Este sismo generó daños severos en las poblaciones cercanas al epicentro así como también la muerte de aproximadamente 600 personas. En esta investigación se estudiará el comportamiento, geodésico y matemático, de las estaciones permanentes de la Red GNSS de monitoreo continuo del Ecuador (REGME) las cuales son afectadas constantemente por fenómenos físicos que afectan su posición en el tiempo. Para este estudio se analizará el comportamiento estocástico de series temporales de estaciones cercanas al epicentro elaborado con datos de posicionamiento registrados en las estaciones GNSS. La información corresponde a datos en formato RINEX de observaciones disponibles antes y después del evento sísmico en intervalos de observación cada 30 segundos registrados en cada una de las estaciones GNSS consideradas.

PALABRAS CLAVE: REGME, GNSS/GPS, Deformación, series temporales, sismo, Pedernales.

ABSTRACT

An earthquake of M7.8 happened in Pedernales, Ecuador, at 18:58 on April 16, 2016. This earthquake generated severe damage in the towns near the epicenter as well as the death of approximately 600 people. In this research, we will study the behavior, geodetic and mathematical, of the permanent stations of the GNSS system network of continuous monitoring of Ecuador (REGME), which are constantly affected by physical phenomena that affect their position in time. For this study, consult the stochastic behavior of time series of stations near the epicenter prepared with positioning data in the GNSS stations. The information corresponds to the data in RINEX format of observations available before and after the seismic event in observation intervals every 30 seconds recorded in each of the GNSS stations considered.

KEYWORDS: REGME, GNSS/GPS, Deformation, time Series, earthquake, Pedernales.

INTRODUCCIÓN

Los sismos se presentan de forma instantánea y sacuden a la vez una gran área provocando serios daños; esto hace que sean uno de los fenómenos naturales más destructores y temidos. (Sánchez, 1994). La superficie de la Tierra se enfrenta constantemente a movimientos físicos, los cuales afectan la elevación y su ubicación horizontal o ambas de un lugar en distintas etapas de análisis. En Ecuador son muchos los sismos que se dan cada año, algunos de muy baja magnitud que son imperceptibles por las personas y otros de magnitud considerable que alertan a la ciudadanía. Sumando todos estos acontecimientos se logran indicar que las placas tectónicas en nuestro país se encuentran en constante movimiento.

Este proyecto basa su investigación en el análisis de la alteración de la posición geodésica en distintos intervalos de tiempo de las estaciones empleadas mediante series de tiempo, análisis empleado al evento de M7.8 de Pedernales-Ecuador registrado el 16 de abril de 2016. Determinamos la magnitud, dirección y sentido de las estaciones cercanas al epicentro. La red GNSS DE monitoreo continuo nos proporciona los datos en formato RINEX utilizados para esta investigación en un periodo de tiempo de 30 segundos registrados diariamente. Para el estudio se utilizaron datos antes, durante y después del evento sísmico.

Las series de tiempo resultantes del análisis efectuado del evento sísmico de subducción nos permiten identificar el comportamiento de las estaciones GNSS antes y después de dicho fenómeno. Para el respectivo análisis se han empleado las estaciones de SNLR, LPEC, ESMR, PEEC, ECEC, ONEC, PVEC, PJEC, QVEC, BHEC, SEEC, GYEC, GUEC, NJEC, ALEC, RIOP, ABEC, CXEC, EPEC, QUI3, IBEC, COEC, GLPS, SCEC.

Como primer paso se procede a la transformación de los datos RINEX de cada estación a coordenadas geocéntricas mediante procesamiento PPP y posteriores a coordenadas geodésicas. Luego se generaron las series de tiempo con el modelo estadístico preliminar para las variables Norte, Up y Este; utilizando la base de datos correspondiente. Empleando el modelo de regresión lineal con mínimos cuadrados se obtuvo para cada estación la magnitud dirección y sentido de deformaciones Norte, Este y Up. Por último

se realizó un análisis estocástico para identificar el comportamiento matemático de las estaciones, GNSS antes y después, del evento sísmico.

El presente trabajo se compone de cuatro capítulos, en el Capítulo I se presenta la introducción y los objetivos planteados. En el Capítulo II se explican conceptos esenciales y los fundamentos teóricos necesarios esenciales para poseer un conocimiento de los métodos aplicados en esta investigación. En el Capítulo III se presenta la metodología empleada aplicando los pasos correspondientes; procesamiento y ajuste de datos GNSS, creación de series temporales y mapeo de resultados en GMT. En el Capítulo IV se muestran los resultados obtenidos de las estaciones utilizadas con sus respectivas gráficas de series de tiempo y las tablas con los resultados de análisis. Por último se muestran las conclusiones que finalmente se consiguió con la investigación, las recomendaciones, bibliografía utilizada y un apartado de anexos.

**CAPÍTULO I:
ESTADO DEL ARTE**

1.1 Introducción

Esta investigación, contempla la información presentada en el siguiente informe sísmico:

*“El sismo registrado el sábado 16 de abril a las 18h58 (tiempo local), de magnitud 7.8 (Mw magnitud momento), cuyo hipocentro se ubicó frente a Pedernales (Manabí), a 20 km de profundidad, fue resultado del desplazamiento entre dos placas tectónicas: la placa de Nazca (placa oceánica) que se sumerge bajo la Sudamericana (placa continental). A este proceso se le conoce como **subducción**, y es el mismo fenómeno que originó los sismos del 31 enero 1906 (Mw 8.8), que es el más grande registrado en Ecuador y el sexto más grande a escala mundial; el del 14 mayo 1942 (Mw 7.8); 19 enero de 1958 (Mw 7.8) y del 12 diciembre de 1979 (Mw 8.1).*

Los datos indican que la mayoría de las réplicas son superficiales (< 20 km en profundidad), con la más grande correspondiente a un sismo de 6.1 (Mw) ocurrida hoy a las 2h13 (TL) y fue sentida incluso en Guayaquil.

El tipo de ruptura asociada a este evento específico corresponde a una falla inversa, es decir que el continente se desplazó algunos centímetros sobre la placa oceánica de Nazca.

Adicionalmente se puede indicar que la ruptura se inició frente a Pedernales y se dirigió hacia el sur, en función de lo que mostraron las réplicas.

En conclusión este evento es un sismo importante, no solo por los daños provocados, sino, porque constituye el sismo más grande desde 1979 en el país, con una magnitud similar a la de los sismos de 1942 y 1958. El número de réplicas tiende a disminuir aunque todavía se no se puede descartar que se presenten sismos con magnitudes mayores a 5.0. La orientación del plano de falla inclinado suavemente al Este Sureste coincide con la orientación de la zona de subducción. Los datos de GPS permitieron encontrar zonas de acumulación de esfuerzo que coincide en este caso con la zona del contacto entre las placas Nazca y Sudamericana.” (Instituto Geofísico, 2016, págs. 1-6).

1.2 Sismo

Movimiento o vibración repentina de la superficie terrestre causada por la relajación brusca y súbita de energía, acumulada por deformación de la Litosfera, que se propaga en forma de ondas sísmicas. (Sánchez, 1994, pág. 18).

1.3 Componentes constitutivos de un sismo

A continuación se indicarán algunos conceptos básicos que son necesarios entender cuando existe la presencia de un sismo.

En la **Figura 1**, se muestra el proceso interno que se pone en funcionamiento en el interior de la corteza terrestre, los cuales generan los movimientos a lo largo de la superficie.

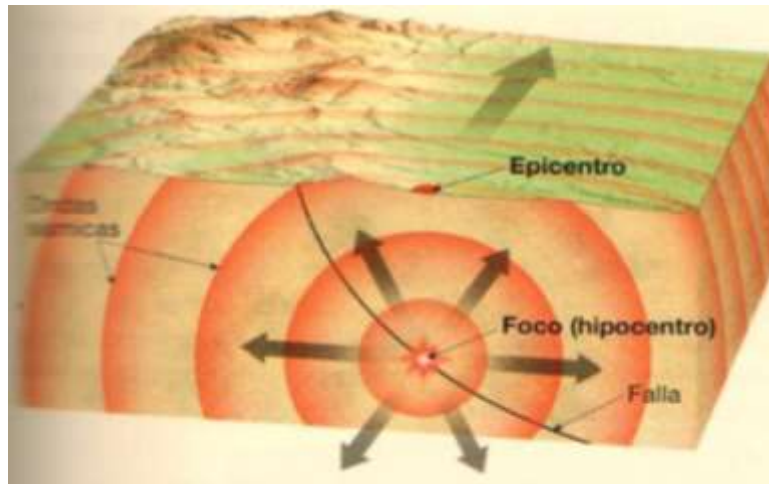


Figura 1: Elementos de un sismo
Fuente y Elaboración: (Tarbuck & Lutgens, 2013, pág. 347)

1.3.1 Foco.

Es el lugar o punto de origen de un sismo que se produce a profundidades comprendidas entre 5 y 700 Km (foci = punto) o hipocentro. (Tarbuck & Lutgens, Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física, 2013).

1.3.2 Epicentro.

Se llama epicentro a la proyección del hipocentro sobre la superficie terrestre. (Cantos Figuerola, pág. 184).

1.3.3 Ondas sísmicas.

Las ondas sísmicas son producidas por la liberación de energía mecánica en el proceso de ruptura en la fuente sísmica y son las que transportan la energía sísmica del foco al lugar. Son de dos tipos: Internas y Superficiales. (Sánchez, pág. 27).

Observando un registro sísmico típico, como el mostrado en la **Figura 2**, puede verse una importante diferencia entre estas ondas sísmicas.

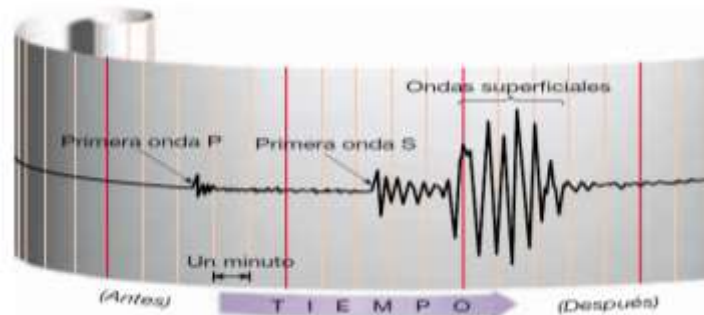


Figura 2: Sismograma Típico

Fuente y Elaboración: (Tarbuck & Lutgens, 2005, pág. 317)

1.3.3.1 Ondas sísmicas internas

Viajan en todas direcciones desde el foco. Son de dos tipos: ondas primarias (P) y ondas secundarias (S). Las ondas P son ondas longitudinales de naturaleza similar a las ondas sonoras, que producen movimientos de las partículas en la misma dirección de la propagación de la onda y que hacen que la roca se comprima y dilate a su paso. Son las primeras ondas que llegan, ya que su velocidad de propagación es la mayor. Las ondas S son ondas transversales, que hacen vibrar lateralmente la roca a su paso y producen por tanto esfuerzos cortantes. No se propagan en líquidos y fluidos. Son las ondas que llegan en segundo lugar y son de mayor energía que las P. (Sánchez, pág. 27).

1.3.3.2 Ondas sísmicas superficiales

Viajan a lo largo del suelo, hacen que éste se mueva y todo lo que descansa sobre él. Además de su movimiento ascendente y descendente, las ondas de superficie tienen un movimiento lateral similar a una onda S orientada en un plano horizontal. (Tarbuck & Lutgens, 2005).

1.4 Placas de subducción

En la introducción presentada en el capítulo previo se muestra un informe sísmico que comunica que el evento físico en estudio se relaciona con el proceso de subducción. Por lo cual se debe tener en cuenta ciertos aspectos relevantes que permitieron generar la teoría de la tectónica de las placas.

La tectónica de placas es una hipótesis de trabajo unificadora que proporciona un modelo cinemático de las capas superiores de la Tierra. La teoría de la tectónica de placas considera que la Litosfera (parte rígida superficial terrestre, que tiene una profundidad aproximada de 100 km, y que se halla por encima de la capa “blanda” y deformable que es la Astenosfera), está dividida en un conjunto de trozos o placas rígidas que se desplazan unas respecto de a otras (con unas velocidades de unos pocos centímetros/año). Existen una docena de grandes placas y alguna más pequeña como se muestra en la **Figura 3**. (Sánchez, pág. 24).

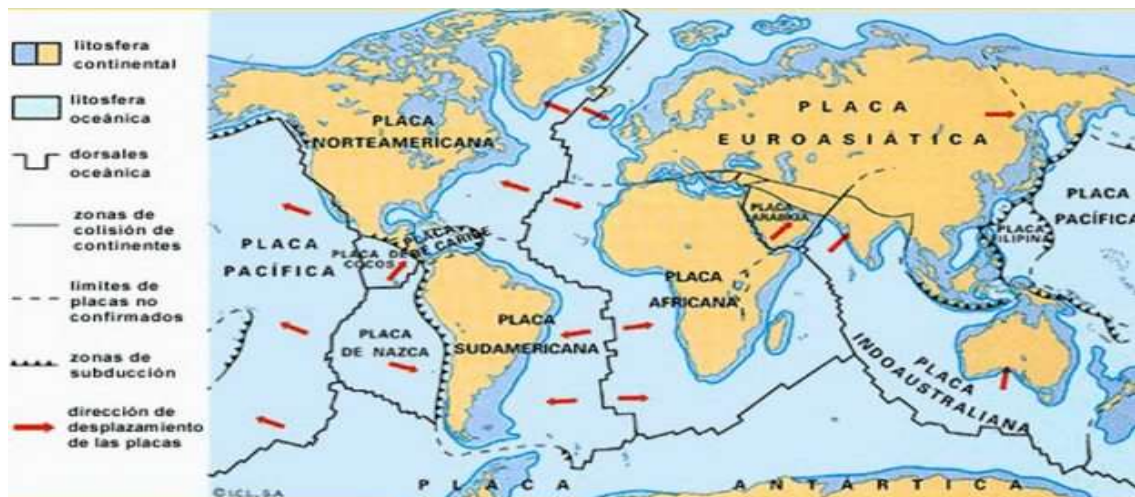


Figura 3: Mapa de las placas tectónicas y su dirección de empuje

Fuente y Elaboración: Editorial Vicens Vives

Estos movimientos relativos entre las placas tectónicas producen deformaciones semielásticas en las inmediaciones de los contornos de las placas que chocan entre sí. Estas deformaciones implican un almacenamiento lento de energía elástica dentro de las franjas limitrofes deformadas. No sólo en los límites: bastante más adentro de estos, también hay energía acumulada. La cantidad de energía acumulada por unidad de volumen, es decir la densidad de energía, no sólo depende de las propiedades de las

deformaciones sino también de las características geométricas y mecánicas de los medios. (Sarria Molina, 1990).

Cuando las fuerzas debidas al movimiento de las placas superan las que tratan de mantener unidos los contactos de placas que se mueven una respecto de la otra, se produce una ruptura súbita a lo largo de los contactos con la liberación de gran parte de la energía elástica que las deformaciones habían almacenado. Se origina entonces un sismo. (Sarria Molina, 1990).

Los bordes de placa revelan el tipo de movimiento que se produce entre las placas y, consecuentemente, condiciona el tipo de actividad sísmica que se origina en ellos. Son fundamentalmente de 3 tipos:

Zonas de expansión o divergentes: Cuando las placas se separan (generalmente en zonas de corteza oceánica). Dan lugar a nueva corteza y producen sismos superficiales.

Zonas convergentes: Cuando las placas se acercan y se chocan. Pueden ser de dos tipos:

Zonas de subducción: Donde una placa oceánica se introduce de bajo de otra continental, y en las que se producen grandes sismos superficiales (profundidad de 0 a 60km.), intermedios (60 a 300km.) y profundos (300 a 700 km.). La nueva corteza creada en las dorsales a partir del material del manto obliga que una cantidad equivalente ha de retornar hacia el mismo, de otro modo la Litosfera y la superficie de las placas tendría que crecer indefinidamente, lo cual es imposible. El consumo de placas se hace generalmente en las zonas de subducción.

Zonas de colisión: Cuando el choque es entre placas continentales se produce una gran deformación pero el proceso de subducción no se desarrolla, producen sismos de gran magnitud, superficiales y hasta unos 150 km de profundidad.

Zona de fallas transformantes o de bordes transcurrentes: El movimiento es lateral y no existe ni creación ni destrucción de material cortical, producen sismos de gran magnitud.

1.5 Geodesia

Según Friedrich Robert Helmert (1880), la geodesia es la ciencia encargada de la medición y representación cartográfica de la superficie terrestre. Esta definición involucra no solamente la determinación de la forma y dimensiones de la Tierra sino también la determinación del campo de gravedad terrestre. Constituye también un tema importante de la geodesia moderna, el estudio de las variaciones temporales, tanto de las coordenadas de los puntos fijos como del campo de gravedad (Huerta, 2005).

1.6 Sistema de referencia

Es la parametrización de las diferentes teorías, hipótesis y constantes que permiten situar una tripleta de ejes coordenados en el espacio, definiendo su origen y su orientación (Furones, 2011).

1.6.1 Marco de referencia

Es la materialización de un sistema de referencia convencional a través de observaciones, es decir, se trata de un conjunto de puntos (lugares localizados en la superficie terrestre) con coordenadas y velocidades conocidas en este sistema de referencia convencional y que sirven para materializar en el espacio el sistema de referencia (Furones, 2011)

1.6.1.1 Marco de referencia geocéntrico convencional

Se utilizarán unos ejes de coordenadas fijos sobre la Tierra, es decir, que giren con ella, de manera que las coordenadas de un punto, en principio, serán siempre las mismas.

Los convencionalismos que llevan el sistema de referencia a convencional son:

- Origen: Centro de masas terrestres o geocentro, incluyendo la atmósfera y los océanos.
- Eje X: es la intersección del plano del Ecuador con el plano del Meridiano de Referencia (Meridiano de Greenwich).
- Eje Y: contenido en el plano del Ecuador y es perpendicular al eje X y su sentido será tal que los tres ejes formen una tripleta dextrógira.
- Eje Z: coincide con el eje de rotación terrestre.

- Plano meridiano: pasa por cualquier punto de la tierra y contiene al eje de rotación.
- Plano ecuador: es perpendicular al eje de rotación y pasa por el geocentro.

1.6.2.2 Marco de referencia terrestre internacional (ITRF)

Básicamente el sistema que materializa se define como geocéntrico (incluyendo la atmosfera y los océanos), la base para la escala la constituye el metro (en el sistema Internacional) y con orientación de sus ejes tal como estableció la BIH en 1984:

- Eje Z: Polo medio determinado por la IERS y llamado IERS Reference Pole (IRP) o Convencional Terrestre Pole (CTP).
- Eje X: Meridiano de Greenwich Convencional determinado por la IERS y llamado IERS Reference Meridian (IRM) o Greenwich Mean Origin (GMO).
- Eje Y: Formando una triplete dextrógira con los ejes anteriores sobre el plano del ecuador convencional.

1.6.2.3 Marco de referencia WGS84

El marco de referencia WGS84 utiliza la técnica GPS y se obtiene exclusivamente a partir de los datos de la constelación de satélites GPS.

El World Geodetic System 1984 (WGS84) utiliza como eje Z el polo I.E.R.S., como eje X el meridiano 0 definido por el I.E.R.S. y el eje Y formando la triplete dextrógira. Su origen coincide con el geocentro (Furones, 2011).

1.7 REGME

La Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador, aparece con el objetivo de mantener un Marco Geodésico de Referencia Nacional actualizado y compatible con las técnicas de posicionamiento disponibles en la actualidad, como son los sistemas satelitales de navegación global: GPS, GLONASS. El éxito de esta gran infraestructura técnica, depende principalmente de la dotación de equipos geodésicos de última generación como son las estaciones GNSS permanentes, instalada y administrada por el Instituto Geográfico Militar (IGM) a nivel nacional. (Bravo , León , Montenegro, & Albán)

La Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador, actualmente está conformado por 33 estaciones cuya distribución y densidad permite una cobertura de señal GNSS en un radio

de 50Km por cada estación. Las estaciones permanentes se encuentran enlazadas a la Red Nacional GPS del Ecuador (RENAGE) y distribuidas a lo largo y ancho del territorio nacional. Estas captan (tracking) datos GNSS (GPS+GLONASS) las 24 horas del día, los 7 días a la semana y los 365 días de la año, proporcionando información necesaria para realizar el procesamiento diferencial de información GNSS.

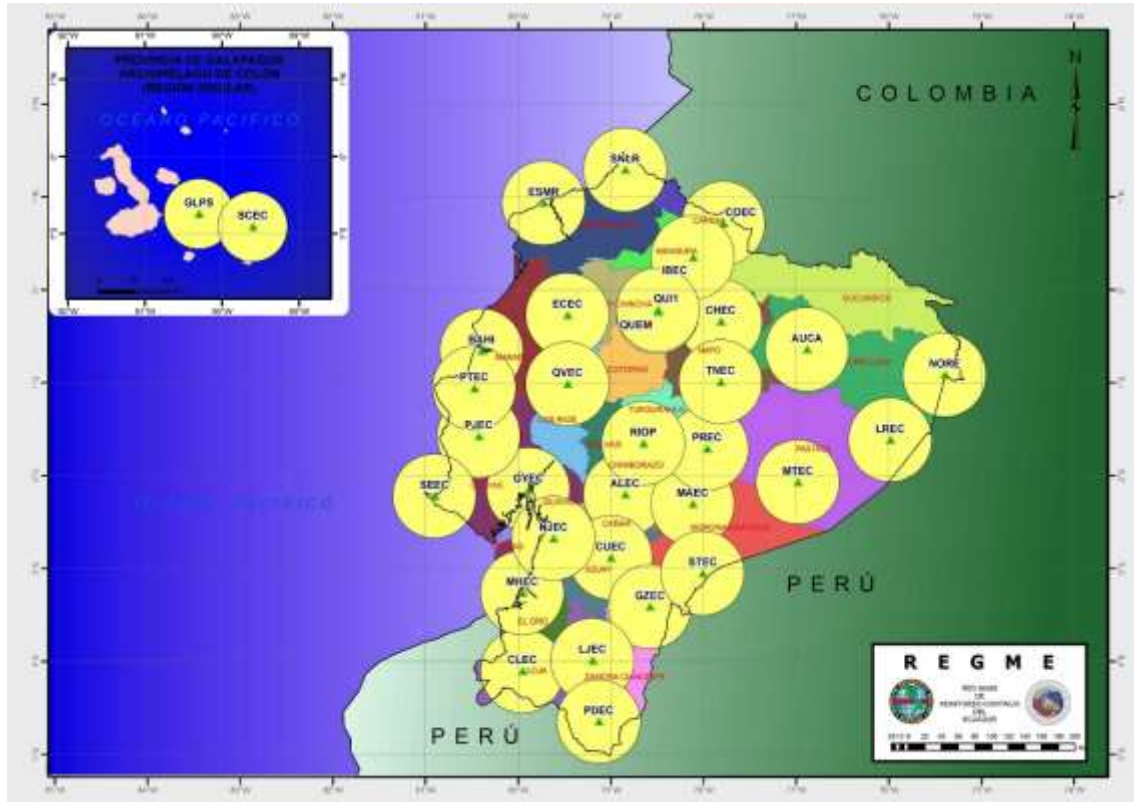


Figura 4: Red GNSS del Ecuador
Fuente y Elaboración: (IGM)

Los productos que genera actualmente la REGME, son archivos diarios de 24 horas en formato RINEX 2.11 (O y N), con un intervalo de grabación de 30 segundos de cada estación y sus correspondientes coordenadas (SIRGAS 95, ITRF 94) contenidas en las fichas técnicas.

