



**EL SISMO DE LOS SANTOS, SANTANDER
DEL 10 DE MARZO DE 2015**

Aspectos sismológicos y movimiento fuerte

Bogotá D.C., marzo de 2015



SISMO DE LOS SANTOS, SANTANDER DEL 10 DE MARZO DE 2015

El día 10 de marzo de 2015 a las 03:55 p.m. Hora local (2015-03-10 20:55 Hora U.T. C.), se presentó un sismo de magnitud Mw 6.4. El Servicio Geológico Colombiano (SGC) - Red Sismológica Nacional de Colombia, lo localizó a 7.4 km al noroeste de la cabecera municipal de Los Santos (Santander), en las coordenadas 6.83°N y 73.14°W con una profundidad de 160 km (figura 1).

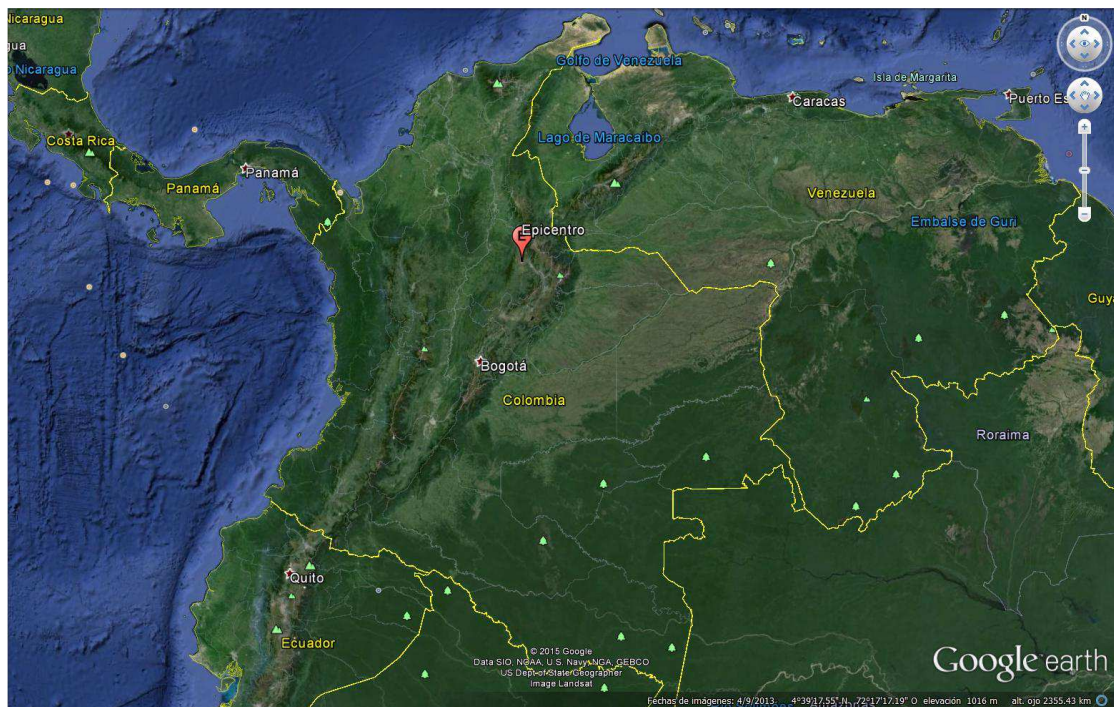


Figura 1. Epicentro del sismo de Los Santos, Santander del 10 de marzo de 2015.

El Servicio Geológico Colombiano localizó el epicentro usando datos de la red sismológica nacional. En la figura 2 se muestra el mapa con la ubicación de las estaciones utilizadas para la localización del evento y la imagen del registro sísmico.

Servicio Geológico Colombiano

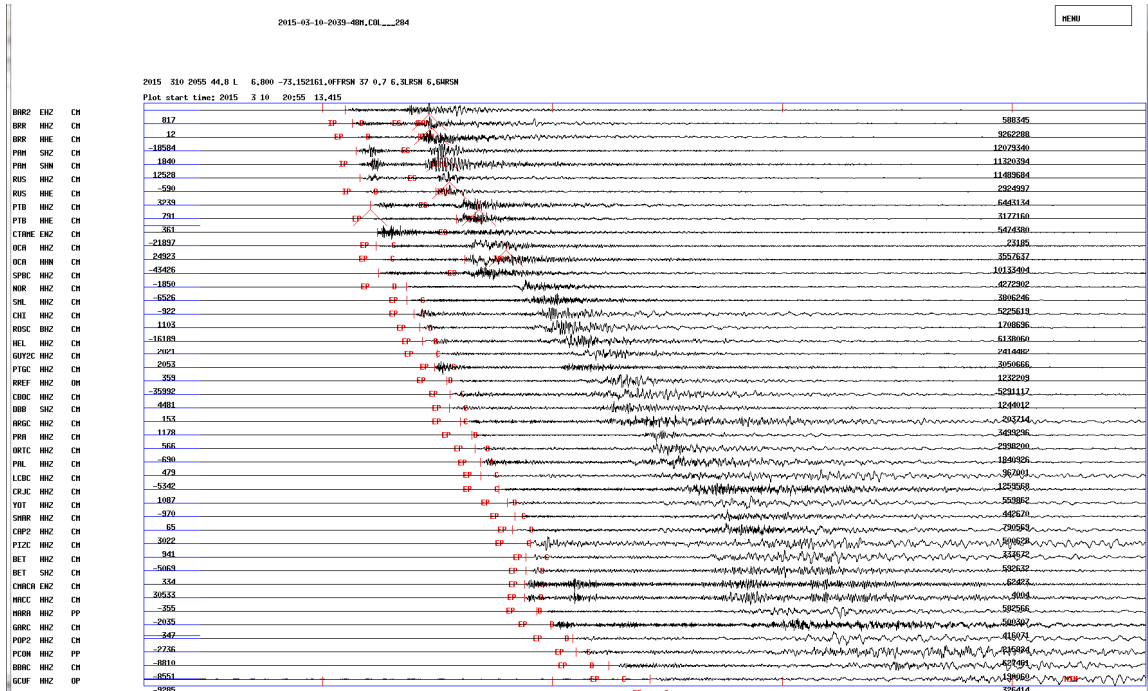


Figura 2. Ubicación de las estaciones usadas en la localización del sismo (arriba) y registro sísmico (abajo)

El Sismo de Los Santos, Santander del 10 de marzo de 2015

Servicio Geológico Colombiano

El evento sísmico se reportó como sentido en: Santander, Norte de Santander, Boyacá, Cundinamarca, Antioquia, Caldas, Casanare, Quindío, Risaralda, Bolívar, Valle del Cauca, Tolima, Córdoba, Atlántico, Magdalena, Arauca, Meta, Cesar, Sucre, Choco y en la frontera con Venezuela.

REPORTE DE AFECTACIONES

La unidad Nacional para la Gestión del riesgo (UNGRD) reporta afectaciones en los departamentos de Santander, Casanare, Bogotá, Valle del Cauca, Boyacá, Atlántico, Antioquia, Cundinamarca, Tolima, Risaralda y en la ciudad de Bogotá. En el enlace <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2015/Actualizaci%C3%B3n-Reporte-de-Afectaci%C3%B3n-Nacional-por-Sismo.aspx> se encuentra la descripción detallada de las afectaciones reportadas por la UNGRD.

