

Actualización preliminar del Sistema Nacional de Referencia Espacial — SIRGAS-Ecuador, posterior al terremoto de Pedernales 7.8 Mw, 16 de abril de 2016

David A.Cisneros*
Jean-Mathieu Nocquet**

Recibido en febrero de 2016; aceptado en enero de 2017

Abstract

The validity and maintenance of a National Geocentric Reference Framework, belonging to countries located in areas of tectonic, seismic, volcanic activity, is a difficult directly related to the level of deformation and stability of the official coordinates. The horizontal and vertical components change from day to day due to the steady motion of the earth's crust. However tectonic plates interaction leads to a high level of energy accumulation in the zone of convergence, where accumulated stress are released when surpassing the resistance of the rocks, giving rise to large or great earthquakes. It is clear that the main losses in an irremediable way will always be the human lives and social catastrophes that derive from these telluric events; however, as far as the National Georeference is concerned, there are high levels of local deformation, destruction of Geodesic infrastructure of both Passive Networks and Active Networks. Furthermore irreversible changes determine a before and after in terms of official coordinates and Geographic/Cartographic inputs that were generated from the use of Official Geoinformation.

As in past decades, Ecuador has experienced several geophysical events that have caused serious distortions and local deformation of the Earth's crust, mainly caused by the subduction process, seismic and volcanic activity, among others. These effects are clearly reflected in the evaluation of the difference in coordinates and distances between the baseline control points, between the time before the Pre-seismic earthquake and the post-earthquake period. According to the magnitude of the seismic event, the distortions and discontinuities can reach several centimeters and even meters.

Providing a technical-scientific solution that guarantees a National System of Space Reference consistent post-earthquake and adopt it officially at the national

.....
* Geoinformación, Proceso de Geodesia, Instituto Geográfico Militar (IGM), Ecuador, correo electrónico:
david.cisneros@mail.igm.gob.ec

* Université de Nice Sophia-Antipolis, IRD-CNRS-GEOAZUR, Nice, France. Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, correo electrónico: nocquet@geoazur.unice.fr

level, is vital to ensure the homogeneous relationship between what is measured in the field and what is represented in mapping, cadastre and other official applications.

The State of the Art of Ecuadorian Geodesy, is a National System of Space Reference Accurate and Exact.

This paper first summarizes the concepts of transformation from national to continental and global reference frame accounting for the steady deformation. Using GPS data between 1994 and 2011, we evaluate the linear (constant velocity) part of time evolving coordinates before the 2016 Pedernales earthquake. Finally, we evaluate the change of coordinates during and immediately after the Pedernales earthquake and present a preliminary solution for the new national reference frame.

Key words: Georeference, local deformation, pre-seismic, post-seismic, discontinuities.

Resumen

La vigencia y mantenimiento de un Marco de Referencia Geocéntrico Nacional, perteneciente a países ubicados en zonas de gran actividad tectónica, sísmica y volcánica, es un tema muy vulnerable que está relacionado directamente con el nivel de deformación y estabilidad de las coordenadas oficiales a nivel nacional. Las componentes horizontales y verticales, cambian de un día al otro debido al movimiento normal de la corteza terrestre, sin embargo, como todo en la Tierra se mueve, principalmente por la interacción de las placas tectónicas, existe un gran nivel de acumulación de energía en la zona de convergencia, cuyos esfuerzos se liberan al sobrepasar la resistencia de las rocas, dando lugar a grandes sismos. Está claro que las principales pérdidas de manera irremediable siempre serán las vidas humanas y las catástrofes sociales que se deriven de estos eventos telúricos; sin embargo, en lo que compete al campo de la Georeferencia Nacional, existen grandes niveles de deformación local, destrucción de infraestructura Geodésica tanto de las Redes Pasivas como Redes Activas; y cambios irreversibles que determinan un antes y un después en términos de coordenadas oficiales e insumos geográficos-cartográficos que se generaron a partir del empleo de la Geoinformación Oficial.

Al igual que en décadas pasadas, el Ecuador ha experimentado varios eventos geofísicos que han provocado graves distorsiones y deformación local de la corteza terrestre, provocados principalmente por procesos de subducción, actividad sísmica y volcánica, entre otros. Estos efectos se ven claramente reflejados al evaluar la diferencia de coordenadas y distancias existentes entre los puntos base de control, entre la época antes del terremoto pre-sísmica y la época después del terremoto post-sísmica. De acuerdo a la magnitud del evento sísmico, las distorsiones y discontinuidades pueden llegar a varios centímetros e incluso metros.

Proporcionar una solución técnica-científica que garantice un Sistema Nacional de Referencia Espacial consistente post-sismo y adoptarlo de manera oficial a nivel nacional, es vital para garantizar la relación homogénea entre lo medido en el campo y lo representado en la cartografía, mapeo, catastro y demás aplicaciones e insumos oficiales.

El Estado del Arte de la Geodesia Ecuatoriana, es un Sistema Nacional de Referencia Espacial Preciso y Exacto.

Este artículo hace un resumen de los conceptos de transformación entre el marco de referencia nacional, continental y global. Usando datos entre 1994 y 2011, se evalúa la evolución lineal con el tiempo, de las coordenadas antes del terremoto Mw 7.8 de Pedernales de 2016. Evaluamos los cambios de coordenadas que ocurrieron durante el sismo y presentamos una solución preliminar del marco de referencia después del sismo (solución post-sismo).

Palabras clave: Georreferencia, deformación local, pre-sísmica, post-sísmica, discontinuidades.

Marco de Referencia SIRGAS 95

En términos generales, se estima que el tiempo de vida útil de un Marco Geodésico de Referencia Nacional, es de aproximadamente 10 a 15 años, siempre y cuando no exista un evento geofísico de gran magnitud que afecte su consistencia de manera prematura. La Red Nacional GPS del Ecuador RENAGE, es el Marco Geocéntrico de Referencia Nacional materializado a través de estaciones Pasivas y el sustento técnico por el cual el Ecuador atravesó el umbral de la Geodesia Convencional a la era de los Sistemas Satelitales de Navegación Global. Las campañas de observación GPS, fueron ejecutadas entre los años 1994, 1996 y 1998. El procesamiento y ajuste fue realizado en el año 2000, cuyos resultados se encuentran descritos en el Report 73 (Tremel, 2000). La red RENAGE está referida a SIRGAS95,¹ cuya realización coincide con el ITRF94, época de referencia 1995.4.

La realización SIRGAS95, se ha mantenido vigente en Ecuador durante los últimos 20 años, sin embargo en el transcurso del tiempo ha experimentado varios agentes y fenómenos geofísicos que afectan su consistencia, incluido la evolución de las técnicas de observación GNSS,² diferencias en el cálculo de efemérides y por supuesto las actualizaciones sucesivas del ITRF.³

En el año 2011, el Instituto Geográfico Militar (IGM), bajo cooperación del Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) y el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN), ejecutaron el proyecto de investigación

.....
¹ Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas, SIRGAS <www.sirgas.org>.

² Sistemas Satelitales de Navegación Global, GNSS.

³ International Terrestrial Reference Frame, ITRF <<http://itrf.ensg.ign.fr/>>.

denominado "Campo de Velocidades del Ecuador obtenido a través de mediciones de campañas GPS de los últimos 15 años y medidas de una red GPS permanente" (Cisneros/Nocquet, 2012). Este trabajo, muestra una primera aproximación del análisis realizado a la RENAGE tomando en cuenta dos épocas distintas de tiempo:

$t_0 = 1995.4$; Época promedio de medidas GPS de la RENAGE

$t = 2011.0$; Época de las últimas medidas incluidas en la determinación del Campo Velocidad VEC_Ec

$t - t_0 = 15.6$ años (1)

El Procesamiento Preciso de Datos (GNSS), requiere que las coordenadas de las estaciones de referencia (es decir las estaciones usadas para evaluar la transformación al marco de referencia), estén dadas en la misma época en que se ejecuta la campaña de medición GNSS en campo; y que estén asociadas al mismo marco de referencia de las órbitas satelitales, vigente a la época en la cual se desarrollaron las medidas GNSS.

Por ejemplo, los puntos Base RENAGE, están referidos a SIRGAS95–ITRF94–época 1995.4. Si se ejecuta una campaña de medidas GPS el 10 de abril de 2016 (DOY 101), es necesario aplicar el siguiente procedimiento para garantizar el procesamiento preciso y obtención de coordenadas ajustadas al Marco de Referencia Nacional (pre-sismo).

Transformar coordenadas SIRGAS95, ITRF94, época 1995.4; hacia el ITRF y época vigente

1. Transformación de las coordenadas de referencia al ITRF al cual se refieren las efemérides satelitales.

Para el caso del ejemplo del 10 de abril de 2016, las coordenadas SIRGAS95 deben transformarse del ITRF94 al ITRF2008 (IGb08), por medio de la aplicación de parámetros de transformación entre ITRFs, se los puede encontrar en: <http://itrf.ign.fr/trans_para.php> (IGN/LAREG, 2016). Para la transformación tridimensional se utiliza el método de Transformación de 7 Parámetros de Helmert, el cual permite la transformación de un sistema de tres ejes X, Y, Z y un factor de escala (ITRF94); a otro sistema tridimensional con otra terna de ejes en distinta posición en el espacio y con otro factor de escala diferente (ITRF2008).

2. Traslado de las coordenadas Base Fijas RENAGE, desde la época de referencia a la época de observación. Es decir, las coordenadas asociadas a SIRGAS95 deben trasladarse desde 1995.4, al día en que se hace el levantamiento GNSS; en este ejemplo sería 10 de abril de 2016 equivale a la época: 2016.3. Para el cálculo de la época, basta dividir el día del año GPS para 365.

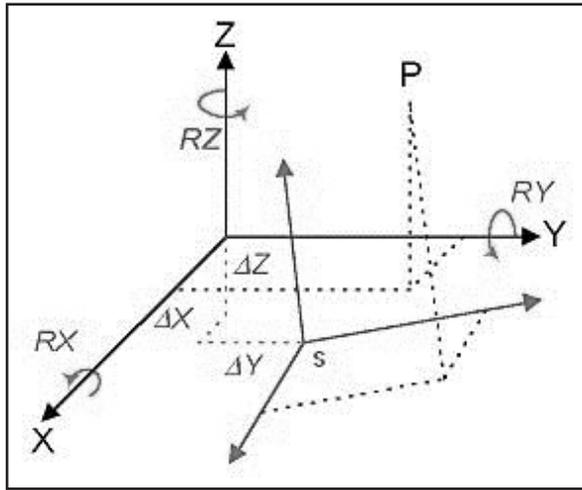


Figura 1. Transformación de semejanza tridimensional.

Para el traslado es mandatorio contar con las tres componentes de velocidad calculadas tanto para X, Y, Z; el traslado se hace mediante la ecuación 2:

$$\begin{aligned}
 X(t) &= X(t_0) + (t - t_0) * V_x \\
 Y(t) &= Y(t_0) + (t - t_0) * V_y \\
 Z(t) &= Z(t_0) + (t - t_0) * V_z
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

siendo $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$ las coordenadas en la época deseada, $X(t_0)$, $Y(t_0)$, $Z(t_0)$ las coordenadas en la época de referencia, $(t - t_0)$ el intervalo de tiempo transcurrido entre la realización del sistema de referencia y el levantamiento GNSS y V_x , V_y , V_z las velocidades de las estaciones o puntos Base de referencia.

3. Las velocidades V_x , V_y , V_z de las estaciones de referencia deben obtenerse preferiblemente del análisis de posicionamientos GNSS repetitivos que cubran un intervalo mínimo de tiempo de dos años. El Campo de Velocidades del Ecuador-VEC_Ec, fue obtenido mediante el análisis de datos GPS de los últimos 15 años (1994 hasta 2011), en tal virtud se deben considerar las componentes de velocidad obtenidas tanto para la RENAGE como para la REGME.

