

Análisis del campo de esfuerzos a partir de los mecanismos focales de los enjambres sísmicos ocurridos en los años 1997, 1999, 2001 y diciembre de 2007 a enero de 2008 en el área de San Vicente, El Salvador.

R. Núñez Vallejo, UCA.

Resumen — La presente investigación tuvo como objetivo principal determinar el régimen de esfuerzos en la zona de San Vicente, El Salvador a partir de los mecanismos focales compuestos de los enjambres sísmicos entre los años 1997 a 2008. La metodología utilizada fue la de primera polaridad de la onda P en la determinación del mecanismo focal y la de diedros rectos para el régimen de esfuerzos. Además se encontró el b-value para el catálogo utilizado. Los resultados muestran un predominio de los mecanismos de desgarre y normales, aunque hay una componente inversa importante. Además sugiere un campo de esfuerzos predominantemente transtensional. Las orientaciones de SHmax y SHmin son NO-SE y NE-SO respectivamente. Finalmente el alto valor de b-value obtenido evidencia que la zona libera energía lentamente en forma de enjambres sísmicos.

Índice de términos— b-value, campo de esfuerzos, enjambre sísmico, mecanismo focal compuesto.

INTRODUCCIÓN

Una de las sismicidades más frecuentes e importantes en El Salvador es el de enjambres sísmicos [1]. En esta investigación se realizó un estudio de los enjambres sísmicos en la zona de San Vicente en los años 1997, 1999, 2001 y diciembre de 2007 a enero de 2008. El trabajo consistió en determinar los mecanismos focales de la zona de estudio a través de la determinación de los mecanismos focales simples

y compuestos de los diferentes enjambres y la relación frecuencia-magnitud para los mismos. A partir de estos se analizó el campo de esfuerzos en el área. Los datos para el estudio se obtuvieron de la base proporcionada por Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), actualmente llamado Observatorio Ambiental. El método utilizado para determinar el mecanismo focal simple y compuesto fue el del primer pulso de la onda P. En la relación frecuencia-magnitud

el ajuste de la distribución de magnitudes locales (M_c) se realizó por el método de mínimos cuadrados. Finalmente para el análisis de esfuerzos, a partir de los mecanismos focales, se hizo utilizando el método de los diedros rectos, el cual proporciona una buena aproximación sobre el campo de esfuerzos en la zona.

MARCO TECTÓNICO Y SÍSMICO

Las soluciones de mecanismos focales de terremotos es una de las principales herramientas aplicadas en América Latina para caracterizar la sismicidad [1], [2] así como en otras regiones del mundo [4], [5] y específicamente para enjambres sísmicos [5], [6].

La región de América Central forma parte de las placas tectónicas de Norteamérica y el Caribe. El Salvador se encuentra en la placa Caribe en la que subduce la placa de Cocos hasta una profundidad de 200 km aproximadamente. La mayor parte de la actividad sísmica de la región ocurre en la zona de subducción, especialmente los terremotos de mayor magnitud ($M \geq 7.0$) [8]. En la descripción de la tectónica de El Salvador se tiene que “El sistema de fallas Este-Oeste controla el Graben Central de El Salvador que atraviesa todo el país y que determina en su parte hundida regiones topográficas de gran importancia, donde se encuentran importantes centros poblacionales. El sistema de fallas E-O se extiende desde la frontera de Guatemala al borde Norte de la cuenca de Olomega. En la parte Occidental de El Salvador toma la forma de un verdadero graben de 100 Km. de largo y alrededor de 20 km. de ancho” [9].

En el área de San Vicente del año 1783 al año 2001 han ocurrido al menos siete sismos de magnitud mayor que 5, los cuales han afectado significativamente la zona. Así como otros sismos de magnitud pequeña y moderada que también han causado daños [10]. Según [11] existe una amplia zona de desgarre, la cual se extiende desde el lado oriental del lago de

Ilopango hacia el río Lempa, en el que hay acumulación y liberación de energía en forma continua.