MARCO TECTÓNICO

El extremo NW de Suramérica es una región tectónicamente compleja, asociada a la convergencia entre la placa Suramericana y las placas de Nazca y del Caribe; la configuración actual del borde NW de Suramérica, es el resultado de esta interacción desde finales del Cretácico (Cortés & Angelier, 2005).

Esta interacción implica que la terminación de Los Andes en el NW de Suramérica se caracterice por la separación de la cordillera en tres cadenas montañosas, las cordilleras: Occidental, Central y Oriental; y por la presencia de elevaciones aisladas como la Sierra Nevada de Santa Marta y terrenos de origen oceánico, adosados al continente producto del accionar de la tectónica regional (Sanchez & Palma, 2014).
Figura 3.

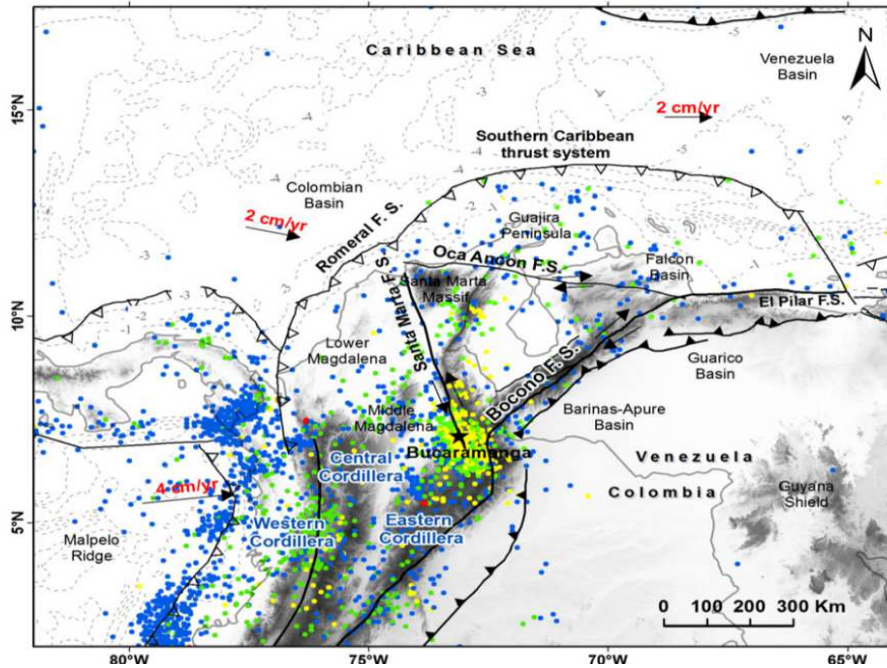


Figura 3. Configuración tectónica regional del NW de Suramérica, señalando los principales sistemas de fallas activos y la sismicidad registrada hasta 2010 (Sanchez y Palma, 2014).

El macizo de Santander, que hace parte de la Cordillera Oriental está relacionado con el nido sísmico de Bucaramanga, localizado entre 6.8°N y 73.1°W y profundidades del orden de 155km (Ojeda & Havskov, 2001). El término “nido” se usa desde los años sesenta para referirse a la sismicidad intermedia del nido sísmico de Bucaramanga, para diferenciar el fenómeno de lo que puede ser un enjambre sísmico o una secuencia de réplicas (Schneider et al., 1987).

De acuerdo con Richter (1958) un nido sísmico es un sector de intensa actividad sísmica, que se diferencia claramente de la sismicidad en sectores circundantes. Este término se utiliza para distinguir entre una “secuencia de réplicas” -asociadas a un sismo principal- y enjambres sísmicos -asociados a zonas de alta actividad sísmica; e.g. zonas volcánicas-. Los nidos sísmicos se caracterizan por tener una alta actividad sísmica persistente en el tiempo (Prieto et al., 2012).

Numerosas publicaciones presentan propuestas de modelos explicativos referentes a la tectónica activa de la región. Modelos como los de Cortes & Angelier (2005); Pennington (1983) y Taboada et al. (2000) afirman que una porción de la placa Caribe

Servicio Geológico Colombiano

esta subduciendo bajo el NW de Suramérica y se inclina dentro del manto bajo la Cordillera Oriental, coincidiendo con la ubicación del nido de Bucaramanga. En contraste Van der Hilt & Mann (1994) sugieren que el nido de Bucaramanga está relacionado con la subducción de la placa de Nazca en lo que denominan losa de Bucaramanga. Zarifi et al. (2007) con datos sismológicos afirman que el nido de Bucaramanga está asociado a la colisión entre las placas Caribe y Nazca en profundidad bajo el extremo NW de Suramérica.

De otro lado, algunas publicaciones proponen dos mecanismos relacionados con la sismicidad intermedia y profunda. Uno de ellos trata de explicar cómo una losa en subducción se comporta de forma frágil por la deshidratación de minerales, este fenómeno contrarresta el estado de esfuerzos normales esperados a esas profundidades. La reducción de ese estado de esfuerzos es la que hipotéticamente permite la ruptura frágil de la losa, induciendo actividad sísmica (Prieto et al., 2012). El segundo es un mecanismo que sugiere la presencia de zonas de inestabilidad térmica localizadas, que conducen a aumentos de temperatura que producen zonas de cizalla provocadas por una rápida fusión del material (Prieto et al., 2013).

MECANISMO FOCAL

Se calculó el mecanismo focal usando las polaridades de los arribos de las ondas P registrados en las estaciones ubicadas a lo largo del territorio colombiano. El mecanismo corresponde a una ruptura de rumbo lateral derecho (figura 4):

Plano falla: strike= 29° dip= 56° slip= -22°

Plano falla: strike= 132° dip= 72° slip= -144°

Ejes principales:

T strike= 257° dip= 10°

P strike= 355° dip= 38°

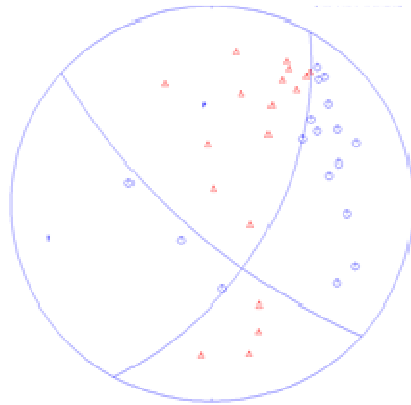


Figura 4. Mecanismo focal usando polaridades de las estaciones del SGC

SOLUCION DEL TENSOR MOMENTO SISMICO MEDIANTE EL MÉTODO DE LA FASE W

Se obtuvo de forma automática, en un tiempo de procesamiento de 24 minutos la solución del tensor momento sísmico usando el W-Phase desarrollado por Rivera y Kanamori, 2008. Se usaron formas de onda registradas por estaciones del Servicio Geológico Colombiano, FUNVISIS (Venezuela), IGEPN (Ecuador) y UPA (Panamá).

En la actualización manual del cálculo del tensor momento sísmico para este sismo se usó la información de la localización, el tiempo de origen y la magnitud calculados por el SGC. También se usó la localización del centroide y una solución opcional del tensor de momento de referencia del sismo suministrado por el Global Centroid-Moment-Tensor (GCMT) con el fin de comparar las soluciones.