1.7.1 GNSS Global Navigation Satellite Systems

El concepto de GNSS (Global Navigation Satellite Systems) es el término estándar genérico que engloba a los Sistemas de Navegación por Satélite que proporcionan un posicionamiento geoespacial con cobertura global, tanto de forma autónoma, como con

sistemas de aumentación. GPS y GLONASS son los únicos sistemas GNSS plenamente operativos.

Está formada por una red de satélites entre 21 y 30, a una altura de la superficie terrestre entre 21000 y 25000 km. Cada satélite emite varias señales en la banda L, para la determinación de la distancia satélite – receptor en Tierra, es conocida la posición del satélite, efemérides, y se puede medir dicha distancia.

La precisión que se puede alcanzar en Geodesia es del orden de unos pocos milímetros (Berné Valero, Anquela Julián , & Garrido Villen, 2014).

1.7.2 Posicionamiento Preciso de Punto (PPP)

El Posicionamiento Puntual Preciso emplea datos de medición con fase no diferenciados, es decir provenientes de un solo receptor de tipo geodésico, más datos de corrección de los errores en los relojes de los satélites y órbitas precisas, junto a un esquema de modelamiento adicional de errores, con la finalidad de obtener una solución con una exactitud a nivel de cm./dm.. En este caso los “puntos fijos” pasan a ser directamente los satélites (Ivars, 2013).

El PPP es una infraestructura de observación a escala global (red de estaciones GNSS permanentes) y centros de análisis, que generan las efemérides precisas y las correcciones a los relojes de los satélites, que son necesarias para que este método funcione en la práctica.

En el caso del PPP, el funcionamiento básico de los servicios disponibles se remite al envío de los archivos de observación en formato RINEX que, en algunos casos deben estar compactados y en otros no. Luego de procesados los datos (en forma casi inmediata), son devueltos a la casilla de e-mail del usuario con una solución de posicionamiento detallada.

Actualmente, se encuentran disponibles los siguientes servicios on-line gratuitos (solo algunos de ellos requieren registrarse como usuario):

- Natural Resources Canada (NRCan) - CSRS-PPP, **Enlace Web:**
http://www.geod.nrcan.gc.ca/online_data_e.php

- Instituto Brasileiro de Cartografía y Estadística (IBGE) – PPP, **Enlace Web:** <http://www.ppp.ibge.gov.br/ppp.htm>
- University of New Brunswick (UNB) - GPS Analysis and Positioning Software (GAPS), **Enlace Web:** <http://gaps.gge.unb.ca/>
- NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) - Automatic Precise Positioning Service (APPS), **Enlace Web:** <http://apps.gdgps.net/>
- Magic GNSS, **Enlace Web:** <http://magicgnss.gmv.com/ppp/>

1.7.2.1 Natural Resources Canada (NRCan) - CSRS-PPP

Es una aplicación en línea para el postproceso de datos GNSS que permite a los usuarios calcular posiciones de mayor precisión a partir de sus datos de observación sin procesar.

CSRS-PPP utiliza las efemérides de órbita de satélite GNSS precisas para producir coordenadas corregidas de una precisión "absoluta" constante, sin importar dónde se encuentre en el globo, independientemente de la proximidad a estaciones base conocidas.

Los usuarios pueden enviar datos de observación de RINEX desde receptores de frecuencia única o doble que funcionan en modo estático o cinemático a través de Internet y recuperar precisiones de posicionamiento mejoradas en el Sistema de referencia espacial canadiense (CSRS) y el Marco de referencia terrestre internacional (ITRF). (Natural Resources Canada, 2017).

1.8 Series Temporales

Matemáticamente hablando, una serie temporal es un conjunto de observaciones de una magnitud y observada, $y_i = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_N)$, en los instantes de tiempo t_i con $i = 1, 2, 3, \dots, N$, siendo N el tamaño muestral de la serie.

Las cuatro componentes principales de una serie temporal son: la tendencia, las variaciones cíclicas, las variaciones estacionales y las variaciones aleatorias. (García Díaz, 2016)

Tendencia (T): es una componente de la serie temporal que refleja su evolución a largo plazo. Esta componente, en el conjunto de toda la serie, puede ser de naturaleza

estacionaria o constante, de naturaleza lineal, de naturaleza exponencial, u otras posibilidades.

Componente cíclica (C): es un componente de la serie que recoge las oscilaciones periódicas de amplitud superior a un año. Estas oscilaciones no son regulares y solamente es caracterizable cuando se disponga de una larga historia de la serie.

Componente estacional (S): es una componente de la serie que recoge oscilaciones que se producen en periodos de repetición iguales o inferiores a un año originalmente en series con datos mensuales.

Componente aleatoria o irregular (I): es una componente de la serie temporal que recoge las fluctuaciones debidas a la ocurrencia de eventos imprevisibles. Es por definición imprevisible y actúa en cualquier serie temporal en mayor o menor medida.

Las series temporales se clasifican en discretas cuando es continua dependiendo de las observaciones, en determinísticas cuando es posible predecir valores; en estocásticas cuando el futuro se puede determinar de forma parcial por lo que se considera la serie como aleatoria, los objetos principales de un análisis de series temporales es obtener su descripción mediante el gráfico de la misma y la predicción de comportamientos.

1.8.1 Series temporales GPS

Las series temporales son el conjunto de coordenadas diarias obtenidas en cada procesado, tres para cada estación correspondiente a cada coordenada (norte, este y elevación), por lo que se trabaja con series discretas y cuyas observaciones se realizan en intervalos de tiempo regulares. El modelo matemático para una serie temporal es un proceso estocástico, donde las observaciones suelen ser consideradas como un conjunto de variables aleatorias, es decir, en cada instante t_i la observación y_i es la realización de una variable aleatoria.

Las series temporales GPS son estocásticas estacionarias debido al comportamiento aleatorio y las repeticiones en el tiempo respectivamente, aunque la periodicidad depende directamente del lugar de análisis puesto que en sectores sísmicos o volcánicos cambia el comportamiento de la serie por los movimientos producidos por los fenómenos antes señalado.

En el análisis de series temporales se pretende estudiar la evolución del fenómeno que representa la magnitud y a lo largo del tiempo. Pueden ocurrir muchos y muy diferentes casos, por ejemplo, que a lo largo del tiempo la serie presente alguna tendencia de crecimiento o decrecimiento, que presente variaciones periódicas o aleatorias o las dos a la vez. A la hora de trabajar con series temporales de datos reales, como son las series de coordenadas, el problema es conocer cuál es el modelo teórico que mejor se ajusta a los datos de la serie, para lo que es necesario estudiar la presencia o no de tendencia, variaciones estacionales, tipo de ruido, etc.

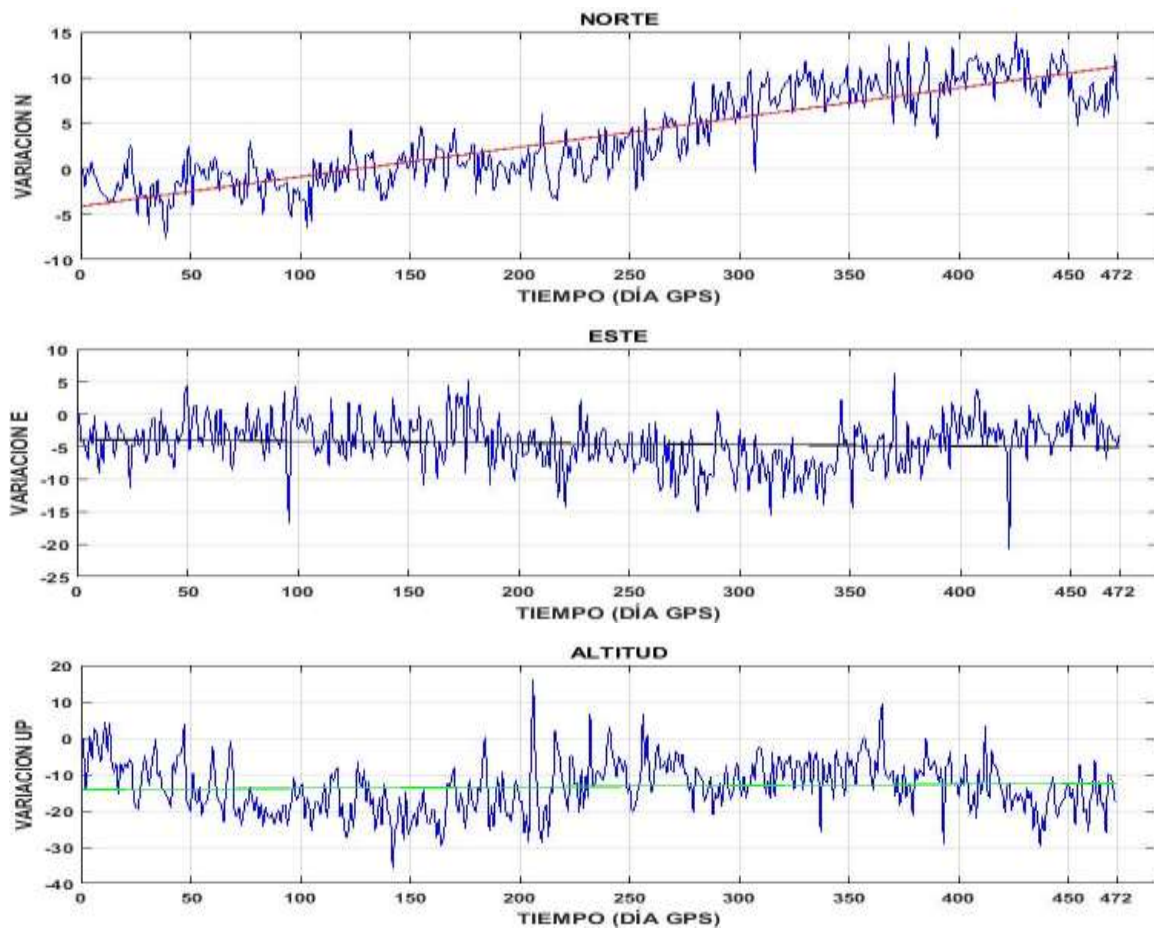


Figura 5: Series Temporales GPS Norte, Este y Up, para la estación ALEC (antes del sismo) con sus soluciones diarias y su tendencia lineal mediante ajuste con mínimos cuadrados
Fuente y Elaboración: El Autor

1.9 Método de regresión lineal

La representación de la relación entre dos (o más) variables a través de un modelo formal supone contar con una expresión lógico-matemática que, aparte de resumir cómo es esa relación, va a permitir realizar predicciones de los valores que tomará una de las dos variables (la que asuma como variable de respuesta, dependiente, criterio o Y) a partir de los valores de la otra (la que asume como variable explicativa, independiente, predictora o X).

El modelo de regresión lineal es el más utilizado a la hora de predecir los valores de una variable cuantitativa a partir de los valores de otra variable explicativa también cuantitativa (modelo de regresión lineal simple).

En concreto, las puntuaciones de los sujetos en 2 variables, una de ellas considerada como variable predictora (X) y la otra como variable de respuesta (Y) vienen representadas (modeladas) por la ecuación de una línea recta:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 \quad (1)$$

El modelo estadístico de regresión lineal permite homogeneizar un conjunto de datos cuya tendencia en el tiempo es lineal, lo que puede ser observado gráficamente. La regresión lineal convierte a un conjunto de datos dispersos en una recta lo que permite predecir datos intermedios que no han sido observados, así como también determinar una pendiente y una posición inicial de la variable lo que se traduce en una ecuación lineal entre la variable dependiente y la variable independiente; en el caso de las series temporales de las estaciones GNSS se comparan las posiciones (Norte-Sur, Este-Oeste o Up) en función del tiempo, que se traduce en un desplazamiento lento y continuo de la estación en el tiempo. Este parámetro determina que en la obtención de un levantamiento preciso además de los datos de posicionamiento se debe tomar como referencia el tiempo por el movimiento continuo de la corteza terrestre. (RUIZ, 2015).

1.9.1. Ajuste por mínimos cuadrados

Al emplear el ajuste por mínimos cuadrados se determina el mínimo error cuadrático de la distancia entre los valores observados y los valores predichos, con la formulación de una ecuación lineal. Del análisis por mínimos cuadrados se obtienen dos parámetros que

son la pendiente de la recta de regresión lineal y la ordenada con el origen de la ecuación lineal, además de estos valores antes mencionados se obtiene el coeficiente de correlación R cuyo valor es un buen estimador de la tendencia de linealidad de los datos procesados.

El valor característico de la regresión realizada es el factor R que tiene valores entre 0 y 1, mientras más cercano se encuentre de 1 mayor será la correspondencia con el método de regresión lineal. La medida de este factor representa la fuerza con la que se relacionan las dos variables.

**CAPÍTULO II:
METODOLOGÍA**

2.1 Metodología utilizada.

La Figura 6, muestra la metodología aplicada la cual se detalla a lo largo del capítulo.



Figura 6: Metodología aplicada
Fuente y Elaboración: El Autor

2.2 Procesamiento y ajuste de datos GNSS.

El procesamiento de datos consiste en obtener las coordenadas a ser utilizadas en esta investigación, la cual se ejecuta de la siguiente manera:

1. Selección de estaciones para el respectivo análisis.
2. Descarga de datos RINEX del Instituto Geográfico Militar (IGM), organismo que abastece y dirige los estudios correspondientes a las estaciones permanentes del Ecuador.
3. Posicionamiento Puntual Preciso.

2.2.1 Selección de estaciones

La REGME actualmente genera información de 33 estaciones permanentes. La selección de las estaciones para el análisis se fundamenta en las siguientes propiedades correspondientes de las estaciones:

- Reconocer el lugar donde se originó el epicentro del sismo.
- Disponibilidad de los datos RINEX antes y después del evento sísmico.

Para fines de esta investigación, analizando los parámetros expuestos, se seleccionan las estaciones SNLR, LPEC, ESMR, PEEC, ECEC, ONEC, PVEC, PJEC, QVEC, BHEC, SEEC, GYEC, GUEC, NJEC, ALEC, RIOP ABEC, CXEC, EPEC, QUI3, IBEC, COEC, GLPS, SCEC.

2.2.2 Descarga de datos RINEX.

Una vez localizadas las estaciones, se procede a solicitar acceso al IGM a través de su página web (www.geoportaligm.gov.ec), para descargar las coordenadas en formato RINEX. El proceso para la recolección de datos es el siguiente:

- 1) Accedemos al (Visor de la Red GNSS del Ecuador) a través de su página web: (http://www.geoportaligm.gov.ec/visor_regme/), la cual presenta su interfaz con cada una de las estaciones que comprende la REGME y su funcionamiento actual: activa, inactiva, en mantenimiento y removida. Como se indica en la **Figura 7**.

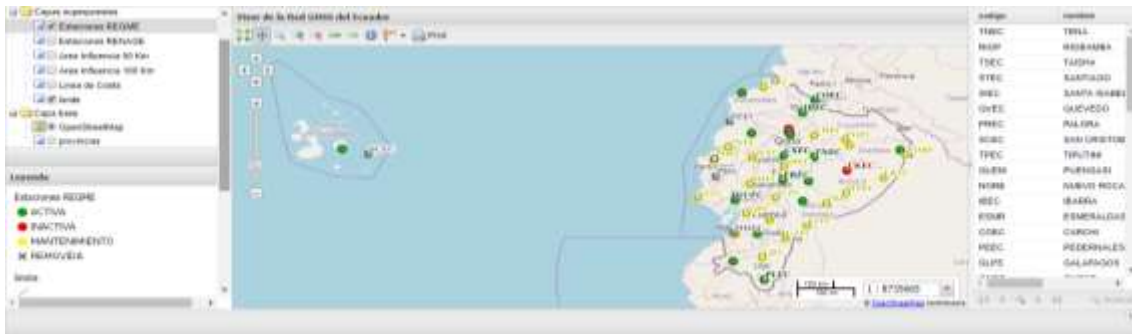


Figura 7: Visor de la Red GNSS del Ecuador
Fuente y Elaboración: (IGM)

- 2) Se selecciona en la parte derecha la estación que se requiere la descarga de datos. Al hacer clic derecho en la estación escogida, se presenta un recuadro con distintas opciones. Seleccionamos la opción "Descarga de Información GNSS".



Figura 8: Visor de la Red GNSS del Ecuador
Fuente y Elaboración: (IGM)

- 3) Ingresamos los datos de usuario y contraseña que nos proporciona el IGM y se elige la opción de “Iniciar Sesión”.



Figura 9: Descarga de datos GNSS
Fuente y Elaboración: (IGM)

- 4) Posteriormente se completa la información solicitada en el icono que aparece: día del cual se quiere obtener los datos, el intervalo en el que se desea obtener y una breve descripción de la aplicación se le dará al mismo.

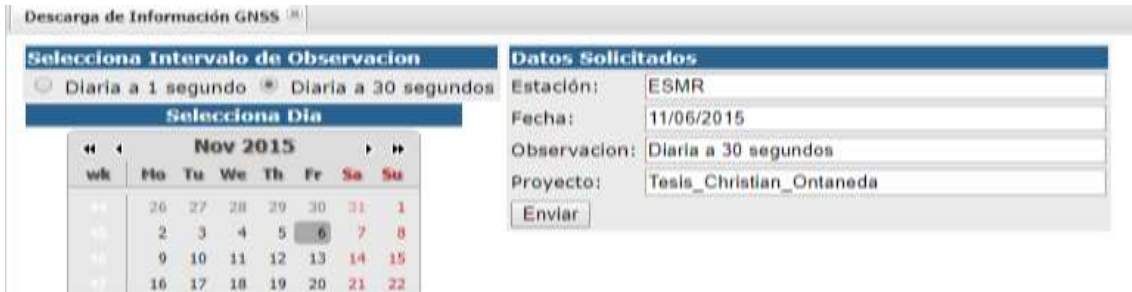


Figura 10: Datos requeridos para la descarga de datos GNSS
Fuente y Elaboración: (IGM)

- 5) En el fichero de descarga de datos solicitados descargamos el archivo de extensión D.z, el cual contiene un archivo comprimido con los datos crudos.

| DESCARGA DE DATOS SOLICITADOS | | |
|--|----------|---|
| 17/11/15 01:37:33 17/11/15 01:37:32 | | |
| DESCARGA DE DATOS | Tamaño | Fecha Modificación |
| descargas/ESMR3100.15D.z | 0.40 Mb | 17/11/15 01:37:33 |
| descargas/ESMR3100.15N | 0.11 Mb | 17/11/15 01:37:32 |
| Manuales y Software | | Fuente |
| Windows | Software | http://sopac.ucsd.edu/dataArchive/hatanaka.html |
| Linux 32 bits | Software | http://sopac.ucsd.edu/dataArchive/hatanaka.html |
| Linux 64 bits | Software | http://sopac.ucsd.edu/dataArchive/hatanaka.html |

Figura 11: Archivo requerido de descarga de datos solicitados
Fuente y Elaboración: (IGM)

2.2.3 Descartar estaciones por falta de datos

Una vez que se obtiene los datos de las 24 estaciones seleccionadas de la REGME del año 2015 y 2016 se evidencia la carencia de información de ciertas estaciones, faltan datos de ciertos días. En consecuencia para corregir se recusan las estaciones que no cumplen con el número suficiente de datos necesarios para esta investigación. En la **Tabla 1**, se muestran el número de datos almacenados que dispone cada estación.

Tabla 1: Estaciones de la Red REGME 2015 y 2016, con sus datos disponibles

| ESTACIÓN | NOMBRE | 2015 | 2016 |
|-----------------|---------------|-------------|-------------|
| SNLR | SAN LORENZO | 39 | 74 |
| LPEC | LAS PEÑAS | 360 | 308 |
| ESMR | ESMERALDAS | 345 | 302 |
| PEEC | PEDERNALES | 138 | 101 |
| ECEC | EL CARMEN | 363 | 365 |
| ONEC | CHONE | 338 | 309 |
| PVEC | PORTOVIEJO | 144 | 106 |
| PJEC | PAJAN | 362 | 310 |
| QVEC | QUEVEDO | 106 | 98 |
| BHEC | BABAHOYO | 364 | 366 |
| SEEC | SANTA ELENA | 364 | 366 |
| GYEC | GUAYAQUIL | 45 | 94 |
| GUEC | GUAYAS | 365 | 366 |
| NJEC | NARANJAL | 101 | 65 |
| ALEC | ALAUSI | 364 | 366 |
| RIOP | RIOBAMBA | 320 | 350 |
| ABEC | AMBATO | 322 | 366 |
| CXEC | COTOPAXI | 363 | 366 |
| EPEC | ESPE | 357 | 360 |
| QUI3 | QUITO | 45 | 85 |
| IBEC | IBARRA | 146 | 112 |
| COEC | CARCHI | 335 | 325 |
| GLPS | GALAPAGOS | 139 | 102 |
| SCEC | SAN CRISTOBAL | 345 | 363 |

Fuente: (IGM)

Elaboración: El Autor

Como se puede notar existen 9 estaciones con datos que rondan entre 39 y 146 las cuales para la presente investigación se eliminan, ya que para el proceso estadístico se ha

contemplado tomar damos mayores a 300 para así obtener un grado de confianza elevado.