ÁREA DE ESTUDIO Y ENJAMBRES SÍSMICOS

Según citan en [1] el SNET ha reportado que El Salvador se puede dividir en ocho zonas principales de actividad sísmica con un comportamiento de tipo enjambre. Siendo una de las principales la región de San Vicente. Esta última ha sido delimitada desde la caldera de Ilopango hasta el borde este del volcán de San Vicente [9], sin embargo en esta investigación ha sido extendido hasta el río Lempa. Para la presente trabajo se definió el área de estudio entre las latitudes $13^{\circ}28' - 13^{\circ}48' N$ y longitudes $88^{\circ}35' - 89^{\circ}00' O$ en los cuales se han reportado cuatro enjambres sísmicos entre 1997 y 2001 [10], que fueron monitoreados por la red telemétrica que muestra la Fig. 1.

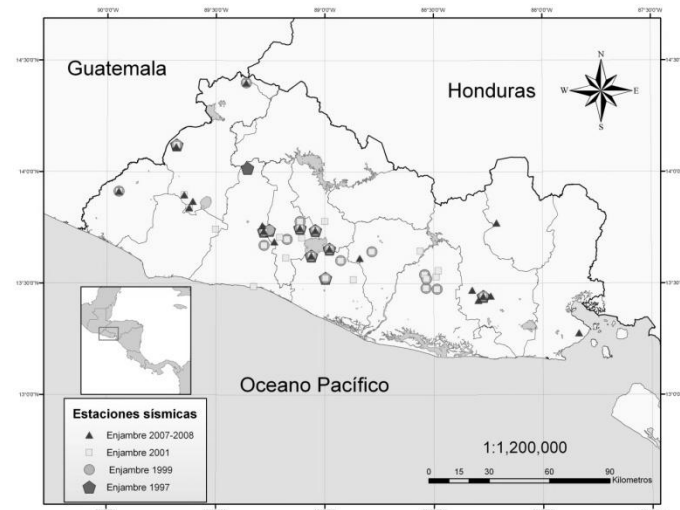


Fig. 1. Red telemétrica de El Salvador que registró los cuatro enjambres sísmicos del estudio durante los años 1997 a 2008.

MÉTODOS

A. Mecanismo focal

El método utilizado para determinar los mecanismos focales de los enjambres fue el de primera polaridad de la onda P. Este consiste en proyectar los puntos de observación en la superficie de la tierra sobre una esfera focal. La esfera se divide en cuatro partes las cuales corresponden a los cuadrantes de dilatación y compresión del patrón de radiación de la onda P. Los puntos proyectados son el azimut de la estación ϕ y con el ángulo de salida i del rayo medido desde la vertical. En general se necesita un modelo de corteza y la relación de velocidades de las ondas P y S para poder hacer la localización de los sismos. El modelo de velocidades utilizado fue el mostrado en la Fig. 2 con una relación de velocidades de $V_P/V_S=1.78$.

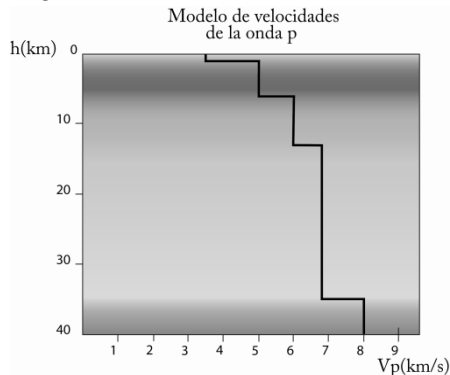


Fig. 2. Modelo de velocidades para relocalizar los eventos sísmicos en el área de estudio. Donde h es la profundidad y V_p es la velocidad de la onda P.

