

Conclusiones

En este trabajo se realizó la inversión de las formas de ondas de las estaciones de banda ancha del evento del día 10 de Junio del 2016 a las 03:39:29 usando para el procesamiento el programa ISOLA. Durante la inversión, se utilizó el modelo de velocidades de Costa Rica que es el modelo más adecuado para esta zona de Nicaragua, según se ha demostrado en estudios anteriores.

Se determinó la localización del centroide, así como el correspondiente tensor del momento sísmico. El ajuste indica una componente del 91.1% como doble par de fuerzas, lo que indica un evento tectónico tectónica y no asociado a procesos volcánicos, a diferencia de otros estimados (Harvard, Geofon, NEIS) que muestran solo alrededor de un 50% de doble par.

La solución de doble par corresponde a un movimiento de corrimiento por el rumbo en direcciones NE-SW. Se determinaron los errores asociados a los parámetros de la solución de doble par a sí como pruebas de estabilidad y calidad de la solución. Los resultados dados por el programa son satisfactorios y los niveles de incertidumbre son aceptables.

Bibliografía

- Dreger D. S. (2002). Time-Domain Moment Tensor INVerse Code (TDMT_INV) Version 1.1, Berkeley Seismological Laboratory, pp. 18.
- GFZ (2016): Helmholtz-Zentrum Potsdam - Deutsches GEOFON Program. GEOFON Moment Tensor Solutions. <http://geofon.gfz-potsdam.de/eqinfo/list.php?mode=mt>
- González al te : (2015) Informe de La serie de terremotos del Sauce-León Nicaragua de septiembre – octubre de 2015 pp 1-37 financiando con fondos propio del INETER
- Harvard (2016): Global Centroid Moment Tensor Project database. <http://www.globalcmt.org/CMTfiles.html>
- Havskov and Ottemoller, SeisAn Earthquake analysis software, Seis. Res. Lett., 70, 1999. http://www.seismosoc.org/publications/SRL/SRL_70/srl_70-5_es.html
- Krizova, D., Zahradnik, J., y Kiratzi, A. (2013). Resolvability of isotropic component in regional seismic moment tensor inversion. Bull. Seism. Soc. Am., 103, 2460–2473.
- La Femina, P.C., Dixon, T.H., Strauch, W., 2002. Bookshelf faulting in Nicaragua. Geology 30 (8), 751-754.
- Sokos, E. N., and J. Zahradnik. (2008). ISOLA a FORTRAN code and a Matlab GUI to perform multiple point source inversion of seismic data. Computers and Geosciences, 34, 967-977.
- Sokos, E. N., and J. Zahradnik. (2013). Evaluating centroid-moment-tensor uncertainty in the new version of ISOLA software. Seismol. Res.Lett. 84. 656-665.
- Vackař J., J. Burjanek, and J. Zahradnik. (2015). Automated detection of disturbances in seismic records; MouseTrap code. Seism. Res. Letters (in press).

3.4 Serie sísmica de Puerto Morazán, Junio de 2016, Nicaragua.

Fabio Segura, Leonardo Álvarez (Dirección de Sismología)

Resumen

Se presenta un análisis sismotectónico de la serie sísmica ocurrida en el parte occidental de Nicaragua, en el sector inter volcánico Cosigüina- San Cristóbal caracterizado por estructuras más antiguas que el arco volcánico cuaternario actual. La serie se tipifica como evento principal-réplicas. La sismicidad se dispuso en una nube epicentral elíptica alargada cuyo eje mayor tiene tendencia NE. Aparentemente, según la relación Gutenberg-Richter la génesis de la serie se asocia predominantemente a procesos tectónicos. El régimen de esfuerzo previo a la serie era consistente con fallamiento inverso, luego varió a rumbo; hubo una rotación de los esfuerzos en sentido horario de 11.6°.

Antecedentes

El escenario previo de la serie sísmica de junio de 2016 es el sector de la parte occidental de Nicaragua localizado dentro del Graben de Nicaragua, sobre la alineación de edificios volcánicos del frente de arco entre los volcanes Cosigüina y Complejo volcánico San Cristóbal. Algunos datos sobre la sismicidad se inician con el mapa epicentral de la figura 1.