Nota técnica: se garantiza la precisión, dirección y magnitud de las velocidades del VEC_Ec, hasta el 15 de abril de 2016, fase pre-sísmica antes del terremoto de Pedernales.

Las componentes de velocidad X, Y, Z del VEC_Ec, se pueden obtener en: <<http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/datos-geodesicos/>> (Cisneros/Nocquet <<http://www.geoportaligm.ec/>>, 2012).

- Una vez las coordenadas de referencia RENAGE (ITRF 94, época 1995.4) se encuentran en la época de observación actual (ITRF 2008, época 2016.3), se ejecuta el procesamiento de los puntos GNSS nuevos obteniendo las coordenadas referidas al ITRF y época de referencia actual.

Transformar coordenadas del ITRF y época vigente; hacia SIRGAS95, ITRF94, época 1995.4:

- Para expresar las coordenadas de los puntos nuevos en la época del Sistema de Referencia SIRGAS95, se trasladan las coordenadas de los puntos nuevos desde la época de observación vigente (2016.3); a la época de referencia oficial (1995.4). Esto de la misma manera que el ítem descrito en el numeral 2, por medio de la aplicación de las velocidades del VEC_Ec y el tiempo transcurrido entre las dos épocas (considerando la variación de los signos).
- Finalmente, las coordenadas de los puntos nuevos deben transformarse al marco de referencia oficial, es decir del ITRF2008 (IGb08) a SIRGAS95 (ITRF94). En todos los casos las coordenadas de los puntos nuevos deben almacenarse junto con los valores de velocidad utilizados para trasladarlas a la época de referencia y estas mismas velocidades deben aplicarse para llevar las coordenadas hacia adelante cuando los puntos nuevos sirvan de base en levantamientos GPS posteriores. Aquellos puntos cuyas velocidades no han sido derivadas de diferentes ocupaciones GNSS (o de operación continua), sino interpoladas a partir del modelo VEMOS,⁴ no pueden clasificarse como estación de referencia (SIRGAS, 2016).

Es importante mencionar que un Campo de Velocidad busca conseguir la máxima precisión con observaciones GPS repetidas en varias épocas de tiempo; y no la conversión por métodos de interpolación.

Las coordenadas SIRGAS95 de las estaciones terrestres que materializan la RENAGE, no son válidas para una época diferente a 1995.4, por tal razón es necesario trasladar las coordenadas a la época actual de observación para garantizar la compatibilidad entre el segmento espacial, el segmento de control y las mediciones realizadas por el usuario del sistema GPS. Este procedimiento, garantiza el correcto enlace de las Redes GPS locales y puntos de precisión, al Marco de Referencia Nacional SIRGAS95, válido hasta el 15 de abril de 2016.

Deformación local del Marco de Referencia SIRGAS95

Todos los Marcos de Referencia Oficiales, deben ser analizados continuamente por las agencias e institutos encargados de mantener actualizado el marco de

⁴ Velocity Model for SIRGAS, VEMOS, <<http://www.sirgas.org/index.php?id=241>>.

referencia nacional. El mantenimiento del marco de referencia SIRGAS incluye, por lo tanto, aparte de la conservación física del monumento (redes pasivas), la evolución en el tiempo de las coordenadas, garantizando la consistencia entre el sistema de referencia terrestre y el satelital.

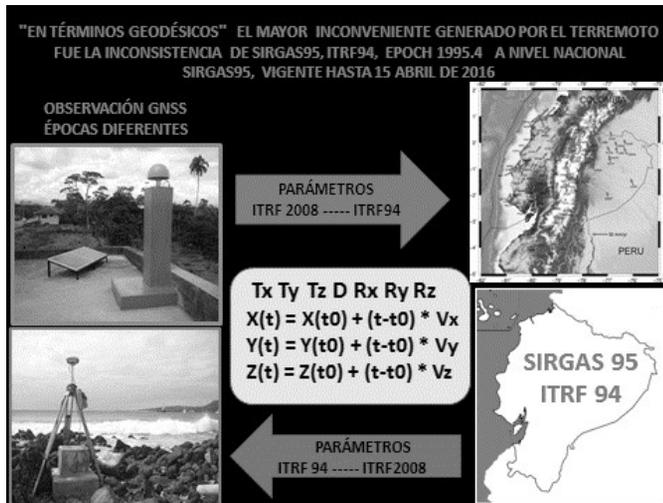


Figura 2. Transformación ITRFs y Épocas (Cisneros D., 2016).

Los principales agentes de deformación, están dados por los eventos y fenómenos geofísicos (procesos de subducción, desplazamientos tectónicos, fallas geológicas, sismos, terremotos, deformaciones volcánicas, etc.). Todos contribuyen con la deformación local, ante lo cual, es necesario realizar una validación de las coordenadas oficiales con el fin de determinar diferencias en término de la magnitud del desplazamiento de los sitios a lo largo del tiempo.

Existen varios eventos geofísicos suscitados a lo largo del tiempo dentro del territorio nacional de los cuales se puede mencionar entre los más importantes: el sismo de magnitud 7.2 producido en Bahía de Caráquez en el año de 1998, cuyos efectos post-sísmicos se presentaron en la región hasta cerca del año 2003. El sismo de Macas de magnitud 6.9 producido en el año 1995, sismo de Pelileo suscitado en 1996; erupción volcánica del Guagua Pichincha en 1999, Reventador en 2002 y el continuo proceso eruptivo del Tungurahua a partir de 1999. Las mediciones GPS confirman también la presencia de un sismo-lento en Esmeraldas (Mothes *et al.*, 2013) y otro similar en Isla de la Plata (Vallée *et al.*, 2013), los cuales actualmente continúan su proceso físico. Cabe señalar también grandes eventos producidos en países de la región, como el terremoto

de magnitud 8.8 en la región del Maule, Chile, suscitado en el año 2010 y el de Arequipa, Perú en el año 2001, cuya magnitud fue de 8.4 grados; todos estos en la escala sismológica de Magnitud Momento (Mw).

Todo el territorio ecuatoriano está expuesto a este tipo de fenómenos en cualquier momento, poniendo en evidencia la vulnerabilidad del Marco de Referencia Nacional, sustentado por estaciones pasivas (mojones de concreto empotrados en el terreno).

El Ecuador está situado sobre la zona de frontera en la cual se “acomoda” el movimiento de convergencia de la placa oceánica de Nazca hacia el continente Sudamericano. La Fosa de Subducción, se encuentra a una distancia aproximada de ~80 km de la costa continental Ecuatoriana. El proceso de subducción es la principal causa de deformación vigente tanto en la Costa como en la Cordillera Andina.

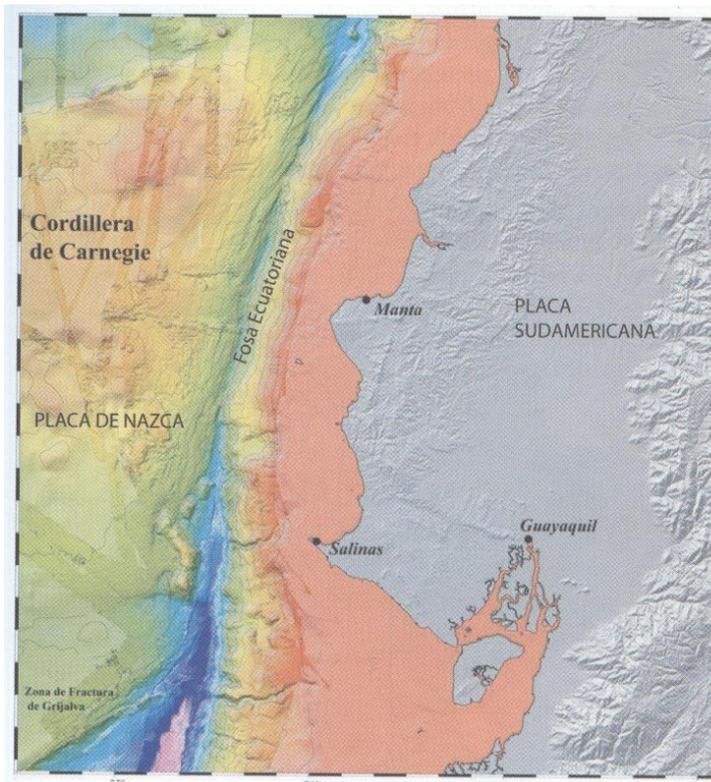


Figura 3. Mapa de la topografía del fondo oceánico a lo largo de la Costa Ecuatoriana. La fosa de Subducción separa las placas de Nazca y Sudamericana. Modificado de Collot et al., 2006.

La zona costera en mayor magnitud que la región andina, se ve afectada por el efecto del acoplamiento entre estas dos placas (Nocquet *et al.*, "Motion of continental slivers and creeping subduction in the northern Andes", 2014), (Chlieh *et al.*, 2014). El movimiento estimado en la Costa es de 2 cm/año, con respecto a la parte estable de la Placa Sudamericana; mientras que en la Sierra de los Andes el movimiento estimado es de ~1 cm/año.

Por otro lado, existe una zona relativamente estable (en comparación a las dos anteriores) que se encuentra al este en la cuenca Amazónica, es decir alejada del efecto de la subducción y de la Región Andina. La velocidad en esta zona es relativamente estable y los sitios se mueven en un solo bloque en común con la Placa Sudamericana. Se estima que el movimiento aproximado es de 1.1 cm/año en el ITRF.

En lo que respecta al territorio Insular, tiene un movimiento diferente al continental. Las islas Galápagos se mueven con la placa de Nazca en dirección este; y se estima que el movimiento aproximado es de 4-5 cm/año con respecto a la parte estable de la placa Sudamericana.

Con la finalidad de analizar la deformación local, dividimos al territorio nacional continental en tres zonas:

- Zona 1: esta zona está ubicada en la parte oriental, al este de la Cordillera de los Andes y alejada de la zona de subducción. En término del desplazamiento, podemos ver que no existe mayor magnitud en los sitios ubicados en esta zona, lo cual concuerda con la teoría. La mayor parte de los sitios tienen una velocidad mínima y una dirección similar conforme a la tendencia del movimiento de la Placa Sudamericana.
- Zona 2: entre el interior estable de la placa América del Sur y la fosa de subducción se extiende una zona de deformación, que comprende la Cordillera de los Andes y parte de la planicie costera. Esta zona es conocida como bloque norandino. Los sitios presentes en este sector, muestran un comportamiento variable en cuanto a la magnitud de su velocidad y los vectores se desplazan en diferentes direcciones de manera independiente. Esta zona posee afectación de la subducción y deformación local producida por la presencia de la cordillera y su actividad sísmica/volcánica.
- Zona 3: nos referimos por completo a la zona costera. En esta zona el movimiento es inestable e independiente. Los sitios se mueven en magnitudes diferentes en relación a la parte estable de la Placa Sudamericana. Posee gran influencia de efectos causados por la subducción de las placas marítima de Nazca y continental de Sudamérica, en la zona de convergencia de las mismas (fosa de subducción) provocando también la presencia de deformación local. Estos efectos provocan un movimiento estimado de 2 cm/a.

Luego que la placa Nazca subduce bajo el margen ecuatoriano, una parte de la interface entre la placa Nazca y el margen queda bloqueado. Esta zona

acumula esfuerzos cizallantes que aumentan con el tiempo. Este es el régimen inter-sísmico. Cuando los esfuerzos pasan un cierto umbral, el deslizamiento se inicia y un sismo ocurre (Nocquet, 2008); destruyendo en términos geodésicos el Marco de Referencia Nacional.