B. Cálculo de los valores a y b de la relación Gutenberg-Richter

Si consideramos que al ocurrir un terremoto los esfuerzos en una región se relajan. Es lógico suponer que para esa región, en cierto periodo de tiempo, el número de terremotos pequeños es mucho mayor que el de los grandes. Para expresar este hecho Gutenberg y Richter propusieron la expresión logarítmica

$$\log(N) = a - bM \quad (1)$$

Donde N es el número de terremotos con magnitud mayor que M ; a es el logaritmo del número de terremotos de magnitud mayor que cero y b la proporción de terremotos de cierta magnitud.

La ventaja principal de este método es que puede indicarnos cómo se comporta la resistencia a los esfuerzos del material de la zona y es fácil de aplicar, ya que solo requiere un ajuste por mínimos cuadrados. Una desventaja es que se necesita un catálogo bastante completo de la sismicidad del lugar para obtener un valor confiable de b -value. Además es un criterio importante para estudios de amenaza sísmica.

C. Análisis de población de mecanismos focales

El análisis de inversión de esfuerzos asume que la fracturación de la corteza es invariante ante el cambio de escala, lo cual se comprueba con la ley de Gutenberg-Richter [12].

Para el análisis de esfuerzos se utilizó el método de diedros rectos. Este se basa en el hecho de que, para el movimiento de la falla, se tienen diedros rectos opuestos de dilatación y compresión (ver Fig. 3). Donde los ejes de esfuerzos principales máximos (σ_1) y mínimos (σ_3) están en los diedros de compresión y dilatación respectivamente, no habiendo restricción geométrica a la orientación de σ_2 .

Para aplicar el método simplemente se superponen las proyecciones estereográficas del mecanismo focal para encontrar las áreas comunes. Esto es tanto para el área de compresión como dilatación. De preferencia debe utilizarse el mayor número de mecanismos focales. Esto tiene el inconveniente de que no resulte ninguna zona 100% compatible en tensión o compresión. Una solución a este problema es trabajar con diagramas de densidad de diedros

rectos. Este consiste en aplicar un criterio numérico de porcentajes de compatibilidad con el carácter de compresión o dilatación a la esfera estereográfica [12].

Este método es aplicable tanto a fallas medidas en el campo, como a mecanismos focales determinados con ondas sísmicas. Una ventaja es que proporciona de manera rápida y clara los ejes de esfuerzo capaces de explicar el conjunto de mecanismos focales. Su desventaja es que solo es un indicador a grandes rasgos de la orientación de los ejes de esfuerzos, por lo que se debe aplicar otros métodos más precisos posteriormente. Otra de las limitaciones del método es que no puede discriminar entre fallas pertenecientes a momentos de deformación distintos; pero si la calidad de los resultados es buena entonces se tiene un indicador de un único estado de esfuerzos o que estos estados son parecidos o comparten alguno de los ejes del elipsoide.

El software utilizado fue TheEarthquakeAnalysis Software (SEISAN) y fue desarrollado por los noruegos JensHavskov y Lars Ottemöller. Este puede trabajar bajo ambiente Windows, Solaris o Linux indistintamente. SEISAN está conformado por un completo conjunto de programas y una base de datos para análisis de sismos de datos sismológicos [13].

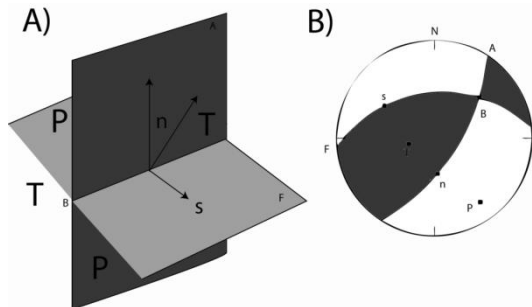


Fig. 3. Esquema de diedros rectos. A) plano de falla (F) y auxiliar (A) en perspectiva, donde P es el diedro compresivo y T el diedro extensivo. B) Proyección estereográfica en el hemisferio inferior del mecanismo focal de la falla.

