

Red GPS “ZFESNET” para el estudio de la evolución del ciclo sísmico de deformaciones y esfuerzos asociado a la Zona de Falla de El Salvador

ZFESNET GPS network to study the evolution of the seismic cycle of stress and strain associated to the El Salvador Fault zone

A. Staller¹, J.J. Martínez-Díaz², B. Benito¹, D. Hernández³, M. Díaz³, C. Pullinger⁴, C. DeMets⁵, C. Canora², J.A. Álvarez-Gómez² y M. Béjar²

- 1 Dpto. de Ingeniería Topográfica y Cartografía, ETSI en Topografía, Geodesia y Cartografía, UPM. Campus Sur, Autovía de Valencia km 7.5, 28031 Madrid. a.staller@upm.es
- 2 Dpto. de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas, UCM. C/ José Antonio Novais, 2 Ciudad Universitaria, 28040 Madrid. jmdiaz@geo.ucm.es
- 3 Servicio de Geología, Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. El Salvador. dhernandez@snet.gob.sv
- 4 Empresa LAGEO, El Salvador. cpullinger@lageo.com.sv
- 5 Dept. of Geology & Geophysics, University of Wisconsin-Madison. 1215 W Dayton St. Madison WI 53706, EE.UU. chuck@geology.wisc.edu

Resumen: El Salvador se caracteriza por la presencia de fallas de desgarre sísmicamente activas subparalelas a la zona de subducción. Estas estructuras han sido las responsables de la mayoría de los terremotos destructivos que han tenido lugar a lo largo de la costa Pacífica en el arco volcánico centroamericano, desde Guatemala hasta Costa Rica. La Zona de Falla de El Salvador (ZFES) es una de las principales estructuras tectónicas de la región estudiada, y posiblemente la estructura donde se está acomodando la mayor parte del movimiento paralelo a la zona de subducción. En este trabajo se presenta la Red GPS ZFESNET, establecida en 2007 con el fin de cuantificar la deformación que se está produciendo actualmente asociada a la ZFES. La determinación de deformaciones y esfuerzos acumulados a partir de datos GPS permitirá complementar los datos geológicos existentes y contribuir a una correcta evaluación de la peligrosidad sísmica para esta zona, así como al mejor entendimiento de los datos de sismicidad histórica y paleosismicidad.

Palabras clave: Zona de Falla de El Salvador, peligrosidad sísmica, Centroamérica, falla activa, GPS.

Abstract: *El Salvador is characterized by the presence of active strike-slip faults subparallel to the trench. These structures have been responsible for most of the destructive earthquakes along the volcanic arc parallel to the pacific coast, from Guatemala to Costa Rica. The El Salvador fault zone is one of the main tectonic structures of the region, and it is possibly the most relevant structure accommodating trench-parallel motion. In this work we present the ZFESNET GPS network, established in 2007 with the aim to quantify the deformation and stress fields controlled by the current activity of the ESFZ. The determination of deformations and stresses from systematic GPS measurements will contribute to improve the seismic hazard assessments in the region and to a better understanding of the historical and paleoseismic activity in the area.*

Key words: *El Salvador Fault Zone, seismic hazard, Central America, active fault, GPS.*

INTRODUCCIÓN

El Salvador ha sufrido al menos 11 terremotos destructivos durante los últimos 100 años causando más de 3000 muertes, debidas tanto al efecto directo de los seísmos como de los deslizamientos inducidos (Bommer *et al.*, 2002). La zona sismogénica de El Salvador se sitúa en el segmento Cocos-Caribe de la zona de subducción centroamericana, donde las placas convergen con velocidades de 73-84 mm/a (DeMets, 2001). En esta zona se producen dos tipos de sismicidad en función de su origen tectónico y su localización. Los mayores terremotos con $M_w > 6.5$ se generan en la zona de subducción a lo largo de la interfase con la placa del Caribe (Dewey y Suarez, 1991). Estos terremotos se producen a profundidades intermedias (~200

kilómetros), generando daños moderados en el continente. Los terremotos en la zona continental se producen a lo largo del arco volcánico salvadoreño con magnitudes de hasta $M_w 6.7$. Estos eventos presentan carácter superficial lo que hace que, a pesar de su menor tamaño, sean más destructivos que los de la zona de subducción.

