

# Caracterización de la sismicidad de 2001

Los sismos de gran magnitud ocurridos en El Salvador durante el año 2001, así como sus respectivas secuencias de réplicas, produjeron una intensa actividad sísmica en un corto período de tiempo. Esta actividad en su momento parecía no decrecer en tiempo y frecuencia, de acuerdo con las leyes conocidas de decaimiento de réplicas, como la ley de Omori.

En este estudio se analiza la distribución espacial y temporal de estas series sísmicas, así como la evolución de la transferencia de esfuerzos, en relación con el entorno tectónico, ya descrito en el Capítulo I.

La actividad sísmica histórica en El Salvador se ha manifestado con eventos de gran magnitud ocurridos en la zona de subducción, y frecuentemente han sido seguidos por sismos de corteza superficial (ver tabla 1.1), en un intervalo de cuatro a cinco años (White, 1991).

La principal interrogante que se plantea con la actividad de 2001 es si el sismo de corteza superficial del 13 de febrero (Ms 6.5 en la escala de Richter) fue de alguna forma *disparado* por el evento de gran magnitud ocurrido el mes anterior, en la zona de subducción. Ratificar esta posibilidad y definir un posible comportamiento de interacción entre ambos escenarios es importante para futuras evaluaciones de peligro sísmico en la región.

El análisis se delimita con los sismos del 13 de enero y 13 de febrero del 2001, que fueron los de mayor magnitud ocurridos durante ese año, junto con la distribución espacial y temporal de sus secuencias de réplicas. Se complementa con el estudio de la evolución de esfuerzos estáticos de Coulomb tras los sismos principales, tratando de arrojar luz sobre la posible interacción entre ambos tipos de eventos.

## ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LOS SISMOS DE 2001

Con el objeto de caracterizar la secuencia sísmica del 2001 se desarrollan ahora los siguientes apartados:

- Elaboración de un catálogo sísmico para el año 2001.
- Correlación entre escalas de magnitud.
- Parámetros de la fuente.
- Distribución espacial de réplicas.
- Modelación de las superficies de ruptura.
- Distribución temporal de réplicas.
- Relaciones Magnitud-Frecuencia de ocurrencia.

## CATÁLOGO SÍSMICO

El análisis de la actividad sísmica que se presentará en este apartado, ha requerido de la elaboración de un catálogo completo de los sismos principales y sus réplicas, con localizaciones fiables y precisas. Por ello, el

análisis ha comenzado con la re-localización de los eventos sísmicos de 2001, partiendo de la revisión de las fases sísmicas de cada evento, identificadas en un cálculo anterior de los parámetros sísmicos.

Posteriormente se incorporaron las fases sísmicas de los eventos registrados por la red acelerográfica de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA), con el objeto de aumentar la precisión en la localización de cada movimiento telúrico. Es de destacar que los errores encontrados en este proceso eran, a veces, muy significativos y se han podido reducir en un orden de magnitud

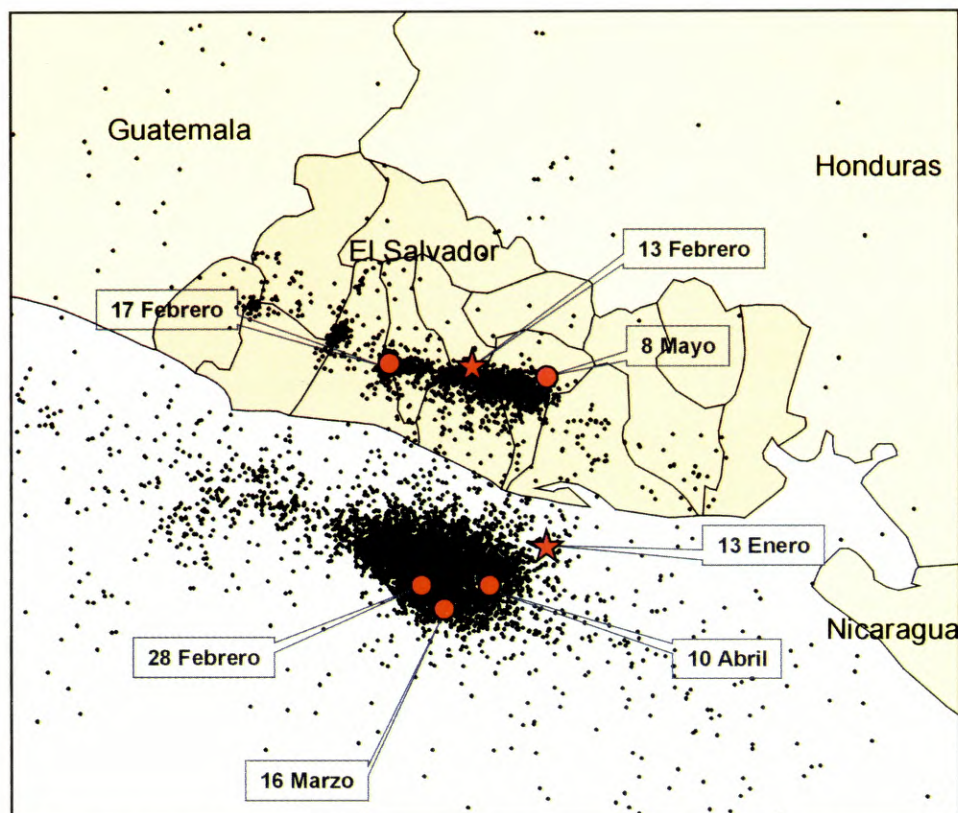


Figura 2.1. Mapa de sismicidad de 2001, registrada y relocalizada por la Red Salvadoreña de periodo corto del SNET. La estimación de parámetros fue realizada con el sistema SEISAN (Earthquake Analysis Software, 2000). Se identifican los epicentros correspondientes a los mayores sismos ocurridos.

Asimismo, se calcularon los valores de Magnitud Local (ML) y Magnitud Momento (Mw), en aquellos sismos que fuera posible determinar la máxima amplitud, sin saturación y con el espectro de desplazamiento. Este minucioso proceso de revisión y cálculo de parámetros ha dado como resultado un catálogo completo y depurado de los eventos de 2001, cuya localización espacial se muestra en la figura 2.1

## CORRELACIÓN ENTRE ESCALAS DE MAGNITUD

Para el estudio que se va a realizar, es importante tener en cuenta el tipo de magnitud de los sismos que ocurrieron en el período de 2001. A tal efecto se homogenizaron las magnitudes reportadas y se calculó la magnitud momento (Mw) para todos los eventos significativos que se encontraron en el catálogo disponible.

El catálogo sísmico de El Salvador para el año 2001, compilado por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) contiene tres mil 755 eventos con magnitudes que oscilan en el rango de 2.1 a 7.8 grados en la Escala de Richter. Las escalas de magnitud usadas son magnitudes de coda (Mc), magnitud local (ML), magnitud de ondas superficiales (Ms) y magnitud momento (Mw).

En general, los modelos de recurrencia y atenuación de movimientos fuertes se vienen desarrollando en términos de Ms ó Mw, con el propósito de evitar la saturación de las escalas de magnitud local. Por ello, y para realizar futuras comparaciones con otros estudios, se ha desarrollado una correlación que ayuda a la posterior conversión entre Mw y Mc, mediante un análisis de regresión de los datos disponibles.