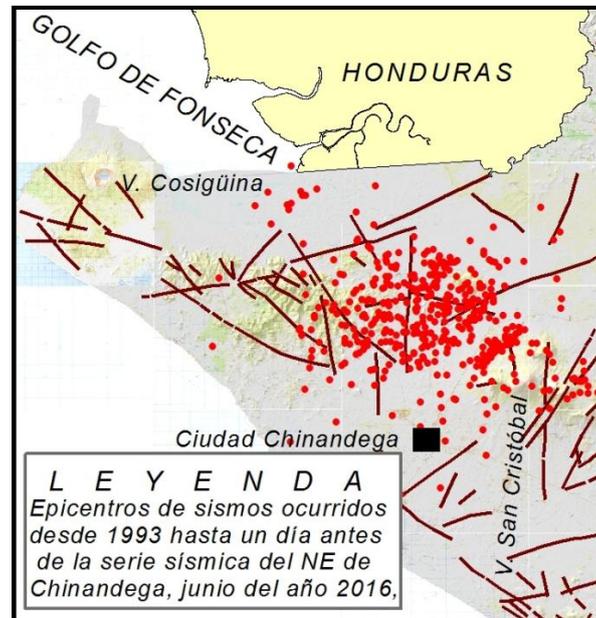


Figura 1. Los puntos reflejan los epicentros de los sismos registrados por la red sísmica local complementada con estaciones de la región de América Central y el Caribe. La trama de líneas representa lineamientos geológicos (del Mapa Geológico Minero).

Es de notar que este sector es terreno llano con el nivel freático somero y algunos promontorios rocosos. Es de baja densidad poblacional dedicado a la acuicultura camaronera, ganadería, siembra de caña de azúcar y agricultura para de auto sostenibilidad.

La revisión de la historia de la sismicidad a partir de 1992 revela, a través de la tasa sísmica y el comportamiento de magnitud lo siguiente, figura 2.

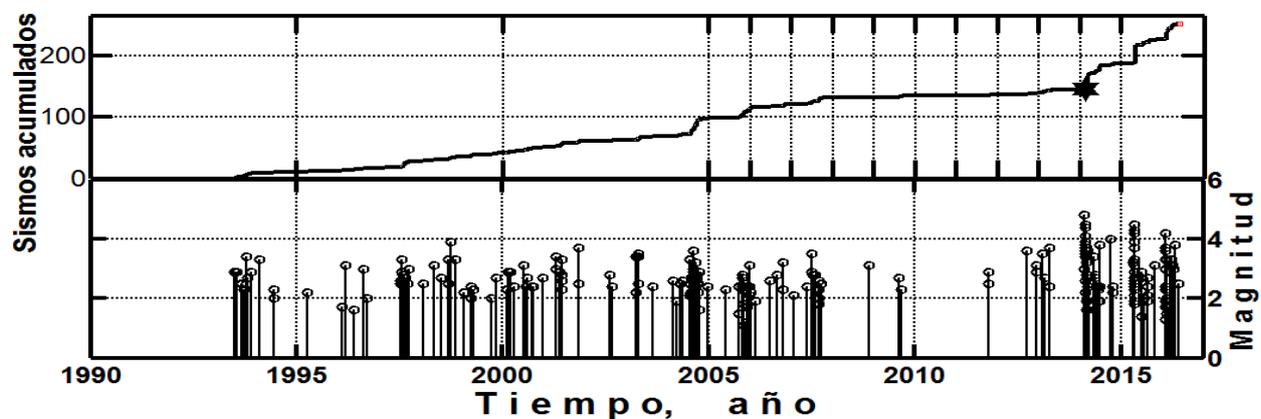


Figura 2. El gráfico, en su parte superior, muestra que (a) la sismicidad ha sido sostenida en este sector inter volcánico con repentinos saltos de la actividad; (b) que la actividad entró en una baja producción de sismos entre los años 2008-2014 (ocurrencia de un gran sismo frente al Golfo de Fonseca, en la zona de subducción); y (c) que a partir del año 2014 la sismicidad creció con saltos de poca cuantía hasta mediados de 2016 cuando ocurrió la serie sísmica. La parte inferior muestra con relación a la magnitud: (a) que para la actividad de fondo hubo un techo de 4.0 (hasta el año 2014); (b) que a partir del año 2014 ocurrieron pequeñas crisis sísmicas con sismos cuya magnitud pasó el nivel de magnitud umbral; (c) que la liberación de energía de deformación se presenta en forma recurrente.

La serie de junio de 2016 se acomodó en el centro de la sismicidad previa con de geometría alargada y estrecha con tendencia NE, figura 3.

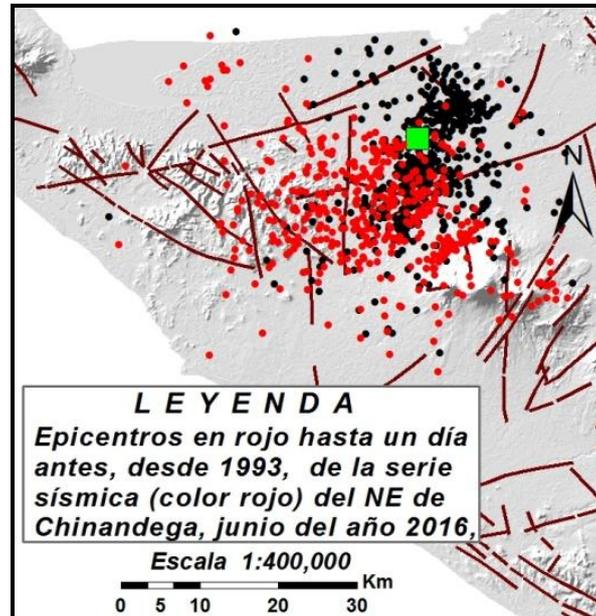


Figura 3. Los puntos en color rojo representan los epicentros hasta un día antes del evento principal de la serie (cuadro en color verde). Los puntos en color negro indican las réplicas de la serie ocurridas en 13 días.