En esta investigación se utilizó la versión para Windows la cual se puede operar desde una interfaz gráfica o desde la línea de comandos. Según la experiencia al trabajar con ambos ambientes, parece que se tiene mayor control y el programa es más estable desde la línea de comandos. Los programas utilizados fueron FOCMEC y BVALUE para el cálculo de los mecanismos focales y la relación frecuencia-magnitud respectivamente. Para determinar los esfuerzos en la zona se utilizó Win Tensor 4.0.1. Para esto se necesita definir una región que este bajo el mismo régimen de esfuerzos y tener calculados los mecanismos focales correspondientes. El software utilizado fue WIN TENSOR desarrollado por el Dr. DamienDelvaux del Royal Museumfor Central Africa, Tervuren, Bélgica.

DESCRIPCIÓN DE LA SISMICIDAD

Se analizaron cuatro enjambres sísmicos en el área comprendida entre el lago de Ilopango y el río Lempa entre los años 1997 y 2008. Para un mejor análisis y de acuerdo a la distribución de los enjambres en la zona de San Vicente se ha dividido en tres áreas como muestra la Fig. 4.

En el enjambre de 1997 ocurrieron 90 sismos en un periodo de 25 días durante el mes de marzo. Las magnitudes coda (Mc) tuvieron un máximo de 3.0 y la mayor concentración de eventos ocurrió entre los 4 y 10 km de profundidad en el área A.

El segundo enjambre estudiado se inició el 1 de marzo de 1999 bajo el sector central del área de San Vicente o área B. La actividad continuó hasta el día 25 de mayo de 1999 cuando se registró el último evento de la secuencia. La actividad sísmica consistió de 523 temblores, teniendo el mayor una magnitud 4.5 Mc. La actividad sísmica mostró una mayor concentración a una profundidad entre los 5 y 13 km.

El tercer enjambre estudiado se inició el 13 de enero de 2001 y cubre toda el área de estudio. La actividad continuó hasta el día 27 de junio de 2001 cuando se registró el último

evento de la secuencia. La actividad sísmica consistió de 1 378 temblores, de los cuales 1372 fueron de tipo superficial y de origen tectónico. El resto fue en la zona de subducción, siendo el principal el sismo de 7.7 M_w [14] ocurrido el 13 de enero. Un mes después, el 13 de febrero de 2001, ocurrió un sismo de magnitud de 6.6 M_w [14], siendo el mayor evento de toda la actividad. La mayor concentración de sismos fue entre los 5 y 15 km de profundidad, siendo en general de tipo superficial.

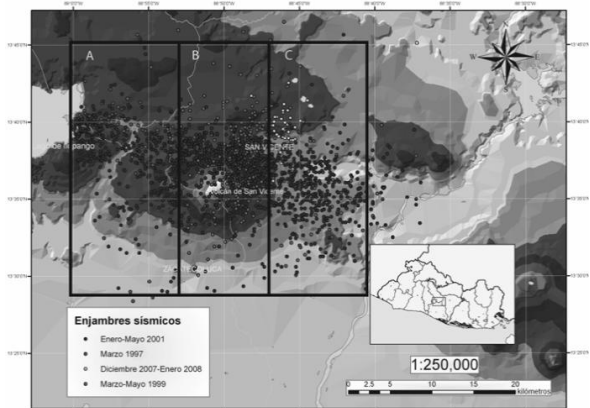


Fig. 4. Región de San Vicente donde ocurrieron los tres enjambres sísmicos del estudio, A. Región del enjambre sísmico de marzo de 1997 B. Región del enjambre sísmico de marzo-mayo de 1999 C. Región del enjambre sísmico de diciembre de 2007 a enero de 2008. El enjambre de 2001 abarca la totalidad del área de estudio.