Con este objetivo, se seleccionaron los eventos sísmicos que contenían ambos tipos de magnitudes y se conformó con ellos un subcatálogo. Los datos fueron ajustados por medio de una regresión polinomial de segundo orden, con la cual se logró el mejor ajuste cuando se comparó con las formas lineal, logarítmica, potencial y exponencial. La relación resultante viene dada por la expresión:

$$Mw = -0.0155Mc^2 + 0.7931Mc + 0.3719$$

El coeficiente de correlación  $R^2$  es 0.9. La figura 2.2 muestra el gráfico de la distribución Mw-Mc, con la cual ha sido posteriormente estimada la magnitud Mw para todos los eventos en el catálogo.

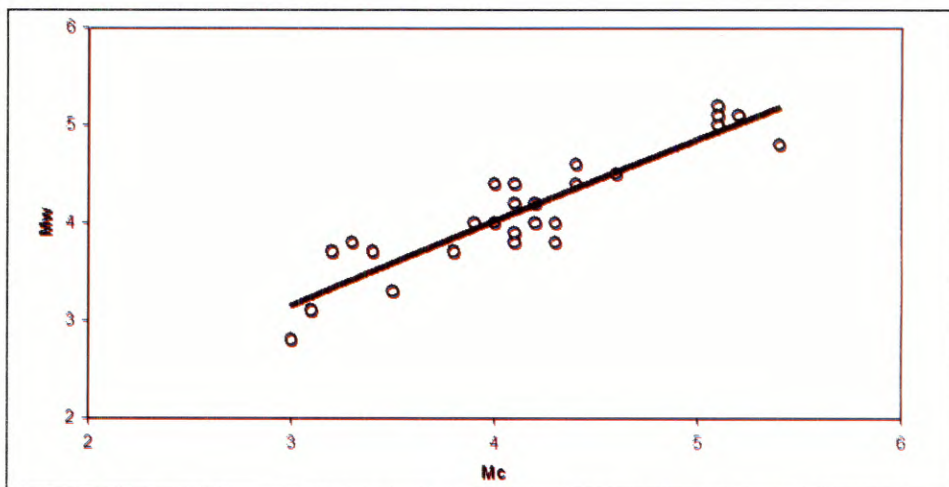


Figura 2.2 Relación entre magnitud de coda y magnitud momento obtenida para los eventos del subcatálogo de estudio. La Agencia fuente de los datos de magnitud coda es el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) en todos los casos, con excepción de los sismos del 13 de enero, cuya fuente es United States Geological Survey (USGS) and Central American Seismic Centre (CASC).

## PARÁMETROS DE LA FUENTE

Los parámetros fuente de los sismos estudiados, junto con los mecanismos focales estimados por diversas agencias y autores, se presentan en las tablas 2.1a y 2.1b. La función de tiempo de la fuente sísmica para el evento del 13 de enero identifica dos subeventos: el primero con alta amplitud y 22 segundos de duración; y el segundo con 24 segundos de duración (Bommer et al., 2002). El momento sísmico liberado se estimó en  $5.5410^{20}$  N-m, sin efectos de directividad aparente. Este sismo, de profundidad intermedia, ocurrió dentro de la placa descendiente de Cocos, cuyo mecanismo focal corresponde a una falla normal con un plano de falla subvertical y un eje de tensión (T) subparalelo a la dirección de buzamiento de la placa descendiente.

Para el evento del 13 de febrero, localizado en la corteza superficial dentro del territorio salvadoreño, el plano de falla corresponde a un mecanismo de deslizamiento lateral. Este evento ocurrió a una profundidad de 10 km, con un momento sísmico de  $6.05 \times 10^{18}$  N-m y una duración total de 12 segundos (Bommer et al., 2002). La distribución de réplicas delimita un plano de ruptura subparalelo a la cadena volcánica, así como subparalelo a la trinchera.

Los mecanismos focales de los dos sismos se han mostrado en la figura 1.3.

## DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE RÉPLICAS

En el mapa presentado en la figura 2.1 se pueden observar algunas concentraciones de sismos correspondientes a las secuencias

de réplicas de los eventos principales. Las agrupaciones más extensas están localizadas alrededor de los epicentros de los eventos del 13 de enero y 13 de febrero. El propósito de esta parte del estudio es identificar las réplicas asociadas con ambos eventos, así como sus superficies de ruptura.

Para visualizar de forma general el patrón de sismicidad, asociar los eventos con cada serie y conocer la evolución temporal de la sismicidad, se examinó la distribución de réplicas semana por semana dentro del período comprendido entre el 13 de enero y el 30 de junio. Este lapso de tiempo contiene los intervalos en los cuales se registró la mayor parte de la actividad de 2001. La distribución se presenta en las figuras 2.3a y 2.3b.

Durante la primera semana, después del sismo del 13 de enero, se produjeron diferentes concentraciones de eventos locales en la corteza superficial dentro del territorio salvadoreño, junto con una concentración de sismos frente a la costa, en la zona de subducción.

En la segunda semana, del 21 al 28 de enero, la sismicidad general decreció y, en la tercera y cuarta semana, cesó casi por completo bajo el eje volcánico. Este período de calma (15 días previo al evento del 13 de febrero) fue seguido de un incremento en la sismicidad a lo largo del sistema de fallas localizadas en paralelo y perpendicularmente a la costa. Ese incremento se produjo justo tras el segundo sismo del 13 de febrero, y se debe a las numerosas réplicas del mismo y a otro sismo de magnitud Mw 5.1, que ocurrió el 17 de febrero en otra falla local. Al mismo tiempo, la actividad de subducción se incrementó durante el período del 13 al 20 de febrero, como si se hubiera reactivado debido a los dos eventos de cadena volcánica.

**Tabla 2.1a. Parámetros fuente y mecanismos focales para el sismo del 13 de enero de 2001, según diferentes Agencias y autores**

HARVARD (CMT)	USGS (CMT)	BUFORN ET AL., 2001 Inversión de onda P	NEIC	HRV	CASC	BOMMER ET AL., 2002
$M_0=4.5*10^{27}$	$M_0=3.2*10^{20}$	Tiempo: 17:33:46	Tiempo: 17:33:32	Tiempo: 17:33:46	Tiempo: 17:33:30	
Tiempo origen 17:33:45.5 0.2	$M_w = 7.6$	Localización del epicentro:	Localización epicentral:	Localización epicentral:	Localización epicentral:	
Localización del Centroide: Lat 12.94N 0.01; Lon 89.08W 0.01	Localización del epicentro: 12.767 N 88.827 W	12.77 N, 88.83 W	13.049 N, 88.66 W	12.97 N, 89.13 W	12.868 N, 88.767 W	
Profundidad: 57.4 km		STF: 46 S				
Duración Media 18.8	Profundidad: 39 Km.	Mw: 7.8	Mw: 7.7 (Ms 7.8, mb 6.4)	Mw: 7.7 (Ms 7.8, mb 6.4)	Mw: 7.7	Mw: 7.7
		Mo: 5.54*1020Nm	Mo:	Mo:	Mo:	Mo: 5.54 * 10 <sup>20</sup>
		Profundidad: 49 Km	Profundidad: 60Km.	Profundidad: 56 Km.	Profundidad: 60 km	Profundidad: 50km
p1: 34°//209° , pitch:-98	p1: 45°//239° , pitch:-73	p1: 63°//038° , slip -98°				
p2: 56°//039° , pitch: -85	p2: 48°//036° , pitch: -107	p2:??				2 sub-eventos de 22 and 24 seg.
Ejes P, T Y N	Ejes P, T Y N	Duración de ruptura: 46 s				
1.(T) VAL= 4.36;PLG=11;AZM=35	1.(T) VAL= 3.16;PLG=1;AZM=47					
2.(N) 0.31; 4; 126	2.(N) -0.01; 12; 317					
3.(P) -4.66; 78; 236	3.(P) -3.15; 78; 143	Ruptura compleja: la mayor parte de la energía se liberó en los primeros 20 seg.				