Obsérvese que la sismicidad previa ocurrió en el sector inter volcánico Cosigüina - San Cristóbal, mientras que la tendencia de los epicentros de la serie, se alejaron hacia el borde nororiental del Graben de Nicaragua, y con tendencia perpendicular al frente de arco.

Datos

Este análisis se basa en la localización de 622 réplicas ocurridas entre los días 10 y 23 de junio, a continuación del evento principal (6.3). En la búsqueda de mejorar las variables de localización espacial se procedió a: afinar las lecturas; relocalizar la muestra usando un modelo de velocidad de ondas diferente al empleado en la rutina de INETER (figura 4); tomar una muestra de 188 réplicas registradas en más de 11 estaciones sísmicas.

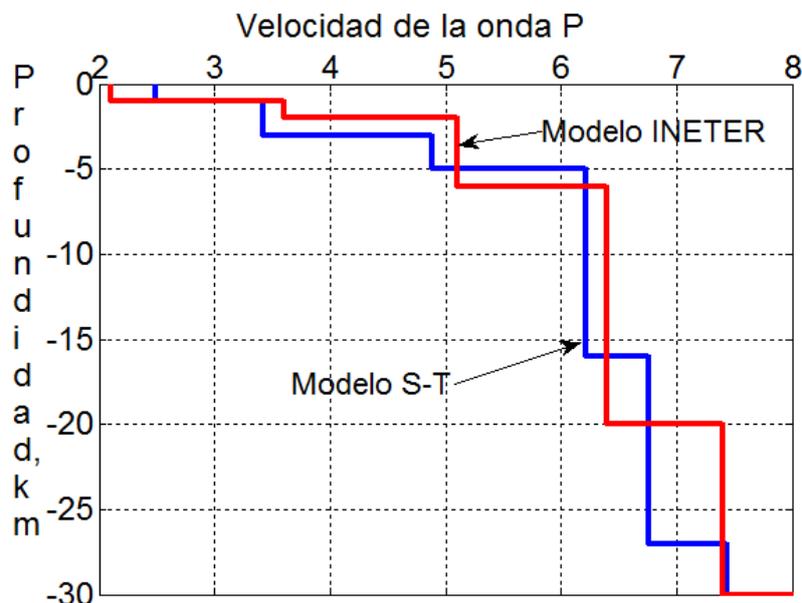


Figura 4. El gráfico indica con la curva color azul el modelo de velocidad de ondas de P utilizado en la rutina de localización de INETER, y con la curva color rojo el modelo Segura-Tenorio (1999), derivado mediante inversión de ondas P y S para la zona del graben.

La disposición espacial completa (figura 5a) y de la muestra en figura 5b.