Estudios geológicos recientes han mostrado la existencia de una falla activa con movimiento de desgarre dextral y longitud superior a 150 km que atraviesa el país de este a oeste con una dirección media $N100^\circ$ (Fig. 1) y que sería la responsable de la sismicidad destructiva de la zona volcánica: la Zona de Falla de El Salvador (ZFES) (Martínez-Díaz *et al.*, 2004). Uno de los segmentos de esta falla (segmento

Ilopango-San Vicente) fue el responsable del terremoto de febrero de 2001 (Mw 6.6) que causó más de 1000 víctimas. Este segmento aparece espacialmente relacionado con el volcán San Vicente y ha controlado procesos de colapso de caldera antiguos. En este trabajo se presenta los primeros resultados del proyecto “ZFESNET: establecimiento de una Red de Control GPS en la Zona de Falla de El Salvador”, que tiene como primer objetivo diseñar e instalar una red GPS con el fin de realizar una cuantificación y monitorización de las deformaciones intersísmicas, y en su caso cosísmicas, asociadas a la actividad de la ZFES, y con ello comprender la tectónica activa de la región y contribuir a medio y largo plazo a la correcta estimación de la peligrosidad sísmica.

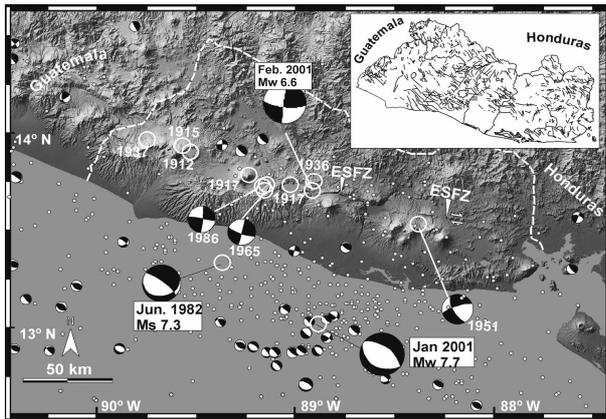


FIGURA 1. Imagen de RADAR-SRTM con los terremotos históricos destructivos ocurridos en el salvador (círculos blancos). Los puntos pequeños muestran la sismicidad de Ms >2.5 para el periodo 1977–2001 tomada del catálogo USGS-NEIC. Los mecanismos focales pequeños proceden del catálogo CMT de Harvard (periodo 1977–2001) mientras que los grandes están tomados de Buforn et al. (2001).

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO ZFESNET-07

El Proyecto ZFESNET nace de la necesidad de cuantificar y monitorizar las deformaciones asociadas a una estructura de elevado potencial sismogénico como es la Zona de Falla de El Salvador (ZFES), está financiado por la Universidad Politécnica de Madrid y se desarrolla en colaboración con la Universidad Complutense de Madrid, el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) de El Salvador, y la universidad Wisconsin-Madison de EE.UU. Este proyecto tiene como principales objetivos apoyar las labores de investigación que se han y están desarrollando en El Salvador a través de varios proyectos de investigación (algunos de ellos actualmente en ejecución) en los que se está realizando la caracterización de la actividad paleosísmica de la ZFES, mediante la aplicación de técnicas paleosísmicas. Estos estudios han permitido estimar una velocidad geológica de la falla de ≈ 2 mm/a e identificar varios eventos sísmicos de Mw>6.5 ocurridos en los últimos 1500 años. Por otro lado, el proyecto pretende ser una fuente que genere un elevado volumen de datos geodésicos en el futuro próximo que puedan ser utilizados para la elaboración de modelos que ayuden a