En la figura 5 se muestran los sismogramas sintéticos y observados concatenados por estación para la componente vertical.

Servicio Geológico Colombiano

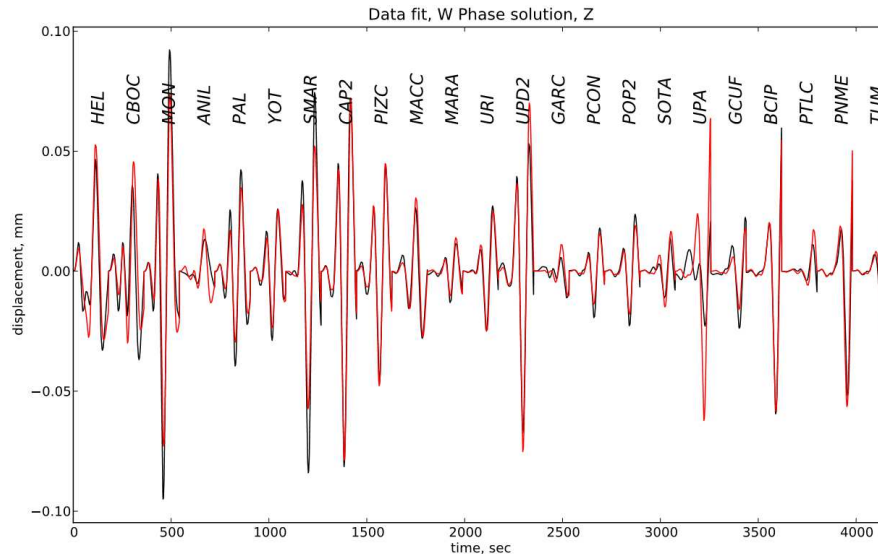


Figura 5. Sismogramas sintéticos (rojo) y observados (negro) de la fase W, concatenados por estación para la componente vertical para el sismo del 10 de marzo de 2015 con epicentro en Los Santos, Santander.

En la figura 7 se compilan los resultados de la inversión, las componentes del tensor momento, el momento escalar, los planos de falla, la magnitud de momento, la calidad del ajuste y los parámetros usados en la inversión. En la figura 6 se muestra el corrimiento en tiempo y la posición del centroide obtenido y en la figura 8 se muestran las formas de onda sintéticas y observadas para cada señal utilizada en la inversión.

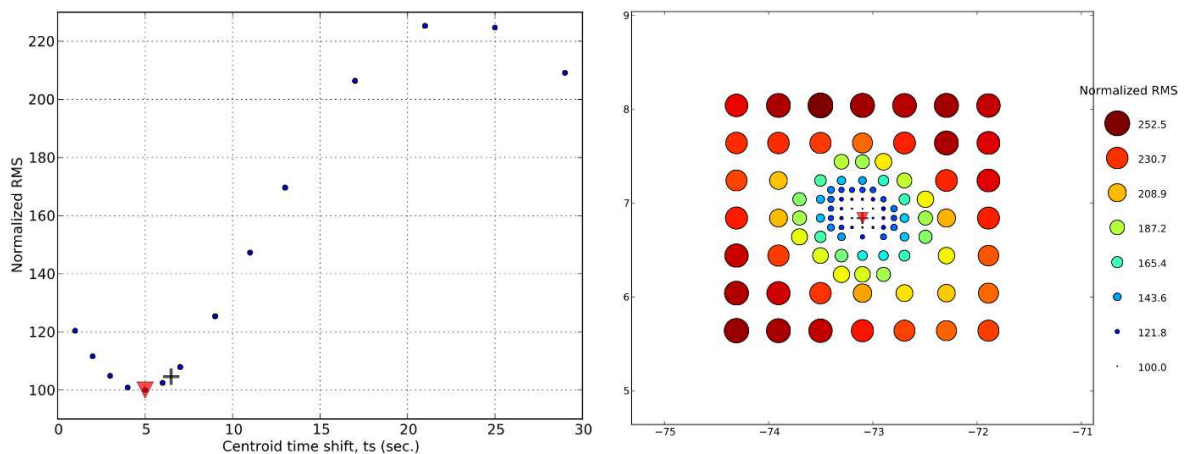


Figura 6. Corrimiento en tiempo (izquierda) y posición del centroide obtenido con la fase W. La cruz negra es la solución obtenida con la fase W y el triángulo rojo es la solución del GCMT para el sismo del 10 de marzo de 2015 con epicentro en Los Santos, Santander.

Servicio Geológico Colombiano

A continuación se encuentra la información del centroide calculado, teniendo en cuenta la localización de la RSNC:

```
PDEW2015  3 10 20 55 44.60    6.8300  -73.1360 160.0  0.0  6.4
NORTHERN COLOMBIA
event name:    201503102055A
time shift:    5.0000
half duration: 5.0000
latitude:      6.8400
longitude:     -73.1000
depth:         160.5000
Mrr:           -1.361599e+25
Mtt:           -6.750311e+24
Mpp:           2.036630e+25
Mrt:           -1.422968e+25
Mrp:           -2.228601e+25
Mtp:           -2.744777e+24
```