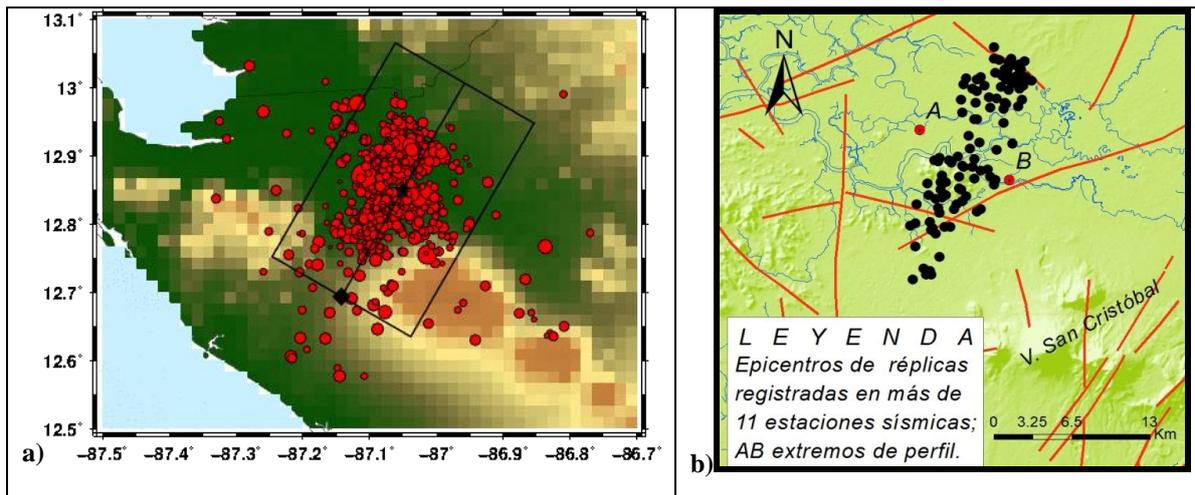


Figura 5. En la parte (a) de la figura se presentan los epicentros mostrando la tendencia NE de la sismicidad. En la parte (b) los puntos negros representan los epicentros con menor dispersión mostrando también el rumbo NE de la sismicidad. Las líneas indican lineamientos geológicos. AB la dirección de un corte sísmico con inicio en A y finalización en B.

Obsérvese que, según los lineamientos geológicos las direcciones preferentes de fallamiento son: (a) SO-NE, con fuerte ángulo tendiendo a E-O; y, NO-SE. La tendencia de la nube de réplicas no coincide con ninguna de esas direcciones. La producción de réplicas se caracteriza por una rápida entrega de energía, figura 6.

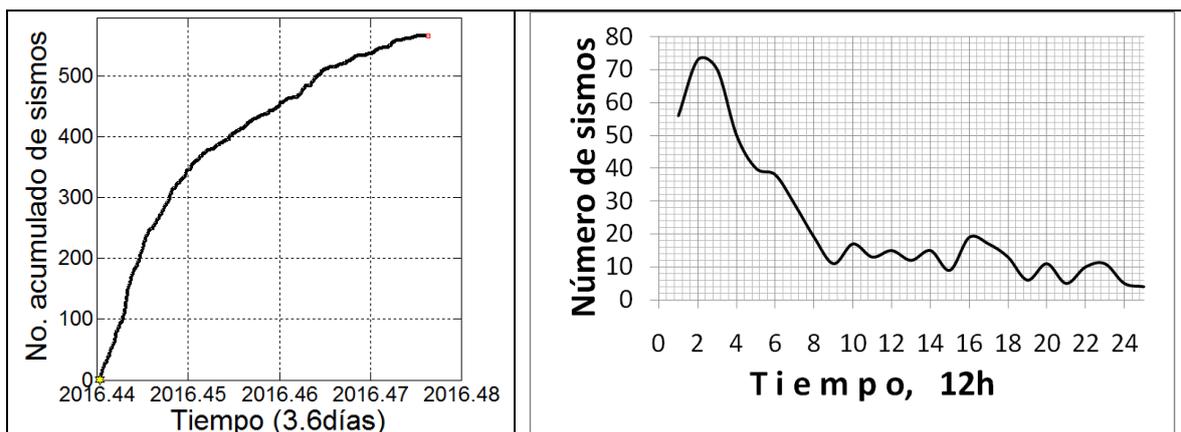


Figura 6. A la izquierda la tasa de sismicidad muestra un rápido crecimiento, según el gráfico de la derecha en 4 días y medio ocurrió la mayor cantidad de réplicas y también el evento principal y la mayor réplica. Por su lado la mayor entrega de energía, después del evento principal ocurrió 4 días y 20 minutos después con un evento de magnitud 5.2, figura 7 a y b.

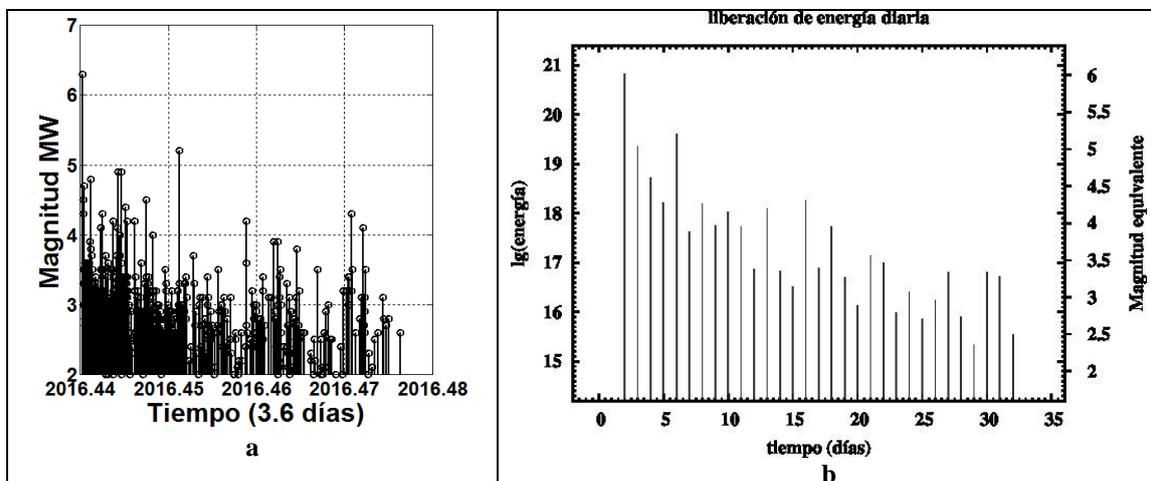


Figura 7. La parte (a) de la figura muestra el comportamiento de la magnitud y la rápida producción de sismos, como ha ocurrido en otras partes del arco volcánico a excepción de la serie de Nagarote 2014, se nota el decaimiento de la magnitud. La parte (b) indica la liberación diaria de energía de deformación.