una determinación precisa del campo de deformaciones de la corteza en el entorno de la ZFES. La red ha sido diseñada de forma que pueda estar coordinada con la red regional ya existente en la zona gestionada por el SNET y la Univ. de Wisconsin-Madison de modo que los datos obtenidos puedan ser incluidos en los modelos geodinámicos regionales centroamericanos. A nivel local una de las cuestiones que se pretende analizar es el distinto comportamiento en cuanto a deformación intersísmica que debería presentar el segmento oriental de la ZFES que lleva al menos varios siglos sin generar ruptura superficial, con respecto al segmento Ilopango-San Vicente que generó el terremoto de Mw 6.7 de 2001. Ello permitirá estimar tasas de acumulación de esfuerzo de cizalla sobre el plano de falla en segmentos con historias de ruptura recientes muy distintas.

Para el diseño espacial de la red se ha llevado a cabo una cartografía de las fallas activas de la zona y se ha considerado especialmente la geometría de la zona de desplazamiento principal de la ZFES. Se ha tenido en cuenta así mismo la posible existencia de movimientos corticales de origen volcánico por lo que se han evitado estaciones demasiado próximas a los volcanes activos. Con estas premisas la Red GPS ZFESNET ha sido establecida con éxito en noviembre de 2007 y ya ha sido realizada la primera campaña de medida.



FIGURA 2. Imagen de estacionamiento de antena GPS Trimble ZEPHYR Geodetic con trípode. Estación perteneciente a la ZFESNET situado sobre roca estable.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

La red GPS consiste en un total de 29 estaciones GPS distribuidas lo más homogéneamente posible a lo largo de la ZFES (Fig. 3), entre el lado oeste del lago Ilopango y el borde este de El Salvador. En el diseño e implantación de la red se tuvieron en cuenta criterios geológicos, geodésicos y logísticos (Talaya et al., 1999;

Colomina *et al.*, 1998). La red cubre un área aproximada de 140 km x 70 km. La distancia mínima y máxima entre puntos es de 8.207 km y 41.563 km respectivamente, siendo la distancia media entre puntos de 25 km. La ubicación y señalización de las estaciones GPS se eligió de tal forma que garantizara su permanencia y estabilidad tanto en tiempo como en posición, y no tuviera deformaciones por variaciones de las condiciones atmosféricas. Ante la imposibilidad de construir vértices, debido a los altos costes, se optó por la instalación de clavos de acero inoxidable de 10 cm de longitud, colocados directamente sobre roca o elemento físico natural con la menor susceptibilidad posible a sufrir movimientos propios asociados a deslizamientos gravitacionales, asentamientos o cambios de volumen de origen térmico.

Para la observación de la red GPS se han usado 4 receptores geodésicos bifrecuencia de alta precisión Trimble modelo 5700 con antena Geodésica modelo ZEPHYR Geodetic, tres de ellos pertenecientes a la ETSI en Topografía, Geodesia y Cartografía de la UPM y uno en posesión del SNET perteneciente a la Universidad de Wisconsin. Se han utilizado dos tipos de estacionamiento de las antenas GPS sobre los clavos que materializan las estaciones GPS; trípode con basada nivelante y plomada óptica (Fig. 2), y sistema centrador para estacionamiento de la antena GPS sobre clavo sobre el suelo. Previo a la observación se ha realizado la

comprobación del instrumental utilizado siguiendo los procedimientos descritos por UNAVCO. La red GPS fue medida del 21 de octubre al 21 de noviembre de 2007. La observación se realizó mediante sesiones diarias de un mínimo 18 horas (18:00-10:00 UTC). Las medidas se realizaron con los 4 equipos descritos anteriormente.