Las estaciones eliminadas de la investigación son: SNLR, PEEC, PVEC, QVEC, GYEC, NJEC, QUI3, IBEC, GLPS; dichas estaciones presentan los datos faltantes por la inactividad de las estaciones las cuales se pueden encontrar en mantenimiento o debido a que sufrió algún desperfecto.

2.2.4 Posicionamiento Puntual Preciso (PPP)

Descargados los datos RINEX, se lleva a cabo el post-procesamiento que implica la utilización del PPP, utilizando la aplicación en línea (The Canadian Spatial Reference System (CSRS) Precise Point Positioning). Para ingresar a esta herramienta se realiza el siguiente procedimiento:

Ingresamos a la aplicación por medio de la siguiente dirección electrónica: (<https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/account-compte/login.php>), en donde se muestra en la **Figura 12**, aquí es necesario ingresar el correo electrónico y contraseña de un usuario ya registrado.



Figura 12: Interfaz de Natural Resources Canada
Fuente y Elaboración: (Natural Resources Canada)

Teniendo en cuenta que ya hemos ingresado al sistema **Figura 13**, seleccionamos en la parte izquierda de las opciones “Earth Scienses” y “Tools and Applications”



Figura 13: Interfaz de herramientas y aplicaciones de Natural Resources Canada
Fuente y Elaboración: (Natural Resources Canada)

Ejecutando la herramienta en línea CSRS-PPP:

- I. Ingrese la dirección de correo electrónico a la cual se enviarán los resultados del procesamiento
- II. Seleccione el modo de procesamiento estático o cinemático
- III. Seleccione el marco de referencia de las coordenadas de salida ITRF
- IV. Importe el archivo de observación RINEX haciendo clic en “Elegir archivo”
- V. Haga clic en “Enviar a PPP”



Figura 14: Interfaz para ejecutar el post-procesamiento de los datos RINEX
Fuente y Elaboración: (Natural Resources Canada)

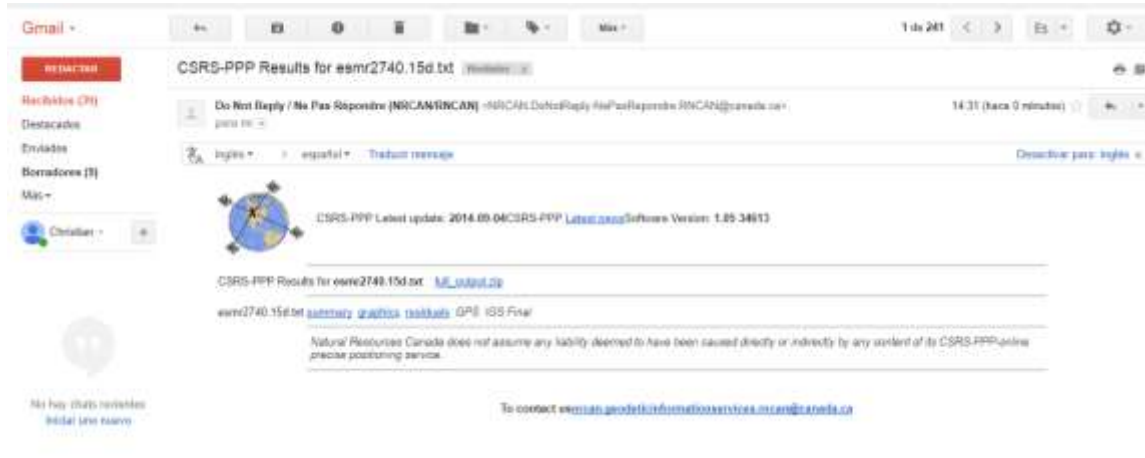


Figura 15: Plantilla de correo emitido por NRCan para la descarga de los resultados
Fuente y Elaboración: (Natural Resources Canada)

El archivo comprimido contiene cuatro archivos con diferentes extensiones como se muestra en la **Figura 16**. Para esta investigación se utilizaron los archivos .sum, archivos que contenían la información de las coordenadas cada 30seg.





| Nombre | Fecha de modificación | Tipo | Tamaño |
|--|-----------------------|---|--------|
|  esmr2740 | 10/05/2017 16:29 | Archivo de valores separados por comas de Microsoft Excel | 153 KB |
|  esmr2740 | 10/05/2017 16:29 | Adobe Acrobat Document | 160 KB |
|  esmr2740.pos | 10/05/2017 16:29 | Archivo POS | 890 KB |
|  esmr2740 | 10/05/2017 16:29 | Archivo SUM | 29 KB |

Figura 16: Archivos de resultados del procesamiento CSRC-PPP
Fuente y Elaboración: (Natural Resources Canada)

El archivo .sum será trabajado con un procesador de texto de características básicas como Wordpad como el que se muestra en la **Figura 18**.

```

3.3 Coordinate estimates (Epoch: 2015)
CARTESIAN
NAD-ITR(m)      NAD83 (CBRS )      ITRF (IGb08)      95% Sigma (m)
X (m)          1137650.7802      1137650.0933      0.0081
Y (m)          -6275258.2612      -6275256.3025
Z (m)          103348.0088      103347.7594      0.0021

SIGMA/CORRELATIONS
X (m)          0.0081      -0.2513      0.0932
Y (m)          0.0160      0.0160      -0.0823
Z (m)          0.0021      0.0021      0.0021

ELLIPSOIDAL
Latitude (dms) 0 56 04.7437      0 56 04.7366      0.0021
Longitude (dms) -79 43 27.7284      -79 43 27.7390      0.0077
Elevation (m)  253.7323      251.6787      0.0162

SCALE
UTM (North)    103332.672      641938.505      17
(point)
(0.99984940)
(combi.)
(0.99980990)

```

Figura 17: Coordenadas estimadas cartesianas del archivo .sum

Fuente: (Natural Resources Canada)

Elaboración: El autor

2.3 Creación de Series Temporales

Con los datos procesados en la sección previa se lleva a cabo la generación de series temporales.

2.3.1 Transformación a coordenadas geodésicas

Una vez que se posee las coordenadas en el marco de referencia ITRF2008 se ejecuta la transformación a un sistema de coordenadas geodésicas. El proceso realizado según (WOLF Y GHILANI, 2010) se muestra a continuación:

Como primer paso se debe determinar las coordenadas en un sistema de coordenadas geocéntrico como se describe a continuación.

- a) Calcule la longitud como

$$\lambda_p = \tan^{-1}\left(\frac{Y_p}{X_p}\right) \quad (2)$$

- b) Calcule D_p como

$$D_p = \sqrt{X_p^2 + Y_p^2} \quad (3)$$

- c) Calcule una latitud aproximada, ϕ_0 , con el valor de la excentricidad $e = 0.08181919084$

$$\phi_0 = \tan^{-1} \left[\frac{Z_p}{D_p(1-e^2)} \right] \quad (4)$$

- d) Calcule un radio aproximado de la primera vertical, R_N , usando ϕ_0 del paso 3

$$R_{N_p} = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \phi_p}} \quad (5)$$

- e) Calcule un valor mejorado para la latitud de

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{Z_p + e^2 R_{N_p} \sin(\phi_0)}{D_p} \right) \quad (6)$$

- f) Repita los cálculos de los pasos 4 y 5 hasta que el cambio en ϕ entre iteraciones sea despreciable. Este valor final, ϕ_p , es la latitud de la estación.
g) Use las siguientes fórmulas para calcular la altura geodésica de la estación.

Para latitudes menores a 45° , use

$$h_p = \frac{D_p}{\cos(\phi_p)} - R_{N_p} \quad (7)$$

Para latitudes mayores a 45° use la fórmula

$$h_p = \left[\frac{Z_p}{\sin(\phi_p)} \right] - R_{N_p}(1 - e^2) \quad (8)$$

De donde:

$$X_p = \text{Coordenada } x \text{ ITRF2008}$$

$$Y_p = \text{Coordenada } y \text{ ITRF2008}$$

$$Z_p = \text{Coordenada } z \text{ ITRF2008}$$

Finalmente se obtiene las coordenadas en el sistema geodésico local Δn , Δe , Δu .

$$\begin{bmatrix} \Delta_n \\ \Delta_e \\ \Delta_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \phi \cos \lambda & -\sin \phi \sin \lambda & \cos \phi \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ \cos \phi \cos \lambda & \cos \phi \sin \lambda & \sin \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.3.2 Modelo de regresión lineal con mínimos cuadrados

Ecuación General:

$$y = a x + b \quad (10)$$

Donde:

Y= Variable dependiente (Coordenadas Δn , Δe , Δu)

X= Variable independiente (Tiempo)

a= Valor de la pendiente de la recta

b= ordenada en el origen, es decir el valor de y cuando x vale 0.

Los valores de Y y X son conocidos, mientras que b se considera un valor igual a 0, el valor de a se lo determina:

$$a = \frac{S_{XY}}{S^2_X} \quad (11)$$

Donde:

$$S_{XY} = \sum_{i=1}^N x_i y_i \quad (12)$$

$$S^2_X = \sum_{i=1}^N x_i^2 \quad (13)$$

Para obtener el criterio de linealidad de la serie se debe calcular el valor R que es el parámetro que indica cuán ajustado se encuentra el método de mínimos cuadrados al modelo lineal de la serie. Para determinar se aplica la siguiente ecuación:

$$R = \frac{b(\sum y_i x_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[b(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2] \times [b(\sum y_i^2) - (\sum y_i)^2]}} \quad (14)$$

Según (Torre, 2011) el factor r significa:

Si $r = -1$ todos los puntos se encuentran sobre la recta existiendo una correlación que es perfecta e inversa.

Si $r = 0$ no existe ninguna relación entre las variables.

Si $r = 1$ todos los puntos se encuentran sobre la recta existiendo una correlación que es perfecta y directa.

2.4 GMT (Generic Mapping Tools)

Para el mapeo se va a utilizar Generic Mapping Tools (GMT) como herramienta de cartografía gratuita, trabaja con ficheros binarios con datos (.batch) que se almacenan como simples pares de coordenadas mediante la inclusión de diversos elementos al mapa/fichero por parte de diferentes módulos para generar archivos en formato PostScript que muestra los resultados del mapeo creados por las herramientas de la aplicación. (Sarría, 2006)

2.4.1 Módulos para iniciar un mapa

Aunque no es estrictamente necesario, es útil iniciar un mapa mediante los módulos `pscoast` o `psbasemap`. Estos generan la base a la que se le incorporarán, posteriormente otros objetos. Las diferencias básicas entre ambos módulos es que el primero pinta las líneas de costa y, opcionalmente, los límites nacionales y grandes ríos utilizando coordenadas geográficas (en grados) a partir de la base de datos que viene con el programa; `psbasemap` permite utilizar coordenadas planas (UTM por ejemplo), como contrapartida no se tiene acceso a las bases de datos que utiliza `pscoast`.

pscoast: Genera un mapa de la región que le especifiquemos utilizando una base de datos espacial que incluye costas, límites nacionales y ríos. Resulta útil para, por ejemplo, localizar áreas de trabajo en regiones mayores. La base de datos está en coordenadas geográficas y, por tanto, para añadir datos estos deberán estar también en coordenadas geográficas. Deben utilizarse como mínimo las opciones **-R**, **-J** y **-W** para determinar, respectivamente, la región que se va a representar, el sistema de proyección y escala, así como el tipo de línea con el que se representarán los datos. La región, así como los intervalos de anotación en el marco se especifican en coordenadas geográficas (grados y décimas de grado).

Este módulo tiene varias opciones específicas.

-R Establece los límites del mapa, representa la región a ser mapeada en coordenadas geográficas.

-J Indica el sistema de proyección utilizado en el mapa.

-W Establece el tipo de línea, color y textura que se utilizara.

-D resolución. Selecciona la resolución de la base de datos de la que se extraerán los elementos, resolución puede ser: f máxima, h alta, i intermedia, l baja y c muy baja.

-N detalle [pluma] Pinta los límites nacionales y provinciales. El nivel de detalle puede ser:

1. Límites nacionales

2. Límites provinciales

3. Límites marinos

4. Todos los límites (1-3)

-I detalle [pluma] Pinta los ríos, detalle indica el grado de detalle de los ríos pintados (10 niveles y la opción a para pintarlos todos).

-S color Establece el color o tramas para pintar el mar.

-K permite la incorporación de nuevos elementos al mapa, se usa cada línea del código.

-X Centra horizontalmente el mapa en la hoja de impresión.

-Y Centra verticalmente el mapa en la hoja de impresión.

El módulo de inicio para el mapa base de Ecuador, presenta el siguiente código:

```
pscoast -R-82/-74/-5/3 -JM7i -W0.02c -Df -B2g1 -S100/100/255 -N1/0.25p -  
N2/0.02c/190/190/190 -X1.5c -Y3c -K -P>> MapaEcuador.ps
```

A continuación guardamos el archivo con extensión .cmd; al ejecutar el archivo anterior, creara un archivo con extensión .ps en la carpeta del programa. Ese es el archivo con el mapa en formato Postscript. Para abrirlo necesitamos el uso de otra herramienta como

es el Ghostview que es un editor de texto y guardamos el mapa final en el formato que deseamos.

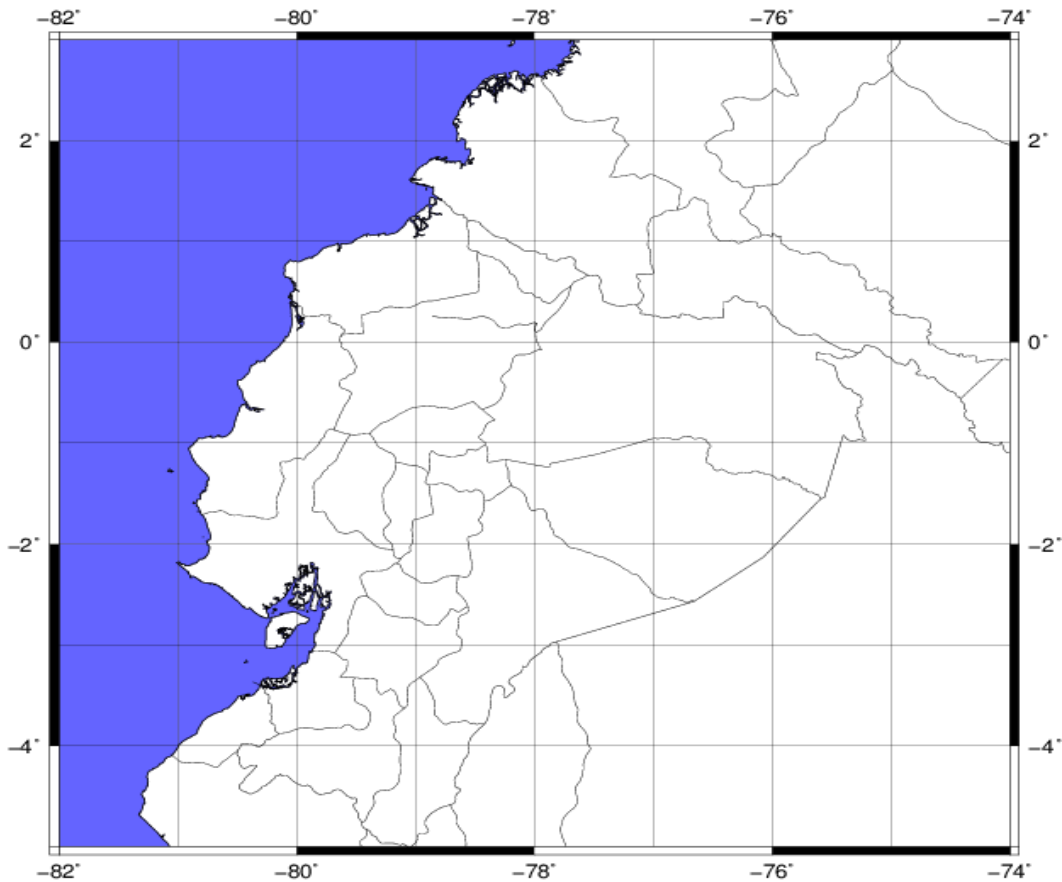


Figura 18: Mapa Base del Ecuador elaborado con el módulo para iniciar mapa
Fuente y Elaboración: El Autor

2.4.2 Módulos para inclusión de objetos espaciales

Los objetos espaciales suelen dividirse entre:

- Superficies (variables cuantitativas que muestran autocorrelación espacial)
- Variables cualitativas
- Polígonos
- Líneas
- Puntos

Por otro lado los formatos de representación de estos objetos son básicamente dos, raster y vectorial.

El formato raster se basa en la división del espacio en celdillas, normalmente cuadradas y del mismo tamaño. En el caso de estar representando superficies, cada celdilla contiene un valor de la variable representada que se considera representativo de toda la celdilla. En el caso de polígonos, aquellas celdillas que forman parte de un polígono reciben su identificador. Finalmente para representar líneas o puntos, aquellas celdillas por donde pasen los objetos recibirán su identificador. (Sarría, 2006)

En formato vectorial se representan los objetos espaciales (puntos y líneas) o sus límites (polígonos y manchas con un determinado valor de una variable cualitativa) mediante puntos (par de coordenadas), líneas (cadena de pares de coordenadas) o polígonos (líneas cerradas o conjunto de líneas que forman el polígono). La superficie también admiten ser representadas mediante líneas (isolíneas).

Las superficies se representan preferiblemente mediante capas raster, polígonos y variables cualitativas tipo pueden representarse en formato raster o vectorial, mientras que las líneas y puntos se representan mejor mediante vectores.

Los módulos de GMT para representar objetos espaciales son:

grdimage para representar datos espaciales

grdcontour extrae isolíneas de una capa raster

pscontour genera isolíneas a partir de un fichero de puntos

psxy dibuja datos puntuales, líneas o polígonos a partir de un fichero con los objetos

Estos módulos deben incluir las opciones ya vistas -R y -J, sin embargo no es necesario volver a introducir toda la cadena de caracteres, si simplemente se pasan las opciones sin valores, el módulo correspondiente asumirá que se trata de los valores ya utilizados con pscoast para crear el fichero postscript. También pueden utilizar (aunque de forma voluntaria) la opción -B.

En esta investigación el principal objeto espacial que se utiliza para dibujar los vectores de desplazamiento es el módulo **psxy** que permite incluir puntos, líneas o polígonos en el mapa. Los puntos pueden representarse mediante diferentes iconos, tamaños y colores. Las líneas mediante diversos tipos de línea, anchos y colores; los polígonos mediante tramas, colores y anchos de línea. (Sarría, 2006)

La codificación de la geometría de los objetos y de los datos temáticos asociados se hace en ficheros aparte que pueden tener formato ASCII o binario.

3.4.3 Representación de puntos

En formato ASCII un fichero de puntos está formado por una línea por cada uno de los puntos. La primera columna contiene la coordenada X y la segunda columna la coordenada Y. La tercer columna contiene el tamaño del icono salvo en aquellos iconos (elipse por ejemplo) que requieren varios valores para especificar tamaño y forma. Estos casos se especifican más adelante.

La opción que indica a **psxy** que se van a pintar puntos es **-S**. Se trata de una opción con múltiples variantes que indican el tipo de icono que se utilizará: Sx Signo más. Sy, Línea vertical, Sa Estrella, Sb Barra, Sc Círculo, Sd Diamante, St Triángulo, Si Triángulo invertido, Ss Cuadrado, Sp Pentágono, Sh hexágono, Sg Octágono, S11\"cadena\", Se elipse (dirección en grados, eje mayor y eje menor en las columnas 3,4 y 5), Sv Vector (dirección en grados y longitud en las columnas 3 y 4), Sw Tarta (radio, dirección de comienzo y dirección final en las columnas 3,4 y 5).

Para especificar el color del que se pintarán los símbolos se utiliza la opción **-G** para pasarle al módulo un único color para todos los símbolos o la opción **-C** para seleccionar un fichero de paleta de color que se utilizará para transformar los valores de la tercera columna del fichero de puntos en colores.

**CAPÍTULO III:
RESULTADOS**

En el presente capítulo se muestran las series temporales GPS adquiridas para el año 2015-2016 (antes del evento sísmico) y 2016 (después del evento sísmico), los datos empleados son diarios con un intervalo de observación de cada 30 segundos. El día 1 de las series de tiempo del año 2015-2016 corresponde al 1 de enero del 2015 y el día 472 corresponde al 16 de abril del 2016. Entretanto el día 1 de las series de tiempo del año 2016 corresponde al 17 de abril y el día 365 corresponde al 31 de diciembre del año en alusión.

Durante el proceso de representación gráfica de los resultados y el respectivo análisis, se ha elaborado una herramienta digital logarítmica con el software Matlab, el cual trabajara de acuerdo a la metodología anteriormente señalada.

Con el propósito de exponer todas las maneras probables de análisis y posterior interpretación de las series temporales, se ha estimado como pieza de este capítulo describir el procedimiento y resultados de las estaciones LPEC, ESMR y ECEC, debido a su proximidad al epicentro del sismo.

Luego de emplear la metodología señalada en el Capítulo III se obtiene, para cada estación, lo siguiente.

- Serie temporal con datos diarios disponibles en un año en intervalos de observación cada 30 segundos antes del evento sísmico, desde el 01 de enero del 2015 al 16 de abril del 2016.
- Serie temporal con datos diarios disponibles en un año en intervalos de observación cada 30 segundos después del evento sísmico, desde el 16 de abril del 2016 al 31 de diciembre del 2016.

Los resultados obtenidos de las series temporales se presentan a continuación.