La producción de réplicas siguió el comportamiento siguiente en un ejercicio de mejor ajuste, figura 8.

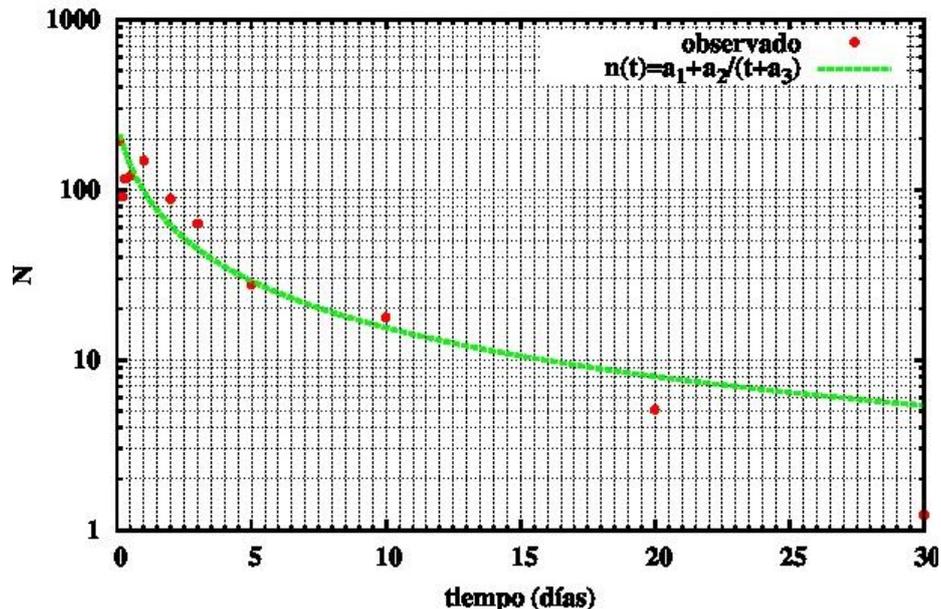


Figura 8. Después de varias pruebas el decaimiento de réplicas se ajustó al modelo de Omori con parámetros $p=1$, $A1=0.0$, $A2=165.46$, y $A3=0.689$.

Resultados

Se practicó un corte sísmico siguiendo la dirección mostrado en la figura 4 según se aprecia en la figura 9.

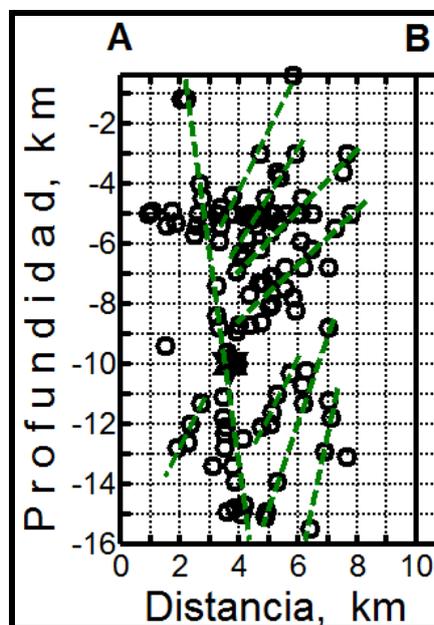


Figura 9. El gráfico muestra con círculos abiertos los hipocentros de las réplicas y las líneas articulando hipocentros sugieren posibles planos de fallas.

Se aprecia un posible plano de falla con fuerte buzamiento ($\sim 80^\circ$) al este y cuya parte más somera podría buscarse a 2 km del punto (A), inicio del perfil, en dirección a B y que se extendería desde la parte somera hasta los 16 km de profundidad, aproximadamente; esta sería la estructura dominante sobre la que ocurrió el evento principal y que controla el resto de estructuras menores que buzanan al contrario de la estructura principal.

La relación Gutenberg-Richter se aprecia en la figura 10.