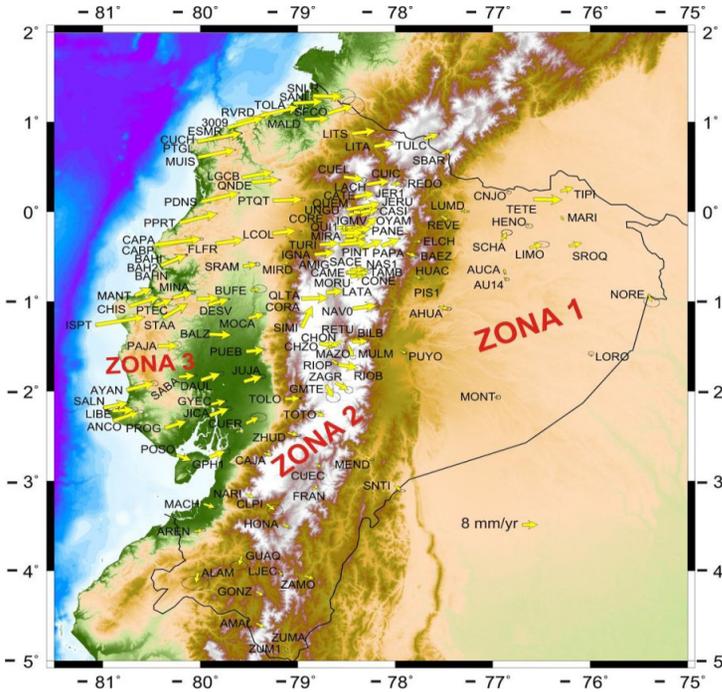


Figura 4. Zonificación del VEC_Ec, conforme a la cinemática de las placas litosféricas y sus efectos geofísicos.

La Tabla 1 permite observar la diferencia existente entre las coordenadas de la Red Nacional GPS del Ecuador (RENAGE), cuya densificación concuerda con SIRGAS95, ITRF94; época de referencia 1995.4 y las calculadas en el Marco de Referencia ITRF08, época 2011.0, obtenidas en el ajuste del campo de velocidad.

Como podemos observar, la diferencia existente está en el orden de los centímetros en las tres componentes. En lo que corresponde al territorio continental, es evidente que la teoría descrita en las tres zonas de deformación, concuerdan con las diferencias expresadas en la Tabla 1. Se puede ver por ejemplo que el vértice de la RENAGE ubicado en Esmeraldas denominado 3009 y cercano a la zona de subducción, tiene una diferencia considerable en la componente horizontal (Norte 0.250 metros).

Tabla 1
Diferencia entre SIRGAS95, ITRF94, época 1995.4 y ITRF2008, época 2011.0

VERTICE	RENAGE SIRGAS 95, ITRF 94, época 1995.4						RENAGE IGS08, época 2011.0					
	COORDENADAS CARTESIANAS			COORDENADAS PLANAS			COORDENADAS CARTESIANAS			COORDENADAS PLANAS		
	X	Y	Z	N	E	h	X	Y	Z	N	E	h
3009 Esmeraldas	1148305.483	-6272977.101	109353.910	109346.874	652825.861	19.949	1148305.688	-6272976.994	109354.156	109347.122	652826.082	19.885
			DIFERENCIA	-0.248	-0.221	0.064						
BALTRA	-28822.438	-6377927.538	-50938.985	9949022.611	805120.619	60.448	-28821.651	-6377927.434	-50938.794	9949022.801	805121.407	60339
			DIFERENCIA	-0.190	-0.788	0.109						
LATACUNGA	1258247.886	-6255142.665	-90040.863	9909956.133	764160.996	2941.238	1258247.972	-6255142.642	-90040.693	9909956.303	764161.085	2941.230
			DIFERENCIA	-0.170	-0.089	0.008						
QUININDE	1165008.426	-6270855.124	36218.099	36216.016	669656.419	122.105	1165008.600	-6270855.013	36218.288	36216.206	669656.610	122.029
			DIFERENCIA	-0.190	-0.191	0.076						
GALA	-33796.164	6377522.618	-82120.929	9917818.126	800125.779	7.418	33795.3972	6377522.67675	82120.74064	9917818314	800126.547	7.471
			DIFERENCIA	-0.188	-0.768	-0.053						

En lo que corresponde al territorio insular, el punto (mojón) de referencia principal de la RENAGE SIRGAS95 para el Archipiélago de Galápagos, es el sitio BALTRA, ubicado en la isla del mismo nombre. Este al igual que el sitio ALA ubicado en la Isla Santa Cruz, muestran un cambio de coordenada de aproximadamente 0.80 m en la componente horizontal. Este desplazamiento concuerda con la teoría puesto que se considera un desplazamiento de 5 cm / año en esta región. Si tomamos en cuenta los 15 años transcurridos desde SIRGAS95 hasta la fecha en que se ajustó el Campo de Velocidad del Ecuador VEC_Ec (2011.0-1995.4=15.6) y lo multiplicamos por la velocidad del punto, comprobamos la tendencia y movimiento de esta región.

Cabe mencionar que estas diferencias, corresponden principalmente a procesos de margen tectónico, volcánico, sísmico y el efecto de la subducción en el transcurso de los 15.6 años. No se considera aun el efecto del Terremoto de Pedernales del 16 de abril de 2016.

Adicionalmente, las diferencias expresadas, corresponden a dos ITRF diferentes (ITRF94-ITRF2008) y dos épocas de tiempo (1995.4-2011.0). No se puede negar que las coordenadas SIRGAS95, se ven afectadas en el transcurso del tiempo, sin embargo, aplicando la técnica rigurosa de transformación de coordenadas entre ITRFs, se puede transformar las coordenadas SIRGAS95 hacia la época e ITRF vigente al momento de la observación GNSS, con un cierto nivel de precisión dado por los parámetros de transformación y las velocidades utilizadas. Esta transformación, únicamente se puede garantizar hasta el 15 de abril de 2016, puesto que posterior al terremoto de Pedernales, la deformación y discontinuidades de las series de tiempo, son muy grandes de tal manera que no se puede utilizar las velocidades del VEC_Ec, y tampoco los parámetros de transformación.

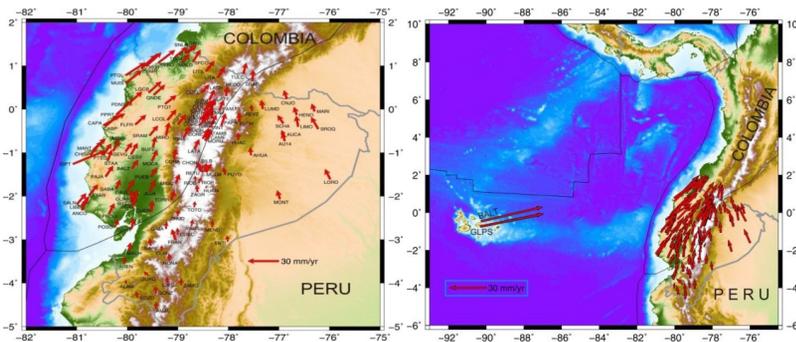


Figura 5. Campo de Velocidades del Ecuador-VEC_Ec.

Este desplazamiento concuerda con la teoría y confirma la deformación elástica local del Marco de Referencia SIRGAS95, inducida principalmente por la convergencia tectónica, al llegar a los 15 años de vigencia a nivel nacional.

Campañas de medidas GPS de la Red Pasiva RENAGE y Red Activa REGME a nivel nacional, para la actualización del Marco de Referencia Nacional

Tomando en cuenta el nivel de deformación de SIRGAS95 y la finalización del tiempo de vida útil, el Instituto Geográfico Militar, ejecutó las actividades técnicas-científicas con el objetivo de actualizar el Sistema de Referencia SIRGAS 95, hacia un nuevo Marco Geocéntrico de Referencia Nacional, materializado a través de la Red Pasiva RENAGE-Red Nacional GPS del Ecuador y la Red Activa REGME-Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador.

Las campañas de medidas GPS a nivel nacional se ejecutaron entre el año 2014 y 2015. En total se observó 144 puntos RENAGE, cada uno durante 48 horas de rastreo GPS continuo; y 45 estaciones GNSS permanentes REGME.

Toda esta infraestructura Geodésica fue diseñada de manera homogénea a nivel nacional; costa, sierra, oriente y región insular. Para garantizar la campaña de campo, se dividió al país en 14 bloques, cada uno conformado por 10 vértices pasivos RENAGE.

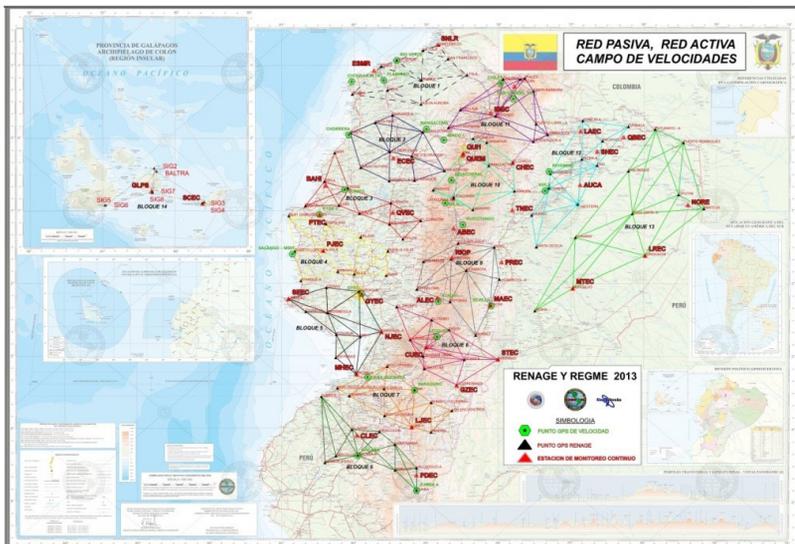


Figura 6. Diseño de la infraestructura Geodésica Nacional.

La etapa de análisis, procesamiento y ajuste de la información estuvo en ejecución a partir del año 2016; sin embargo tuvo lugar el sismo de Pedernales y con ello la necesidad de tomar urgentes medidas y decisiones técnicas-científicas. Con este evento, se puso en evidencia la vulnerabilidad de la Georreferencia nacional.

Terremoto de Pedernales 7.8 Mw, 16 de abril de 2016

De acuerdo al Informe Sísmico Especial No.7-2016, del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN), se describe que:

El sismo del sábado 16 de abril a las 18h58 hora local (UTC 23h58), de magnitud 7.8 Mw (magnitud momento), cuyo hipocentro se ubicó frente a Muisne (Manabí), a 20 km de profundidad (Nocquet *et al.*, 2016), fue resultado del deslizamiento en el plano de Subducción separando la placa tectónica de Nazca (placa oceánica) del bloque continental llamado Bloque Nor-Andino (Nocquet *et al.*, "Motion of continental slivers and creeping subduction in the northern Andes", 2014). 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) (<<http://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1317-informe-sismico-especial-n-13-2016>>, IGEPN, Quito, 2016).

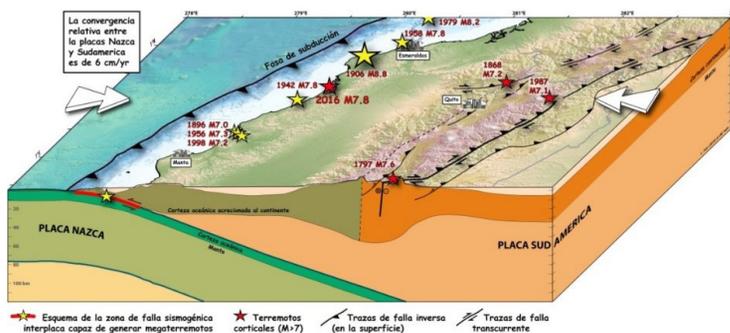


Figura 7. Subducción en el Ecuador, sismo de Pedernales

Fuente: Font, Y. and LMI Team, IRD-IGEPN (Font, 2016).