**Tabla 2.1b. Parámetros fuente y mecanismos focales para el sismo del 13 de Febrero de 2001, según diferentes Agencias y autores**

HARVARD (CMT)	USGS (CMT)	BUFORN ET AL., 2001 Inversión de onda P	NEIC	HRV	CASC	BOMMER ET AL., 2002
	$M_0=6.7*10^{18}$	Tiempo: 14:22:16	Tiempo: 114:22:06	Tiempo: 14.22:16	Tiempo: 14.22:07	Tiempo:
	$M_w = 6.5$	Localización epicentral:	Localización epicentral:	Localización epicentral:	Localización epicentral:	Localización epicentral:
	Localización del epicentro: 13.603 N, 88.961 W	13.60 N, 88.96 W	13.671 N, 88.938 W	13.98 N, 88.97 W	12.927 N, 88.7437 W	
		STF: 14 S				
	Profundidad: 13 Km.	Mw: 6.5	Mw: 6.5 (Ms 6.5, mb 5.5)	Mw: 6.6 (Ms 6.5, mb 5.5)	MC: 5.9, ML 5.7	Mw: 7.7
		Mo: 6.05*1018 Nm	Mo:	Mo:	Mo:	Mo: 6.05*1018 Nm
		Profundidad: 14 Km	Profundidad: 10 Km.	Profundidad: 15 Km.	Profundidad: 9.5 km	Profundidad: 14km
	p1: 79°//184° , pitch:-179	p1: 90°//191° Slip -180°				
	p2: 89°//093° , pitch: -11	p2:??				Duración: 12 s
	Ejes P, T Y N	Duración de ruptura:				
	1.(T) VAL= 6.74;PLG=7;AZM= 49					
	2.(N) -0.09; 79; 179					

Los análisis de las semanas siguientes indican cambios adicionales en la tasa de sismicidad después de eventos de moderada magnitud: 28 de febrero (Mw 6.0, subducción), 16 de marzo (Mw 5.9, subducción), 10 de abril (M 4.7, cadena volcánica), 8 y 9 de mayo (serie de tres eventos ML 5.5, 5.2 y 4.7 en la cadena volcánica). La actividad sísmica comienza a decrecer en el mes de julio, aún cuando se registraron trece eventos más de magnitudes superiores a 4.0 hasta el final del año en ambos escenarios.

En resumen, la actividad sísmica tanto de subducción como de fallas locales, creció y decreció alternativamente, encontrando algunas semanas en las que ambos tipos de sismicidad parecen sucederse en el tiempo. Un hecho resulta evidente: coincidiendo con la ocurrencia de nuevos eventos de magnitud próxima a 5, la actividad alrededor de sus epicentros es disparada nuevamente, cuando antes había comenzado a decrecer. Tales eventos pueden estar actuando como mecanismo de disparo de nuevos movimientos, induciendo a su vez otros con similar magnitud y diferente fuente. Debido a la importancia de esos eventos en la actividad global registrada, que pueden ser al mismo tiempo *causa y efecto* de la misma, vale la pena considerarlos con particular atención. La tabla 2.2 incluye los parámetros de todos los sismos con magnitud 4.5, registrados durante el primer semestre del 2001.

La superposición temporal de las series descritas produjo una actividad inusual durante los primeros seis meses del 2001. Aparentemente el sismo del 13 de enero disparó una o varias fallas locales en la cadena volcánica, y estas a su vez indujeron nuevos sismos en la zona de subducción. Cabe preguntarse si estos sismos locales se habrían producido igualmente aunque no hubiera ocurrido el sismo del 13 de enero.

Una respuesta razonable es que probablemente habrían ocurrido pasado algún tiempo y de forma más paulatina. La historia sísmica de El Salvador demuestra que hay un sismo destructor de cadena volcánica aproximadamente cada 20 años, y el último fue en 1986. Es probable que la falla donde se produjo el sismo del 13 de febrero tuviera mucha energía acumulada, y aunque tal vez no se habría disparado justo ahora por sí sola, la acumulación de esfuerzos derivada del reajuste de tensiones tras el 13 de enero sí ha podido actuar como disparo. Algo así como “*la gota que desborda el vaso*”. Algo similar, pero a una escala de menor magnitud, ha podido suceder con los restantes sismos de moderada magnitud ocurridos en la zona.