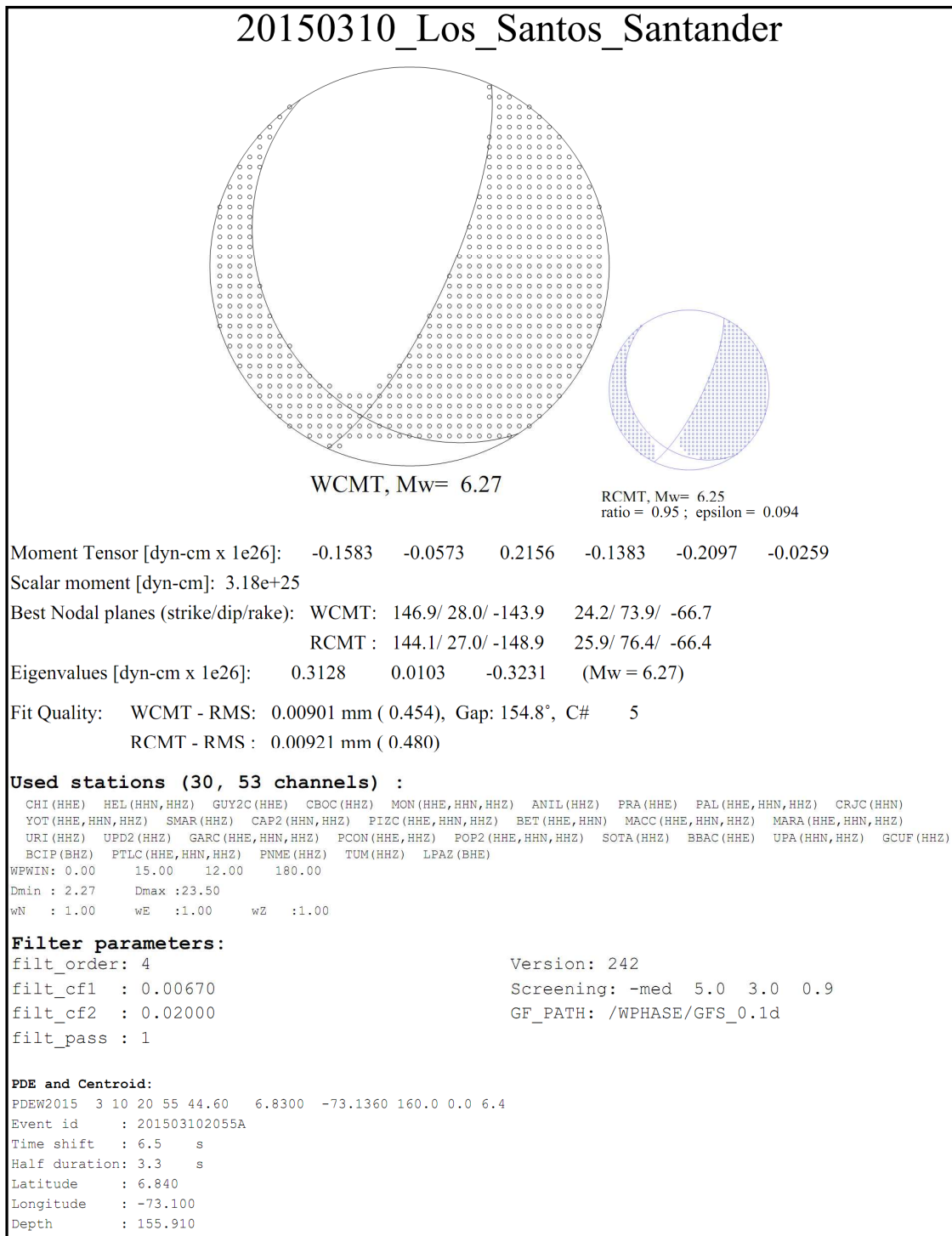
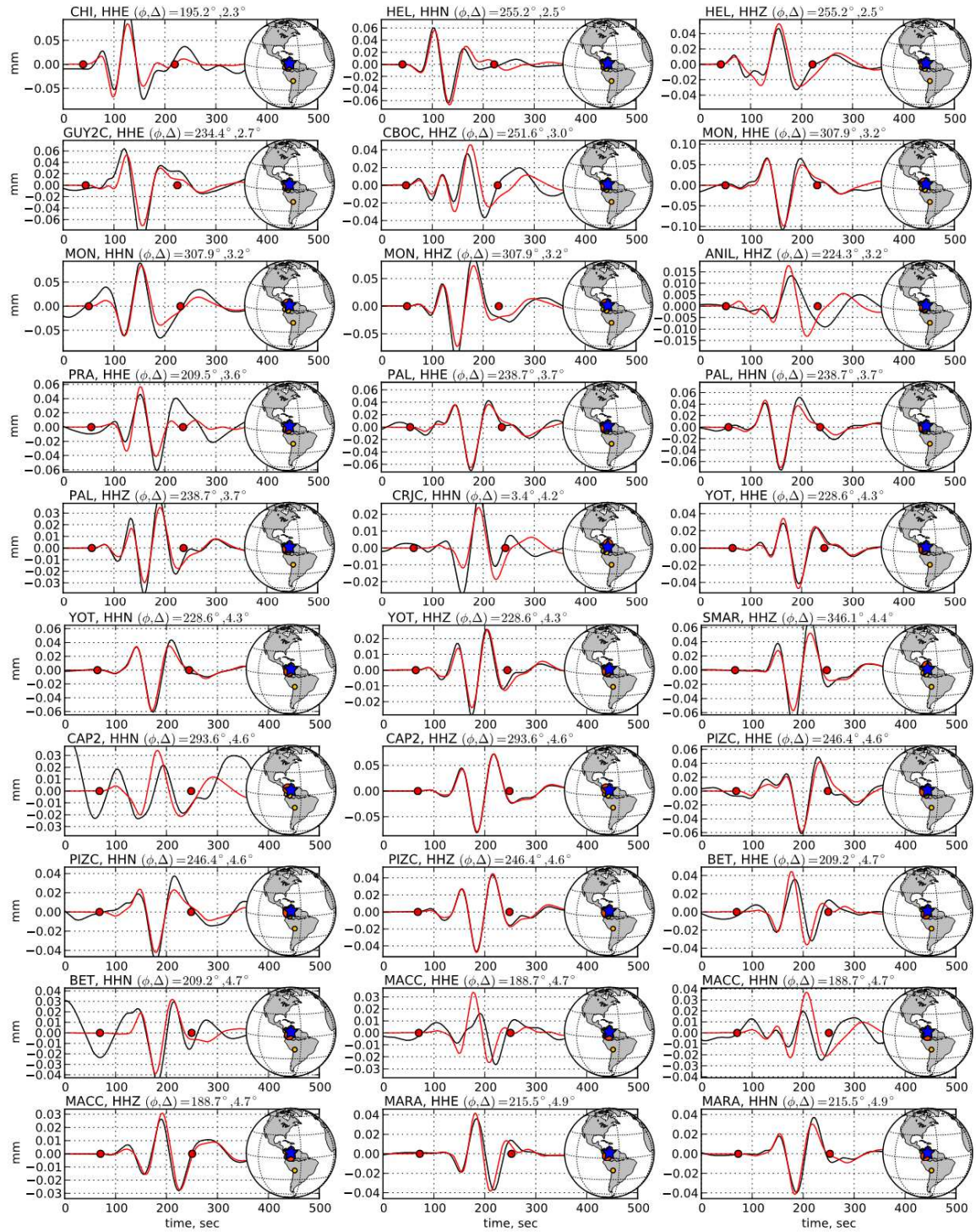


Figura 7. Parámetros de la fuente para el sismo del 10 de marzo de 2015 con epicentro en Los Santos, Santander.

20150310_Los_Santos_Santander, filter = (0.0067, 0.02, 4, 1)



20150310_Los_Santos_Santander, filter = (0.0067, 0.02, 4, 1)