Debido a la elevada precisión requerida, el proceso de datos ha sido realizado utilizando el software Bernese versión 5.0 (desarrollado por la Universidad de Berna (Rothacher, *et al.*, 1993). En el cálculo se han utilizado las observaciones de la campaña del 2007, efemérides precisas y observaciones permanentes de las estaciones permanentes pertenecientes a IGS y a la red de vigilancia perteneciente al SNET y a la Universidad de Wisconsin-Madison, las estaciones del IGS fijarán el marco de referencia. En primer lugar se ha realizado un pre-proceso para eliminar los errores de las observaciones GPS (cycle-slip), posteriormente se han determinado las ambigüedades de un conjunto independiente de líneas base (junto con la estimación de parámetros troposféricos) para, finalmente, combinar las observaciones de cada sesión y realizar un cálculo global independiente por cada sesión. El ajuste global de toda la red GPS se ha realizado mediante una combinación de las ecuaciones normales, guardadas en el proceso de cada sesión, utilizando Bernese.

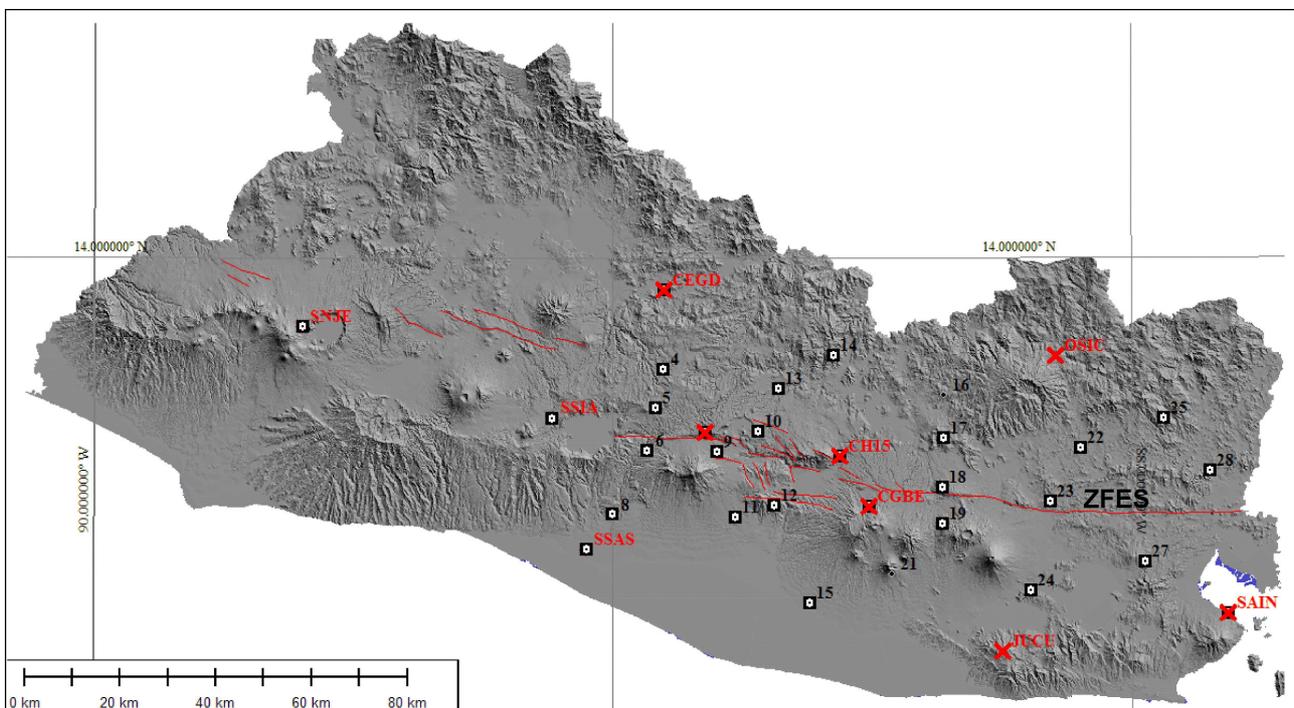


FIGURA 3. Modelo digital del terreno de El Salvador sobre el que se representan las trazas principales de las fallas que forman la ZFES. Se señalan con números las estaciones de la red ZFESNET, y con letras las estaciones de la Univ. de Wisconsin-Madison con las que se coordinarán las observaciones.