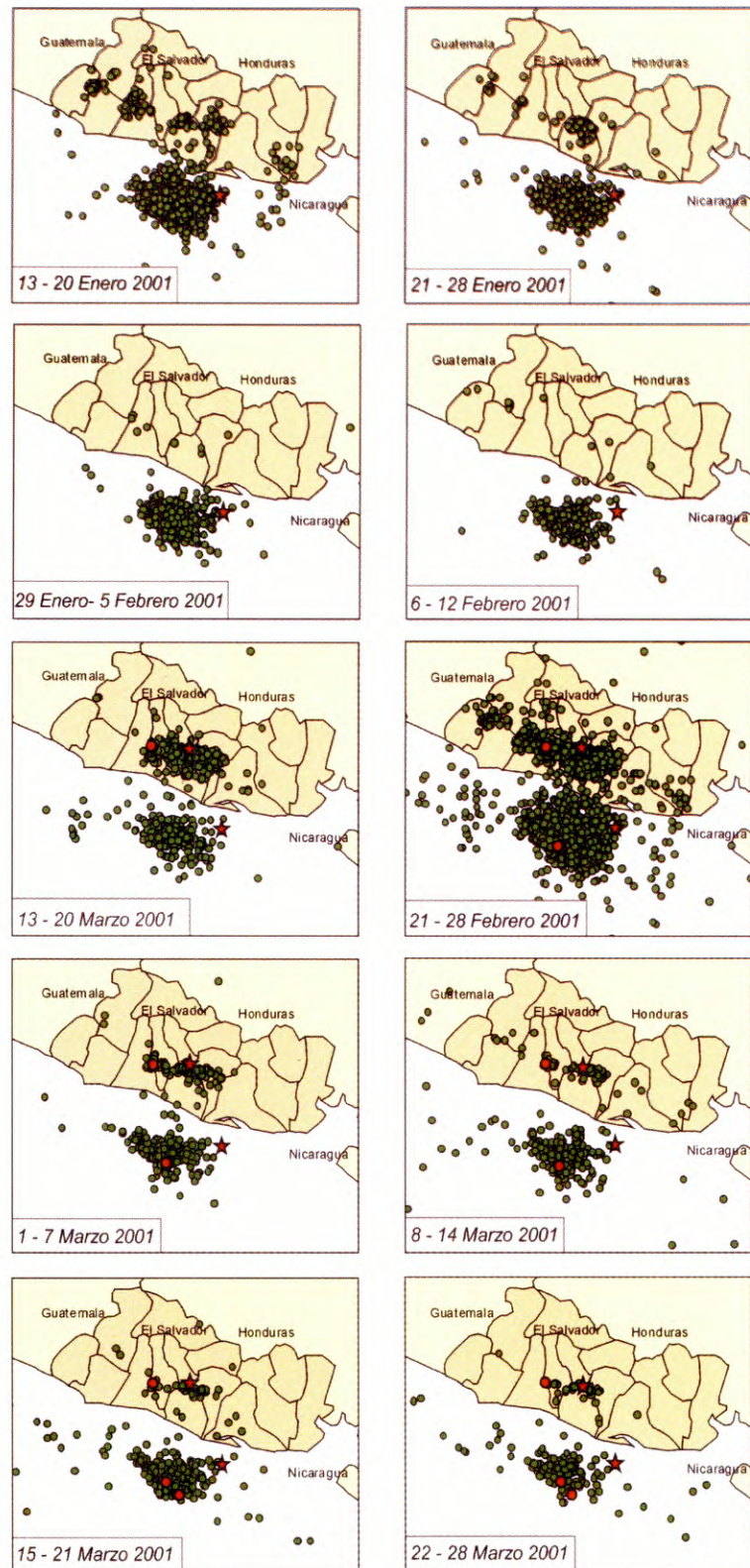


Figura 2.3a Sismicidad de El Salvador después del sismo principal del 13 de enero (estrella) hasta el 28 de febrero, desplegada en ventanas de una semana de duración (Magnitud Mw 3.0). El epicentro del 13 de febrero es también indicado. Los demás sismos identificados en el estudio por producir cambios en la tasa de sismicidad son también representados en sus correspondientes ventanas temporales (M 6.0, 28 de febrero, subducción; M 5.9, 16 de marzo, subducción). La localización de los restantes eventos es representada por un círculo.

## MODELACIÓN DE LAS SUPERFICIES DE RUPTURA

Después del estudio de la distribución espacial de las secuencias de réplicas, se trata ahora de modelar los planos de ruptura asociados con los terremotos del 13 de enero y 13 de febrero; comenzando con la distribución de réplicas para los tres primeros días tras los eventos principales.

En teoría, la distribución de cada serie de réplicas debe definir un plano, que debe ser acorde con la solución obtenida por el mecanismo focal. Sin embargo, cuando se examinaron las soluciones dadas por diferentes agencias (Tablas 2.1a y 2.1b), pudo notarse que existían algunas diferencias entre los valores de azimuth y buzamiento. Ante tal situación se ha tratado de obtener información adicional del área de réplicas, con el objetivo de confirmar algunas de esas soluciones.

Se ensayaron diferentes orientaciones del plano de falla, centrados en la nube de réplicas, de acuerdo con los mecanismos focales dados en las tablas 2.1a y 2.1b. En este contexto se identificó la mejor solución, para representar con mayor coherencia el mecanismo focal y el área de réplicas.

Para el evento del 13 de enero, el mejor ajuste es un plano de falla buzando  $60^\circ$  al NE con un rumbo de  $N 128^\circ E$ , subparalelo a la trinchera centroamericana. La falla tiene una longitud de 67 Km. y un área de ruptura de dos mil 532 Km<sup>2</sup>, indicados por la distribución espacial de réplicas. Véase figura 2.4a.

Se ensayaron diferentes orientaciones del plano de falla, centrados en la nube de réplicas, de acuerdo con los mecanismos focales dados en las tablas 2.1a y 2.1b. En este contexto se identificó la mejor solución, para representar con mayor coherencia el mecanismo focal y el área de réplicas.

Para el evento del 13 de enero, el mejor ajuste es un plano de falla buzando  $60^\circ$  al NE con un rumbo de  $N 128^\circ E$ , subparalelo a la trinchera centroamericana. La falla tiene una longitud de 67 Km. y un área de ruptura de dos mil 532 Km<sup>2</sup>, indicados por la distribución espacial de réplicas. Véase figura 2.4a.

Para el terremoto de corteza superficial del 13 de febrero, la mejor solución corresponde a un plano de 471 km<sup>2</sup>, con un rumbo  $N94^\circ E$  ,y un buzamiento de  $70^\circ$  hacia el SO (Figura 2.4b).

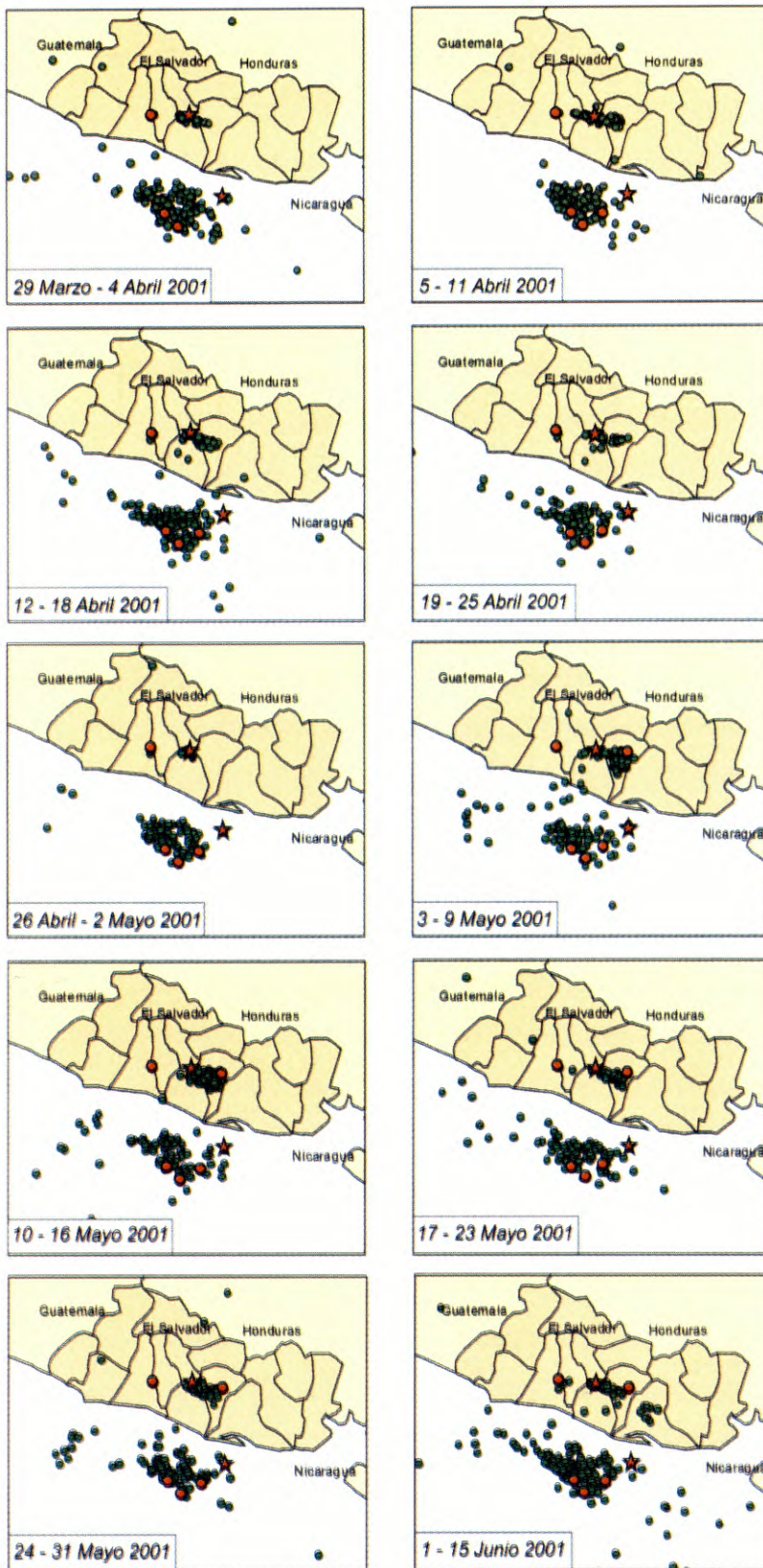


Figura 2.3b Sismicidad de El Salvador para el periodo 29 de Marzo a 15 de Junio, con el mismo criterio de representación que el usado en la figura 2.3a. Los nuevos símbolos de epicentros en algunas ventanas temporales corresponden a los eventos que actuaron como disparo (M 4.7, 10 de Abril cadena volcánica y M 5.5, 5.2, 4.7 Mayo 8 y 9, cadena volcánica).