3.1 Series Temporales de las estaciones GNSS de la Red REGME

3.1.1 Estación Las Peñas (LPEC)

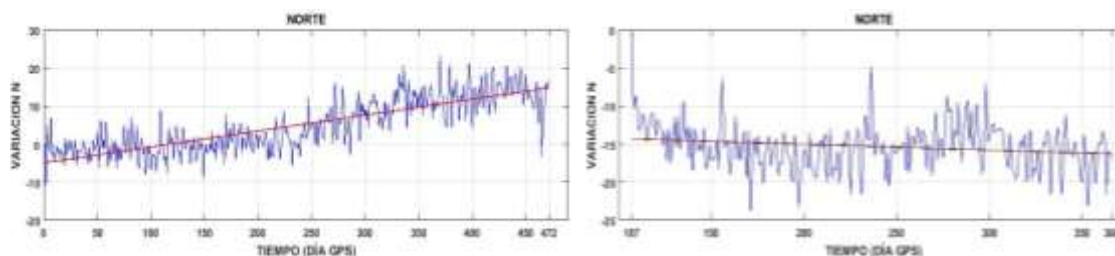
Los resultados obtenidos de la serie temporal para la estación LPEC, situada en la Provincia de Esmeraldas y Ciudad Las Peñas indicadas en las **Figura 20**, se muestran en la **Tabla 2**.

Tabla 2: Resultados de la Estación LPEC

| Período | Norte (N) | | Este(E) | | Altura(Up) | |
|--------------------|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|
| | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² |
| Antes (A) | $y = 0,0419x - 4,9221$ | 0,6740 | $y = 0,0276x + 2,1868$ | 0,4004 | $y = 0,0229x - 10,372$ | 0,1598 |
| Después (D) | $y = -0,0077x - 14,275$ | 0,0349 | $y = -0,0522x - 25,596$ | 0,4262 | $y = -0,0194x - 11,805$ | 0,0621 |

Fuente y Elaboración: El Autor

En la **Figura 20**, en la serie de tiempo antes del sismo, se puede notar que el componente Norte y Este presentan una pendiente positiva. Con lo que el análisis denota que la dirección de desplazamiento de esta estación tiende hacia el Nor-Este. El desplazamiento del parámetro Norte es el que más se ajusta a la recta de regresión. La coordenada Up presenta una tendencia lineal ascendente con su pendiente casi horizontal, lo que demuestra que el movimiento en este parámetro es mínimo. En cambio, en la serie de tiempo después del sismo **Figura 20**, se puede apreciar que el componente Norte y Este presentan una pendiente negativa. Con lo que se concluye que la dirección de desplazamiento tiende hacia el Nor-Oeste. El desplazamiento del parámetro Este es el que más se ajusta a la recta de regresión. La coordenada Up muestra un una tendencia lineal descendente con una pendiente negativa casi horizontal.



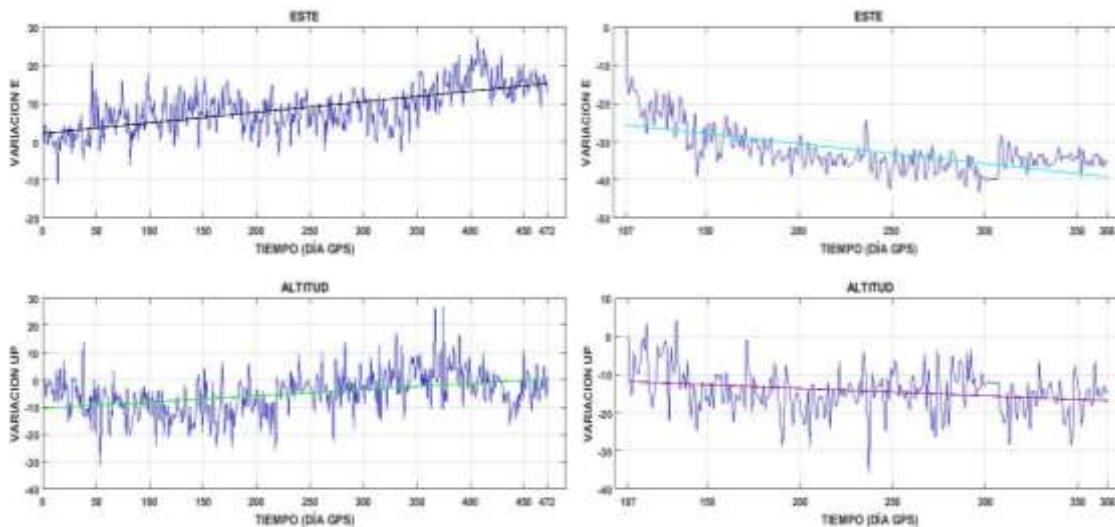


Figura 19: Serie Temporal estación LPEC antes y después del evento sísmico
Fuente y Elaboración: El Autor

3.1.2 Estación Esmeraldas (ESMR)

Los resultados obtenidos de la serie temporal para la estación ESMR, situada en la Provincia de Esmeraldas y Ciudad Esmeraldas indicadas en las **Figura 21**, se muestran en la **Tabla 3**.

Tabla 3: Resultados de la Estación ESMR

| Período | Norte (N) | | Este(E) | | Altura(Up) | |
|--------------------|------------------------|----------------|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|
| | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² |
| Antes (A) | $y = 0,0411x - 2,4655$ | 0,7278 | $y = 0,0425x + 3,5676$ | 0,6490 | $y = -0,0067x - 5,8897$ | 0,0137 |
| Después (D) | $y = 0,0311x - 23,790$ | 0,3382 | $y = -0,1102x - 33,577$ | 0,6873 | $y = 0,0528x - 28,589$ | 0,2757 |

Fuente y Elaboración: El Autor

En la **Figura 21**, en la serie de tiempo antes del sismo, se puede notar que el componente Norte y Este presentan una pendiente positiva. Con lo que el análisis denota que la dirección de desplazamiento de esta estación tiende hacia el Nor-Este. El desplazamiento del parámetro Norte es el que más se ajusta a la recta de regresión. La coordenada Up presenta una tendencia lineal descendente con su pendiente negativa. En cambio, en la serie de tiempo después del sismo **Figura 21**, se puede apreciar que el componente Norte presenta una pendiente positiva y el Este presentan una pendiente negativa. Con lo que se concluye que la dirección de desplazamiento tiende hacia el Nor-Oeste. El desplazamiento del parámetro Este es el que más se ajusta a la recta de regresión. La coordenada Up muestra una tendencia lineal ascendente con una pendiente casi horizontal.

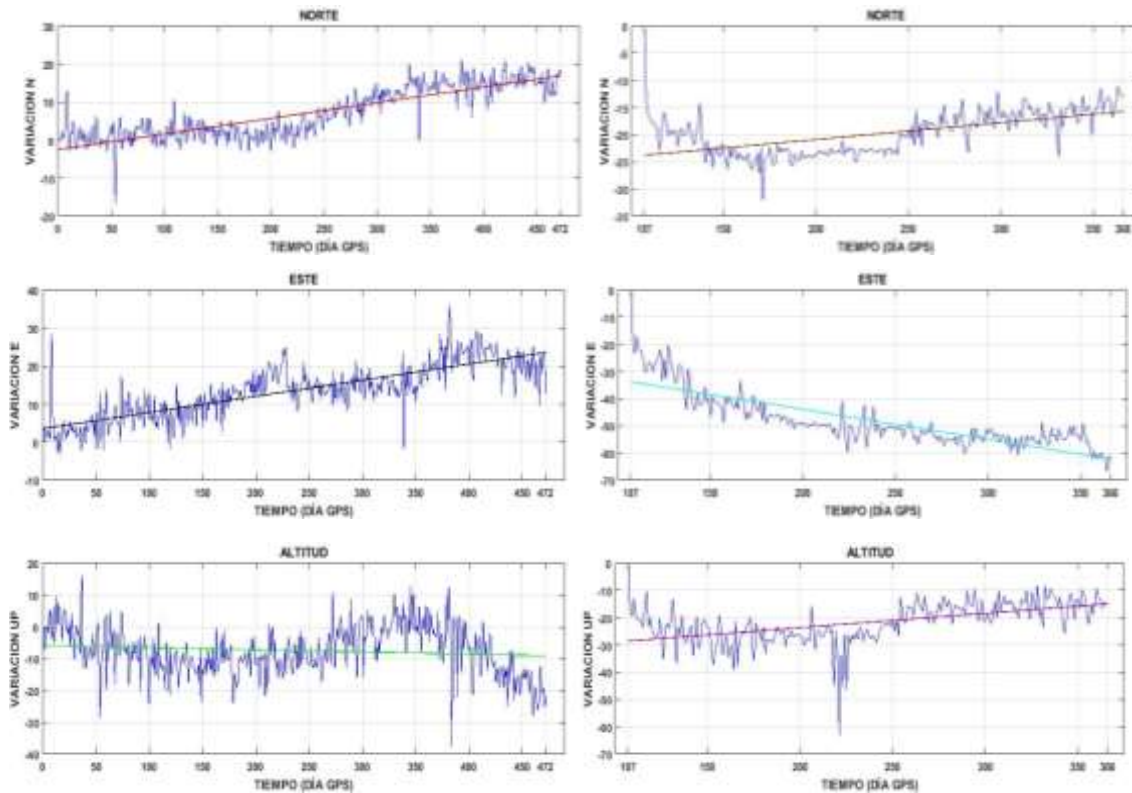


Figura 20: Serie Temporal estación ESMR antes y después del evento sísmico
Fuente y Elaboración: El Autor

3.1.3 Estación El Carmen (ECEC)

Los resultados obtenidos de la serie temporal para la estación ECEC, situada en la Provincia de Manabí y Ciudad El Carmen indicadas en las **Figura 22**, se muestran en la **Tabla 4**.

Tabla 4: Resultados de la Estación ECEC

| Período | Norte (N) | | Este(E) | | Altura(Up) | |
|--------------------|------------------------|----------------|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|
| | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² |
| Antes (A) | $y = 0,0377x - 9,7704$ | 0,6321 | $y = 0,0087x + 0,0462$ | 0,0452 | $y = -0,0104x - 13,621$ | 0,0470 |
| Después (D) | $y = 0,0854x + 49,746$ | 0,7309 | $y = -0,1998x - 224,30$ | 0,4585 | $y = -0,0395x - 30,332$ | 0,1620 |

Fuente y Elaboración: El Autor

En la **Figura 22**, en la serie de tiempo antes del sismo, se puede notar que el componente Norte y Este presentan una pendiente positiva. Con lo que el análisis denota que la dirección de desplazamiento de esta estación tiende hacia el Nor-Este. El desplazamiento del parámetro Norte es el que más se ajusta a la recta de regresión. La coordenada Up presenta una tendencia lineal descendente con su pendiente casi horizontal, lo que demuestra que el movimiento en este parámetro es mínimo. En cambio, en la serie de tiempo después del sismo **Figura 22**, se puede apreciar que el componente Norte presenta una pendiente positiva y el componente Este presentan una pendiente negativa. Con lo que se concluye que la dirección de desplazamiento tiende hacia el Nor-Oeste. El desplazamiento del parámetro Norte es el que más se ajusta a la recta de regresión. La coordenada Up muestra una tendencia lineal descendente con una pendiente negativa casi horizontal.

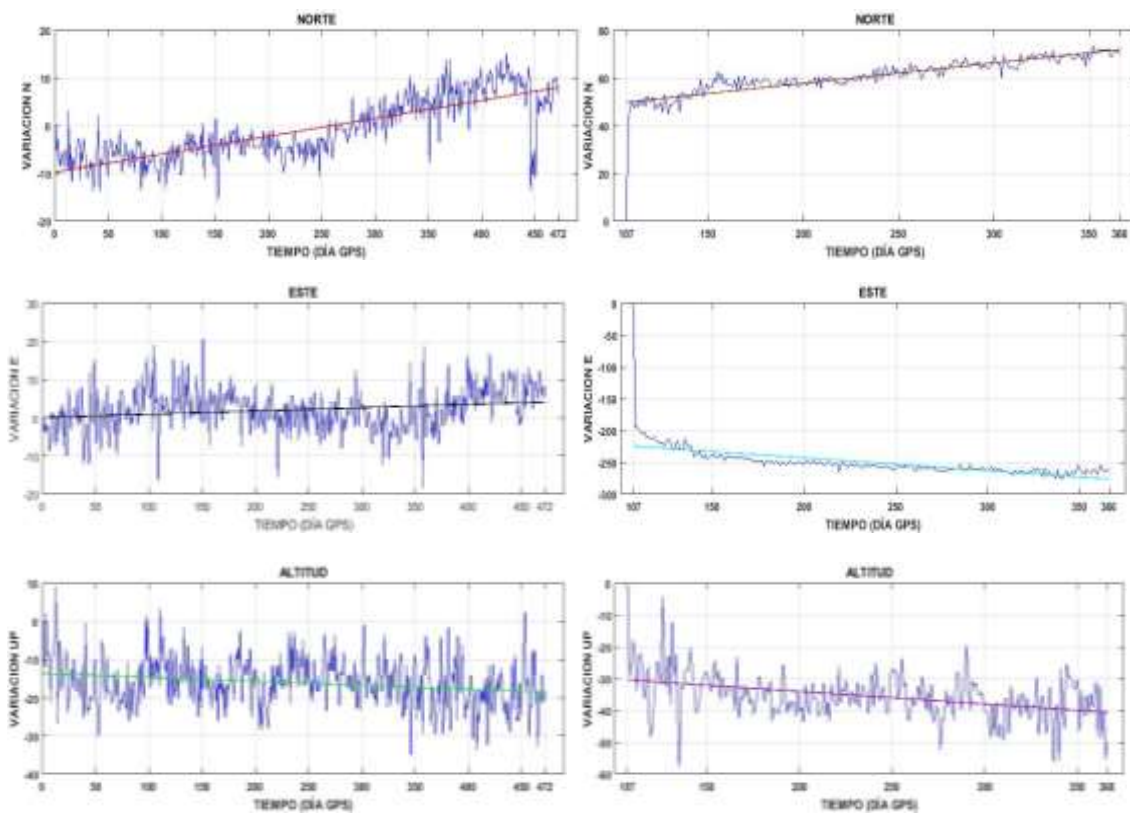


Figura 21: Serie Temporal estación ECEC antes y después del evento sísmico
Fuente y Elaboración: El Autor

3.1.4 Estación Chone (ONEC)

Tabla 5: Resultados de la Estación ONEC

| Período | Norte (N) | | Este(E) | | Altura(Up) | |
|-------------|------------------------|----------------|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|
| | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² |
| Antes (A) | $y = 0,0503x - 8,4403$ | 0,7931 | $y = 0,0200x + 3,433$ | 0,2228 | $y = 0,0291x - 13,970$ | 0,2344 |
| Después (D) | $y = 0,0070x + 5,9443$ | 0,0629 | $y = -0,0925x - 107,91$ | 0,3144 | $y = -0,0602x - 81,015$ | 0,2486 |

Fuente y Elaboración: El Autor

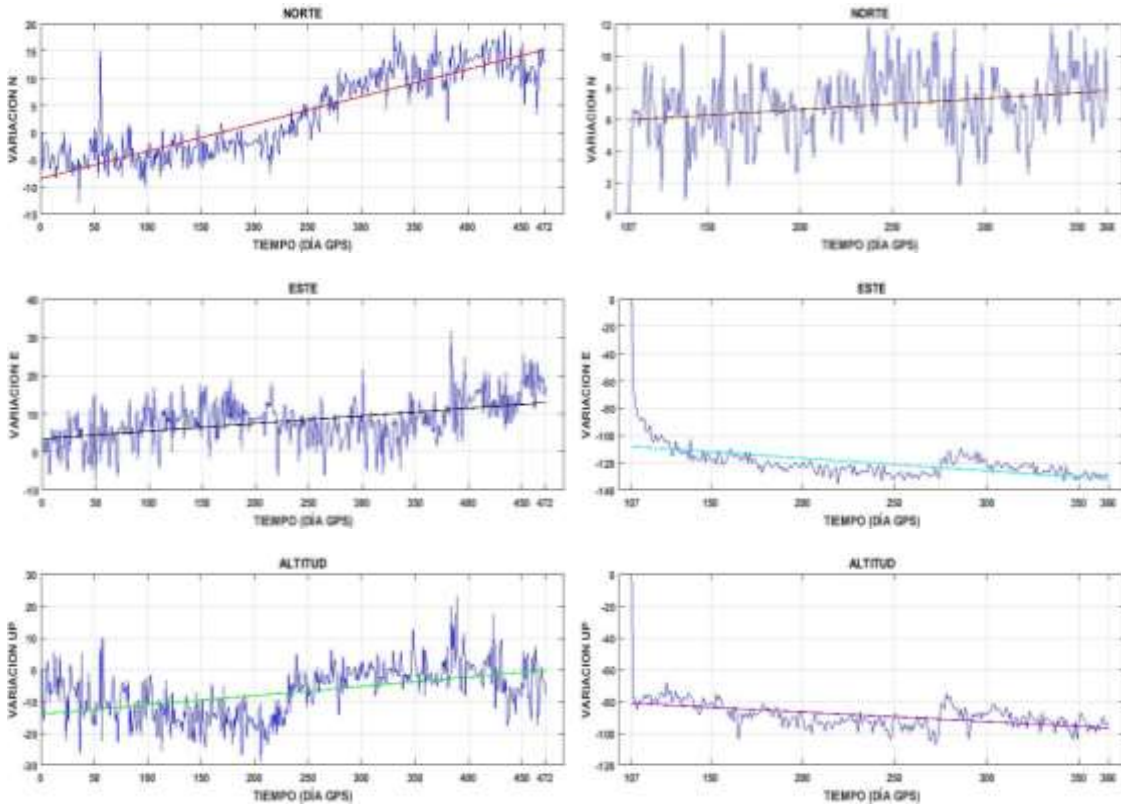


Figura 22: Serie Temporal estación ONEC antes y después del evento sísmico

Fuente y Elaboración: El Autor

3.1.5 Estación Pajan (PJEC)

Tabla 6: Resultados de la Estación PJEC

| Período | Norte (N) | | Este(E) | | Altura(Up) | |
|-------------|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|------------------------|----------------|
| | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² |
| Antes (A) | $y = 0,0376x + 1,5604$ | 0,7240 | $y = 0,0189x - 3,5779$ | 0,1866 | $y = 0,0237x - 10,327$ | 0,1781 |
| Después (D) | $y = -0,0118x - 14,893$ | 0,1129 | $y = -0,0347x - 23,812$ | 0,1871 | $y = 0,0125x - 7,4566$ | 0,0370 |

Fuente y Elaboración: El Autor

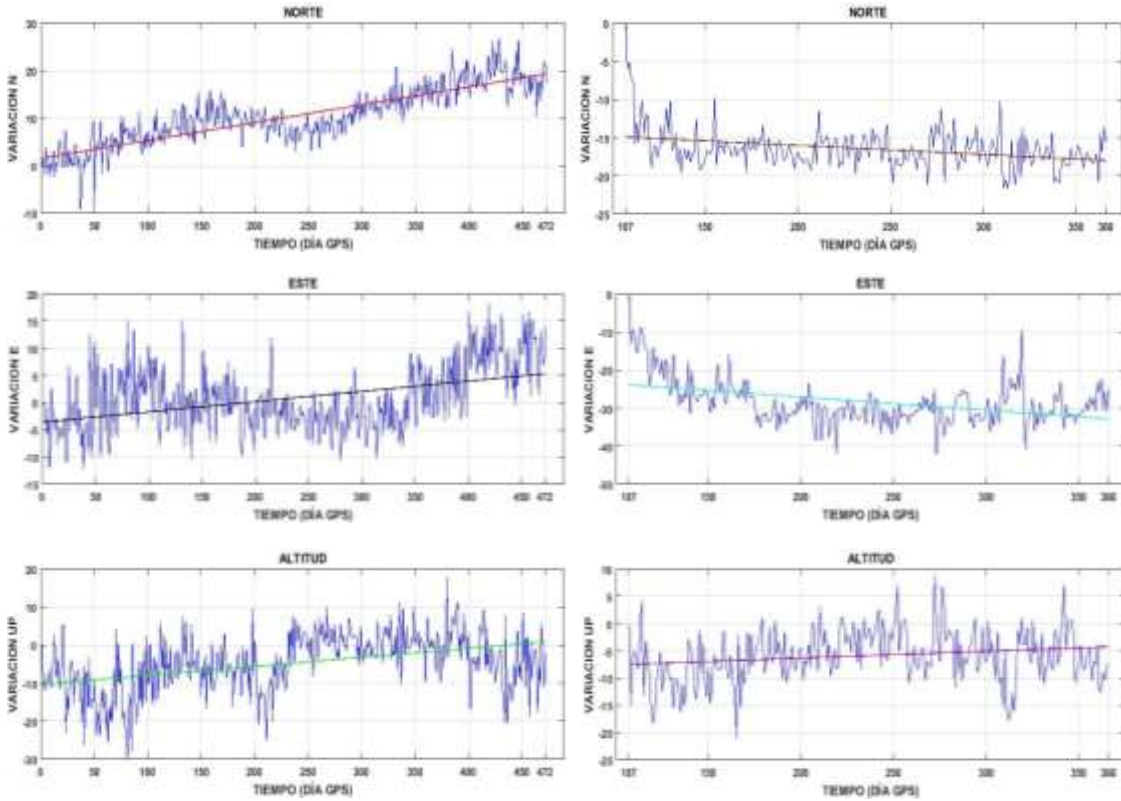


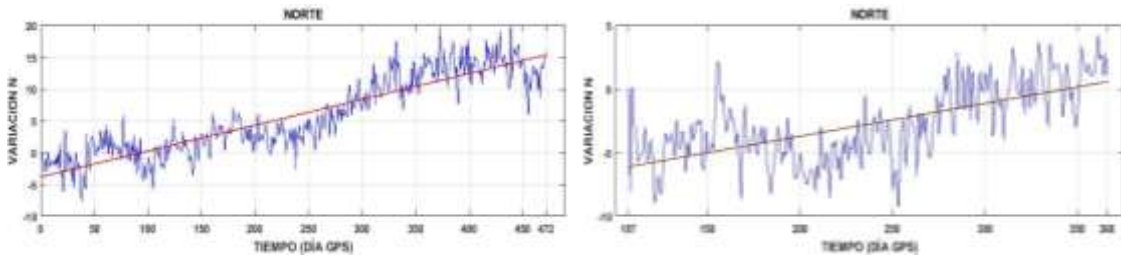
Figura 23: Serie Temporal estación PJEC antes y después del evento sísmico
Fuente y Elaboración: El Autor