El 22 de diciembre de 2007 se inició el cuarto enjambre sísmico en el área C. La actividad continuó hasta el día 27 de enero cuando se registró el último sismo de la secuencia. La actividad sísmica consistió de 55 temblores, siendo el sismo de mayor magnitud de 3.3 M_c con una mayor frecuencia entre los 6 y 15 km de profundidad.

MECANISMOS FOCALES DE LOS ENJAMBRES SÍSMICOS

Para determinar del mecanismo focal compuesto primero se calcularon los mecanismos simples. El primer criterio de selección fue el número de polaridades, el cual debía ser

mayor que cinco y con una profundidad menor a los 40 km. El último criterio de selección, para solo tomar sismos de importancia, fue la magnitud del terremoto. Los valores tomados variaron para cada enjambre, dependiendo el número de terremotos.

Para el enjambre sísmico de 1997 no pudo calcularse un mecanismo focal simple satisfactorio, por lo que se procedió a calcular de una vez el compuesto. La solución obtenida es un mecanismo focal compuesto de desgarre con componente inversa. Su acimut es de 81° , buzamiento de 81.5° y ángulo de desplazamiento de 162.62° . El mecanismo focal compuesto es mostrado en la Fig. 5 junto con las principales fallas geológicas del área A. De esta última figura se observa que la mayor concentración de eventos ocurre en la parte más próxima al lago de Ilopango. El mecanismo focal concuerda en el acimut y buzamiento reportado en [15] para la zona en estudio y la falla denominada “Zona de Falla de El Salvador” o ZFES por el mismo autor; pero difiere en cuanto a la componente, ya que el mecanismo reportado en 2001 es de componente normal y este es de componente inverso. De hecho la aparición de componentes inversos se dio en varias soluciones de otros enjambres.

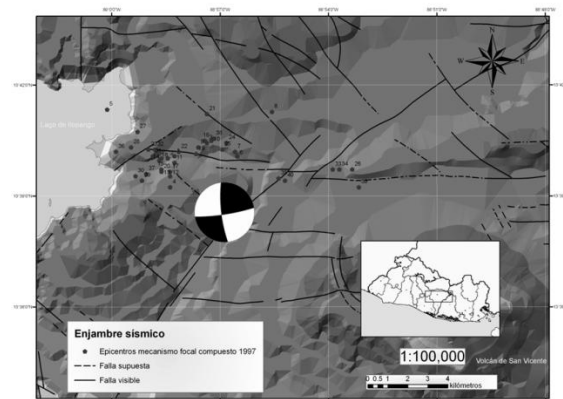


Fig 5. Principales sistemas de falla en el área de estudio A junto con el diagrama del mecanismo focal compuesto. En el diagrama del mecanismo focal la parte blanca son dilataciones y la negra compresiones.

El enjambre de 1999 fue uno de los más complejos, ya que el número de sismos registrados fue de 523. Para poder determinar el mecanismo focal se impuso la condición que de que $M_c > 2.4$ y el número de polaridades fuera mayor o igual a 5. Con estos criterios se seleccionaron 28 eventos sísmicos. De estos resultaron: 13 de desgarre, 12 normales y 3 inversos (ver Fig. 6). Con estos mecanismos focales simples se calcularon mecanismos focales compuestos obteniendo: 3 de desgarre, 2 normales y 3 inversos. Este último tipo de mecanismo no está de acuerdo con el sistema de fallas de la zona, sin embargo han sido reportados mecanismos inversos en la zona occidental [1], [15]. Posiblemente estos resultados podrían ser producto de la poca cobertura acimutal en el registro de los eventos sísmicos. Específicamente para la zona de San Vicente [16] reporta haber encontrado en la falla de desgarre ZFES una estructura de flor con componente inversa. Hasta el momento no se le ha dado la suficiente atención a este tipo de falla en la zona; pero según parece esta tiene una presencia importante, que debe ser investigada con más detalle en el futuro.