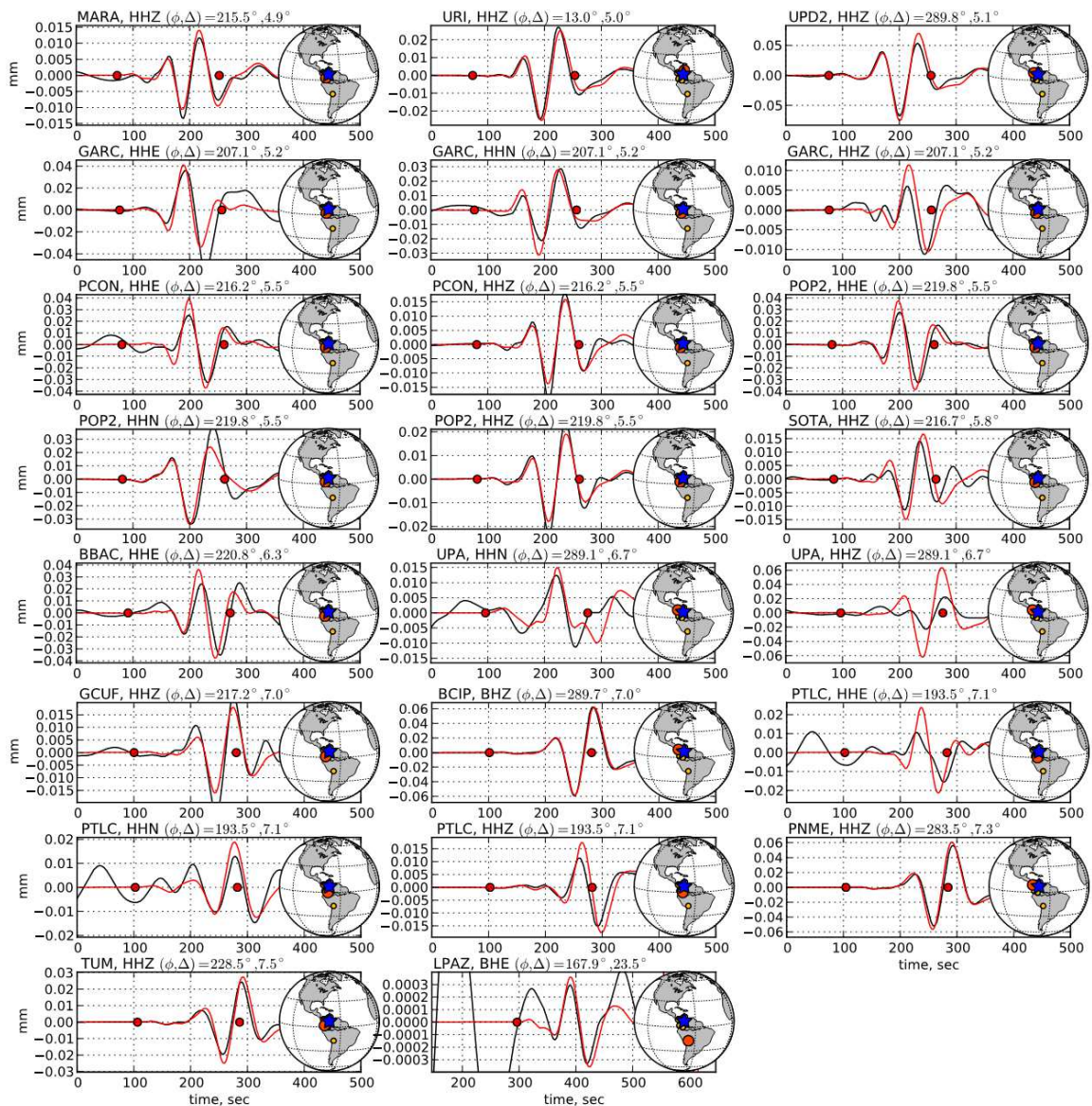


Figura 8. Formas de onda sintéticas (rojo) y observadas (negro) de la fase W para el sismo del 10 de marzo de 2015 con epicentro en Los Santos, Santander.

MOVIMIENTO FUERTE

Después del evento sísmico se extrajeron los acelerogramas de las estaciones de la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia (RNAC) que cuentan con conexión remota a nuestra sede central en Bogotá. Se realizó el procesamiento básico de los mismos, el cual consiste en la conversión de la señal de unidades de cuentas a unidades de aceleración en gales o cm/s^2 ; remoción de línea base y aplicación de un filtro pasa banda que no altere considerablemente la señal. Las aceleraciones máximas (PGA) de las tres componentes del movimiento (Este-Oeste, Vertical y Norte-Sur) registradas hasta la fecha de emisión de este informe se presentan en la Tabla 1; así como la distancia hipocentral.

Estación	Código	Geología	Aceleraciones en Gales				Amax (cm/s^2)	Distancia Hipocentral (km)
			Este - Oeste	Vertical	Norte - Sur			
Tame, Est. Sismológica	CTAME	ROCA	-7.62	-5.80	-3.78	6.01	224.00	
Norcasia, EST. Sismológica	CNOCA	ROCA	-19.21	-7.47	-21.10	20.18	284.85	
El Rosal	CROSA	ROCA	14.45	8.86	13.66	14.06	299.60	
Bogotá-SGC	CBOG1	SUELO	11.07	-5.40	10.88	10.98	306.61	
Guyana	CGUYA	ROCA	4.59	-3.68	-5.98	5.33	341.98	
Villamaría	CRECR	ROCA	-11.47	2.08	10.49	10.99	356.91	
Manizales, SGC	CMAN1	SUELO	-16.95	-7.29	18.84	17.92	363.59	
Ortega	CORTC	ROCA	-4.64	2.41	-6.11	5.43	428.81	
Palmar	CPALC	ROCA	-3.19	1.13	-3.72	3.47	437.12	
Valledupar	CVALL	ROCA	5.08	2.38	-6.87	6.04	442.12	
Yotoco	CYOTO	ROCA	0.41	0.31	0.36	0.39	499.47	
Bahía Solano	CBSOL	SUELO	-1.01	-0.51	1.27	1.15	503.46	
Santa Marta	CSTM1	ROCA	2.28	1.41	-1.74	2.03	529.91	
Pizarro	CPIZC	ROCA	-0.86	0.57	0.95	0.91	534.55	
La Macarena, est. Sismologica	CMACA	ROCA	-2.34	-0.90	-2.07	2.21	546.70	
Cali, SGC	RAC02	SUELO	1.27	0.92	-1.15	1.21	558.03	
Bahía Málaga	CBMAL	ROCA	-0.61	0.41	0.78	0.70	580.87	
Uribe	CURIB	ROCA	0.68	-0.51	-0.66	0.67	581.66	

Servicio Geológico Colombiano

La Cruz	CCRUZ	ROCA	-1.28	-0.82	1.53	1.41	735.84
Cufiño	CCUFI	LAVA	0.11	-0.09	0.17	0.14	790.92
Pasto Obonuco	CPAS1	ROCA	-0.07	0.06	-0.11	0.09	792.64
Tumaco Faro	CTUM2	ROCA	4.05	-2.53	3.75	3.90	845.10
Cumbal	CCUMB	ROCA	0.15	0.12	-0.19	0.17	847.40
Providencia	CPROV	ROCA	0.55	-0.09	-0.14	0.40	1178.91

Tabla 1. Aceleraciones máximas registradas (PGA) y distancia hipocentral de algunas estaciones de acelerógrafos que registraron el sismo del 10 de Marzo de 2015

En la figura 9 se muestran las estaciones de la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia (RNAC) que cuentan con conexión remota que registraron el sismo.