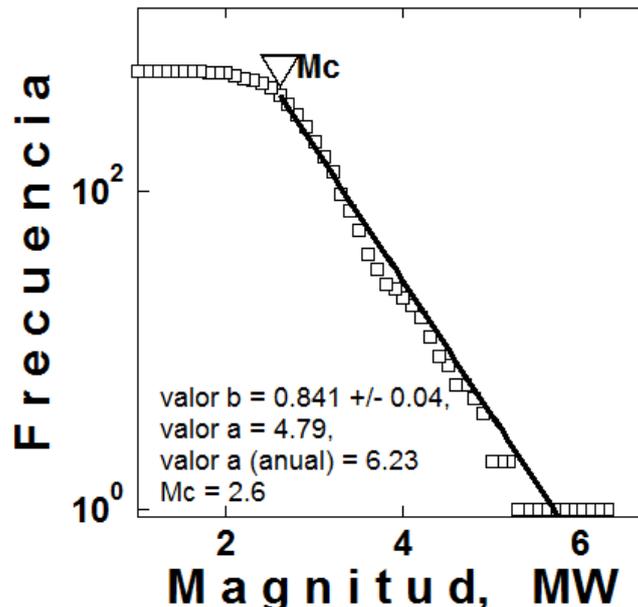


Figura 10. La relación magnitud-frecuencia muestra la correlación entre los sismos grandes a los pequeños, en una región o área determinada. La pendiente de la curva tiene significado físico implicando para valores bajos, como en este caso, alta rigidez cortical de tal modo que esto sugiere que la génesis de esta secuencia es más tectónica que volcánica. La magnitud (Mc) umbral de detección para el sector es de 2.6.

Mecanismos focales

Debido a la buena densidad de estaciones sísmicas y cobertura acimutal fue posible determinar más de 40 mecanismos focales, figura 11.

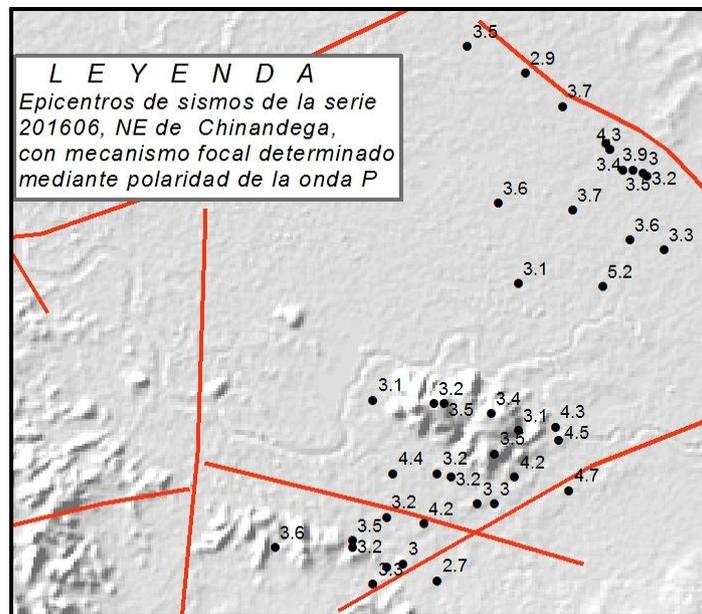


Figura 11. El mapa reúne los epicentros marcados, con su respectiva magnitud Mw, de los sismos con mecanismo focal evaluado mediante la polaridad de primeros arribos de la onda P; en su mayoría son sismos con magnitud mayor que 3.0, como se aprecia para cada epicentro.

Para mayor claridad con las esferas focales cuyo color rojo indica zonas de compresión y partes en color amarillo zonas de dilatación, se separaron en dos grupos uno para el NO más cercano a la Loma Puerto La Flor y otro en el sector del promontorio rocoso de La Isla, figura 12 a y b.

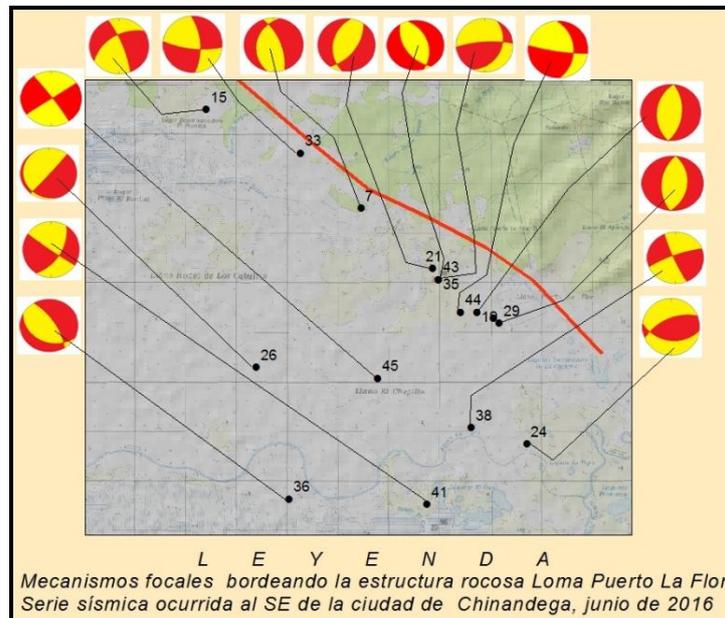


Figura 12 a. El gráfico muestra sobre el modelo digital del terreno los epicentros de los sismos con el mecanismo focal correspondiente para la zona NO, en el borde sur de la Loma Puerto La Flor, que marca una estructura geológica prominente con dirección NO-SE. Obsérvese el alineamiento de epicentros con rumbo similar a la estructura (línea roja). Hay diversidad de tipos de ruptura.