Está claro que las principales pérdidas de manera irremediable siempre serán las vidas humanas y las catástrofes sociales que se deriven de estos eventos

telúricos; sin embargo, en lo que compete al campo de la Georreferencia Nacional, existen grandes niveles de deformación local, destrucción de infraestructura Geodésica tanto de las Redes Pasivas como Redes Activas; y cambios irreversibles que determinan un antes y un después del terremoto, en términos de coordenadas oficiales e insumos Geográficos-Cartográficos que se generaron a partir del empleo de la Geoinformación Oficial.

El terremoto provocó graves afectaciones tanto en la Red Pasiva RENAGE, como en la Red Activa REGME, principalmente las estaciones cercanas al epicentro. Se ejecutó una salida de campo urgente, por parte del personal técnico de Geodesia_GNSS, quienes se encargaron de rescatar la información registrada por las estaciones; y ejecutar mantenimientos correctivos de los equipos. Las estaciones REGME intervenidas fueron las siguientes:

Tabla 2
Mantenimiento de estaciones REGME intervenidas posterior al terremoto

Nombre	Código
Las Peñas	LPEC
Pedernales	PEEC
El Carmen	ECEC
Chone	ONEC
Portoviejo	PVEC
Pajan	PJEC
Santa Elena	SEEC
Guayas	GUEC
Naranjal	NJEC

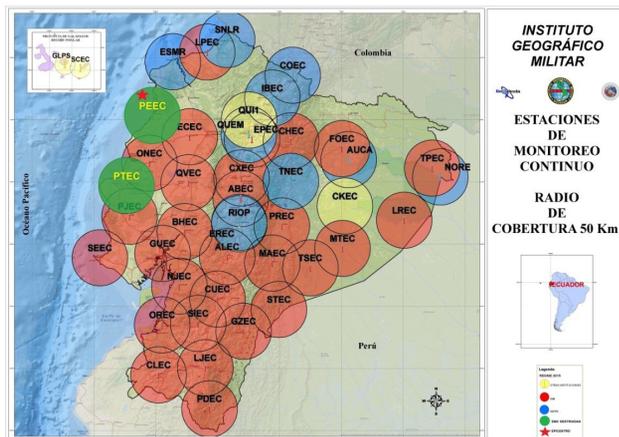


Figura 8. Ubicación Geográfica Estaciones REGME, fecha de corte: 16 de abril de 2016.

Estación GNSS Pedernales Ecuador (PEEC)

La estación GNSS fue instalada en el edificio municipal de Pedernales, mediante un convenio de cooperación entre el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Pedernales y el IGM; en el año 2014. Es una estación tipo CORS,⁵ enlazada a la REGME Nacional y a la Red SIRGAS_Continental. Es la estación REGME_IGM más cercana al epicentro del terremoto, encontrándose aproximadamente a 31 km de distancia (línea de aire); compuesta por una Antena marca TRIMBLE, modelo CHOKER RING GNSS - TRM59800.00 SCIS; Receptor marca TRIMBLE, modelo NETR9, sistema de paneles solares fotovoltaicos y enlace de Internet dedicado banda ancha para transmisión de datos en tiempo real hacia el centro de control en Quito. Adicionalmente cuenta con un Sensor Meteorológico marca Paroscientific, modelo MET 4A.



Figura 9. Estación Pedernales Ecuador (PEEC), fotografía de agosto 2014.

La intensidad del terremoto, afectó notablemente la infraestructura, por tal razón, parte de los equipos y accesorios fueron evacuados por seguridad.

El centro de control de la REGME ubicado en el IGM Quito, perdió conectividad y respuesta con la estación PEEC en la tarde del 16 de abril debido al terremoto, sin embargo tanto la antena como el receptor GNSS registraron datos durante el periodo pre-sísmico, co-sísmico y post-sísmico desde el 16 de abril de 2016-18:45 hora local (DOY 107, UTC 23:45), hasta el 17 de abril de 2016-10h30 tiempo local (DOY 108, UTC 15:30). Posterior a esto, los equipos perdieron el suministro eléctrico de los paneles solares y sistema de energía fotovoltaica que se malogró en el evento sísmico.

Las estaciones REGME_IGM registran datos GNSS a un intervalo de un segundo y un ángulo de corte (ángulo de máscara) cero grados.

⁵
CORS.- Continuously Operating Reference Stations.

El análisis a priori de los datos GNSS, consistió en transformar la información original binaria generada por el equipo (RAW DATA), en formato RINEX⁶ y mediante la técnica PPP se utilizó el software RTKLIB (Takasu, 2013), para el procesamiento de los datos. Dado que el sismo principal 7.8 Mw tuvo lugar en el umbral del día GPS 107 e inicio del 108, es decir sábado 16 de abril a las 18h58 hora local (UTC 23h58); fue mandatorio ejecutar un Merge de los datos RINEX de ambos días para garantizar el análisis por completo de la información obtenida.

La técnica de Posicionamiento Punto Preciso (PPP), es un método de posicionamiento GNSS utilizando un solo receptor geodésico de manera autónoma, que emplea principalmente los productos de corrección de órbita ephemerides y error de reloj, puestos a disposición por parte del Servicio GNSS Internacional (IGS) y un esquema de modelamiento adicional de errores (ionosféricos, troposféricos, calibración de antenas, etc.), con la finalidad de obtener una solución con una exactitud a nivel de cm/dm. Esto sugiere que la técnica PPP tiene una ventaja sobre los métodos diferenciales en que sólo es necesario un solo receptor (en la posición del usuario), eliminando la necesidad de que el usuario establezca su propia estación de referencia local o tenga acceso a las observaciones de una o más estaciones de referencia con coordenadas conocidas (Rizos C., 2012).

El sismo principal de 7.8 Mw, fue precedido por un sismo premonitor que ocurrió a las 18h47 de magnitud 5.0 ML magnitud local (IGEPN, Informe Sísmico Especial N. 13-2016, 2016). Si bien la intensidad del terremoto fue registrada en todo el territorio nacional, es importante conocer la contribución del movimiento sísmico inducido sobre las antenas de las estaciones GNSS cercanas al epicentro y la variación de las coordenadas oficiales.

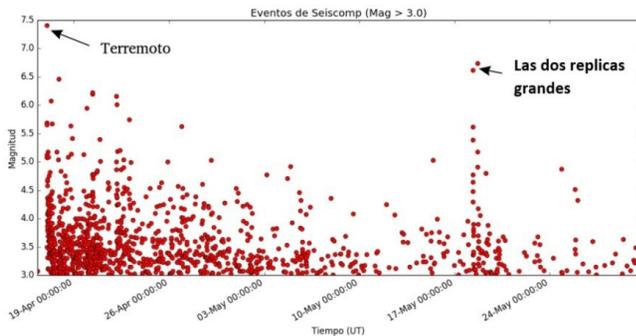


Figura 10. Sismo Principal y réplicas (IGEPN, Informe Sísmico Especial N. 13-2016, 2016).

⁶ Receiver INdependent Exchange, RINEX. Ficheros de texto orientados a almacenar, de manera estandarizada, medidas proporcionadas por receptores de sistemas de navegación por satélite, como GPS, GLONASS, EGNOS, WAAS o Galileo.

Al analizar el movimiento de la antena de PEEC, mediante un Ground Track de PPP (es una vista aérea que muestra el movimiento de la antena GNSS durante la fase sísmica), se puede ver el desplazamiento que experimentó la antena justamente en el periodo pre-sísmico, co-sísmico y post-sísmico hasta el 17 de abril de 2016, 10:30 horas, tiempo local (UTC 15:30).

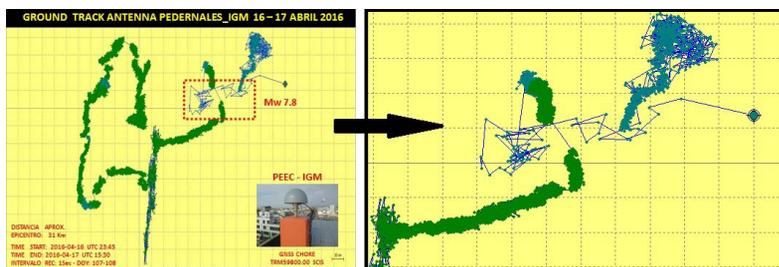


Figura 11. PPP Ground Track_PEEC.

Previo al terremoto la antena mantenía su posición “estable” (dentro de los parámetros normales, puesto que obviamente la coordenada cambia cada segundo en un nivel mínimo), determinada por las coordenadas oficiales que se mantenían fijas, sin embargo, la antena registró el movimiento del sismo cada segundo, permitiendo conocer la variación de la posición de la antena inicial, dada por la diferencia de coordenadas y la intensidad del terremoto sobre las edificaciones aledañas que colapsaron.

La coordenada de la antena pre-sismo respecto a la post-sismo tiene una diferencia cercana al metro lo cual en términos de deformación del Marco de Referencia Nacional es evidente que se destruyó la Georreferencia oficial. La diferencia de coordenadas de PEEC, tienen una contribución importante del edificio del GADMP (4 pisos), el cual a pesar de que no colapsó por completo como el resto de edificaciones a su alrededor, experimentó graves afectaciones que alteran sin duda la posición inicial de la antena. Cabe mencionar que pese al terremoto la columna de concreto y el dispositivo de centrado forzoso que soporta la antena GNSS, se mantuvieron fijas haciendo posible el rastreo y adquisición de datos de manera efectiva. La única manera de perder la antena GNSS, sin duda sería bajo el colapso completo del edificio.

El Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional y el IRD, poseen una estación GPS muy cercana al epicentro del sismo denominada PEDERNALES-PDNS, se encuentra aproximadamente a 25 km de distancia en línea de aire, conformada por una Antena marca TRIMBLE, modelo ZEPHYR GEODETIC-TRM41249.00 NONE; Receptor marca TRIMBLE, modelo NETRS, sistema de

paneles solares fotovoltaicos; No cuenta con canal de transmisión de datos en tiempo real. Esta estación es parte de la Red Nacional de Geodesia-RENGEO, está compuesta por GPS geodésicos de doble frecuencia y alta resolución, destinada al monitoreo de la deformación de los flancos de los volcanes y de la corteza continental (IGEPN, Red Nacional de Geodesia RENGEO, 2017).



Figura 12. Tracking_PEEC.



Figura 13. Tracking_PEEC.



Figura 14. Estación Pedernales PDNS–IGEPN–IRD.

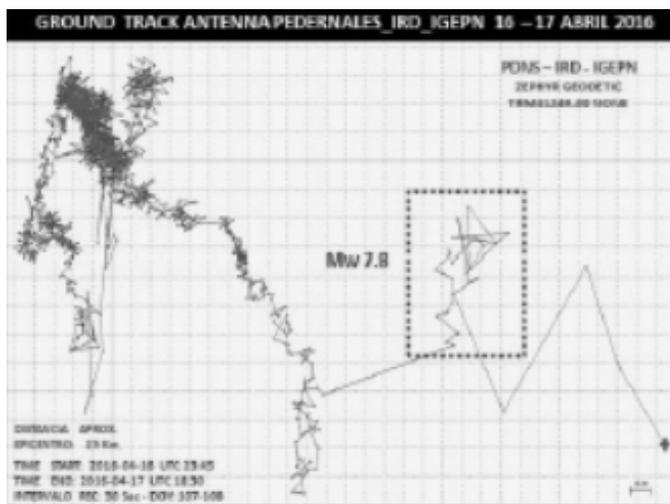


Figura 15. PPP Ground Track_PDNS.