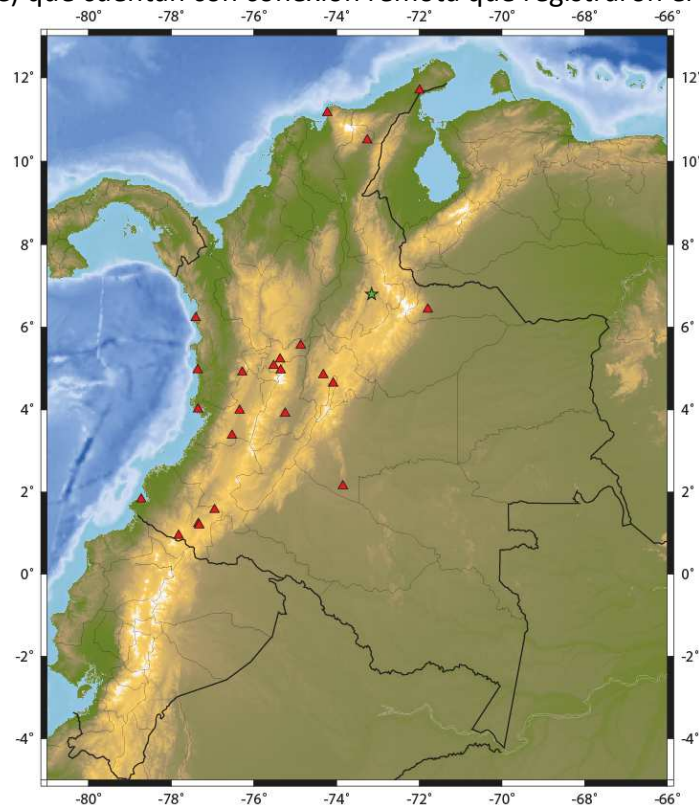


Figura 9. Mapa de Estaciones de la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia que registraron el sismo del 10 de marzo de 2015. La estrella de color verde indica el epicentro del evento y los triángulos de color rojo las estaciones acelerográficas que registraron el sismo.

Servicio Geológico Colombiano

Las estaciones de acelerógrafos más cercanas al evento son las ubicadas en Tame, Arauca (Amáx 6.01 cm/s²), Norcasia, Caldas (Amáx 20.18 cm/s²) el Rosal, Cundinamarca (Amáx 14.06 cm/s²).

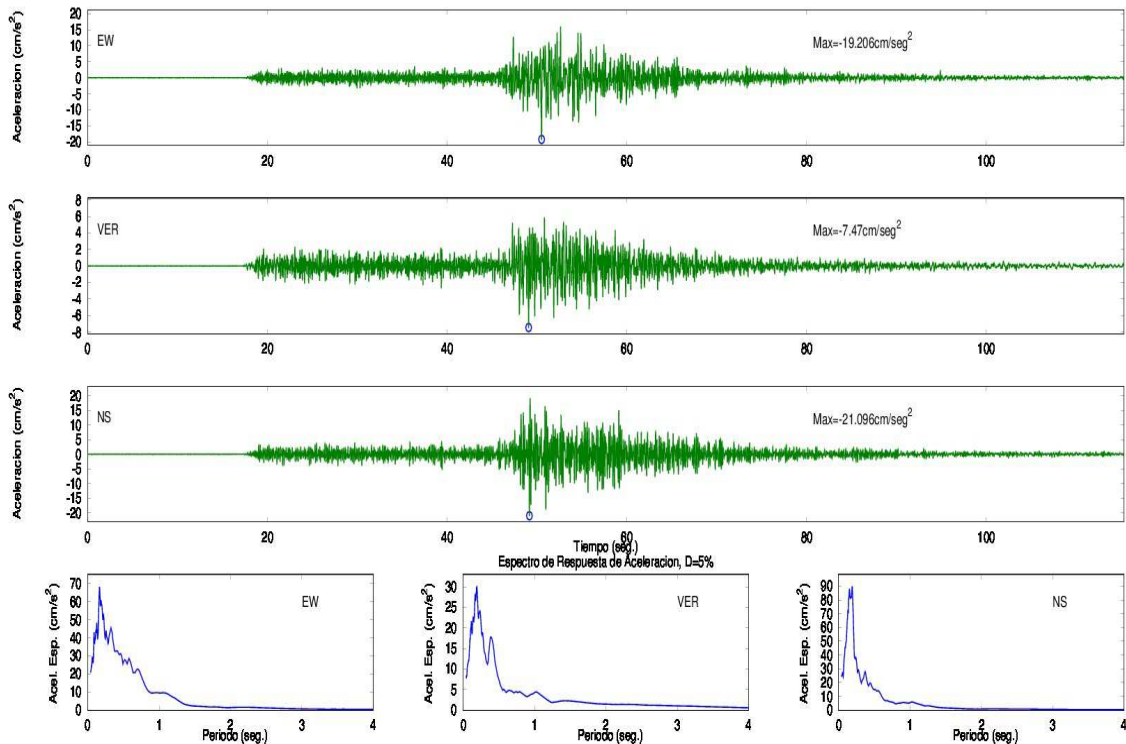


Figura 10. Aceleraciones máximas (PGA) registradas y el espectro de respuesta para un amortiguamiento del 5%, de las tres componentes de la estación de acelerógrafos ubicada en Norcasia Caldas – CNOCA

MAPAS AUTOMÁTICOS DE INTENSIDAD INSTRUMENTAL

Para la generación de los mapas de intensidad Instrumental en tiempo real por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), se realiza una localización del sismo y el cálculo de su magnitud de forma automática utilizando señales en tiempo real de la estaciones sismológicas y de movimiento fuerte disponibles, calculando además, los parámetros

Servicio Geológico Colombiano

de movimiento del suelo tales como Aceleración, Velocidad y Aceleración Espectral pico del suelo (PGA, PGV y PSA, por sus siglas en inglés). Para las zonas donde no se tiene disponibilidad de estaciones sismológicas o de movimiento fuerte, los parámetros de movimiento del suelo se calculan utilizando ecuaciones de atenuación de la energía sísmica hasta el nivel de roca siendo estos posteriormente afectados por factores de amplificación estimados a partir de la velocidad de onda de corte a 30 m. de profundidad (V_{s30}) con el fin de tener en cuenta los efectos de sitio y poder estimar las aceleraciones en superficie.

Con los valores registrados por las estaciones sismológicas y de movimiento fuerte y con los valores estimados se generan los diferentes mapas de PGA, PGV y PSA, esta última para diferentes periodos estructurales. Finalmente, las intensidades instrumentales se calculan usando ecuaciones de conversión de aceleración a intensidad en la escala Mercalli Modificada. Todo el proceso se realiza de forma completamente automática y es posible actualizar los mapas al tiempo que se revisen los cálculos de localización y magnitud o adicionando información complementaria en tiempo no real. Los mapas automáticos generados por el SGC para PGA y PGV se muestran en la Figura 11.