CONCLUSIONES

El Proyecto ZFESNET, iniciado en 2007, ha permitido, diseñar e implantar una Red de Control de las deformaciones en la Zona de Falla de El Salvador, actualmente la zona sismogénica con mayor capacidad para generar terremotos de magnitud superior a 6.5 de la cadena volcánica de El Salvador, zona además caracterizada por una muy elevada vulnerabilidad. Con las medidas realizadas durante este año se ha fijado la época cero de la campaña ZFESNET para futuras campañas. Una próxima campaña se llevará a cabo a finales del año 2008, permitiendo validar las velocidades de deformación esperadas y realizar los modelos preliminares de velocidades. En próximas campañas se espera mejorar y homogeneizar el sistema de estacionamiento empleado, densificar la Red GPS en aquellas zonas donde sea necesario, así como ampliar la red a la zona oeste del país, para estudiar la transmisión de deformaciones y esfuerzos hacia el oeste. Con los resultados obtenidos se pretende determinar la velocidad de acumulación de la deformación intersísmica y con ella la estimación de la acumulación de esfuerzos de cizalla a lo largo de los distintos segmentos que conforman la falla. La comparación de los resultados obtenidos con la actividad sísmica, histórica y pre histórica, permitirá comprender y cuantificar la evolución del ciclo sísmico asociado a esta fuente sismogénica de gran importancia, tanto desde el punto de vista científico como desde el de la prevención de riesgos sísmicos en una zona en desarrollo.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha estado financiada por el proyecto ZFESNET LA07-PID-051 financiado por la Universidad Politécnica de Madrid y los proyectos de investigación TECSAL y ASPE, subproyectos del proyecto coordinado ANDROS, CGL05-7456, financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia. Agradecemos al SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales de El Salvador) por el apoyo humano y científico prestado.

REFERENCIAS

- Bommer, J.J., Benito, M.B., Ciudad-Real, M., Lemoine, A., López-Menjivar, M.A., Madariaga, R., Mankelov, J., Méndez de Hasbun, P., Murphy, W., Nieto-Lovo, M., Rodríguez-Pineda, C.E. y Rosa, H. (2002): The El Salvador earthquakes of January and February 2001: context, characteristics and implications for seismic risk. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22: 389-418.
- Buforn, E., Lemoine, A., Udias, A., y Madariaga, R., (2001): Mecanismo focal de los terremotos de El Salvador. *Memorias 2º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, Madrid, Spain*, p. 115-118.
- Colomina, I., Fleta, J., Giménez, J., Goula, X., Masana, E., Ortiz, M.A., Santanach, P., Soro, M., Suriñach, E., Talaya, J. y Térmens, A. (1998): The CuaTeNeo GPS Network to quantify horizontal movements in the southeastern part of the Iberian Peninsula. *Memorias 1ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Almería, España*.
- DeMets, C. (2001): A new estimate for present-day Cocos-Caribbean plate motion: Implications for slip along the Central American volcanic arc. *Geophysical Research Letters*, 28: 4043-4046.
- Dewey, J.W., y Suarez, G., (1991): Seismotectonics of Middle America, in Slemmons, D.B., *et al.*, eds., *Neotectonics of North America*: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Geology of North America, Decade map volume, p. 309-321.
- Martínez-Díaz, J.J., Álvarez-Gómez, J.A., Benito, B., y Hernández, D. (2004): Triggering of destructive earthquakes in El Salvador. *Geology*, 32(1): 65-68.
- Rothacher, M., G. Beutler, W. Gurtner, E. Brockmann y L. Mervart (1993): The Bernese GPS Software Version 3.4, Druckerei der Universität Bern, Astronomical Institute, University of Berne.
- Talaya, J., Feigl, K., Térmens, A. y Colomina, I. (1999): Practical Lessons from Analysis of a GPS Network Designed to Detect Movements of = Imm/year in the Eastern Pyrenees. *Phys. Chem. Earth (A)*, 24(4): 355-359.