3.1.6 Estación Santa Elena (SEEC)

Tabla 7: Resultados de la Estación SEEC

| Período | Norte (N) | | Este(E) | | Altura(Up) | |
|-------------|------------------------|----------------|-------------------------|----------------|------------------------|----------------|
| | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² |
| Antes (A) | $y = 0,0405x - 3,8307$ | 0,8127 | $y = 0,0129x - 0,0057$ | 0,1017 | $y = 0,0093x - 9,1123$ | 0,0627 |
| Después (D) | $y = 0,0258x - 6,1526$ | 0,4271 | $y = -0,0137x - 16,824$ | 0,0797 | $y = 0,025x - 11,258$ | 0,1329 |

Fuente y Elaboración: El Autor



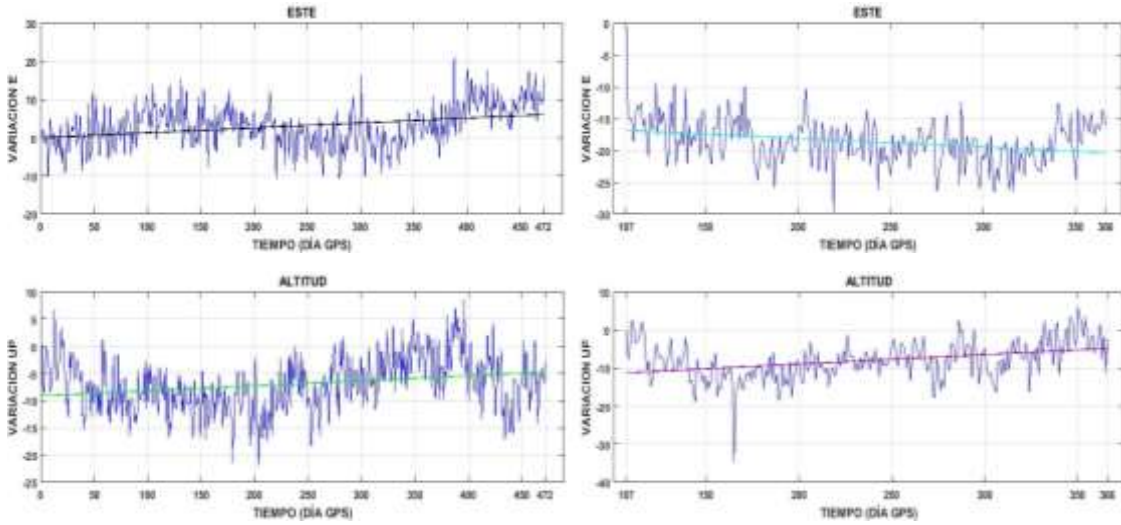


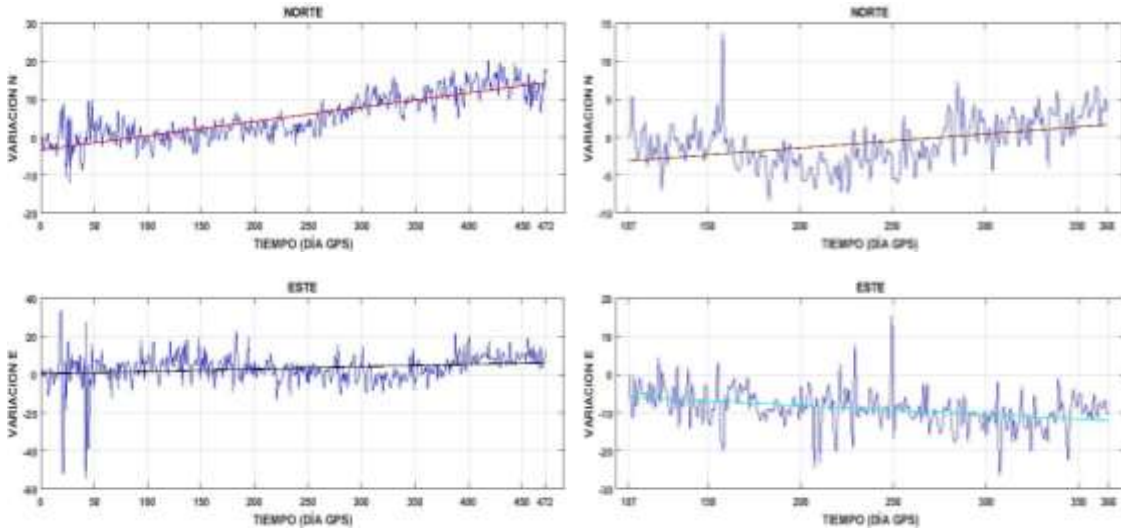
Figura 24: Serie Temporal estación SEEC antes y después del evento sísmico
Fuente y Elaboración: El Autor

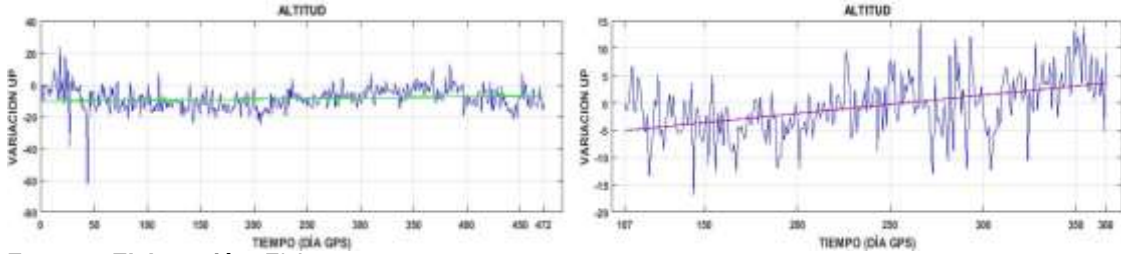
3.1.7 Estación Guayas (GUEC)

Tabla 8: Resultados de la Estación GUEC

| Período | Norte (N) | | Este(E) | | Altura(Up) | |
|-------------|------------------------|----------------|-------------------------|----------------|------------------------|----------------|
| | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² |
| Antes (A) | $y = 0,0376x - 3,3766$ | 0,7146 | $y = 0,0127x + 0,3653$ | 0,0441 | $y = 0,0068x - 10,23$ | 0,0164 |
| Después (D) | $y = 0,0183x - 3,1380$ | 0,1848 | $y = -0,0238x - 5,8596$ | 0,1211 | $y = 0,0336x - 5,0721$ | 0,2068 |

Fuente y Elaboración: El Autor





Fuente y Elaboración: El Autor

3.1.8 Estación Babahoyo (BHEC)

Tabla 9: Resultados de la Estación BHEC

| Período | Norte (N) | | Este(E) | | Altura(Up) | |
|-------------|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|
| | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² |
| Antes (A) | $y = 0,0527x - 3,1158$ | 0,7600 | $y = 0,0062x - 2,6729$ | 0,0157 | $y = -0,0338x + 1,1922$ | 0,3134 |
| Después (D) | $y = -0,0335x + 11,738$ | 0,3831 | $y = -0,0351x - 17,387$ | 0,2971 | $y = -0,0814x - 6,7558$ | 0,6221 |

Fuente y Elaboración: El Autor

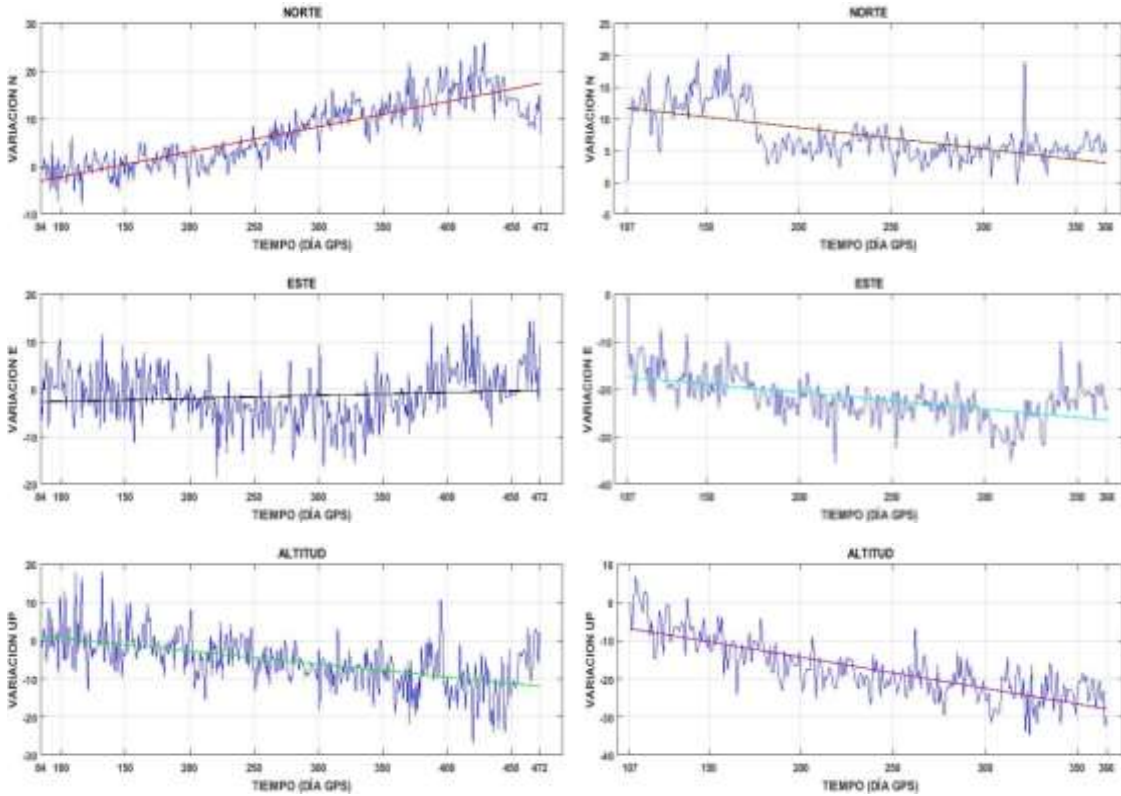


Figura 26: Serie Temporal estación BHEC antes y después del evento sísmico

Fuente y Elaboración: El Autor

3.1.9 Estación Alausí (ALEC)

Tabla 10: Resultados de la Estación ALEC

| Período | Norte (N) | | Este(E) | | Altura(Up) | |
|-------------|------------------------|----------------|-------------------------|----------------|------------------------|----------------|
| | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² |
| Antes (A) | $y = 0,0325x - 4,1336$ | 0,7633 | $y = -0,0025x - 3,8863$ | 0,0083 | $y = 0,0037x - 14,195$ | 0,0480 |
| Después (D) | $y = 0,0447x + 10,041$ | 0,6966 | $y = -0,0315x - 8,4107$ | 0,3274 | $y = 0,0500x - 0,1528$ | 0,2510 |

Fuente y Elaboración: El Autor

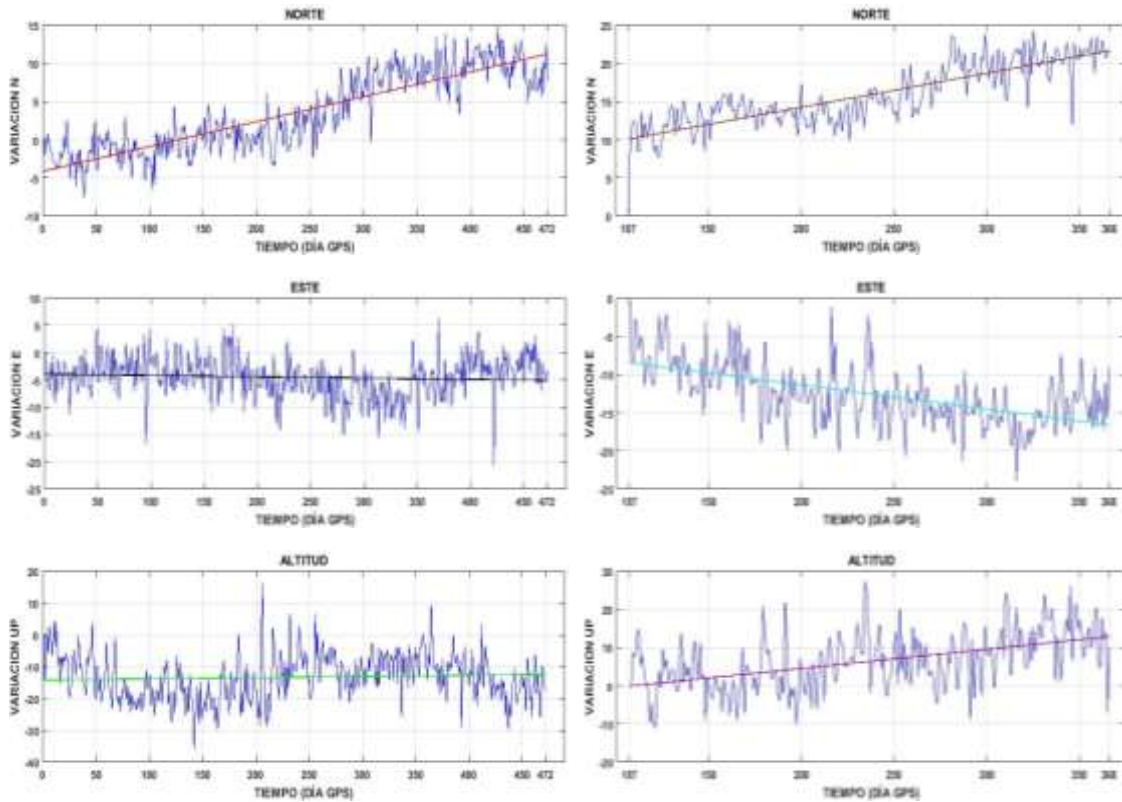


Figura 27: Serie Temporal estación ALEC antes y después del evento sísmico

Fuente y Elaboración: El Autor

3.1.10 Estación Riobamba (RIOP)

Tabla 11: Resultados de la Estación RIOP

| Período | Norte (N) | | Este(E) | | Altura(Up) | |
|-------------|------------------------|----------------|-------------------------|----------------|------------------------|----------------|
| | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² |
| Antes (A) | $y = 0,0415x - 0,0669$ | 0,7968 | $y = 0,0063x - 0,4399$ | 0,0786 | $y = 0,0308x + 5,3357$ | 0,3333 |
| Después (D) | $y = 0,0507x + 13,504$ | 0,8005 | $y = -0,0326x - 17,502$ | 0,4498 | $y = 0,0339x + 0,6543$ | 0,3280 |

Fuente y Elaboración: El Autor

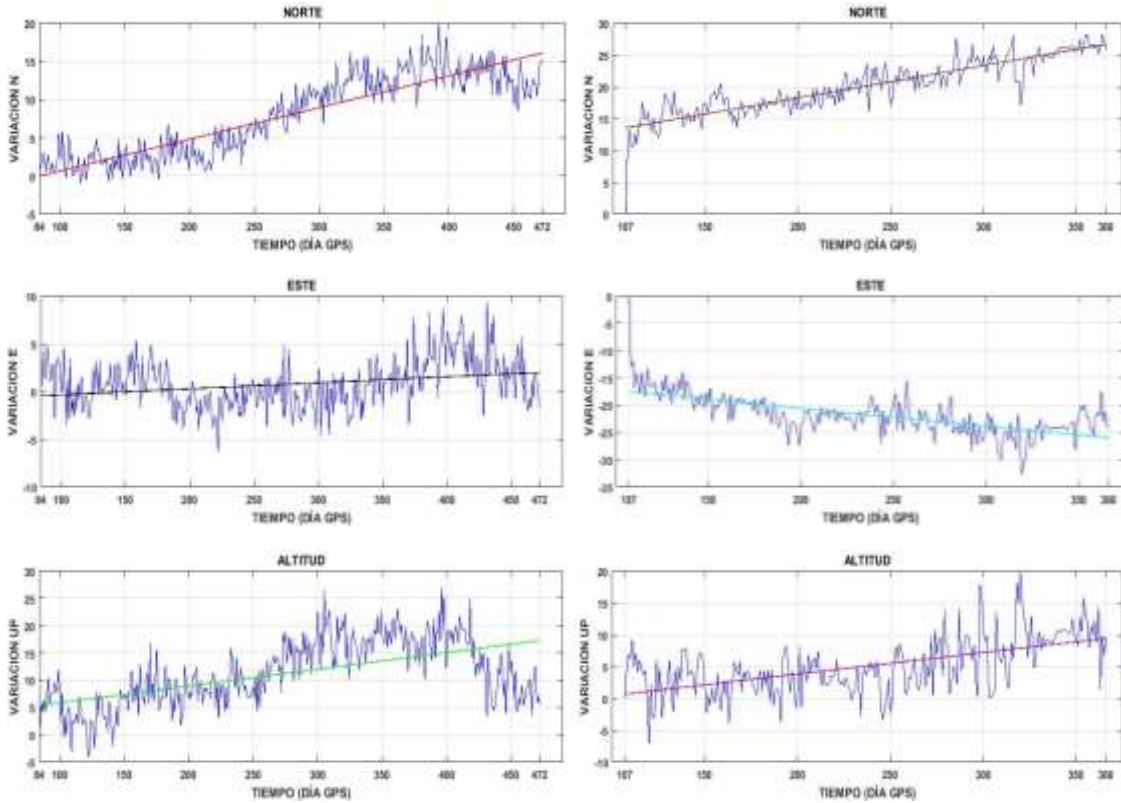


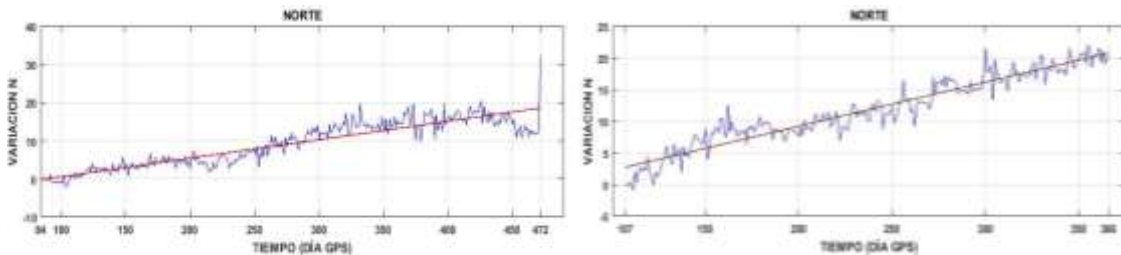
Figura 28: Serie Temporal estación RIOP antes y después del evento sísmico
Fuente y Elaboración: El Autor

3.1.11 Estación Ambato (ABEC)

Tabla 12: Resultados de la Estación ABEC

| Período | Norte (N) | | Este(E) | | Altura(Up) | |
|-------------|------------------------|----------------|-------------------------|----------------|------------------------|----------------|
| | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² |
| Antes (A) | $y = 0,0484x - 0,2394$ | 0,8405 | $y = -0,0067x - 0,8163$ | 0,0271 | $y = 0,0102x - 1,0565$ | 0,0512 |
| Después (D) | $y = 0,0695x + 2,6798$ | 0,9139 | $y = -0,0626x - 5,5113$ | 0,6385 | $y = 0,0281x - 9,1577$ | 0,2186 |

Fuente y Elaboración: El Autor



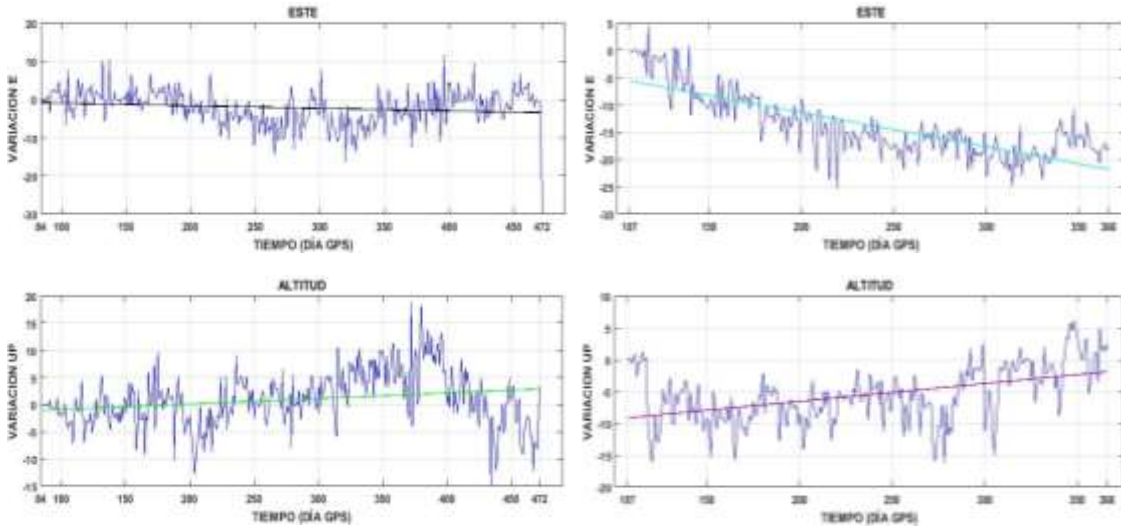


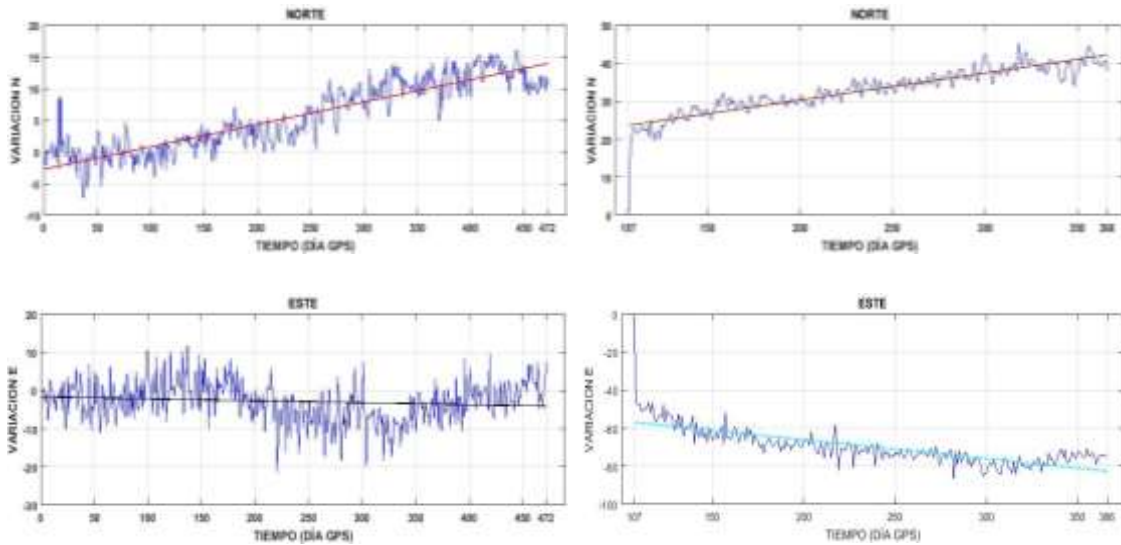
Figura 29: Serie Temporal estación ABEC antes y después del evento sísmico
Fuente y Elaboración: El Autor