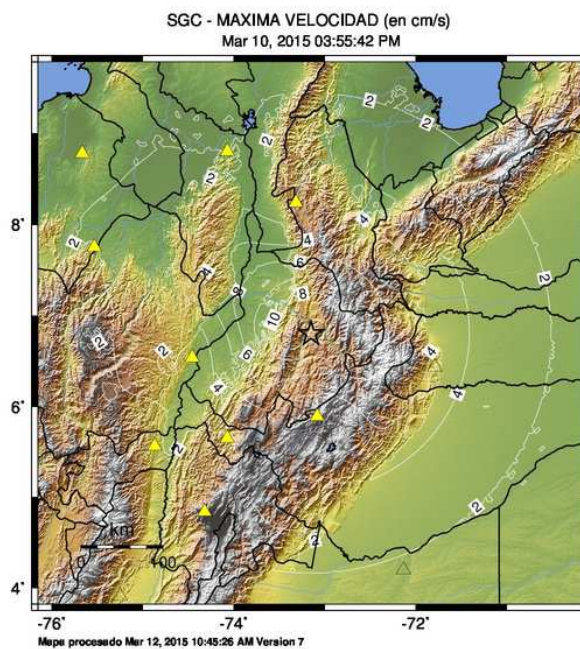
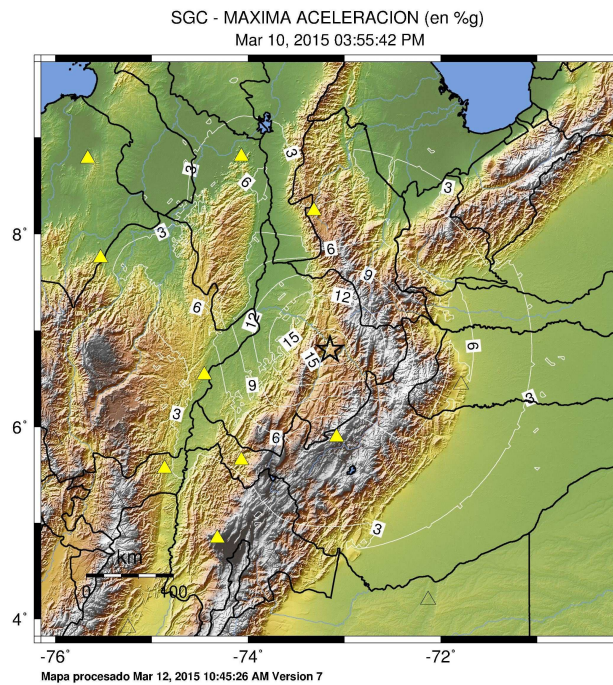


Figura 11. Mapa de aceleraciones (arriba) y velocidades (abajo) máximas generados automáticamente por el SGC para el sismo del 10 de Marzo de 2015 con Mw = 6.6

Servicio Geológico Colombiano

En la Figura 12, se muestra el Mapa de Intensidades Instrumentales en donde la Intensidad Instrumental alcanzada fue de V para la zona epicentral y de VI para las zonas cercanas al epicentro, que corresponden a aceleraciones registradas entre 9 a 15 (%g). Información adicional puede ser consultada en la web a través del enlace <http://seisan.sgc.gov.co/RSNC/shakemap/sc/shake/intensidad.html>

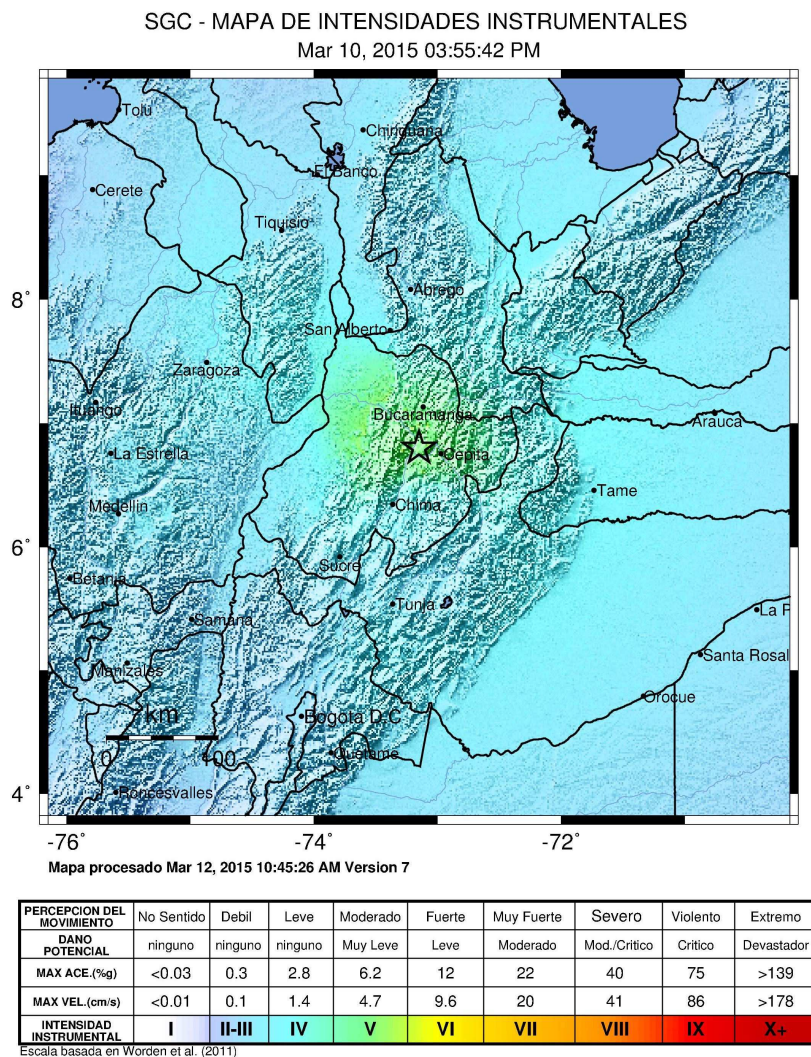


Figura 12. Mapa de intensidades instrumentales generado automáticamente por el SGC para el sismo del 10 de Marzo de 2015 con Mw = 6.6.

Servicio Geológico Colombiano

EVALUACIÓN DE INTENSIDADES A PARTIR DE LOS REPORTES RECIBIDOS VÍA INTERNET

La intensidad sísmica es una medida cualitativa que se evalúa teniendo en cuenta los efectos observados en las personas, objetos, construcciones y naturaleza, en un área determinada. Estos efectos se analizan y se asigna un grado de intensidad para cada sitio según una escala de intensidad, en este caso, la Escala Macrosísmica Europea de 1998 (EMS-98), para posteriormente generar el mapa de intensidades.

Para evaluar la intensidad del sismo, se utilizaron los reportes recibidos a través del Formulario para la evaluación de intensidad sísmica, disponible en la web: <http://seisan.sgc.gov.co/RSNC/paginas/intensidades/fsentido.html>, en el cual los usuarios registraron los efectos observados.