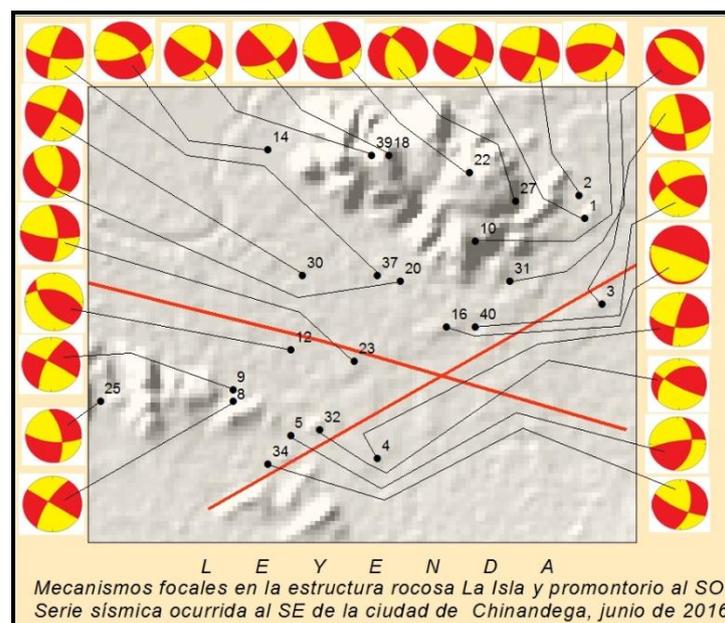


Figura 12 b. Se presentan los epicentros y sus respectivos mecanismos focales; sobre La Isla y al sur de la misma aparece alineamientos de epicentros con rumbo similar a la estructura con tendencia NO-SE (aproximándose al E-O). La geometría de los mecanismo focales sobre la isla no difieren tanto sugiriendo rupturas en la misma dirección, aunque no sobre un plan de falla ideal.

La inversión de los mecanismos focales, mediante metodología estándar (Michael 1989), permitió evaluar el tensor de esfuerzos (variables en Tabla 1), local, figura 13.

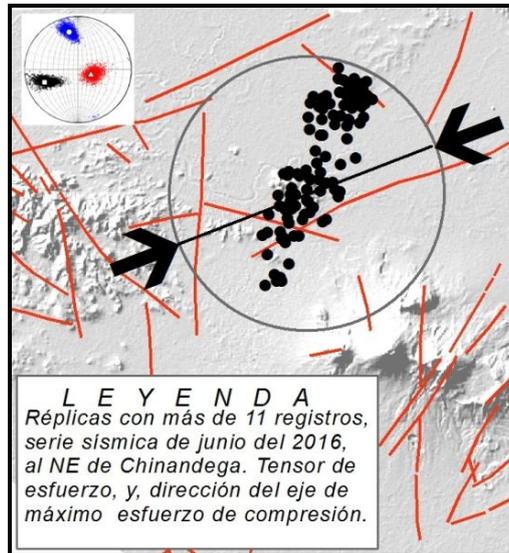


Figura 13. El mapa indica, con puntos negros, epicentros relocalizados; las curvas son lineamientos geológicos, según el Mapa geológico Minero.

En la parte superior izquierda aparece el tensor de esfuerzos local mostrando la dirección de los ejes de esfuerzos principales: presión máxima (negro), intermedia (rojo), y mínima (azul), variables geométricas Tala 1. Al centro la dirección del esfuerzo principal compresivo (flechas grandes). El régimen de fallamiento es de rumbo.

Tabla 1. Variables geométricas del tensor de esfuerzo. Las sigmas (σ_1 , σ_2 y σ_3) representan la dirección de los esfuerzos principales en el sector sísmicamente activado.

Eje de esfuerzo de compresión	Acimut	Buzamiento	Símbolo
σ_1 (máximo)	248.8°	22.3°	□
σ_2 (intermedio)	112.1°	60.5°	△
σ_3 (mínimo)	346.5°	18.2°	○

Las rupturas, para este régimen de esfuerzos se esperan, aproximadamente a acimut de 289° y 29°. Es interesante revisar el régimen de esfuerzos antes de la serie. Se reunieron 33 mecanismos focales en el mismo sector, figura 14.