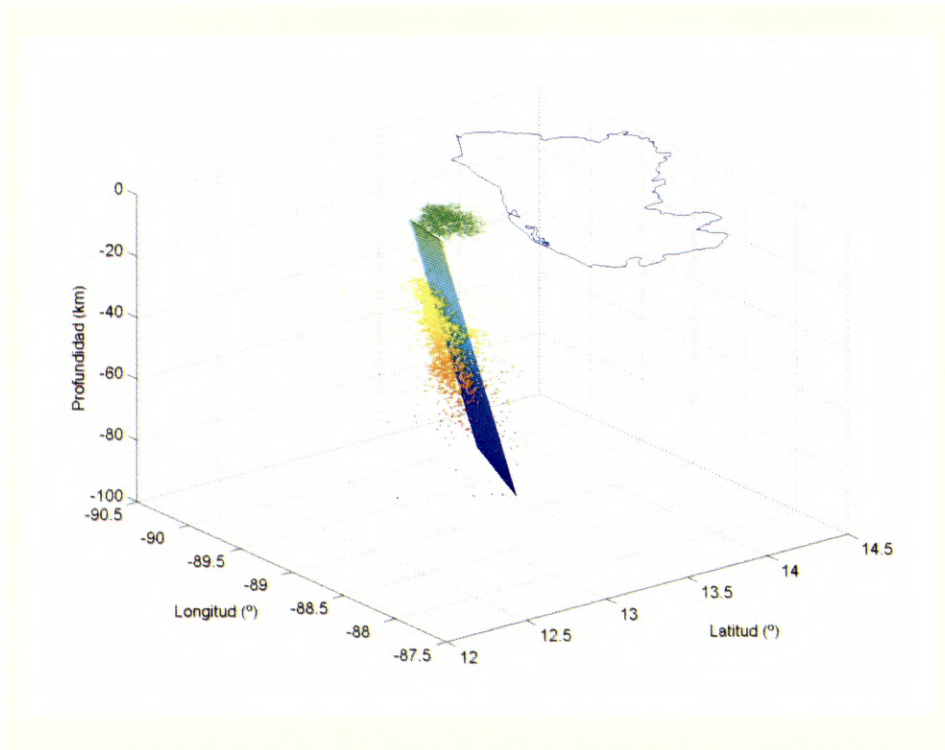


Figura 2.4a Representación del plano de falla para el evento del 13 de enero Ms 7.8, ajustado con la secuencia de réplicas de los primeros tres días, junto con la proyección en superficie de epicentros. La traza de la falla es subparalela a la costa y su parte más superficial se encuentra a una profundidad de 20 km.

## DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LAS RÉPLICAS

Se estudió la evolución temporal de cada secuencia de réplicas independientemente, tanto para el 13 de enero como para el 13 de febrero, con el propósito de evaluar la posible interacción entre ambas series.

La discriminación de los eventos de cada serie se realizó teniendo en cuenta los sismos asociados con cada superficie de ruptura previamente determinada. Las figuras 2.5a y 2.5b, ilustran el número de eventos como una función del tiempo para las dos secuencias, en el intervalo de tiempo entre el 13 de enero y 30 de junio de 2001, mostrando incrementos y decrementos alternos de la actividad en cada zona.

Un aspecto significativo es la ocurrencia de eventos de cadena volcánica en el período comprendido del 13 al 25 de enero, que puede interpretarse como actividad local disparada por el terremoto previo de la zona de subducción.

Las observaciones parecen corroborar la interacción entre las secuencias de diferentes orígenes o escenarios, hecho que

también puede ser ilustrado por la superposición logarítmica de ambas series con el mismo tiempo origen de referencia (situado en el 13 de enero). Véase figura 2.6

Profundizando en este punto, se ha estudiado también el decaimiento de réplicas de cada secuencia de una forma analítica, haciendo ajustes a la bien conocida ley de Omori, que en forma logarítmica corresponde a la expresión:  $\text{Log}(N(t)) = a - b * \log(t)$ ; siendo  $N(t)$  el número de eventos por día y “t” el tiempo en días desde el sismo principal. En la figura 2.7, se muestra los ajustes para las dos series, en dos intervalos temporales para cada una de ellas.

Para la serie de subducción, un primer ajuste es realizado con la secuencia total y un segundo tomando sólo los eventos entre el 13 de enero y el 13 de febrero. Puede apreciarse que las réplicas decaen siguiendo la ley de Omori en este último período, pero se pierde el decaimiento lineal cuando ocurre el segundo terremoto principal.

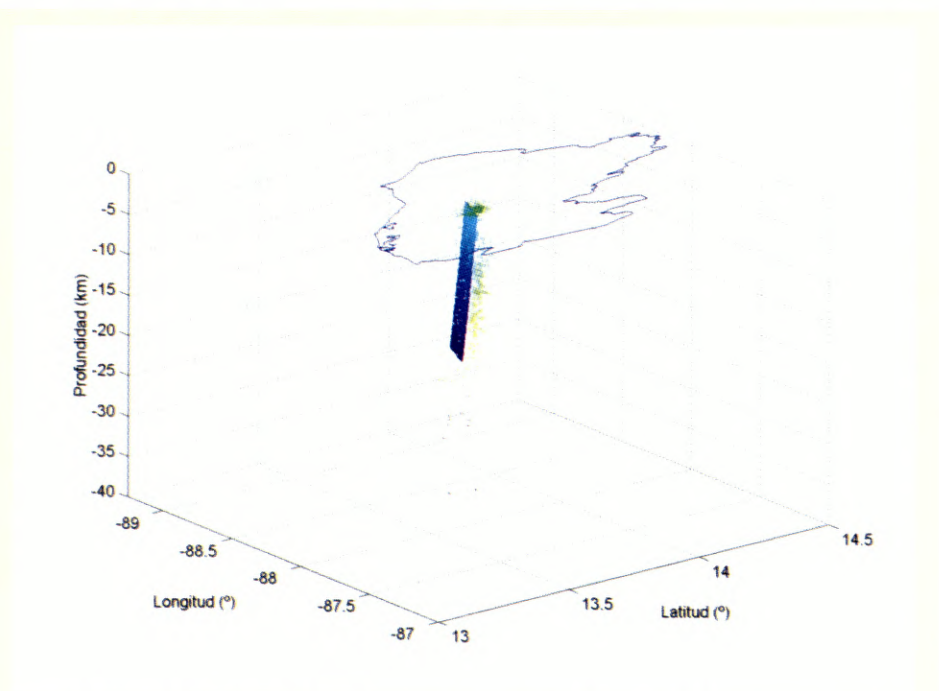


Figura 2.4b Representación del plano de falla para el evento del 13 de febrero Ms 6.5. La parte más superficial de la ruptura se encuentra a una profundidad de 5 km, sin manifestación en superficie. Muchos de los hipocentros de las réplicas se encuentran a una profundidad menor de 15 km.