Al igual que PEEC_IGM, el análisis a priori de los datos GPS de PDNS_IGEPN, consistió en transformar la información original binaria generada por el equipo (RAW DATA), en formato RINEX y mediante la técnica PPP se utilizó el software RTKLIB (Takasu, 2013), para el procesamiento de los datos.

El análisis del movimiento de la antena de Pedernales-PDNS, mediante un Ground Track de PPP, muestra el desplazamiento que experimento la antena justamente en el periodo pre-sísmico, co-sísmico y post-sísmico desde el 16 de abril de 2016, 18:45 tiempo local (DOY⁷ 107, UTC 23:45), hasta el 17 de abril de 2016, 13:30 horas, tiempo local (DOY 108, UTC 18:30). La estación PDNS_IGEPN se encuentra instalada directamente sobre el terreno y el desplazamiento de las coordenadas muestra diferencias cercanas al metro, al igual que PEEC.

En la Figura 16 se puede ver la variación de la posición de las antenas (PEEC y PDNS) en la componente horizontal y vertical, durante el sismo. Dada la cercanía de las dos antenas al epicentro, los saltos en las componentes son similares.

Las antenas registraron la variación de la velocidad producto del movimiento en el transcurso del tiempo, estas variables permiten inferir el nivel de aceleración que experimentó la infraestructura que soporta la antena GNSS.

En el caso de PEEC, la Figura 17, evidencia el nivel de aceleración que soportó la superficie del suelo y la contribución sobre el edificio del GADMP, se observa claramente los picos que registró la antena. Es importante mencionar que la aceleración es la medida de un terremoto más utilizada en ingeniería para establecer normativas sísmicas y zonas de riesgo sísmico. Durante un terremoto, el daño en los edificios y las infraestructuras está íntimamente relacionado con la velocidad y la aceleración sísmica, y no con la magnitud del temblor. En terremotos moderados, la aceleración es un indicador preciso del daño, mientras que en terremotos muy severos la velocidad sísmica adquiere una mayor importancia.

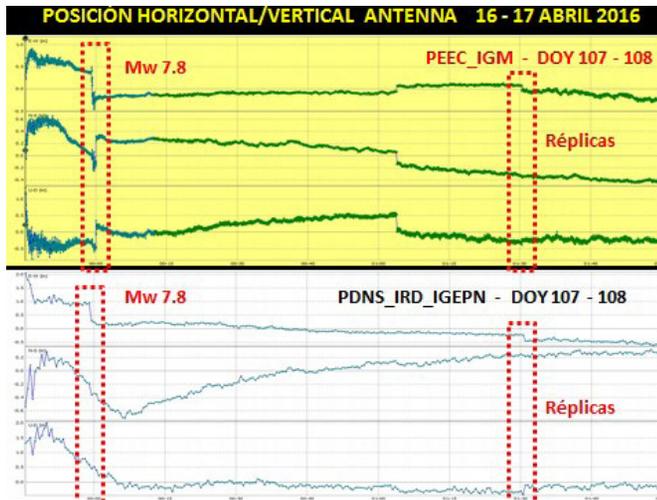


Figura 16. Variación Posición PEEC y PDNS.

⁷ Day of Year GPS, DOY.

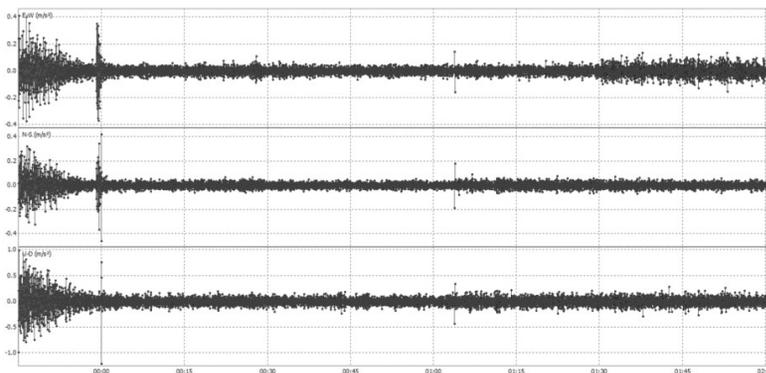


Figura 17. Aceleración PEEC.

Podemos extender el análisis hacia dos estaciones similares, PORTOVIEJO IGM-PVEC; y CHISPAS IGEPN-CHIS.

PVEC, es una estación GNSS del IGM similar a PEEC, enlazada a la REGME y a la red SIRGAS CONTINENTAL. Se encontraba instalada en el edificio del Municipio de Portoviejo GADMP (5 pisos), a partir del año 2016. Posterior al terremoto los equipos fueron evacuados y la estación se dio de baja; la distancia hasta el epicentro fue de 158 km aproximadamente.



Figura 18. Estación Portoviejo Ecuador-PEEC, fotografía de enero 2016.

Aplicando la misma técnica PPP, se procesó la información generada por la estación a intervalo de registro un segundo, desde el 16 de abril de 2016-18:45 hora local (DOY 107, UTC 23:45), hasta el 17 de abril de 2016-06:52 horas, tiempo local (DOY 108, UTC 11:52) y se obtuvo un Ground Track de la antena para el análisis del movimiento.

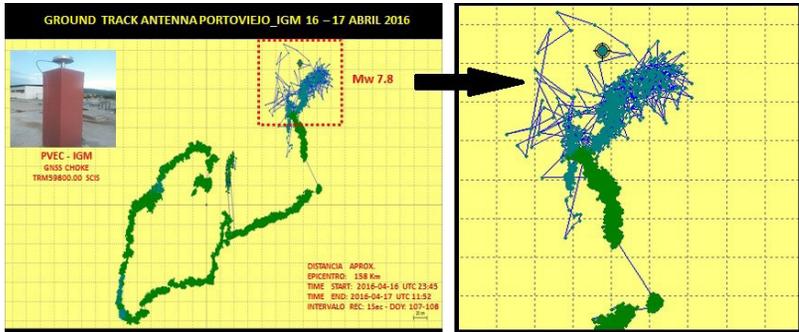


Figura 19. PPP Ground Track_PVEC.

La estación CHIS, es propiedad el IGEPN-IRD, se encuentra ubicada en la terraza sobre una edificación de un piso en las cercanías entre Portoviejo y Manta, a una distancia aproximada de 163 km del epicentro.



Figura 20. Estación Chispas CHIS-IGEPN-IRD.

Tomando la misma técnica de PPP se procesó la información registrada por la estación a una tasa de registro de 30 segundos, desde el 16 de abril de 2016-18:45 hora local (DOY 107, UTC 23:45), hasta el 17 de abril de 2016-12h20 tiempo local (DOY 108, UTC 17:20), obteniendo el siguiente Ground Track de la antenna.

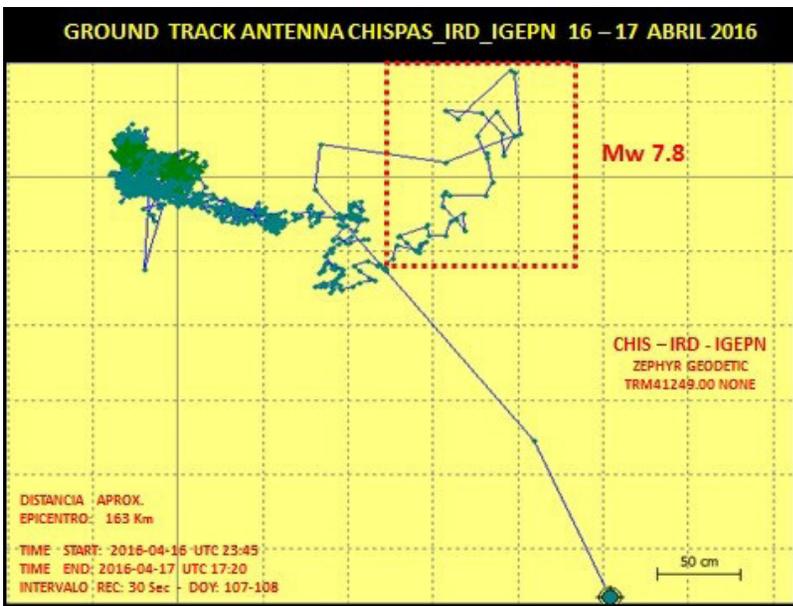


Figura 21. PPP Ground Track_CHIS.

En la Figura 22, se puede ver la variación de la posición de las antenas (PVEC y CHIS) en la componente horizontal y vertical, durante el sismo.

Considerando las diferencias que existen en los sitios en los cuales se instalaron las estaciones, se observa la diferencia del comportamiento de la aceleración, siendo más fuerte el nivel presentado en PVEC sin duda por la contribución del edificio sobre la estabilidad de la antena GNSS.

Finalmente las estaciones del IGM CHONE-ONEC y El Carmen ECEC, bajo similares condiciones de equipos e infraestructura de montaje sobre el edificio de la Universidad Laica Eloy Alfaro y el edificio del GADM Chone respectivamente, muestran el movimiento de la antena inducida por el sismo durante el tiempo de ocurrencia.

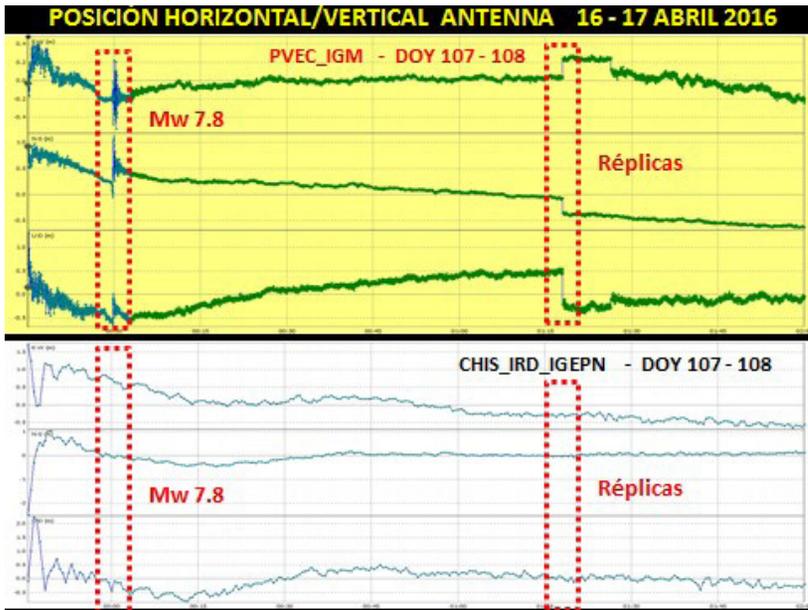


Figura 22. Variación Posición PVEC y CHIS.

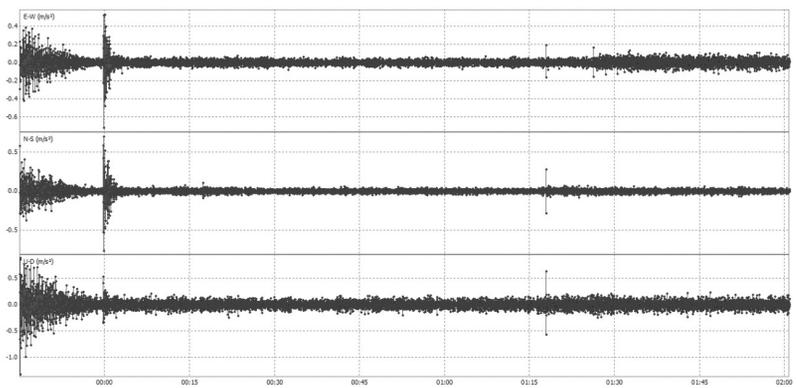


Figura 23. Aceleración PVEC.