Para el enjambre de 2001 solo se pudieron utilizar 40 eventos para el cálculo de los mecanismos focales simples. Se calcularon: 19 de desgarre, 20 normales y 1 inverso (ver Fig. 7).

De los 40 sismos solo 27 se pudieron utilizar para el cálculo del mecanismo focal compuesto. De estos se obtuvieron 3 mecanismos normales (ver Fig. 7) y 2 de desgarre. En el enjambre sísmico de 2007 a 2008 la solución obtenida es un mecanismo focal compuesto de desgarre dextral con orientación E-O con acimut de 93.97° , buzamiento de 76.73° y ángulo de desplazamiento de 167.74° . Esta solución también corresponde a la falla ZFES, con la excepción que la componente es inversa y no normal como se esperaba

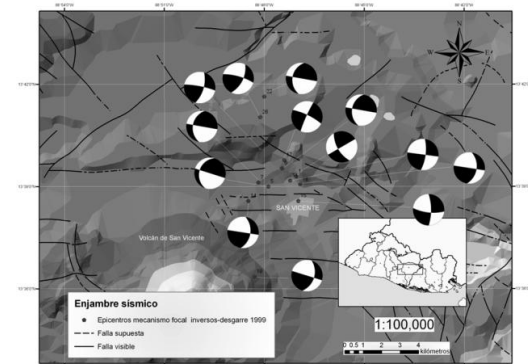


Fig. 6. Principales sistemas de falla en el área de estudio B junto con los diagramas de mecanismo focal de desgarre encontrados para los sismos seleccionados en 1999.

RELACIÓN FRECUENCIA-MAGNITUD PARA LA ZONA DE SAN VICENTE

Ya que la mayoría de los sismos para los enjambres estudiados son de magnitud pequeña e intermedia, se utilizó únicamente la magnitud coda para el análisis de la relación Gutenberg-Richter.

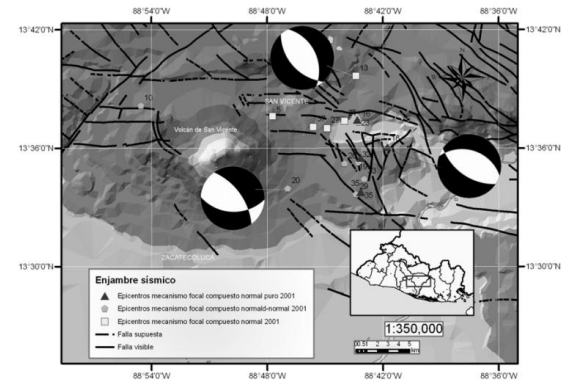


Fig 7. Mecanismos focales compuesto normales calculados para el enjambre sísmico de 2001. Se observa que la mayoría de sismos están ubicados en la zona C de estudio. En el diagrama del mecanismo focal la parte blanca son dilataciones y la negra compresiones.

Se hizo el ajuste para todos los enjambres sísmicos juntos (ver Fig. 8) y así poder evaluar el comportamiento de la zona en un periodo de 10 años. Se utilizaron un total de 1 997 sísmos, con los que se obtuvo un ajuste de a y b de 7.71 y 1.70 respectivamente.

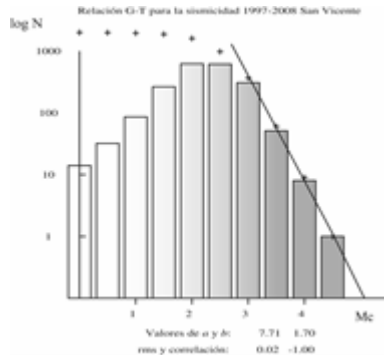


Fig. 8. Relación frecuencia-magnitud para la totalidad de la sismicidad de 1997 a 2008.

El valor alto de b -value indica que zona de estudio tiene niveles de acumulación de esfuerzos bajos, ya que estos se van liberando lentamente con el tiempo.