3.1.12 Estación Cotopaxi (CXC)

Tabla 13: Resultados de la Estación CXC

| Período | Norte (N) | | Este(E) | | Altura(Up) | |
|--------------------|------------------------|----------------|-------------------------|----------------|------------------------|----------------|
| | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² |
| Antes (A) | $y = 0,0353x - 2,7349$ | 0,8088 | $y = -0,0051x - 1,6438$ | 0,0169 | $y = 0,0097x - 11,734$ | 0,0480 |
| Después (D) | $y = 0,0713x + 23,587$ | 0,8258 | $y = -0,0989x - 56,804$ | 0,6098 | $y = 0,034x - 13,986$ | 0,2057 |

Fuente y Elaboración: El Autor



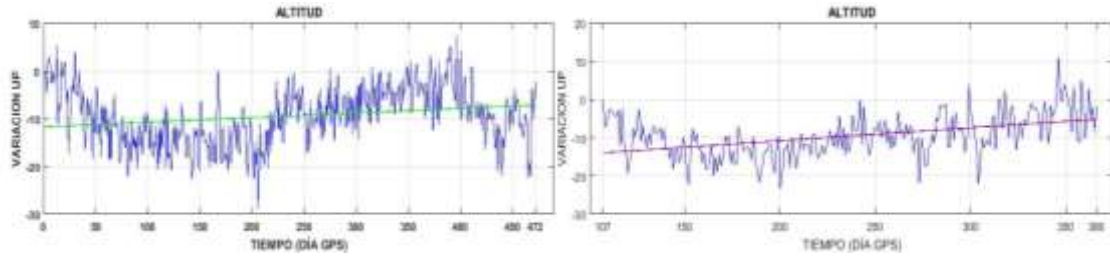


Figura 30: Serie Temporal estación CXEC antes y después del evento sísmico
Fuente y Elaboración: El Autor

3.1.13 Estación Espe (EPEC)

Tabla 14: Resultados de la Estación EPEC

| Período | Norte (N) | | Este(E) | | Altura(Up) | |
|-------------|------------------------|----------------|-------------------------|----------------|------------------------|----------------|
| | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² |
| Antes (A) | $y = 0,033x - 5,3488$ | 0,7916 | $y = 0,0086x + 0,3847$ | 0,0626 | $y = 0,0108x - 7,5559$ | 0,0530 |
| Después (D) | $y = 0,0524x + 7,6203$ | 0,7987 | $y = -0,1278x - 69,812$ | 0,6822 | $y = 0,0465x - 2,3758$ | 0,3155 |

Fuente y Elaboración: El Autor

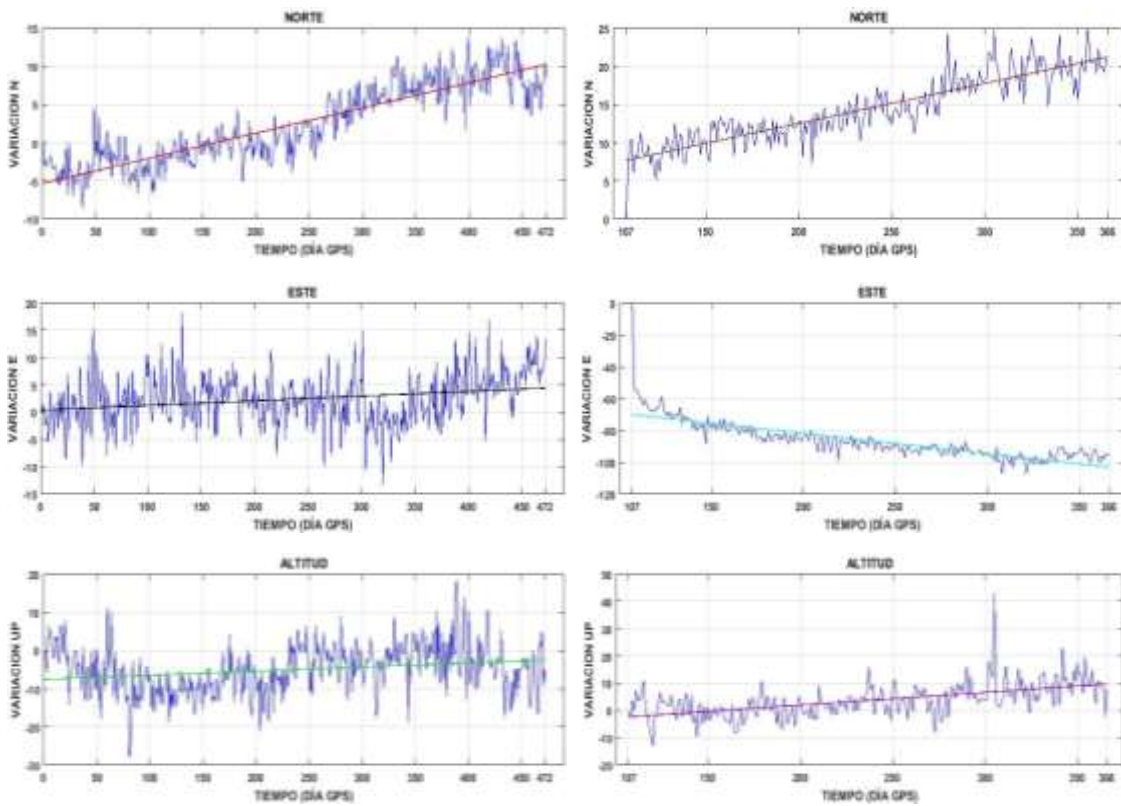


Figura 31: Serie Temporal estación EPEC antes y después del evento sísmico
Fuente y Elaboración: El Autor

3.1.14 Estación Carchi (COEC)

Tabla 15: Resultados de la Estación COEC

| Período | Norte (N) | | Este(E) | | Altura(Up) | |
|-------------|------------------------|----------------|-------------------------|----------------|------------------------|----------------|
| | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² |
| Antes (A) | $y = 0,0401x - 4,7245$ | 0,8572 | $y = 0,0046x - 5,8161$ | 0,0267 | $y = 0,0148x - 12,453$ | 0,1074 |
| Después (D) | $y = 0,0244x - 4,9434$ | 0,5168 | $y = -0,0464x - 19,278$ | 0,5145 | $y = 0,0445x - 0,9446$ | 0,3484 |

Fuente y Elaboración: El Autor

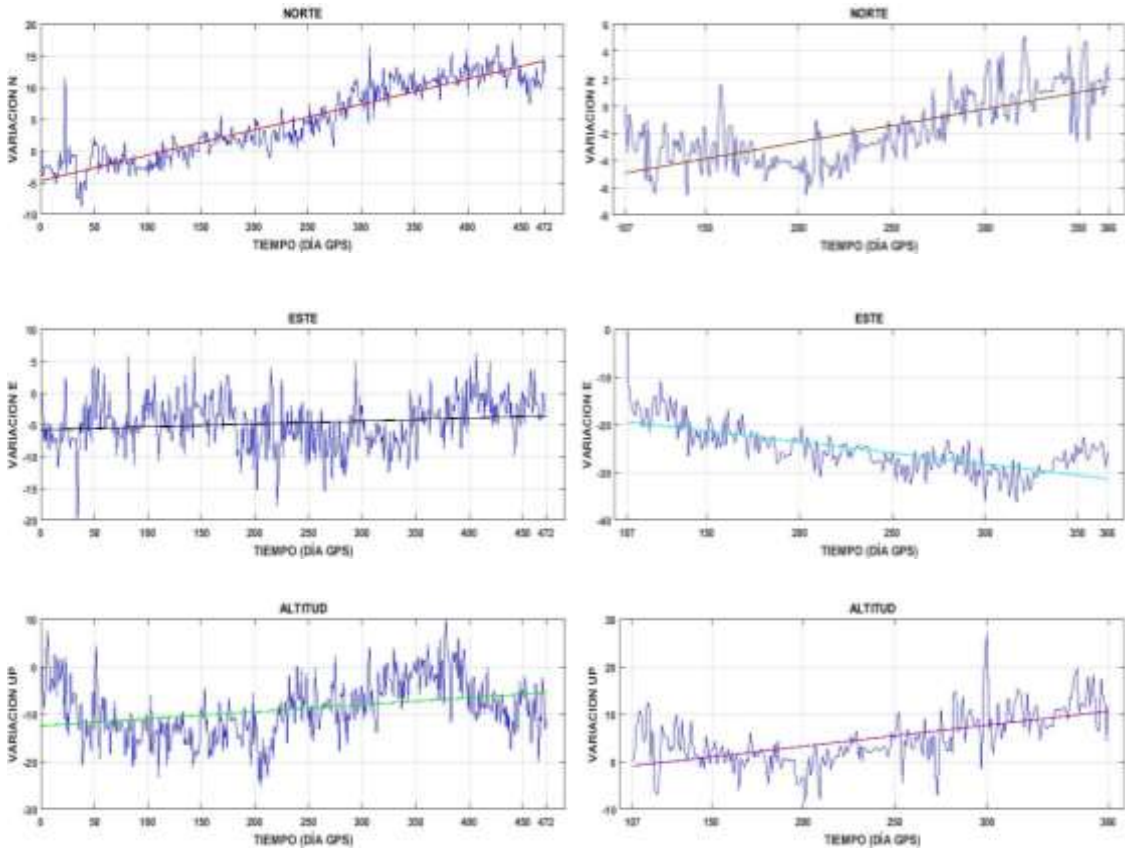


Figura 32: Serie Temporal estación COEC antes y después del evento sísmico

Fuente y Elaboración: El Autor

3.1.15 Estación San Cristóbal (SCEC)

Tabla 16: Resultados de la Estación SCEC

| Período | Norte (N) | | Este(E) | | Altura(Up) | |
|-------------|------------------------|----------------|------------------------|----------------|-------------------------|----------------|
| | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² | Modelo Estimado | R ² |
| Antes (A) | $y = 0,0349x + 1,045$ | 0,6171 | $y = 0,1423x + 0,1574$ | 0,8189 | $y = -0,0003x - 2,4813$ | 0,0020 |
| Después (D) | $y = 0,0361x - 5,7314$ | 0,6833 | $y = 0,1294x + 1,3243$ | 0,8970 | $y = -0,0062x - 2,1327$ | 0,0215 |

Fuente y Elaboración: El Autor

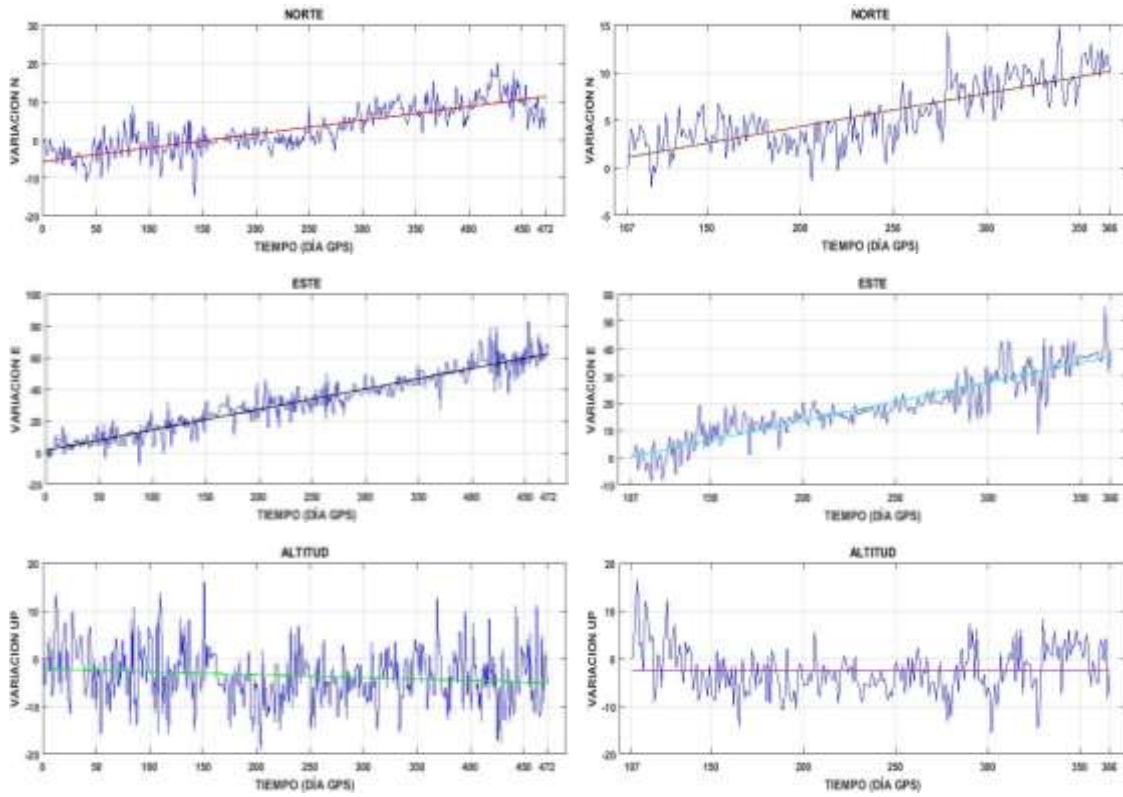


Figura 33: Serie Temporal estación SCEC antes y después del evento sísmico
Fuente y Elaboración: El Autor

La Tabla 17, 18 y 19. Presenta un resumen comparativo de los resultados determinando el comportamiento de las estaciones GNSS, antes y después del evento sísmico.

Tabla 17: Resultados del comportamiento matemático de las estaciones GNSS de la coordenada Norte, antes y después del evento sísmico

| Estación | Coordenada Norte (antes del sismo) | | | Coordenada Norte (después del sismo) | | |
|----------|------------------------------------|----------------|-----------|--------------------------------------|----------------|-----------|
| | MODELO ESTIMADO | R ² | V.N (m/a) | MODELO ESTIMADO | R ² | V.N (m/a) |
| ABEC | $y = 0,0484x - 0,2394$ | 0,841 | 0.0484 | $y = 0,0695x + 2,6798$ | 0.914 | 0.0695 |
| ALEC | $y = 0,0325x - 4,1336$ | 0,763 | 0.0325 | $y = 0,0447x + 10,041$ | 0.697 | 0.0447 |
| BHEC | $y = 0,0527x - 3,1158$ | 0,760 | 0.0527 | $y = -0,0335x + 11,738$ | 0.383 | -0.0335 |
| COEC | $y = 0,0401x - 4,7245$ | 0.857 | 0.0401 | $y = 0,0244x - 4,9434$ | 0.517 | 0.0244 |
| CXEC | $y = 0,0353x - 2,7349$ | 0.809 | 0.0353 | $y = 0,0713x + 23,587$ | 0.829 | 0.0713 |
| ECEC | $y = 0,0377x - 9,7704$ | 0.632 | 0.0377 | $y = 0,0854x + 49,746$ | 0.731 | 0.0854 |
| EPEC | $y = 0,0330x - 5,3488$ | 0.792 | 0.0330 | $y = 0,0524x + 7,6203$ | 0.799 | 0.0524 |
| ESMR | $y = 0,0411x - 2,4655$ | 0.728 | 0.0411 | $y = 0,0311x - 23,790$ | 0.338 | 0.0311 |
| GUEC | $y = 0,0376x - 3,3766$ | 0.715 | 0.0376 | $y = 0,0183x - 3,1380$ | 0.185 | 0.0183 |
| LPEC | $y = 0,0419x - 4,9221$ | 0.674 | 0.0419 | $y = -0,0077x - 14,275$ | 0.035 | -0.0077 |
| ONEC | $y = 0,0503x - 8,4403$ | 0.793 | 0.0503 | $y = 0,0070x + 5,9443$ | 0.063 | 0.0070 |
| PJEC | $y = 0,0376x + 1,5604$ | 0.724 | 0.0376 | $y = -0,0118x - 14,893$ | 0.113 | -0.0118 |
| RIOP | $y = 0,0415x - 0,0669$ | 0.797 | 0.0415 | $y = 0,0507x + 13,504$ | 0.801 | 0.0507 |
| SCEC | $y = 0,0349x + 1,045$ | 0.617 | 0.0349 | $y = 0,0361x - 5,7314$ | 0.683 | 0.0361 |
| SEEC | $y = 0,0405x - 3,8307$ | 0.813 | 0.0405 | $y = 0,0258x - 6,1526$ | 0.427 | 0.0258 |

Fuente y Elaboración: El Autor

Tabla 18: Resultados del comportamiento matemático de las estaciones GNSS de la coordenada Este, antes y después del evento sísmico

| Estación | Coordenada Este (antes del sismo) | | | Coordenada Este (después del sismo) | | |
|----------|-----------------------------------|----------------|-----------|-------------------------------------|----------------|-----------|
| | MODELO ESTIMADO | R ² | V.E (m/a) | MODELO ESTIMADO | R ² | V.E (m/a) |
| ABEC | $y = -0,0067x - 0,8163$ | 0,027 | -0.0067 | $y = -0,0626x - 5,5113$ | 0.639 | -0.0626 |
| ALEC | $y = -0,0025x - 3,8863$ | 0,008 | -0.0025 | $y = -0,0315x - 8,4107$ | 0.327 | -0.0315 |
| BHEC | $y = 0,0062x - 2,6729$ | 0,016 | 0.0062 | $y = -0,0351x - 17,387$ | 0.297 | -0.0351 |
| COEC | $y = 0,0046x - 5,8161$ | 0,027 | 0.0046 | $y = -0,0464x - 19,278$ | 0.515 | -0.0464 |
| CXEC | $y = -0,0051x - 1,6438$ | 0,017 | -0.0051 | $y = -0,0989x - 56,804$ | 0.610 | -0.0989 |
| ECEC | $y = 0,0087x + 0,0462$ | 0,045 | 0.0087 | $y = -0,1998x - 224,30$ | 0.459 | -0.1998 |
| EPEC | $y = 0,0086x + 0,3847$ | 0,063 | 0.0086 | $y = -0,1278x - 69,812$ | 0.682 | -0.1278 |
| ESMR | $y = 0,0425x + 3,5676$ | 0,649 | 0.0425 | $y = -0,1102x - 33,577$ | 0.687 | -0.1102 |
| GUEC | $y = 0,0127x + 0,3653$ | 0,044 | 0.0127 | $y = -0,0238x - 5,8596$ | 0.121 | -0.0238 |
| LPEC | $y = 0,0276x + 2,1868$ | 0,400 | 0.0276 | $y = -0,0522x - 25,596$ | 0.426 | -0.0522 |
| ONEC | $y = 0,0200x + 3,4330$ | 0,223 | 0.0200 | $y = -0,0925x - 107,91$ | 0.314 | -0.0925 |
| PJEC | $y = 0,0189x - 3,5779$ | 0,187 | 0.0189 | $y = -0,0347x - 23,812$ | 0.187 | -0.0347 |
| RIOP | $y = 0,0063x - 0,4399$ | 0,079 | 0.0063 | $y = -0,0326x - 17,502$ | 0.450 | -0.0326 |
| SCEC | $y = 0,1423x + 0,1574$ | 0,819 | 0.1523 | $y = 0,1294x + 1,3243$ | 0.900 | 0.1294 |
| SEEC | $y = 0,0129x - 0,0057$ | 0,102 | 0.0129 | $y = -0,0137x - 16,824$ | 0.080 | -0.0137 |

Fuente y Elaboración: El Autor

Tabla 19: Resultados del comportamiento matemático de las estaciones GNSS de la coordenada Up, antes y después del evento sísmico

| Estación | Coordenada Up (antes del sismo) | | | Coordenada Up (después del sismo) | | |
|----------|---------------------------------|----------------|------------|-----------------------------------|----------------|------------|
| | MODELO ESTIMADO | R ² | V.Up (m/a) | MODELO ESTIMADO | R ² | V.Up (m/a) |
| ABEC | $y = 0,0102x - 1,0565$ | 0.051 | 0.0102 | $y = 0,0281x - 9,1577$ | 0.219 | 0.0281 |
| ALEC | $y = 0,0037x - 14,195$ | 0.050 | 0.0037 | $y = 0,0500x - 0,1528$ | 0.251 | 0.0500 |
| BHEC | $y = -0,0338x + 1,192$ | 0.313 | -0.0338 | $y = -0,0814x - 6,7558$ | 0.622 | -0.0814 |
| COEC | $y = 0,0148x - 12,453$ | 0.107 | 0.0148 | $y = 0,0445x - 0,9446$ | 0.348 | 0.0445 |
| CXEC | $y = 0,0097x - 11,734$ | 0.048 | 0.0097 | $y = 0,0340x - 13,986$ | 0.206 | 0.0340 |
| ECEC | $y = -0,0104x - 13,621$ | 0.047 | -0.0104 | $y = -0,0395x - 30,332$ | 0.162 | -0.0395 |
| EPEC | $y = 0,0108x - 7,5559$ | 0.053 | 0.0108 | $y = 0,0465x - 2,3758$ | 0.316 | 0.0465 |
| ESMR | $y = -0,0067x - 5,8897$ | 0.013 | -0.0067 | $y = 0,0528x - 28,589$ | 0.276 | 0.0528 |
| GUEC | $y = 0,0068x - 10,230$ | 0.016 | 0.0068 | $y = 0,0336x - 5,0721$ | 0.207 | 0.0336 |
| LPEC | $y = 0,0229x - 10,372$ | 0.160 | 0.0229 | $y = -0,0194x - 11,805$ | 0.062 | -0.0194 |
| ONEC | $y = 0,0291x - 13,970$ | 0.234 | 0.0291 | $y = -0,0602x - 81,015$ | 0.249 | -0.0602 |
| PJEC | $y = 0,0237x - 10,327$ | 0.178 | 0.0237 | $y = 0,0125x - 7,4566$ | 0.037 | 0.0125 |
| RIOP | $y = 0,0308x + 5,3357$ | 0.333 | 0.0308 | $y = 0,0339x + 0,6543$ | 0.328 | 0.0339 |
| SCEC | $y = -0,0003x - 2,4813$ | 0.002 | -0.0003 | $y = -0,0062x - 2,1327$ | 0.022 | -0.0062 |
| SEEC | $y = 0,0093x - 9,1123$ | 0.063 | 0.0093 | $y = 0,025x - 11,258$ | 0.133 | 0.0250 |

Fuente y Elaboración: El Autor

3.2 Mapeo de Resultados en GMT

Una vez obtenidos los resultados de velocidades se procede a graficar los vectores de desplazamiento de cada estación para cada una de sus componentes antes y después del sismo.