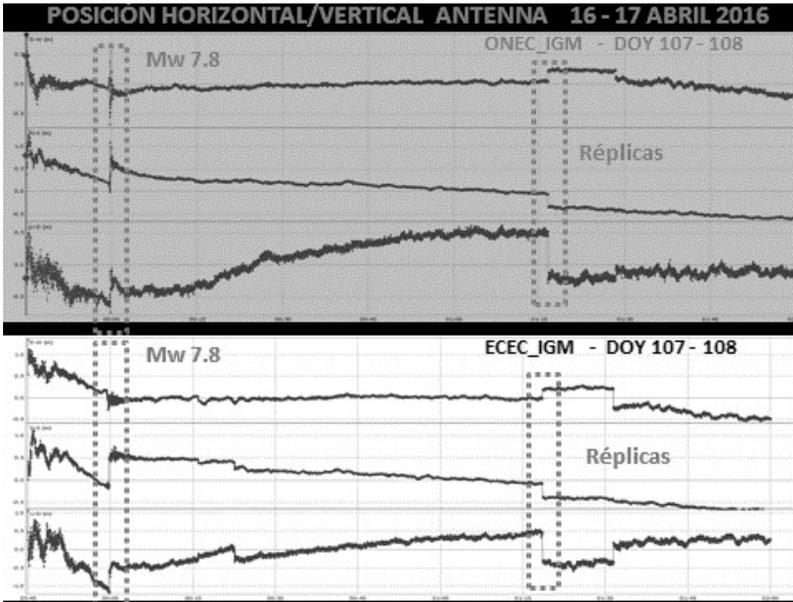


Figura 24. Variación Posición ONEC y ECEC.

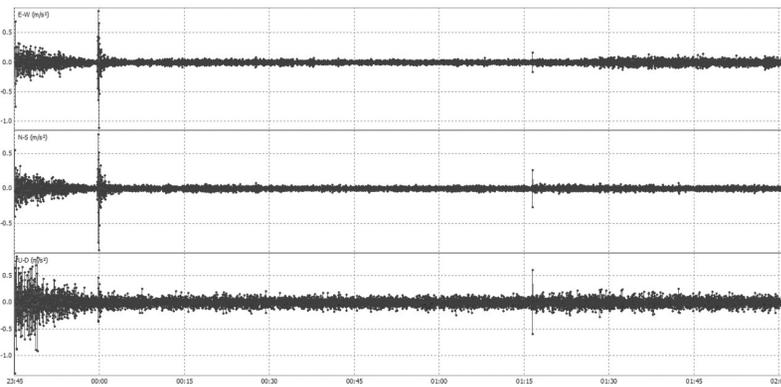


Figura 25. Aceleración ONEC.

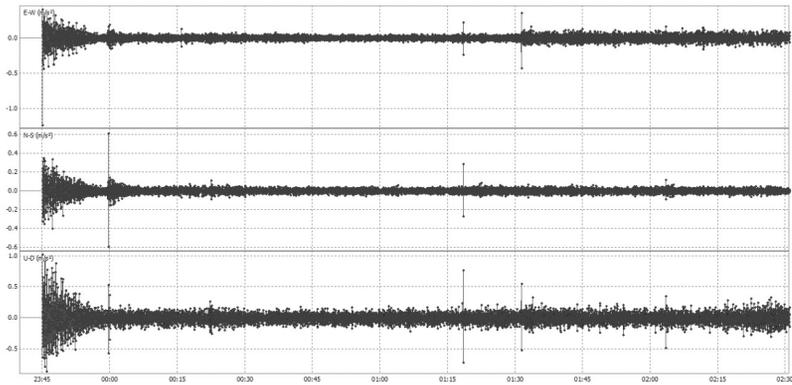


Figura 26. Aceleración ECEC.

Diferencia de coordenadas pre-sismo y post-sismo

De acuerdo a lo presentado en los párrafos anteriores, está claro que las coordenadas oficiales pierden su consistencia y precisión con el transcurso del tiempo, y principalmente con la ocurrencia de un terremoto. Esto determina un alto nivel de deformación de la componente horizontal en función de la magnitud del evento telúrico.

Todo evento sísmico, principalmente uno de magnitud 7.5 Mw en adelante, destruye la consistencia de un Marco de Referencia Nacional y los efectos geodinámicos que se derivan de este evento, se mantienen presentes en la mayoría de casos a lo largo de los tres años siguientes hasta llegar a consolidar nuevamente la estabilidad del terreno.

Los sitios que se encuentran materializados en el área del sismo no pueden ser usados como referencia hasta que el efecto post-sísmico desaparezca, por tal razón, es importante levantar mediciones GPS de los sitios del área afectada y evaluar el comportamiento hasta comprobar que los efectos geodinámicos del sismo desaparecieron. Sin duda la obtención de estas observaciones GNSS proporcionadas por las estaciones REGME, son el insumo principal para analizar la estabilidad de las componentes horizontal y vertical. De esta manera se mantiene actualizado el Marco de Referencia Oficial.

En la Tabla 3, se muestra la diferencia que existe entre las coordenadas pre-sismo, ITRF2008, correspondientes a la semana GPS 1892 del 14 de abril de 2016 y las coordenadas Ppost-sismo ITRF2008, semana GPS 1893 del 20 de abril de 2016.

Tabla 3
Diferencia de coordenada pre-sismo 14 de abril de
2016 y post-sismo 20 de abril de 2016

Nombre	Institución	ΔX (m)	ΔY (m)	Δh (m)	Δ Posición (m)	Distancia aprox. epicentro km
PDNS	IGEPN-IRD	0,7348	-0,0897	0,0788	0,7403	25
PEEC	IGM	0,7148	-0,0606	0,0818	0,7174	31
ECEC	IGM	0,2042	0,0153	-0,0488	0,2048	96
ONEC	IGM	0,0965	-0,0689	-0,0067	0,1186	113
QVEC	IGM	0,0587	0,0132	-0,0359	0,0601	160
QUEM	IGM	0,0546	0,0165	-0,0069	0,0571	191
EPEC	IGM	0,0512	0,0083	-0,0088	0,0519	195
CXEC	IGM	0,0399	0,0104	-0,0202	0,0412	215
ESMR	IGM	0,0294	-0,0138	0,0150	0,0325	83
IBEC	IGM	0,0278	0,0102	0,0023	0,0296	222
ABEC	IGM	0,0260	0,0100	-0,0183	0,0278	237
CHEC	IGM	0,0238	0,0035	-0,0039	0,0241	268
CHIS	IGEPN-IRD	0,0212	0,0109	0,0363	0,0238	163
LPEC	IGM	0,0219	-0,0019	0,0069	0,0220	137
TNEC	IGM	0,0198	0,0043	-0,0088	0,0203	291
COEC	IGM	0,0159	0,0060	0,0025	0,0179	261
RIOP	IGM	0,0153	0,0065	-0,0143	0,0186	271
LJEC	IGM	-0,0008	-0,0139	-0,0034	0,0190	482

Se puede observar en la Tabla 3, que el desplazamiento de coordenadas de las estaciones PDNS_IGEPN (0.7403 m) y PEEC_IGM (0.7174 m), difieren en 0.0229 m. A pesar que las dos estaciones se encuentran relativamente cerca, la diferencia puede radicar en que PDNS está instalada directamente sobre el terreno y PEEC está instalada sobre el edificio del GADMP; en conclusión la contribución del movimiento del edificio estaría en el orden de los ~0.030 m. aproximadamente, o que la distancia a la zona de ruptura sea ligeramente diferente (hay 25 Km. entre las dos estaciones).

En la Tabla 4, se muestra la diferencia que existe entre las coordenadas oficiales SIRGAS95, ITRF 94, época 1995.4 Pre-sismo y las coordenadas Post-sismo ITRF2008, correspondientes a la semana GPS 1893 del 20 de abril de 2016.

Tabla 4

Diferencia de coordenada pre-sismo SIRGAS95 ITRF94 y post-sismo ITRF2008

Código	ΔX (m)	ΔY (m)	Δh (m)	Δ Posición (m) ITRF94 - ITRF2008	Distancia aprox. epicentro km.
IBEC	-0.044	-0.258	0.115	0.286	222
ESMR	-0.247	-0.323	0.111	0.421	83
PEEC	NO DATA				
LPEC	-0.260	-0.330	0.069	0.426	137
QUEM	-0.059	-0.283	0.066	0.297	191
ONEC	-0.017	-0.288	0.234	0.371	113
ABEC	0.044	-0.174	0.072	0.193	237
QVEC	-0.048	-0.309	0.088	0.325	160
CXEC	-0.108	-0.284	0.105	0.321	215
ECEC	0.124	-0.340	0.143	0.389	96
EPEC	-0.064	-0.258	0.092	0.281	195
CHEC	0.086	-0.220	0.033	0.239	268
TNEC	0.048	-0.219	0.051	0.230	291

Información y resultados adicionales sobre los desplazamiento co-sísmicos del terremoto de Pedernales, se encuentran presentados en "Supercycle at the Ecuadorian subduction zone revealed after the 2016 Pedernales earthquake" (Nocquet *et al.*, 2016).

En párrafos anteriores se presentó las diferencias de SIRGAS95 analizadas en la época 2011.0 (véase Tabla 1), y como se puede observar en la Tabla 3 y Tabla 4, las diferencias en el año 2016 aumentaron de manera considerable producto de la deformación de la corteza por efecto del terremoto a nivel nacional. Estas diferencias confirman lo siguiente:

- No se puede transformar coordenadas entre ITRF94 e ITRF2008 puesto que las velocidades VEC_EC y parámetros son válidos hasta el 15 de abril de 2016.
- La diferencia de las coordenadas SIRGAS95 posterremoto son grandes y por ende estas coordenadas son válidas únicamente hasta el 15 de abril de 2016.
- Los efectos de deformación post-sismo del Marco de Referencia Nacional SIRGAS95 se prolongan a lo largo del territorio nacional y por ende no se puede segmentar al país en diferentes zonas de afectación y utilizar coordenadas con diferentes ITRF y en distintas épocas de referencia.
- Las coordenadas variaron en magnitudes considerables y eso es concluyente para ejecutar una actualización homogénea del nuevo Sistema Nacional de Referencia Espacial SIRGAS-Ecuador.

Procesamiento y ajuste de datos GPS mediante el software científico GAMIT/GLOBK

La plataforma de procesamiento científico usado en el proyecto es el software GAMIT/GLOBK versión 10.6 desarrollado por el Instituto de Tecnología de Massachusetts (King, 2015) y el sistema operativo LINUX (distribución Ubuntu), el cual es una herramienta informática muy poderosa que permite desarrollar aplicaciones con alta seguridad, escalabilidad e interoperabilidad para automatizar el tratamiento y flujo de datos. Tanto el sistema operativo como el software de procesamiento científico son herramientas informáticas catalogadas como Open Source.

GAMIT, realiza el cálculo de soluciones libres (libre de un marco de referencia) en el espacio, para lo cual utiliza dobles diferencias de fase entre las estaciones y satélites para cancelar completamente los efectos de las variaciones del reloj. GAMIT incorpora un algoritmo de mínimos cuadrados ponderados para calcular las posiciones relativas de un conjunto de estaciones.