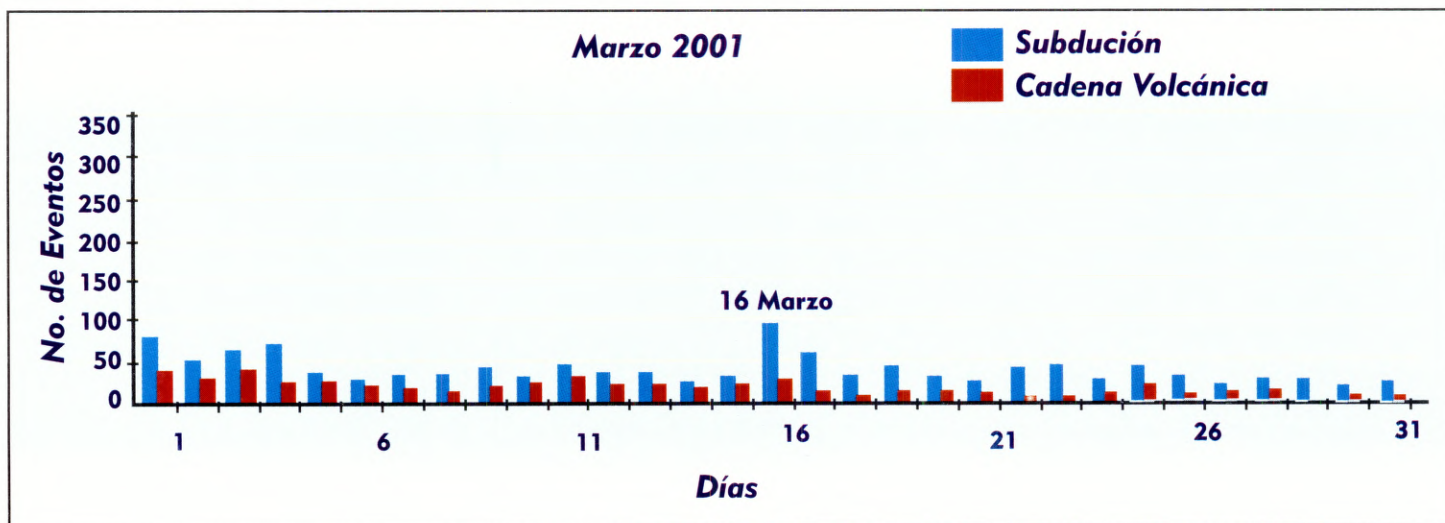
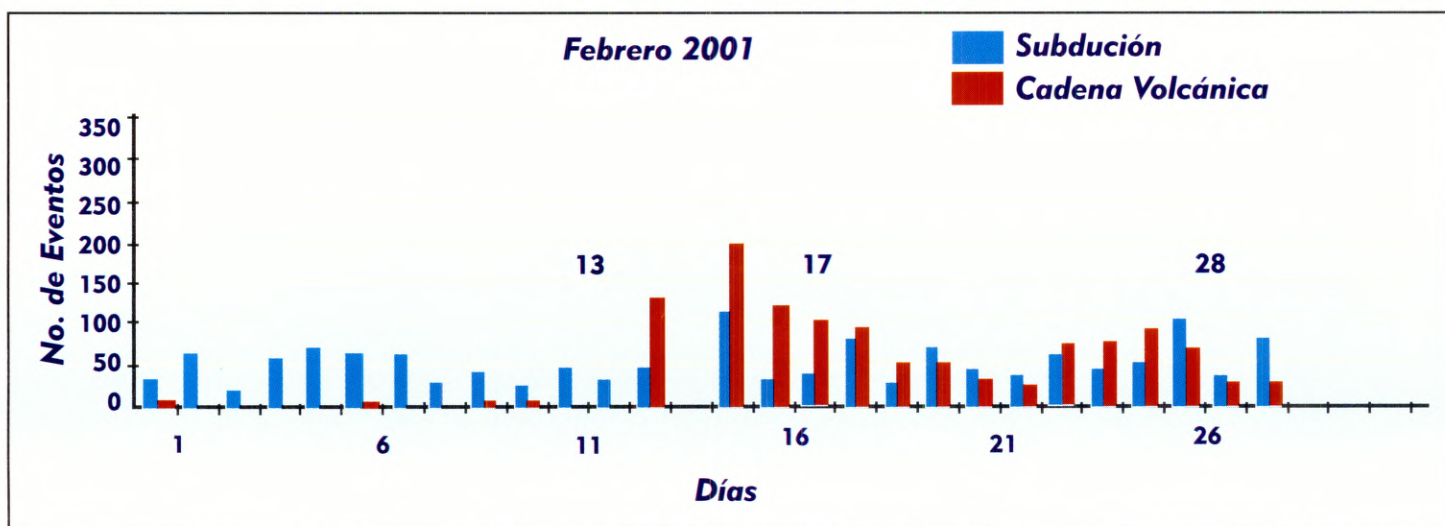
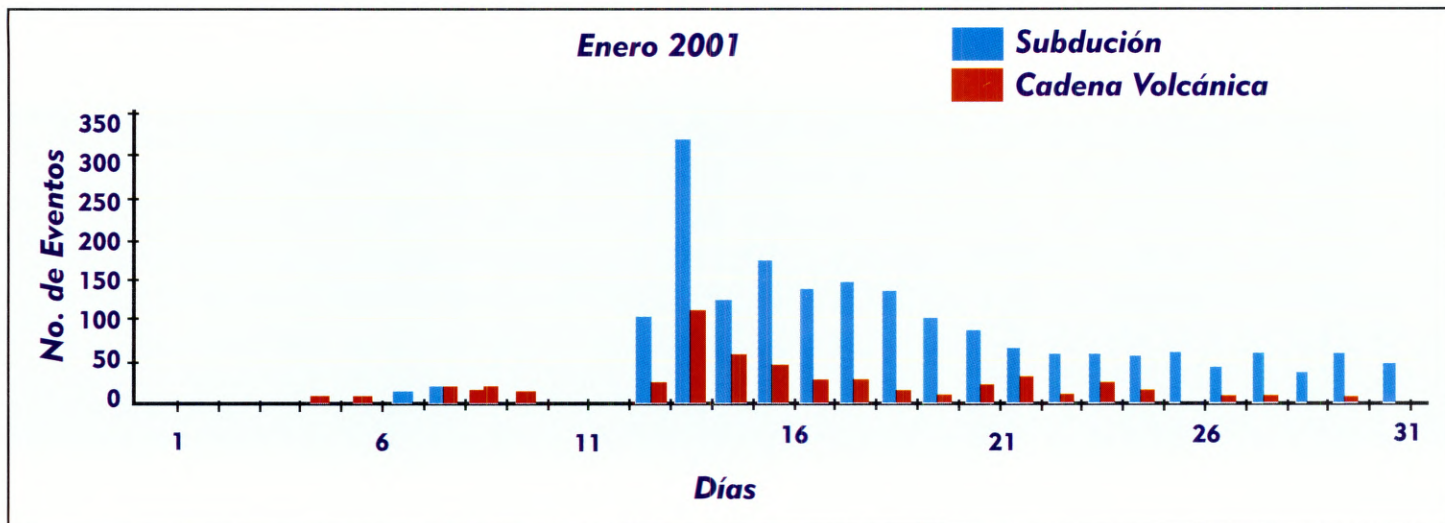


Figura 2.5a El histograma representa el número de sismos en función del tiempo para el periodo comprendido entre el 13 de enero y el 31 de marzo, diferenciando los sismos asociados a la subducción de los del eje volcánico. Es apreciable la ocurrencia de eventos de cadena volcánica desde el 13 de enero hasta el 25 de enero, lo cual es considerado como una actividad disparada por el evento previo de subducción. Asimismo se observa la ausencia de eventos locales las dos semanas siguientes hasta el 13 de febrero. Nótese los incrementos y decrementos alternos de los eventos de cadena volcánica y subducción. Los sismos que indujeron nueva actividad son fácilmente identificables.