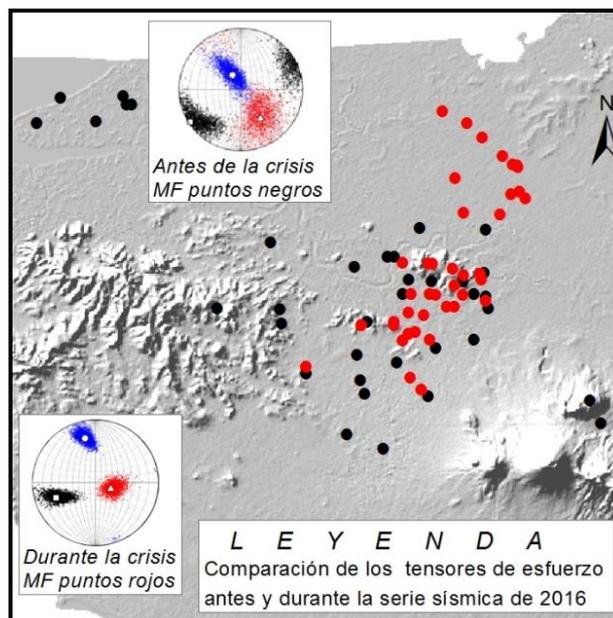


Figura 14. En el gráfico los puntos negros reflejan epicentros con mecanismos focales de 1975 a un día antes del inicio de la serie sísmica. Los puntos rojos son los epicentros de réplicas de la serie con mecanismo focal, ambos elaborados con polaridad de primeros arribos de la onda P.

Se indican los tensores de esfuerzo local elaborados mediante inversión de los dos grupos de mecanismos focales empleando la técnica de Michael (1999); las variables geométricas del tensor de esfuerzo antes de la serie en la Tabla 2.

Tabla 2. Variables geométricas del tensor de esfuerzo antes de la serie del 2016. Las sigmas (σ_1 , σ_2 y σ_3) representan la dirección de los esfuerzos principales en el sector.

Eje de esfuerzo	Acimut	Buzamiento	Símbolo
σ_1 (máximo)	237.2°	1.4°	□
σ_2 (intermedio)	146.2°	30.6°	△
σ_3 (mínimo)	329.5°	59.3°	○

La comparación de las variables geométricas de los tensores antes y después de la serie indican resultados significativos, figura 15.

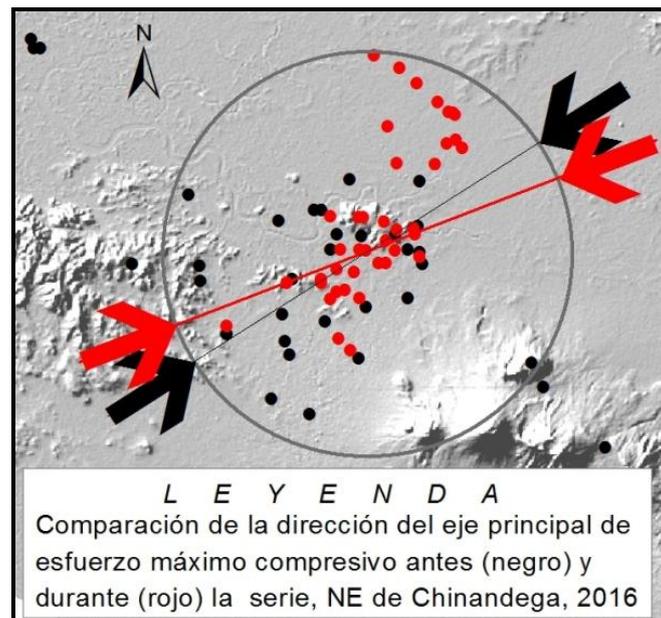


Figura 15. El gráfico presenta las dos direcciones del esfuerzo máximo compresivo de los tensores de esfuerzo con los conjuntos de mecanismo focales antes y después de la serie sísmica.

Se observa una rotación en sentido horario del sistema de esfuerzo local de aproximadamente 11.6°.

Conclusiones

El sector de ocurrencia de la serie es de alta sismicidad de fondo.

Los resultados sugieren que:

- La serie es de tipo evento principal-réplicas.
- la génesis de la serie se asocia, en mayor grado, a tectonismo.
- La sismicidad estuvo controlada por una estructura con tendencia NE-SO que rompe desde cerca de la superficie hasta los 16 km de profundidad, aproximadamente, con buzamiento hacia el SE.
- Asociada a la estructura principal hay una serie de estructuras menores, buzando al contrario que la principal cortando a diferentes profundidades la estructura principal, desde la parte este.
- El régimen de esfuerzos favorece fallamiento de rumbo.
- Aparentemente hubo rotación en sentido horario del orden de 11.6°.