CAMPOS DE ESFUERZOS A PARTIR DEL ANÁLISIS DE POBLACIÓN DE FALLAS

Para determinar el campo de esfuerzo solo se utilizaron los mecanismos de los enjambres sísmicos de 1999 y 2001, ya que estos disponen de un buen número de mecanismos focales. Para el enjambre de 1999 se identificaron dos regímenes de esfuerzos. El primero es el correspondiente a las fallas de desgarre y el segundo al de fallas normales. Según muestra el ajuste por diedros rectos se tiene un régimen de esfuerzos de desgarre con un eje horizontal de esfuerzos máximo (SHmax) y mínimo (SHmin) con orientación NO-SE y NE-SO respectivamente. El régimen de esfuerzos normal presenta un SHmin con orientación NE-SO. Se observa que

para ambos regímenes, el esfuerzo mínimo (σ_3) presenta una dirección similar. De igual forma para el enjambre de 2001 se encontraron dos regímenes de esfuerzos del mismo tipo que para el de 1999.

El campo de esfuerzos concuerda con los entrados por [16]-[17] en la zona de San Vicente. Por lo que estos resultados sugieren un campo de esfuerzos predominantemente transtensional con ligeras diferencias para la zona B y C de estudio como se observa en la Fig. 9. Esto puede deberse probablemente a ligeros cambios de dirección en ZFES.

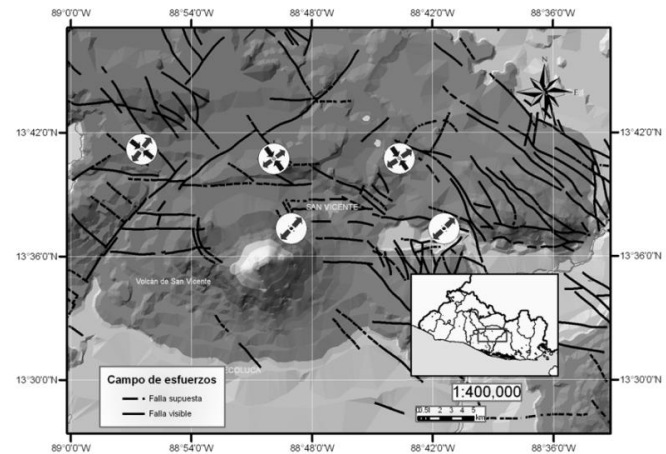


Fig. 9. Orientación de los ejes principales de esfuerzos para el área de San Vicente a partir de los mecanismos focales calculados en el presente estudio. Las flechas más oscuras indican la dirección de SHmax y las más claras la dirección de SHmin.

CONCLUSIONES

El método de mecanismo focal compuesto puede resultar más efectivo si primero se calculan mecanismos focales simples, aunque no tengan buena cobertura acimutal. A partir de los mecanismos que presentan semejanza, y están en una misma área, se calculan los compuestos, como se ha mostrado en los resultados de la presente investigación.

De los mecanismos focales calculados y aplicando el método de diedros rectos se sugiere un campo de esfuerzos predominantemente transtensional. Las orientaciones de SH_{max} y SH_{min} son NO-SE y NE-SO respectivamente. Estos resultados muestran concordancia con los mecanismos focales compuesto sobre el régimen tectónico en la región. A partir de los resultados del b-value se puede concluir que la zona de San Vicente tiene bajos niveles de acumulación de esfuerzos, cuya energía se libera lentamente como enjambres sísmicos.

RECONOCIMIENTOS

El autor agradece la colaboración del Lic. Guillermo Morán de la Universidad de El Salvador para el desarrollo de la investigación. Así también agradece al Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), actual Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), por proporcionarme la base de datos de los eventos sísmicos de la zona de San Vicente.