La estrategia de procesamiento adoptada incluye la aplicación de variables que intervienen en un procesamiento científico, a través de la inclusión (*download*) de los Parámetros de Rotación de la Tierra (EOP), Órbitas Precisas del IGS (efemérides Reprocesadas-repro1), Grillas Atmosféricas, Carga Oceánica, efectos de las mareas de la Luna y del Sol (*ut1*, *luntab*, *soltab*) respecto al Marco de Referencia.

El procesamiento también incluye parámetros calculados como los Retrasos al Cenit de las ondas de los satélites inducidas por la tropósfera, la posición y las ambigüedades de fase. Dado que el modelo funcional sobre las observaciones y los parámetros no es lineal, el ajuste por mínimos cuadrados para cada sesión es necesario (en ciertos casos) repetirlo hasta encontrar la convergencia.

El resultado del procesamiento son los *h-files* obtenidos por cada día procesado, los cuales poseen todas las estimaciones de la solución libre (*loosely constrained*), conjuntamente con las matrices de varianza/covarianza.

GLOBK, es un Filtro de Kalman cuyo propósito es combinar soluciones obtenidas del procesamiento de datos GPS. La entrada primaria son las soluciones libres — *loosely constrained (h-files)* obtenidas del procesamiento GPS con GAMIT. Estas soluciones son usadas en tres aplicaciones con GLOBK:

- Para generar series de tiempo de las estaciones, realizar test de repetibilidad e identificar y remover outliers de cada estación.
- Para obtener una estimación promedio de las coordenadas de múltiples días de procesamiento, combinando sesiones individuales de las observaciones de los sitios GPS.
- Para estimar velocidades de las estaciones a partir de las coordenadas promedio obtenidas de varios años de observación repetitiva.

Posterior al terremoto, es importante ejecutar un análisis de la estabilidad de las coordenadas en función del tiempo y definir una época de referencia que permita estabilizar la solución ajustada para obtener las nuevas coordenadas oficiales que garanticen la ejecución de todas las actividades relacionadas con la componente de georreferencia como cartografía, mapeo, catastro, etc., dentro de los niveles de precisión aceptables.

Para el análisis de la estabilidad, se procesó un total de 11 semanas GPS a partir de la semana pre-sismo 1890 (comprende del 27 de marzo al 02 de abril) hasta la semana post-sismo 1900 (comprende del 5 al 11 de junio), obteniendo la repetibilidad y las series de tiempo.

La Repetibilidad (wrms) cuantifica la precisión en término de la diferencia y variación de la coordenada de un mismo punto en el transcurso del tiempo (27 de marzo al 11 de junio de 2016, semana GPS 1890 a 1900); considerando todos los agentes externos que puedan provocar un salto importante en las series de tiempo de cada estación.

Cabe mencionar que se consideran como valores óptimos de WRMS para las componentes norte y este entre 2 y 3 mm, y el valor óptimo para la componente vertical es el doble o triple del valor del wrms de las componentes N-E. Sin embargo como se puede observar en los siguientes gráficos estadísticos, los valores máximos en las componentes Norte, Este y Altura son de 41.7 mm, 312.4 mm y 87.5 mm respectivamente, en función a su cercanía al epicentro del terremoto.

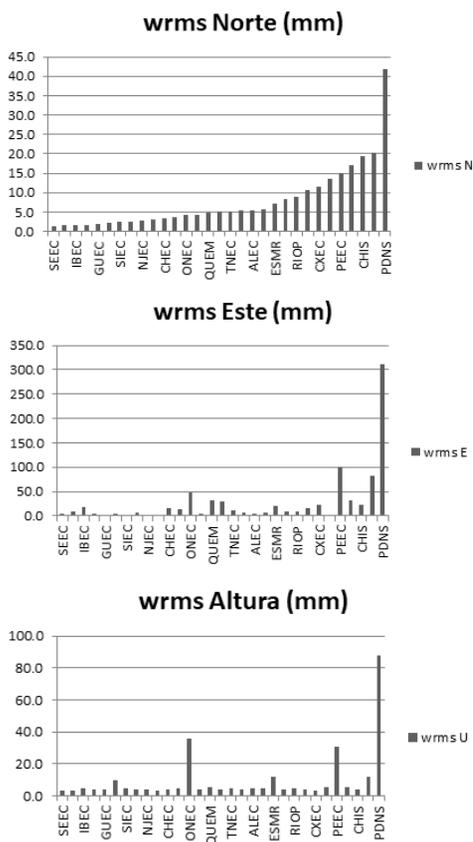


Figura 27. Nivel de Repetibilidad de las estaciones permanentes.

Tanto la repetibilidad (wrms) como las series de tiempo, están expresadas en el Marco de Referencia Global ITRF2008.

Las series de tiempo muestran los resultados obtenidos respecto al valor promedio de las posiciones de los puntos calculadas para cada día.

A continuación se presentan tres ejemplos de series de tiempo obtenidas en diferentes estaciones REGME y RENGEO, en función de la distancia al epicentro. Es evidente los saltos y discontinuidades generadas por el Sismo Principal y las réplicas:

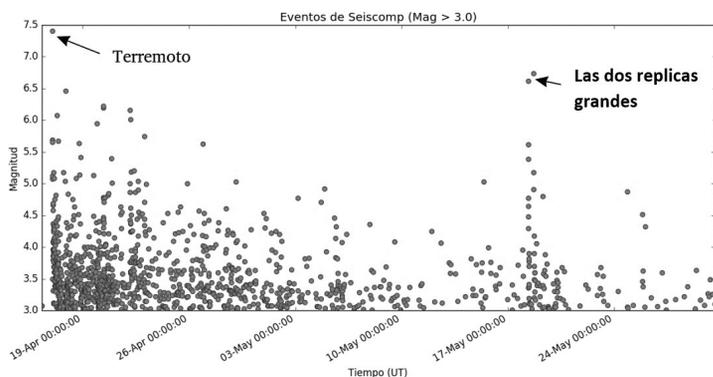


Figura 28. Sismo Principal y réplicas ((IGEPN, Informe Sísmico Especial N. 13 - 2016, 2016).

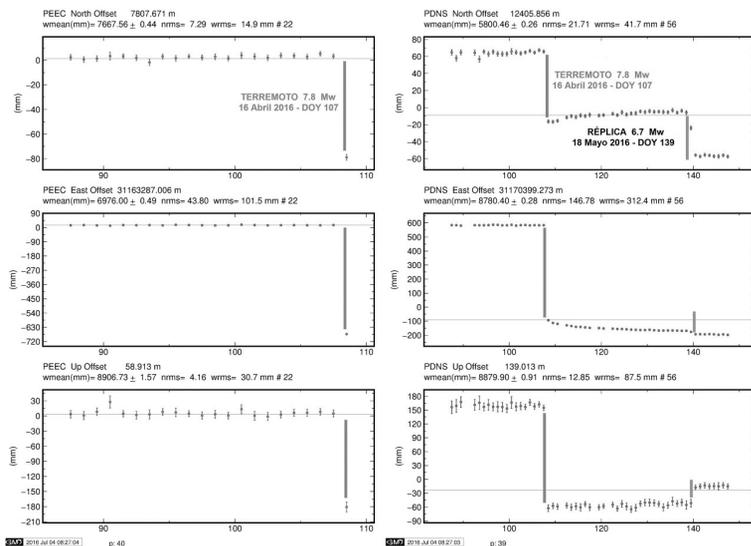


Figura 29. Serie de Tiempo PEEC y PDNS.

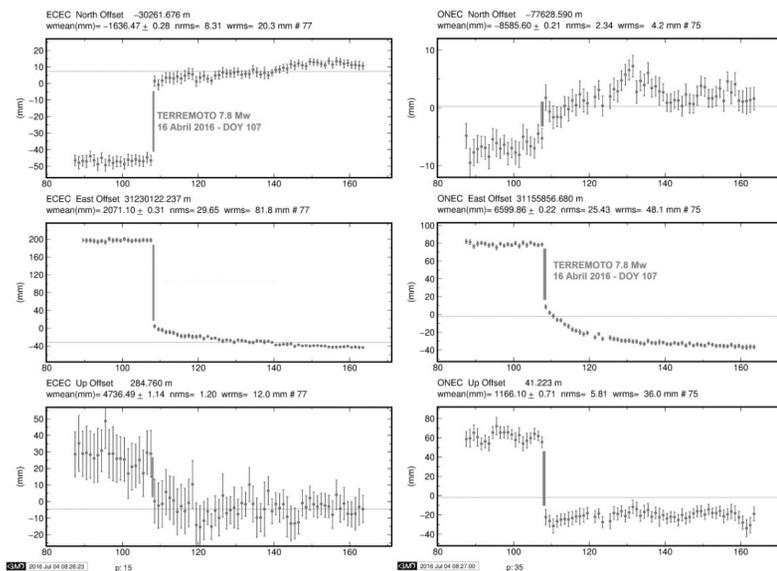


Figura 30. Serie de Tiempo ECEC y ONEC.

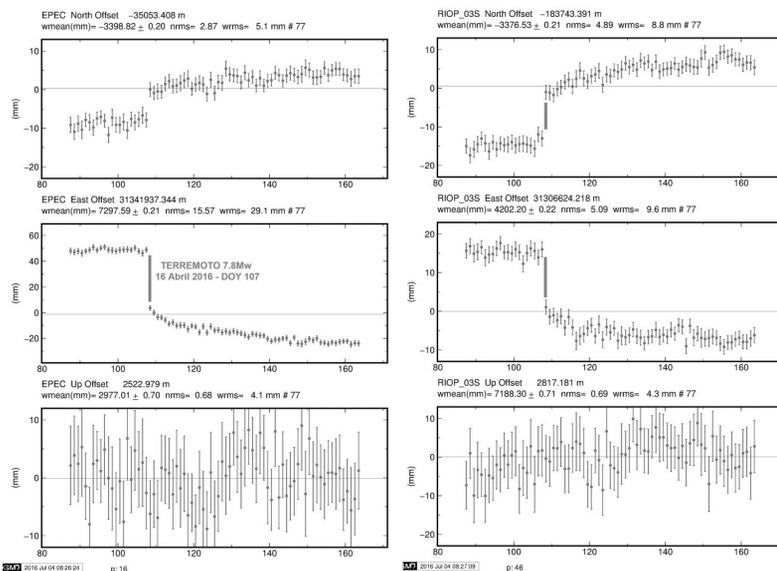


Figura 31. Serie de Tiempo EPEC y RIOP.

Estabilización de la solución final

Dada la necesidad de contar con nuevas coordenadas post-sismo y en función de las réplicas sísmicas asociadas al terremoto, se decidió tomar la semana 1900 para estabilizar la solución final y obtener las nuevas coordenadas precisas, puesto que la serie temporal muestra cierto nivel de estabilidad respecto a las anteriores semanas cercanas al terremoto.

Para estabilizar la Solución Final, GLOBK asume el modelo de transformación de Helmert y calcula catorce parámetros de transformación: 3 Rotaciones (R), 3 Traslaciones (T), 1 Factor de Escala (D) y sus respectivas tasas de variación (rates R1, R2, R3, T1, T2, T3 y D) con respecto al ITRF.

Estos 14 parámetros son usados para estabilizar la Solución Final (libre) dentro de un Marco de Referencia Global, por tal razón la Solución Final, está referida al ITRF 2008, época de referencia 2016.43.

Para el cálculo de los 14 parámetros debemos escoger estaciones del IGS como referencia, tomando en cuenta una buena geometría, es decir, cuya ubicación cubra toda el área del proyecto por niveles de distancia en los cuatro cuadrantes (en lo posible las más cercanas), que posean coordenadas en el ITRF que estamos calculando el proyecto (en este caso ITRF2008) y considerando únicamente las estaciones que no estén afectadas por fenómenos geofísicos transitorios (cambios bruscos de la posición con respecto al movimiento lineal).