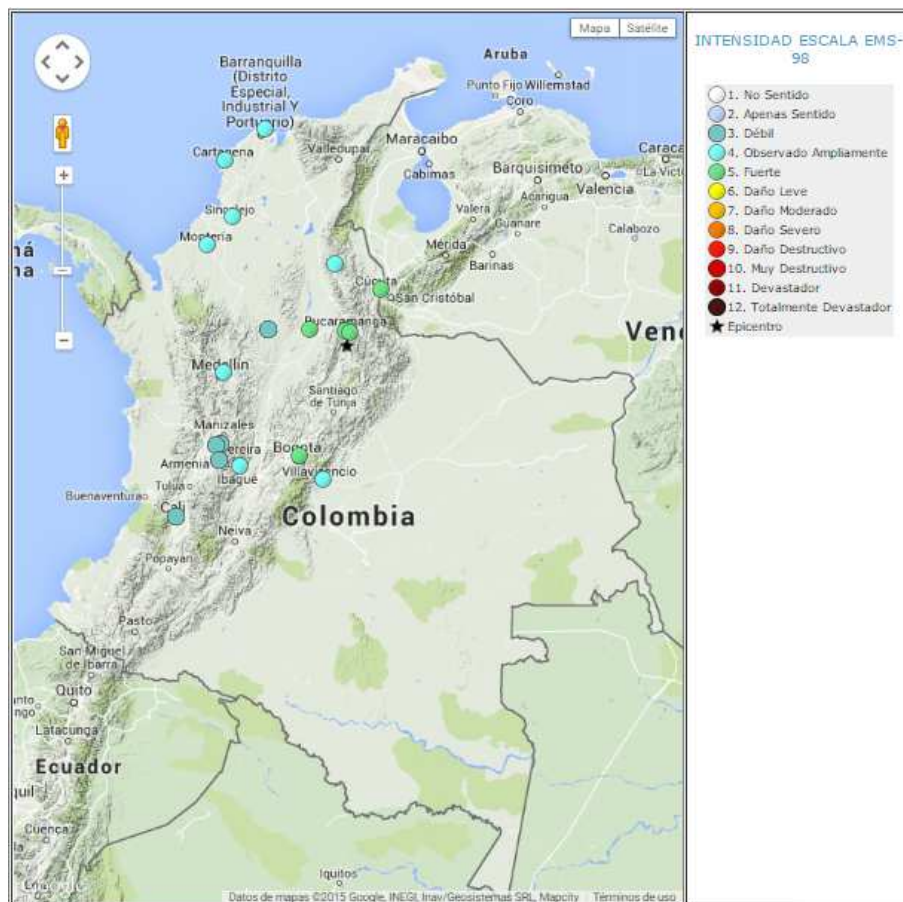


Figura 13. Mapa de intensidades del sismo del 10 de marzo de 2015

Servicio Geológico Colombiano

Con estos datos se elaboró el mapa de intensidades (figura 13), disponible en línea: <http://seisan.sgc.gov.co/RSNC/paginas/intensidades/mapa.php?id=20150310205544&lat=6.80&lon=-73.15&pro=161&mag=6.6&epi=LOS>

En total se recibieron 139 formularios de 20 municipios del país que se detallan en la Tabla 2.

Departamento	Municipio	Lat.	Long.	No. Reportes	Intensidad
Antioquia	Segovia	7.08	-74.70	2	3
	Medellín	6.24	-75.57	10	4
Atlántico	Barranquilla	10.98	-74.79	3	4
Bogotá D. C.	Bogotá D. C.	4.59	-74.08	54	5
Bolívar	Cartagena	10.40	-75.51	6	4
Cesar	González	8.38	-73.38	2	4
Córdoba	Montería	8.75	-75.88	5	4
Meta	Villavicencio	4.15	-73.64	2	4
Norte de Santander	Cúcuta	7.90	-72.49	8	5
	Ocaña	8.14	-73.36	4	5
Quindío	Armenia	4.53	-75.67	2	3
Risaralda	Santa Rosa de Cabal	4.88	-75.62	2	3
	Pereira	4.84	-75.74	2	3
Santander	Floridablanca	7.06	-73.08	3	5
	Barrancabermeja	7.06	-73.85	4	5
	Bucaramanga	7.12	-73.12	18	5
	Girón	7.06	-73.16	3	5
Sucre	Sincelejo	9.30	-75.39	4	4
Tolima	Ibagué	4.43	-75.25	2	4
Valle del Cauca	Cali	3.43	-76.52	3	3

Tabla 2. Número de reportes e intensidad por municipio.

Con el fin de complementar el seguimiento a la actividad sísmica que se presentó y de realizar estudios adicionales conducentes a determinar la intensidad del evento,

Servicio Geológico Colombiano

expertos del grupo de macrosísmica del SGC se desplazaron a la región para recopilar información sobre los efectos que se produjeron en los alrededores de la zona epicentral. En el primer informe se reportó que el sismo fue sentido muy fuerte, hubo pánico y pérdida de equilibrio de las personas, así como caída y desplazamiento de objetos pesados como televisores, muebles y neveras.

Se hizo un recorrido por las poblaciones de Betulia, Matanza (corregimiento el Pajuil), Zapatoca, Rionegro y El Playón, donde se observaron daños severos como agrietamiento, separación y colapso de muros de las construcciones antiguas hechas en tapia pisada o ladrillo no confinado y de hecho, algunas viviendas colapsaron totalmente. A excepción de Betulia, la mayor afectación se presentó en el área rural. En las Figuras 14, 15, 16 y 17 se presentan fotografías en las que se aprecian algunos daños causados por el sismo.

	
Figura 13. Vivienda ubicada en la vereda Portachuelo (Rionegro, Santander).	Figura 14. Vivienda ubicada en la Las Rocas (El Playón, Santander).
	
Figura 15. Daños en viviendas del casco urbano de Betulia (Santander).	Figura 16. Daños en una vivienda de El Pajuil (Matanza, Santander).

REFERENCIAS

Cortes, M., Angelier, J., 2005. "Current states of stress in the northern Andes as indicated by focal mechanisms of earthquakes". *Tectonophysics* 403, 29 – 58.

Duputel Z., Rivera L., Kanamori H., "How to run W phase inversion". W phase main manual.

Kanamori H., 1993. "W phase", *Geophysical Research letters*, vol. 20, No 16, 1691-1694,

Kanamori H., Rivera L., 2008. "Source inversion of W phase: speeding up seismic tsunami warning", *Geophys. J. Int.*, 175, 222-238.

Ojeda A., Havskov J., 2001. "Crustal structure and local seismicity in Colombia". *J. Seismol.* 5, 575 – 593.

Pennington, W.D., 1981. Subduction of the Eastern Panama Basin and Seismotectonics of Northwestern South America. *J. Geophys. Res.* 86 (B11), 10753 – 10770

Prieto G., Beroza G., Barret S., Lopez G., Florez M. 2012. "Earthquake nests as natural laboratories for the study of intermediate-depth earthquake mechanics". *Tectonophysics* 570–571 (2012) 42–56 .

Prieto G., Florez M., Barrett S., Beroza G., Pedraza P., Blanco J., Poveda E. 2013. "Seismic evidence for thermal runaway during intermediate-depth". *Geophysical Research Letters*. 40, 1–5.

Richter, C.F. 1958. "Elementary seismology". W.H. Freeman, San Francisco, California. p 342.

Sanchez-Rojas J., Palma M. 2014. "Crustal density structure in northwestern South America derived from analysis and 3-D modeling of gravity and seismicity data". *Tectonophysics* 634 97–115 .

Schneider J.F., Pennington W.D., Meyer, R.P., 1987. "Microseismicity and focal mechanisms of the intermediate-depth Bucaramanga Nest, Colombia". *Journal of Geophysical Research* 92, 13913–13926.

Servicio Geológico Colombiano

Taboada A., Rivera L. A., Fuenzalida A., Cisternas A., Philip H., Bijwaard A., Olaya, J., Rivera C., 2000. "Geodynamics of the northern Andes: subductions and intracontinental deformation (Colombia)". *Tectonics* 19, 787–813.

Van der Hilst R., Mann P., 1994. "Tectonic implication of tomographic images of subducted lithosphere beneath northwestern South America". *Geology* 22, 451 – 454

Zafiri Z., Havskov J. & Hanyga A. 2007. "An insight into the Bucaramanga nest". *Tectonophysics* 443 93 – 105.

ENLACES

Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas:
<http://www.funvisis.gob.ve/>

Instituto Geofísico de Ecuador:
<http://www.igepn.edu.ec/>

Global Centroid Moment Tensor Catalog:
<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>

Unidad Nacional para la Gestión del riesgo (UNGRD):
<http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/>