REFERENCIAS

- [1] Méndez, L.M. y Portillo, A.M., "Determinación de los mecanismos focales de los sismos ocurridos entre el volcán de San Salvador y la caldera del lago de Ilopango en el periodo de 1994 a marzo de 2005.", Tesis. San Salvador: Universidad de El Salvador, 2006.
- [2] Lermo-Samaniago, J., "Análisis de la actividad sísmica en el Volcán Popocatepetl (México) durante el periodo 1994-1997." *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LVIII(2), pp.253-57, 2006.
- [3] Gonzáles E., M. "Reporte de un emjambre sísmico de febrero-abril de 2004, en la bahía de la Paz, Baja California sur", México. *Geos*, 24(3), pp.451-56, 2005.
- [4] Angelier, J. "Seismotectonics in Northeast India: a stress analysis of focal mechanism solutions of earthquakes and its kinematic implications. *Geophysic Journal International*, (178), pp.303-27, 2009.
- [5] Walsh, D. A Bayesian approach to determining and parametrizing earthquake focal mechanisms. *Geophysic Journal International*, (176), p.235-255, 2009.
- [6] Mulibo, G., "The 1994-1995 Manyara and Kwantoro Earthquake swarms" *South African journal of geology*, 112, pp.387-404, 2009.
- [7] Roland, E., "Earthquake swarms on transform faults" *Geophys. J. Int.*, 178, pp.1677-90, 2009.

- [8] Frez, J. & Gámez, E., "Aspectos de la sismotectónica de Nicaragua y su alrededor" *GEOS*, 28(3), 2008.
- [9] Morán, G.N., "Evaluación de la amenaza sísmica para el área geotérmica de Berlín, El Salvador, América Central" Tesis. San José, Costa Rica: Universidad Centroamericana de Geología. 1989.
- [10] SNET, [Online] Disponible en: <http://www.snet.gob.sv/ver/sismologia/registro/enjambres+sismicos/ano+2008/enjambre+sismico+en+san+vicente/>
- [11] Rodríguez, M., "A GPS and modelling study of deformation in northern Central America", *Geophys Journal International*, pp.1733-54, 2009.
- [12] de Vicente, G., Muñoz, A. & Giner, J.L., "El uso del método de los diedros rectos: implicaciones a partir del modelo de deslizamiento del análisis poblacional de fallas" *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 5(3-4), pp.7-20, 1992.
- [13] Havskov, J. & Ottemöller, L., *Routine Data Processing in Earthquake Seismology*. primera ed. Bergen: Noruega, 2010.
- [14] Cepeda, J., M.B., B. y A., B.E., "Strong-motion characteristics of January and February 2001 earthquakes in El Salvador" *Geological Society of America*, (special paper 375), pp.405-21, 2004.
- [15] Jiménez, D., "Caracterización de los enjambres sísmicos ocurridos en abril y mayo de 2005 en la zona occidental de El Salvador" Tesis de grado. Universidad de El Salvador, 2005.
- [16] Canora Catalán, C., "Análisis sismotectónico, neotectónico y paleosísmico de la zona de falla de El Salvador, Centro América" Tesis doctoral. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, 2010.
- [17] Corti, G., Carminati, E., Mazzarini, F. & García, M.O., "Active strike-slip faulting in El Salvador, Central America". *Geological Society of America*, 33(12), pp.989-92, 2005.

BIOGRAFÍA

Raúl Núñez Vallejo nació en la ciudad de Ahuachapán, El Salvador, el 27 de diciembre de 1974. Se graduó de profesor de Física y Matemática en la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas y estudió en la Universidad de El Salvador la Licenciatura en Física.

Su experiencia laboral incluye la de docente de Matemática y Ciencias de educación media en varios colegios de El Salvador, así como el trabajo en el laboratorio de Física de la UCA, en la cual actualmente es profesor de Física. Además cursa estudios de maestría en educación en la Universidad Rafael Landívar de Guatemala.