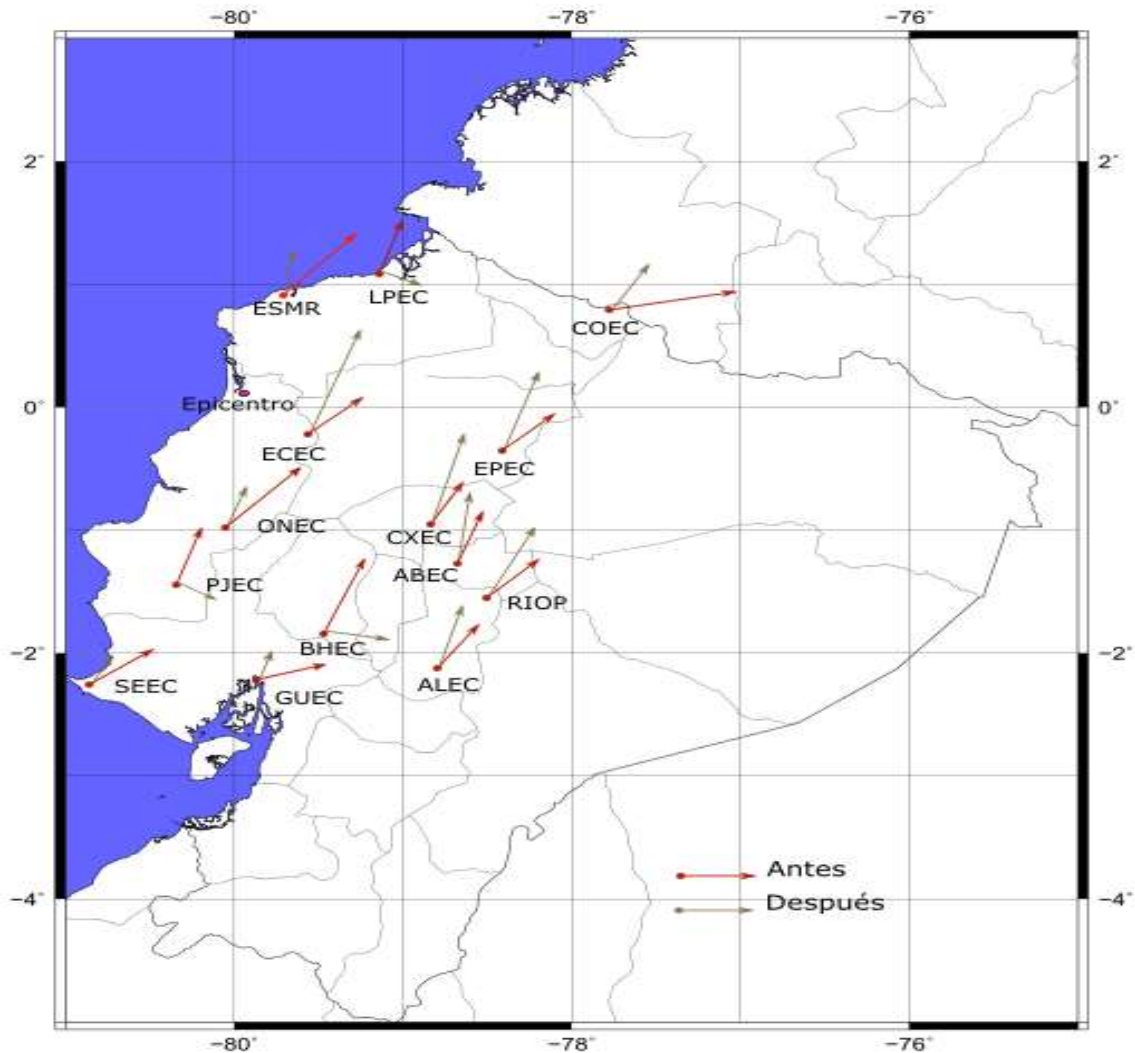


Figura 34: Resultados de las velocidades de desplazamiento de la componente Norte, antes y después del sismo

Fuente y Elaboración: El Autor

La **Figura 34**, muestra los vectores de desplazamiento de la componente Norte de cada estación antes y después del sismo. Se puede observar en el mapa que la dirección de desplazamiento antes del evento sísmico se mantiene constante en cada una de las estaciones con una dirección de desplazamiento Nor-Este la cual se representa con una

flecha de color rojo. La mayor velocidad de desplazamiento antes del evento sísmico se localiza en la estación BHEC con un valor de 0.0527 m/año y la mínima velocidad se encuentra en la estación ALEC con un valor de 0.0325 m/año .Después del sismo, se visualiza que los vectores de desplazamiento generan un movimiento Sur-Este en las estaciones LPEC, PJEC y BHEC, mientras que, las demás estaciones conservan la dirección de desplazamiento Nor-Este la cual se representa con una flecha de color café. La mayor velocidad de desplazamiento después del evento sísmico se localiza en la estación ECEC con un valor de 0.0854 m/año y la mínima velocidad se encuentra en la estación ONEC con un valor de 0.0077 m/año.



Figura 35: Resultados de las velocidades de desplazamiento de la componente Norte de la estación SCEC, antes y después del sismo

Fuente y Elaboración: El Autor

En la **Figura 35**, se puede visualizar que la estación SCEC presenta una dirección de desplazamiento Nor-Este antes y después del evento sísmico.

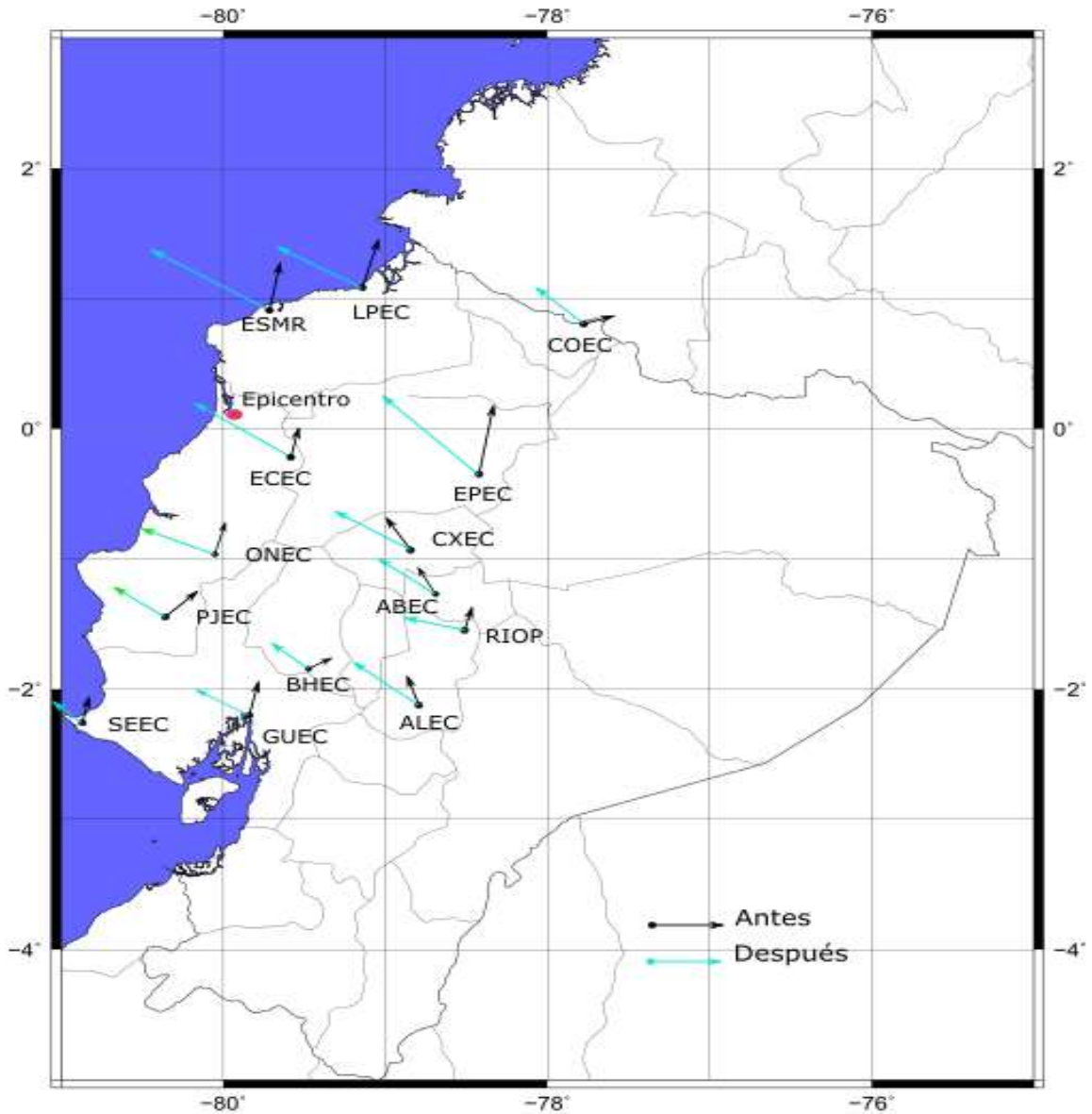


Figura 36: Resultados de las velocidades de desplazamiento de la componente Este, antes y después del sismo

Fuente y Elaboración: El Autor

La **Figura 36**, muestra los vectores de desplazamiento de la componente Este de cada estación antes y después del sismo. Se puede observar en el mapa que la dirección de desplazamiento antes del evento sísmico tiende hacia el Nor-Este, a excepción de la estación ALEC, ABEC y CXEC que presenta una dirección de desplazamiento Nor-Oeste, la cual se representa con una flecha de color negro. La mínima velocidad se encuentra en la estación ALEC con un valor de 0.0025 m/año. Después del sismo, se visualiza que

los vectores de desplazamiento de las estaciones generan un movimiento Nor-Oeste la cual se representa con una flecha de color celeste. La mínima velocidad se encuentra en la estación SEEC con un valor de 0.0137 m/año.

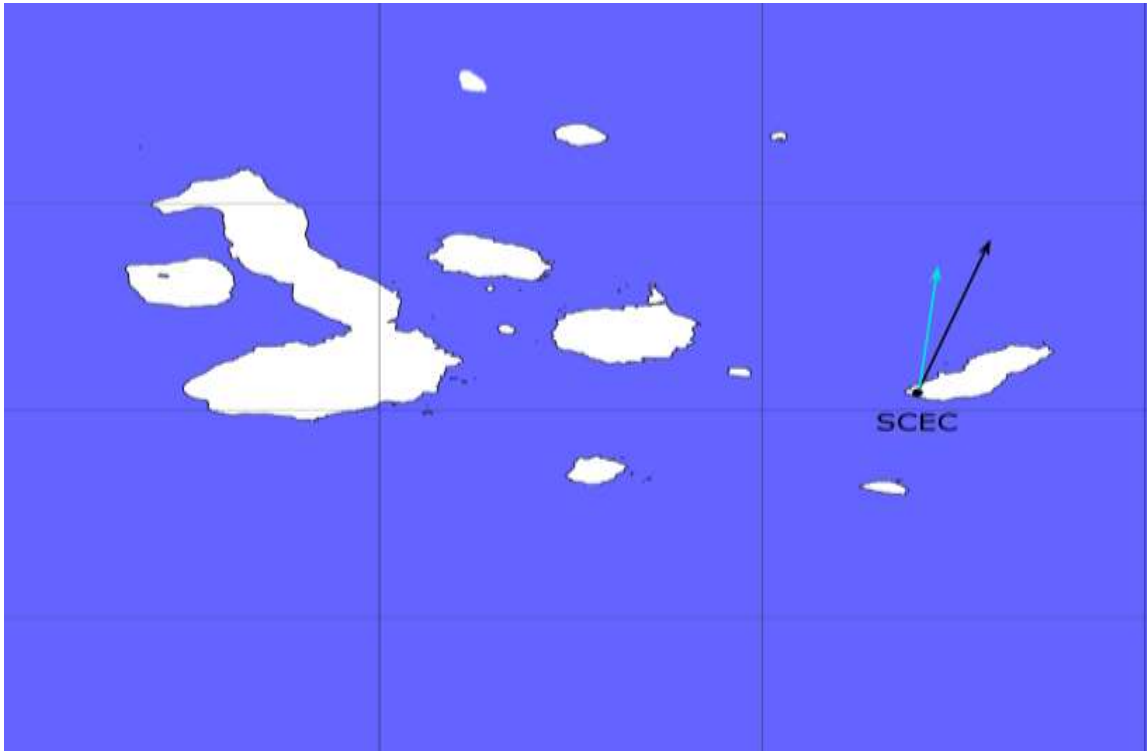


Figura 37: Resultados de las velocidades de desplazamiento de la componente Este de la estación SEEC, antes y después del sismo

Fuente y Elaboración: El Autor

En la **Figura 37**, se puede visualizar que la estación SEEC presenta una dirección de desplazamiento Nor-Este antes y después del evento sísmico. La mayor velocidad de desplazamiento antes y después del evento sísmico se localiza en la estación SEEC con un valor de 0.1523 y 0.1294 m/año respectivamente.

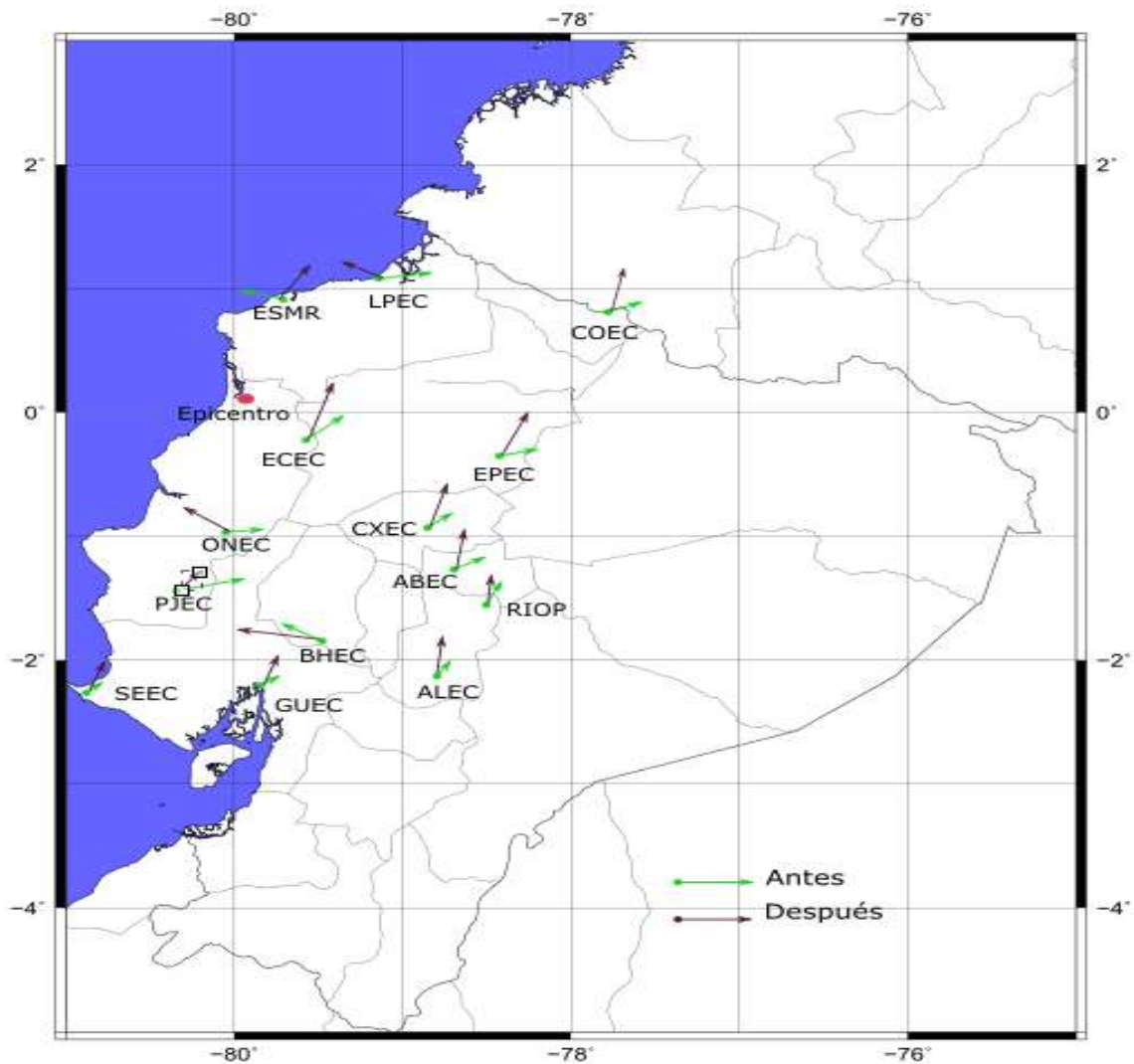


Figura 38: Resultados de las velocidades de desplazamiento de la componente Up, antes y después del sismo

Fuente y Elaboración: El Autor

La **Figura 38**, muestra los vectores de desplazamiento de la componente Norte de cada estación antes y después del sismo. Se puede observar en el mapa que la dirección de desplazamiento antes del evento tiende hacia el Nor-Este, a excepción de la estación ESMR Y BHEC que presenta una dirección de desplazamiento Nor-Oeste la cual se representa con una flecha de color verde. La mayor velocidad de desplazamiento antes del evento sísmico se localiza en la estación BHEC con un valor de 0.0338 m/año. Después del sismo, se visualiza que los vectores de desplazamiento generan un movimiento Nor-Este, a excepción de las estaciones LPEC, BHEC y ONEC que presentan la dirección de desplazamiento Nor-Oeste la cual se representa con una flecha de color

morado. La mayor velocidad de desplazamiento después del evento sísmico se localiza en la estación BHEC con un valor de 0.0814 m/año.



Figura 39: Resultados de las velocidades de desplazamiento de la componente Up de la estación SCEC, antes y después del sismo

Fuente y Elaboración: El Autor

En la **Figura 39**, se puede visualizar que la estación SCEC presenta una dirección de desplazamiento Nor-Oeste antes y después del evento sísmico. La mínima velocidad de desplazamiento antes y después del evento sísmico se localiza en la estación SCEC con un valor de 0.0003 y 0.0062 m/año respectivamente.

CONCLUSIONES.

- La obtención de las series temporales de las coordenadas de posicionamiento GNSS, permite reconocer gráficamente distintos indicadores para ser analizados y así obtener un modelo estadístico que mejor se ajuste a ella, con la mayor exactitud posible para el cálculo de los desplazamientos.
- Los desplazamientos de las estaciones GNSS obtenidos antes del evento sísmico con coordenadas diarias RINEX para la componente Norte son constante en cada una de las estaciones con una dirección de desplazamiento Nor-Este, presentan una velocidad que va desde 0.0527 m/año como máxima de la estación BHEC a 0.0325 m/año como mínimo de la estación ALEC.
- Los desplazamientos de las estaciones GNSS obtenidos antes del evento sísmico con coordenadas diarias RINEX para la componente Este presentan una tendencia de dirección de desplazamiento Nor-Este, a excepción de las estaciones ALEC, ABEC y CXEC que presenta una dirección de desplazamiento Nor-Oeste, presentan una velocidad que va desde 0.1523 m/año como máxima de la estación SCEC a 0.0025 m/año como mínimo de la estación ALEC.
- Los desplazamientos de las estaciones GNSS obtenidos antes del evento sísmico con coordenadas diarias RINEX para la componente Up presentan una tendencia de dirección de desplazamiento Nor-Este, a excepción de las estaciones ESMR Y BHEC que presenta una dirección de desplazamiento Nor-Oeste, presentan una velocidad que va desde 0.0338 m/año como máxima de la estación BHEC a 0.0003 m/año como mínimo de la estación SCEC.
- Los desplazamientos de las estaciones GNSS obtenidos después del evento sísmico con coordenadas diarias RINEX para la componente Norte presentan una tendencia de dirección de desplazamiento Nor-Este, a excepción de las estaciones ALEC, ABEC y CXEC que presenta una dirección de desplazamiento Sur-Este, presentan una velocidad que va desde 0.0854 m/año como máxima de la estación ECEC a 0.0070 m/año como mínimo de la estación ONEC.
- Los desplazamientos de las estaciones GNSS obtenidos después del evento sísmico con coordenadas diarias RINEX para la componente Este son constante en cada una de las estaciones con una dirección de desplazamiento Nor-Oeste,

- presentan una velocidad que va desde 0.1294 m/año como máxima de la estación SCEC a 0.0137 m/año como mínimo de la estación SEEC.
- Los desplazamientos de las estaciones GNSS obtenidos antes del evento sísmico con coordenadas diarias RINEX para la componente Up presentan una tendencia de dirección de desplazamiento Nor-Este, a excepción de las estaciones LPEC, BHEC y ONEC que presentan la dirección de desplazamiento Nor-Oeste, presentan una velocidad que va desde 0.0814 m/año como máxima de la estación BHEC a 0.0062 m/año como mínimo de la estación SCEC
 - Las series de tiempo adquiridas demuestran que la metodología empleada ha sido la adecuada ya que se adapta a los datos con los que se está operando.
 - En la ingeniería civil la determinación de las velocidades de desplazamiento de las redes de monitoreo continuo abre un sin número de campos de investigación, como la determinación de movimientos en edificaciones y su incidencia en el comportamiento de las estructuras, la determinación del movimiento de laderas, actualización del catastro de las ciudades, entre otros.