Se usaron 24 estaciones IGS como referencia para estabilizar la solución final. En geodesia, este procedimiento se define generalmente como "Estabilización", pero es más conocido como "Transformación al Marco de Referencia", por lo tanto la solución final está bien definida dentro de un Marco de Referencia Global, en este caso el ITRF2008.

Nivel de acuerdo y precisión de los resultados obtenidos del procesamiento GAMIT/GLOBK

Aplicando de manera rigurosa la estrategia de análisis, procesamiento y ajuste científico, se obtuvo como resultado las coordenadas de 30 estaciones de la REGME, determinadas al nivel de 2 milímetros en la componente horizontal y 4 milímetros en la componente vertical.

El nivel de acuerdo de la Solución Final de la semana GPS 1900 obtenida con GAMIT/GLOBK, respecto a la Solución Semanal SIRGAS sir16P1900.crd es el siguiente:

Tabla 5

Nivel de acuerdo de las coordenadas finales

Nivel de acuerdo GAMIT 1900 sir16P1900.crd
Me_X = 0.00279 m
Me_Y = 0.00215 m
Me_Z = 0.00077 m

Los resultados obtenidos del procesamiento GAMIT/GLOBK, muestran un excelente nivel de acuerdo y precisión, el cual presenta una Media para las tres componentes inferior al centímetro.

El nuevo Sistema Nacional de Referencia Espacial SIRGAS-Ecuador, está constituido por las Estaciones de Monitoreo Continuo REGME, la información GNSS generada en formato Raw Data y RINEX; y las coordenadas ajustadas al ITRF2008, Época de Referencia 2016.4, vigente a nivel oficial a partir del 17 de abril de 2016.

Los mojones de la Red Pasiva RENAGE, no están incluidos en el ajuste debido a que está pendiente la campaña de medidas GPS a nivel nacional.

Evolución del ITRF a lo largo de los últimos 22 años y su contribución con el nuevo Sistema Nacional de Referencia Espacial SIRGAS-Ecuador

La evolución del ITRF en sus diferentes realizaciones, también contribuye con diferencias significativas en la definición de un Marco de Referencia Nacional. La actualización del ITRF presenta las siguientes realizaciones, las cuales en su momento fueron adoptadas como "ITRF vigente" llegando a la solución actual:

Tabla 6
Evolución del ITRF

ITRF SOLUTIONS
ITRF 92
ITRF 93
ITRF 94
Ajuste RENAGE
ITRF 96
ITRF 97
ITRF 2000
ITRF 2005
ITRF 2008
Ajuste REGME
Post-Sismo año 2016
ITRF 2014
Vigente a nivel global a partir de 29-01-2017

Todas las realizaciones incluyen posiciones y velocidades de las estaciones que forman parte de la red de seguimiento en una época de tiempo específica. Las soluciones se encuentran relacionadas por medio de parámetros de

transformación, los mismos que permiten comparar (o migrar de un ITRF a otro) las observaciones en diferentes épocas de medida; por tal razón el ITRF se actualiza constantemente.

A partir de la semana GPS 1934, correspondiente al 29 de enero de 2017, el Servicio GNSS Internacional – IGS, oficializó el nuevo ITRF 2014, vigente a nivel global, es decir que a partir de esa fecha las coordenadas globales serán ajustadas al nuevo ITRF2014. Fuente: IGSMail-7399 e IGSMail-7414 (IGS, 2016).

Consecuentemente es importante actualizar las coordenadas de la red nacional para garantizar la compatibilidad entre el segmento satelital, segmento de control y segmento de usuarios.

Este cambio al igual que las anteriores actualizaciones del ITRS, genera un salto en las series de tiempo de las estaciones, puesto que a partir de esta fecha los productos calculados por el IGS tales como las efemérides satelitales, los parámetros de orientación terrestre EOPs y las correcciones a los relojes de los satélites estarán dados en este nuevo marco de referencia vigente.

Dado que el Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas SIRGAS, incluye en el procesamiento semanal de la red SIRGAS_CON los productos calculados por el IGS, las coordenadas semanales de las estaciones SIRGAS se refieren también al ITRF2014 a partir de la semana GPS 1934; lo cual sugiere a corto plazo la posibilidad de un nuevo ajuste de la REGME nacional.

Conclusiones

- Las coordenadas SIRGAS95 de las estaciones terrestres que materializan la RENAGE, no son válidas para una época diferente a 1995.4, por tal razón es necesario trasladar las coordenadas a la época actual de observación por medio de velocidades y parámetros entre ITRF, para garantizar la compatibilidad entre el segmento espacial, el segmento de control y las mediciones realizadas por el usuario del sistema GPS.
- Las diferencias entre SIRGAS95, ITRF94; época 1995.4 e ITRF2008, época 2011.0; confirman el desplazamiento lineal de los sitios de la RENAGE a través del tiempo, inclusive sin considerar el terremoto del año 2016.
- El mantenimiento del marco de referencia nacional incluye, por lo tanto, aparte de la conservación física del monumento (redes pasivas) y la operación de las estaciones activas, la evolución en el tiempo de las coordenadas, garantizando la consistencia entre el sistema de referencia terrestre y el satelital.
- Todo evento sísmico, principalmente uno de magnitud 7.5 Mw en adelante, destruye la consistencia de un Marco de Referencia Nacional y los efectos geodinámicos que se derivan de este evento, se mantienen presentes en la mayoría de casos a lo largo de los tres años siguientes hasta llegar nuevamente a una velocidad constante.
- Los sitios que se encuentran materializados en el área del sismo no pueden ser usados como referencia hasta que el efecto post-sísmico desaparezca,

por tal razón, es importante levantar mediciones GPS de los sitios del área afectada y evaluar el comportamiento hasta comprobar que los efectos geodinámicos del sismo desaparecieron.

- La coordenadas oficiales de las estaciones REGME, tienen una variación considerable entre el periodo pre-sismo y post-sismo llegando a los ~0.80 m. en las estaciones cercanas al epicentro.
- Posterior al terremoto, no se puede transformar coordenadas entre ITRF94 e ITRF2008 puesto que las velocidades VEC_EC y parámetros son válidos hasta el 15 de abril de 2016.
- La diferencia de las coordenadas SIRGAS95 post-terremoto son grandes y por ende estas coordenadas son válidas únicamente hasta el 15 de abril de 2016.
- Los efectos de deformación post-sismo del Marco de Referencia Nacional se prolongan a lo largo del territorio nacional y por ende no se puede segmentar al país en diferentes zonas de afectación y utilizar coordenadas con diferentes ITRF y en distintas épocas de referencia.
- El procesamiento y ajuste post-sismo, obtuvo como resultado las coordenadas de 30 estaciones de la REGME, determinadas al nivel de 2 milímetros en la componente horizontal y 4 milímetros en la componente vertical.
- El nuevo Sistema Nacional de Referencia Espacial SIRGAS-ECUADOR, está constituido por las estaciones de monitoreo continuo REGME y las coordenadas ajustadas al ITRF2008, Época de Referencia 2016.4, vigente a nivel oficial a partir del 17 de abril de 2016.
- Los mojones de la Red Pasiva RENAGE, no están incluidos en el ajuste debido a que está pendiente la campaña de medidas GPS a nivel nacional.

Agradecimientos



Figura 32. Fotografía del malecón de Pedernales, julio 2016.

- Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM)
- Centro de Procesamiento de Datos GNSS del Ecuador (CEPGE)
- Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador (REGME)

- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN)
- Institut de Recherche pour le Développement (IRD France)
- GADM Pedernales, equipo de apoyo 2015, Arq. Silvia Palacios Navia
- GADM Portoviejo
- Instituciones públicas y privadas que apoyan el desarrollo de la REGME a nivel nacional.

Bibliografía

- Chlieh *et al.*, 2014. Distribution of discrete seismic asperities and aseismic slip along the Ecuadorian Megathrust. *Earth and Planetary Science Letters*, 292-301.
- Cisneros, D., 2013. Análisis de la red nacional GPS pasiva enlazada al sistema de referencia SIRGAS95 y su evolución hacia la nueva infraestructura soportada por la red GNSS de monitoreo continuo del Ecuador. *Revista Técnica Geográfica Instituto Geográfico Militar*, 17-35.
- Cisneros, D., 2016, noviembre 15. <www.sirgas.org>. Retrieved 02 16, 2017, from <<http://www.sirgas.org/index.php?id=242>>.
- Cisneros/Nocquet, 2012. Campo de velocidades del Ecuador obtenido a través de mediciones de campañas GPS de los últimos 15 años y medidas de una red GPS permanente. *Revista Geoespacial ESPE*, 9, 30-49.
- Cisneros/Nocquet, 2012. <<http://www.geoportaligm.gob.ec>>. Retrieved 2016, from <<http://www.geoportaligm.gob.ec>> <<http://www.geoportaligm.gob.ec>>.
- Font, Y.A., 2016. 40 años de cooperación científica franco-ecuatoriana. Exposición permanente Museo Interactivo de Ciencias, Quito, Ecuador, 2014. *Subducción en Ecuador, sismo de Pedernales*. Quito, Pichincha, Ecuador.
- IGEPN, 2016, abril 17. *Informe Sísmico Especial N. 13 - 2016*. Retrieved Febrero 21, 2017, from <<http://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1317-informe-sismico-especial-n-13-2016>>.
- IGEPN, 2017. *Red Nacional de Geodesia RENGEO*. Retrieved Marzo 01, 2017, from <<http://www.igepn.edu.ec/6-red-nacional-de-geodesia-rengeo>>.
- IGEPN, Quito, 2016, abril. www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1317-informe-sismico-especial-n-13-2016. Retrieved Abril 19, 2016, from <<http://www.igepn.edu.ec>>.
- IGN/LAREG, 2016, January. *International Terrestrial Reference Frame*. Retrieved Febrero 15, 2017, from International Terrestrial Reference Frame: <<http://itrf.ign.fr/>>.
- IGS, 2016. [IGSMail-7399] *Upcoming switch to IGS14*. Retrieved 2017, from <<https://igs.cb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2016/008589.html>>.
- King, H.E., 2015, June 16. *Introduction to GAMIT/GLOBK Release 10.6*. Retrieved February 2017, from <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/Intro_GG.pdf>.

- Nocquet, M. A., 2008. *Geodesia, geodinámica y ciclo sísmico en Ecuador*.
- Nocquet *et al.*, 2014. Motion of continental slivers and creeping subduction in the northern Andes. *Nature Geoscience*.
- Nocquet *et al.*, 2016. Supercycle at the Ecuadorian subduction zone revealed after the 2016 Pedernales earthquake. *Nature Geoscience*.
- Rizos C, J. V., 2012, mayo. <<http://www.fig.net>>. Retrieved Febrero 20, 2017, from <<http://www.fig.net>>: <http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2012/papers/ts09b/TS09B_rizos_janssen_et_al_5909.pdf>.
- SIRGAS, 2016, julio 08. <www.sirgas.org>. Retrieved Febrero 15, 2017, from <www.sirgas.org>: <<http://www.sirgas.org/index.php?id=54>>.
- Takasu, T., 2013. *RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning*. Retrieved Febrero 22, 2017, from <<http://www.rtklib.com/>>.
- Tremel, H., 2000. *Processing of the Ecuadorian National GPS Network within the SIRGAS Reference Frame*. Munich, Alemania: DGFI.
- Vallée *et al.*, 2013. Intense interface seismicity triggered by a shallow slow-slip event in the Central-Ecuador subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118, 2965-2981.