RECOMENDACIONES.

- Con el propósito de conseguir una mayor precisión en los resultados, se debe conseguir descargar la mayor cantidad de datos disponibles para crear modelos que determine resultados más exactos.
- Es necesario realizar este tipo de investigaciones para eventos sísmicos de la magnitud del ocurrido en Pedernales, Ecuador o mayores al estudiado.
- Buscar soluciones a la falta de datos RINEX por mantenimiento de las estaciones GNSS o por falta de satélites en la observación del posicionamiento GPS, por medio del herramientas estadísticas, en miras a obtener magnitudes y direcciones que se ajusten de mejor manera al modelo real.
- Examinar las variaciones presentes entre los periodos de observación diferentes, con el fin de conseguir en el análisis una mayor precisión en el cálculo de velocidades de desplazamiento.

BIBLIOGRAFÍA.

- Berné Valero, J. L., Anquela Julián , A. B., & Garrido Villen, N. (2014). *GNSS. GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática*. València: Universidad Politécnica de València.
- Bravo , E., León , F., Montenegro, P., & Albán, M. (s.f.). *RED GNSS DE MONITOREO CONTINUO DEL ECUADOR – REGME*. Obtenido de <http://www.geoportaligm.gob.ec/wordpress/>
- Cantos Figuerola, J. (1987). *Geofísica Aplicada*. Madrid: CIENCIA 3 DISTRIBUCION, S.A.
- Cisneros, D. (2014). *Procesamiento Científico Ecuatoriano de datos GPS generados por estaciones permanentes ubicadas en países de la región SIRGAS*. Quito: IGM.
- Eduardo, H., Aldo, M., & Gustavo, N. (2005). GPS: Posicionamiento satelital.
- Furones, Á. M. (2011). *SISTEMA Y MARCO DE REFERENCIA TERRESTRE. SISTEMAS DE COORDENADAS*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- García Díaz, J. C. (2016). Predicción en el dominio del tiempo. Análisis de series temporales para ingenieros. Universitat Politècnica de Valencia .
- Gurtner, W., & Estey, L. (2007). "RINEX: El Formato Receptor Cambio Independiente".
- IGM. (20 de 01 de 2018). *Instituto Geográfico Militar* . Obtenido de <http://www.geoportaligm.gob.ec/wordpress/>
- Instituto Geofísico, E. P. (2016). *Informe Sísmico Especial N.13*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2012). *Procesamiento de Datos GPS Considerando Deformaciones del Marco Geodésico en el Tiempo*. México, DF.: Dirección General de Geografía y Medio Ambiente.
- Ivars, L. (2013). *Café Geodésico*. Obtenido de <http://cafegeodesico.blogspot.com/2013/07/el-posicionamiento-puntual-preciso-ppp.html>.

- Lizarazo, S. C., Páez, H. M., & Santa, L. F. (2014). Análisis de tendencias de movimiento de estaciones GNSS/GPS mediante series de tiempo geodésicas en Colombia, 2008-2011. *UD y la geomática*, (7), 41-51.
- Natural Resources Canada. (16 de Agosto de 2017). Obtenido de <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/geodetic-reference-systems/tools-applications/10925#ppp>.
- MARIN, J. M. (2004). *Series Temporales*. Madrid: UC3M.
- MATEO, M. L. (2011). *Determinación precisa de velocidades en las estaciones GNSS de medición continua de América Latina*. Cuyo: Universidad Nacional del Cuyo.
- Sánchez, F. V. (1994). Los terremotos y sus causas. In *El estudio de los terremotos en Almería* (pp. 17-38). Instituto de Estudios Almerienses.
- Sarachaga, M. H. (1997). *Conceptos básicos de sismología para ingenieros* (Primera ed.). Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería - CISMID.
- Sarria Molina, A. (1990). *Ingeniería Sísmica*. Santa Fe: Presencia.
- Sarría, F. A. (13 de Febrero de 2006). *Cómo hacer mapas con GMT*. Obtenido de <http://www.um.es/geograf/sigmur/GMTtuthtml/index.html>
- Sevilla de Lerma, M. J. (2015). *Análisis de series temporales en estaciones permanentes gps* (Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid).
- TAYLOR, J. R. (1997). *An Introduction to Error Analysis*. 55D Gate Five Road: University Science Books.
- Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física*. Madrid: Pearson.
- Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2013). *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física*. Madrid: Pearson.
- The Canadian Spatial Reference System (CSRS) Precise Point Positioning*. (s.f.). Obtenido de <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/account-compte/login.php>
- Visor de la Red GNSS del Ecuador*. (s.f.). Obtenido de http://www.geoportaligm.gob.ec/visor_regme/
- WOLF, P. R., & GHILANI, C. D. (2010). *Topografía*. DF: Alfaomega Grupo Editorial.

ANEXOS

5.1. Anexo 1: Códigos utilizados en Matlab

```
%UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
%CURSO BÁSICO DE MATLAB
%FECHA: 7 DE OCTUBRE DE 2016

%DESCRIPCIÓN:
%El sistema GNSS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM)
proporciona
%información precisa (5 ppm) de las coordenadas geocéntricas
(x,y,z) de la
%posición que tiene una estación permanente en el dominio
tiempo. En la carpeta
%AUCA_2013 se adjunta archivos .SUM que corresponden a la
información diaria, (i=1:366),
%de la estación AUCA para el año 2013.

%De toda la información proporcionada en los archivo .SUM,
es necesaria para este ejemplo,
%solamente la información correspondiente a el numeral 3.3
del archivo .SUM.
%Con el objetivo de no "abrir" cada archivo .SUM y obtener
la información
%necesaria, he escrito SCAN para obtener rápidamente los
valores deseados.
%Las coordenadas geocéntricas correspondientes a x, y, z, se
almacenan en
%un vectores identificados como X, Y, Z.

%Finalmente presento las gráficas de las series temporales
correspondientes
%a cada coordenada.

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%NNNN=input('Name of STATION:'); %Identificación de
estación: cuatro letras MAYÚSCULAS.
% AAAA=input('Year of data:'); %Año al que corresponden los
datos de la estación.
% nnnn=input('station:'); %Identificación de estación:
cuatro letras minúsculas.

for i=1:366 % i=366 cuando es año bisiesto

    dia=num2str(i);
```

```

    if length(dia)==1
        dia=['00' dia];
    elseif length(dia)==2
        dia=['0' dia];
    else
        dia;
    end

camino=sprintf('AUCA_2013/auca%s0.sum',dia);
        %NNNN_AAAA/nnnn%data.sum
        %NNNN=input('Name of STATION:');
%Identificación de estación: cuatro letras MAYÚSCULAS.
        %nnnn=input('station:'); %Identificación de
estación: cuatro letras minúsculas.
        %data.sum=input(ingresa el archivo a ser
escaneado) .

if exist(camino,'file')>0
    fid=fopen(camino,'rt');
    l=fgetl(fid);

found=0;
while found==0
    if length(l)>=5
        if strcmp('CARTESIAN', l(2:10))==1
            found=1;
        else
            l=fgetl(fid);
        end
    else
        l=fgetl(fid);
    end
end
%i
%l=fgetl(fid);
l=fgetl(fid);
X(i)=sscanf(l(35:51),'%f');

l=fgetl(fid);
Y(i)=sscanf(l(35:51),'%f');
l=fgetl(fid);
Z(i)=sscanf(l(35:51),'%f');

```



```

fclose(fid);
% clear fid;
else
    X(i)=NaN;
    Y(i)=NaN;
    Z(i)=NaN;
end

end

X=X';
Y=Y';
Z=Z';
p=(1:366);

figure
plot(p,X,'b');
title('SERIE TEMPORAL AÑO 2013, ESTACIÓN AUCA')
xlabel('Días')
ylabel('Coordenada X')

figure
plot(p,Y,'r');
title('SERIE TEMPORAL AÑO 2013, ESTACIÓN AUCA')
xlabel('Días')
ylabel('Coordenada Y')

figure
plot(p,Z,'g');
title('SERIE TEMPORAL AÑO 2013, ESTACIÓN AUCA')
xlabel('Días')
ylabel('Coordenada Z')

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Computation of coordinates N, E and UP.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

load CHIS_corregido
n1=input('First GPS day:');
n2=input('Last GPS day:');
T=n2-n1;
N=[];
E=[];
U=[];
phi=data(1,20);
alpha=data(1,8);

R=[-sind(phi)*cosd(alpha),-sind(phi)*sind(alpha),cosd(phi);-
sind(alpha),cosd(alpha),0;cosd(phi)*cosd(alpha),cosd(phi)*sind(alpha),sind(phi)];

dx=data(:,5);
dy=data(:,6);
dz=data(:,7);

delta=[dx';dy';dz'];

for i=1:length(dx)
Solucion=R*delta(:,i);
N(i)=Solucion(1);
E(i)=Solucion(2);
U(i)=Solucion(3);
end
N=N';
E=E';
U=U';

x=data(:,1); %dia GPS

p=polyfit(x,N,1);
N_1 = p(1)*n1+p(2);
N_2 = p(1)*n2+p(2);
% figure; plot(x,N);hold on;plot([n1 n2],[N_1 N_2],'r');
% % title('Time Serie ESMR')
% xlabel('Time (days)')
% ylabel('North (mm)')

```

```
q=polyfit(x,E,1);
E_1 = q(1)*n1+q(2);
E_2 = q(1)*n2+q(2);
% figure; plot(x,E);hold on;plot([n1 n2],[E_1 E_2],'r');
% title('Time Serie ESMR')
% xlabel('Time (days)')
% ylabel('East (mm)')

r=polyfit(x,U,1);
U_1 = r(1)*n1+r(2);
U_2 = r(1)*n2+r(2);
% figure; plot(x,U);hold on;plot([n1 n2],[U_1 U_2],'r');
% title('Time Serie AUCA')
% xlabel('Time (days)')
% ylabel('Up (mm)')
```

```

%NNNN=input('Name of STATION:'); %Identificación de estación: cuatro letras
MAYÚSCULAS.
% AAAA=input('Year of data:'); %Año al que corresponden los datos de la estación.
% nnnn=input('station:'); %Identificación de estación: cuatro letras minúsculas.

for i=1:366 % i=366 cuando es año bisiesto

    dia=num2str(i);

    if length(dia)==1
        dia=['00' dia];
    elseif length(dia)==2
        dia=['0' dia];
    else
        dia;
    end

    camino=sprintf('AUCA_2013/auca%s0.sum',dia);% data.sum/NNNN_AAAA/nnnn:
    ingresar el archivo correspondiente a ser escaneado.

    if exist(camino,'file')>0
        fid=fopen(camino,'rt');
        l=fgetl(fid);

        found=0;
        while found==0
            if length(l)>=5
                if strcmp('CARTESIAN', l(2:10))==1
                    found=1;
                else
                    l=fgetl(fid);
                end
            else
                l=fgetl(fid);
            end
        end
        end
        %i
        %l=fgetl(fid);
        l=fgetl(fid);
        X(i)=sscanf(l(35:51),'%f');

        l=fgetl(fid);

```

```
Y(i)=sscanf(l(35:51),'%f');
```

```
l=fgetl(fid);
```

```
Z(i)=sscanf(l(35:51),'%f');
```

```
fclose(fid);
```

```
% clear fid;
```

```
else
```

```
    X(i)=NaN;
```

```
    Y(i)=NaN;
```

```
    Z(i)=NaN;
```

```
end
```

```
end
```

```
X=X';
```

```
Y=Y';
```

```
Z=Z';
```

5.2. Anexo 2: Ficha técnica de la estación ESMR



REGME - ESMR



REGME RED GNSS DE MONITOREO CONTINUO DEL ECUADOR Formulario Informativo de la Estación de Monitoreo Continuo ESMERALDAS - ESMR

1. FORMULARIO

Preparado: Equipo Técnico REGME – CEPGE
Revisado: Tnte de E Christian Barahona
Fecha de actualización: 12 de junio de 2017
Versión: 10.1

RESOLUCIÓN VIGENTE N° IGM-2016-005-e-1, NOTA ACLARATORIA:

- SE GARANTIZA LA CONSISTENCIA DE LAS COORDENADAS SIRGAS 95 DE LA REGME (COORDENADAS PRE-SISMO), HASTA EL 13 DE ABRIL DE 2016.
- SE GARANTIZA LA CONSISTENCIA DE LAS NUEVAS COORDENADAS POST-SISMO, A PARTIR DEL 17 DE ABRIL DE 2016. ESTAS COORDENADAS ESTAN AJUSTADAS AL ITRF 08, EPOCA DE REFERENCIA 2016.4

2. IDENTIFICACIÓN DE LAS ESTACIONES GNSS

Nombre de la Estación: Esmeraldas Ecuador
Identificación de la Estación: ESMR
Código Internacional: 42011M001(IERS DOMES NUMBER)
Log File vigente: [esmr_20090708.log](http://www.geoportalqgqob.ec/portal/index.php/datos-geodesicos/)
Protocolo de acceso a datos REGME: <http://www.geoportalqgqob.ec/portal/index.php/datos-geodesicos/>
Propietario de Equipos: Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional
Responsable Mantenimiento: Ing. Patricia Mothes
E-mail contacto: pmothes@qepn.edu.ec

Página 1



Ministerio de Defensa Nacional



Comando Conjunto de las Fuerzas Armadas



Ejército Ecuatoriano



Instituto Geográfico Militar

REGME - ESMR

3. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

Provincia: Esmeraldas
 Ciudad: Esmeraldas
 Establecimiento: OCP
 Ubicación: Terminal de OCP
 Dirección: A 5 km del mar y 15 km. de la ciudad de Esmeraldas.
 Tipo de Monumentación: Estructura piramidal de acero de 1,00 m de altura. La base de la antena a 0.184m. verticalmente encima de un perno.

Fotografías Estación:



Imagen 1.

Fuente: Equipo Técnico REGME – CEPGE



Imagen 2.

Fuente: Equipo Técnico REGME – CEPGE

4. COORDENADAS OFICIALES

4.1. Coordenadas de la EMC calculada hasta el 15 de abril del 2016

ITRF: 94
 Datum: SIRGAS 95
 Época de Referencia: 1995.4
 Elipsoide de Referencia: GRS80

| Geodésicas | | Planas UTM 17N | | Sigma (m) |
|-----------------|-------------------|----------------|-------------|-----------|
| Latitud (G M S) | 0° 56' 04,7260" N | Norte (m) | 103 332,347 | 0,003 |

Página 2

REGME - ESMR

| | | | | |
|-----------------------|--------------------|----------|-------------|-------|
| Longitud (G M S) | 79° 43' 27,7485" W | Este (m) | 641 938,213 | 0,003 |
| Altura Elipsoidal (m) | 251,754 | | | 0,004 |

Tabla 1. Coordenadas oficiales SIRGAS 95, antes del sismo del 16 de abril del 2016.

El evento sísmico de magnitud 7.8 Mw ocurrido entre la zona de Pedernales y Cojimiles en la provincia de Manabí el pasado 16 de abril 2016, produjo un desplazamiento de coordenadas en las estaciones de monitoreo continuo de la REGME. En función de lo anteriormente expuesto, la información presentada en la tabla 1, es vigente hasta el 15 de abril del 2016.

4.2. Coordenadas Post-sísmicas vigentes a partir del 17 de abril del 2016

Marco de Referencia: ITRF2008
 Época de Referencia: 2016.436
 Elipsoide de Referencia: GRS80
 Semana GPS: 1900 (DOY 157 - 163)

| Geodésicas | | Planas UTM 17N | | Sigma (m) |
|-----------------------|--------------------|----------------|-------------|-----------|
| Latitud (G M S) | 0° 56' 04,7365" N | Norte (m) | 103 332,669 | 0,0041 |
| Longitud (G M S) | 79° 43' 27,7405" W | Este (m) | 641 938,458 | 0,0014 |
| Altura Elipsoidal (m) | 251,644 | | | 0,001 |

Tabla 2. Coordenadas post-sísmicas vigentes a partir del 17 de abril del 2016.

Con la finalidad de homologar la información geodésica – cartográfica generada en los distintos proyectos e investigaciones a nivel nacional, a partir del 17 de abril del 2016, el IGM utilizará como Marco Geodésico de Referencia para el Ecuador las coordenadas ajustadas a ITRF08 - época 2016.436 de las Estaciones de Monitoreo Continuo pertenecientes a la red activa de control horizontal – REGME.

NOTA.

La vigencia de la época de ajuste variará en función de la magnitud de las réplicas sísmicas que se presente en este periodo post sísmico.



Ministerio
de Defensa
Nacional



Comando Conjunto
de las Fuerzas
Armadas



Ejército
Ecuatoriano



Instituto
Geográfico
Militar

REGME - ESMR

5. INFORMACIÓN DEL EQUIPO GNSS

5.1. Receptor

| | |
|-----------------------|---------------------|
| Tipo de Receptor: | TRIMBLE NETRS |
| Número de Serie: | 4541260349 |
| Sistema Satelital: | GPS |
| Fecha de Instalación: | 03 de Abril de 2007 |

5.2. Antena

| | |
|----------------------|--|
| Modelo de Antena: | ZEPHYR GEODETIC |
| Nombre Rinex: | TRM41249.00 NONE |
| Número de Serie: | 60035111 |
| Sistema Satelital: | GPS |
| Altura de la Antena: | 1.184 m |
| Detalle de Altura: | Distancia vertical desde el tope del dispositivo de centrado forzoso hasta el ARP (Antenna Reference Point). |
| Modelo RADOME: | No |
| Esquemas: | |



Imagen 3. Esquema de la altura de la antena
Fuente: Equipo Técnico REGME – CEPGE



Ministerio de Defensa Nacional



Comando Conjunto de las Fuerzas Armadas



Ejército Ecuatoriano



Instituto Geográfico Militar

REGME - ESMR

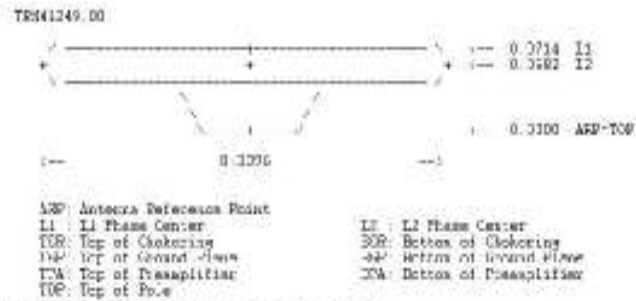


Imagen 4. Característica física de recepción de la antena

Fuente: International GNSS Service - GNSS



Imagen 5. Calibración de antena

Fuente: National Geodetic Survey

6. INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

| | |
|---|--|
| Observables: | (7) C1,L1,P1,S1,P2,L2,S2 |
| Intervalo de Registro: | 30 segundos. |
| Angulo de Máscara: | 0 grados. |
| Archivo Diario: | Si |
| Formato de Archivo: | Original TRIMBLE (TD2) Rinex (v. 2.11). |
| Servidor de búsqueda 1: | www.geoportaligm.gob.ec |
| Transmisión de Correcciones Diferenciales en tiempo real: | No |
| Servidor Caster NTRIP: | Ninguno. |



Ministerio de Defensa Nacional



Comando Conjunto de las Fuerzas Armadas



Ejército Ecuatoriano



Instituto Geográfico Militar

REGME - ESMR

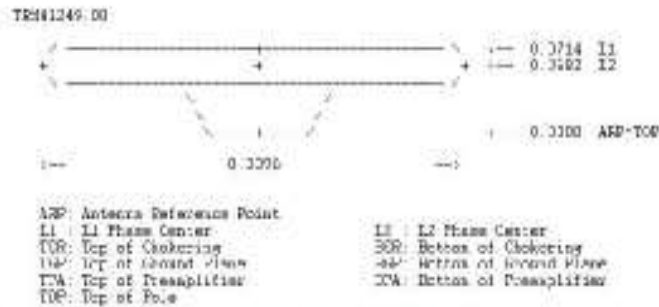


Imagen 4. Característica física de recepción de la antena

Fuente: International GNSS Service - GNSS



Imagen 5. Calibración de antena

Fuente: National Geodetic Survey

6. INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

| | |
|---|--|
| Observables: | (7) C1,L1,P1,S1,P2,L2,S2 |
| Intervalo de Registro: | 30 segundos. |
| Ángulo de Máscara: | 0 grados. |
| Archivo Diario: | Si |
| Formato de Archivo: | Original TRIMBLE (T02) Rinex (v. 2.11). |
| Servidor de búsqueda 1: | www.geoportalmgm.gov.ec |
| Transmisión de Correcciones Diferenciales en tiempo real: | No |
| Servidor Caster NTRIP: | Ninguno. |

c. Instituciones Participantes:

La REGME cuenta con el apoyo de las siguientes Instituciones:

A nivel Nacional

Instituto Geográfico Militar del Ecuador

Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional

Consejo de Coordinación Kichwa de Pastaza

Empresa Eléctrica Riobamba - EERSA

Jet Propulsion Laboratory

Instrumental y Óptica

Estación Científica Charles Darwin

Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales

Gobiernos Provinciales

Empresa pública municipal de telecomunicaciones, agua potable, alcantarillado y saneamiento de Cuenca

Universidades

Armada del Ecuador

Instituciones Militares

A nivel Internacional

Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas