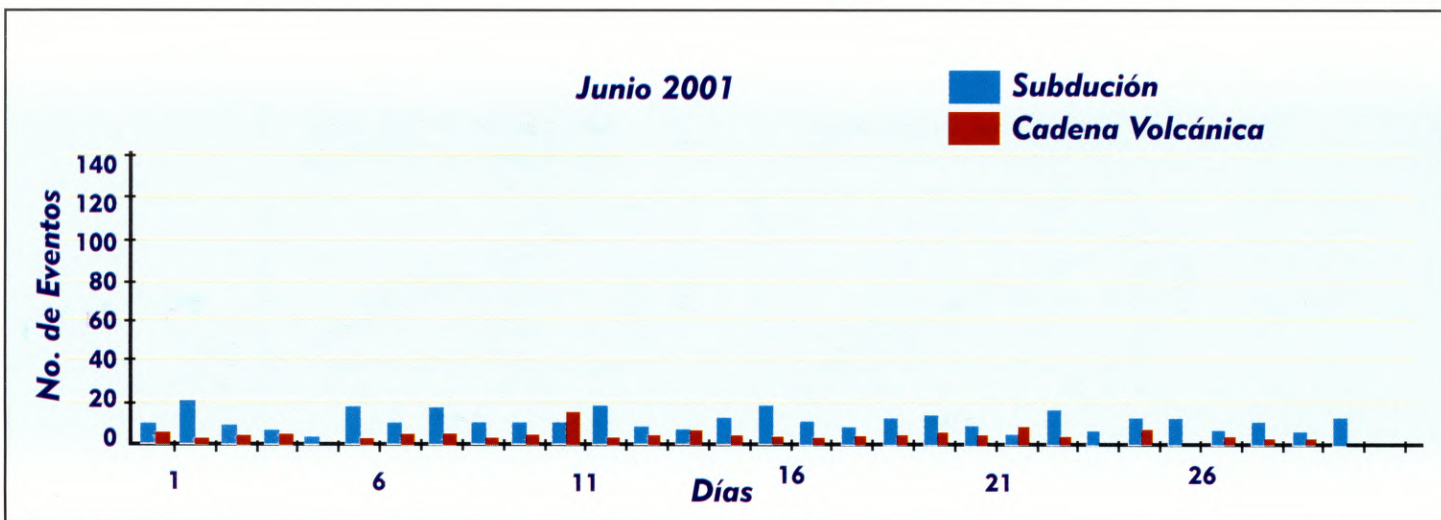
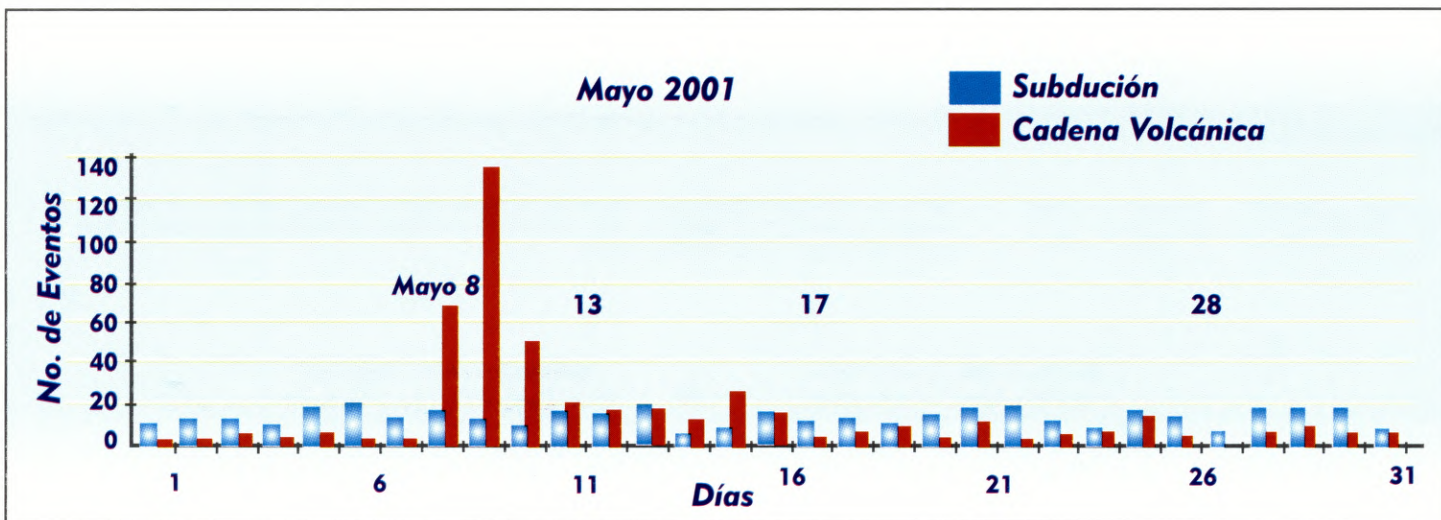
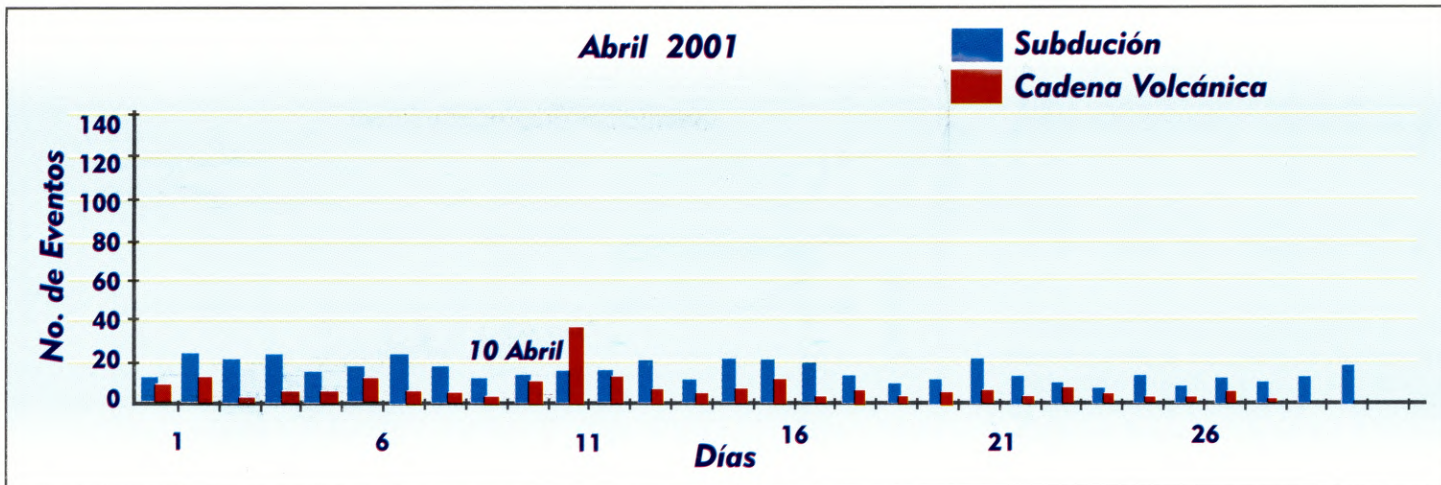


Figura 2.5b El histograma representa el número de sismos en función del tiempo para el periodo comprendido entre el 1 de abril y el 30 de junio siguiendo los mismos criterios de la figura 2.5a. Es apreciable el incremento de actividad local para el 10 de abril y 8 y 9 de mayo.



El ajuste a la ley de Omori es notablemente mejor si solo se consideran las réplicas antes del sismo del 13 de febrero (ecuación 2.3) que con la secuencia completa (ecuación 2.2).

$$\text{Log } N(t) = 2.7 - 0.8 t \quad R^2 = 0.7 \quad (2.2)$$

$$\text{Log } N(t) = 2.4 - 0.7 t \quad R^2 = 0.8 \quad (2.3)$$

Para el sismo principal del 13 de febrero y sus réplicas, el ajuste inicial fue hecho con la secuencia total, en el intervalo de tiempo completo, y es posible apreciar que la tendencia de decaimiento exponencial se pierde aproximadamente después de 100 días ( $\log(t)=2$ ), coincidiendo con la ocurrencia de los sismos locales del 8 y 9 de mayo.

Un segundo análisis, considerando sólo los eventos hasta esa fecha, muestra un mejor ajuste. Las leyes encontradas para esos dos intervalos de tiempo se presentan en las ecuaciones 2.4 y 2.5:

$$\text{Log } N(t) = 1.9 - 0.7 t \quad R^2 = 0.5 \quad (2.4)$$

$$\text{Log } N(t) = 2.3 - 1.1 t \quad R^2 = 0.7 \quad (2.5)$$

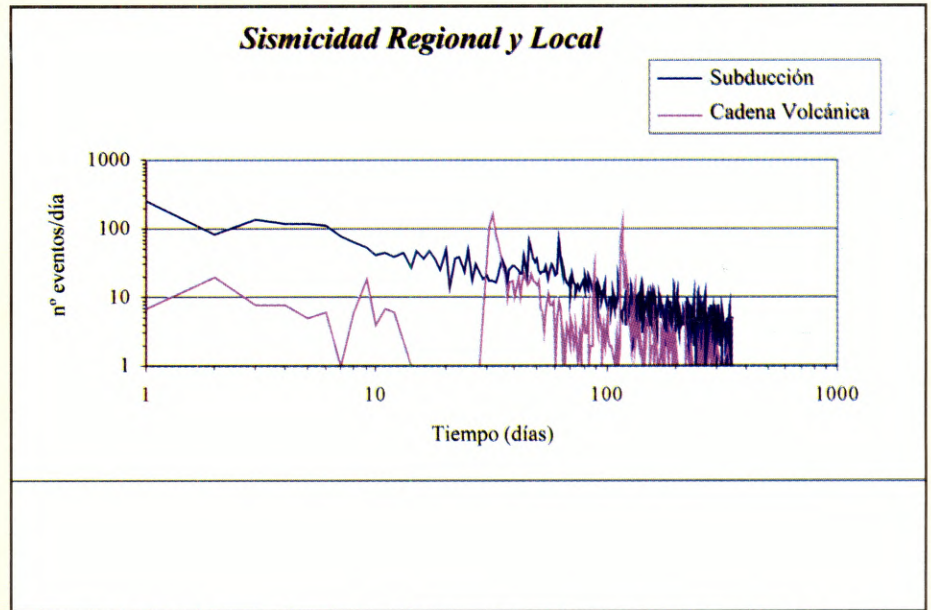


Figura 2.6 Distribución logarítmica de las series temporales de subducción y cadena volcánica desde el 13 de enero hasta el 31 de diciembre de 2001. Se observa una fuerte irregularidad para ambas series en el espacio temporal en el cual se superponen.

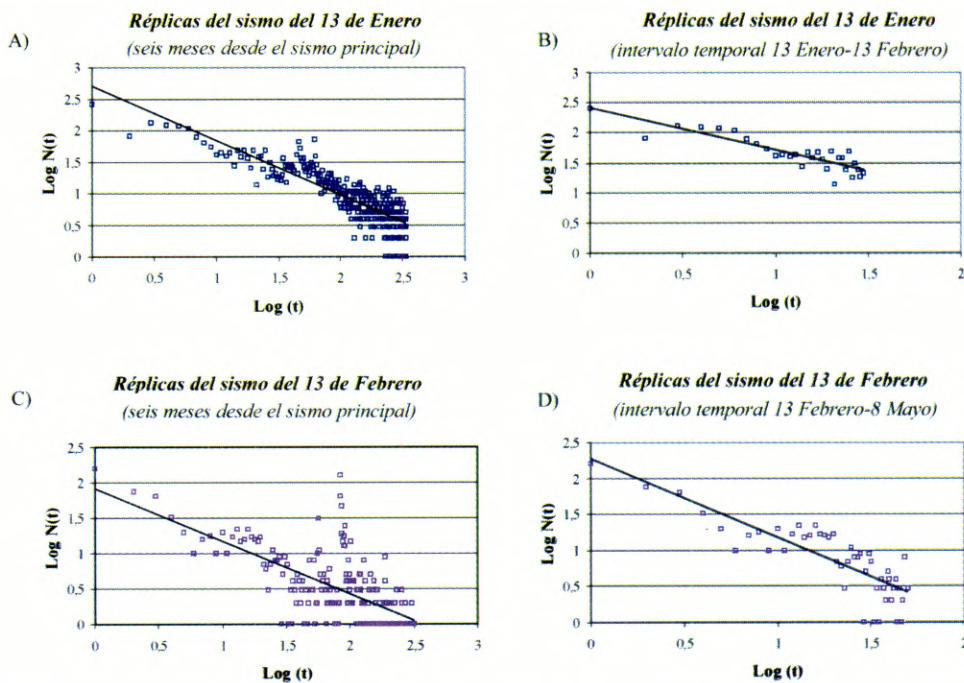


Figura 2.7. a) Ajuste de la ley de Omori para la serie total de réplicas del 13 de enero (Seis meses). b) Ajuste de la ley de Omori sólo para el periodo comprendido entre el 13 de enero y el 13 de febrero. En este caso la tendencia se ajusta de mejor forma que en 2.7a. c) Ajuste de la ley de Omori para la totalidad de las réplicas del 13 de febrero. d) Ajuste de la ley de Omori para el periodo comprendido entre el 13 de febrero y el 8 de mayo. La tendencia se ajusta mejor que si se considera el periodo total.

Los resultados confirman una perturbación en la tendencia lineal de decaimiento cuando tiene lugar otro sismo de moderada magnitud. Un resultado similar fue encontrado en el análisis de la secuencia de réplicas del terremoto de Izmit, Turquía, el 17 de agosto de 1999 (Mw 7.6). La distribución temporal de las réplicas sigue la Ley de Omori, a excepción de las perturbaciones causadas por eventos de magnitud próxima a 5, y en particular para el sismo  $M = 5$  ocurrido en la isla de Marmara el 20 de septiembre (Polat et al., 2002).

### RELACIONES MAGNITUD-FRECUENCIA-PROFUNDIDAD.

Es bien conocido que la distribución de magnitudes frente a la frecuencia de ocurrencia de sismos ligados a una misma fuente sigue comúnmente una tendencia, que se expresa a través de la conocida relación Gutenberg-Richter:  $\text{Log}N(m)=a-b*m$ ; siendo  $m$  la magnitud y  $N(m)$  el número acumulativo de terremotos con  $M \leq m$ . En este apartado se ha examinado el ajuste de réplicas de los dos sismos principales (13 de enero y 13 de febrero) a esta ley y los resultados son mostrados en la figura 2.8. Los parámetros obtenidos para ambas series son dados en las ecuaciones 2.6 (subducción) y 2.7 (cadena volcánica).

$$\text{Log} N(m) = 6,2 - 1,0 m \quad R^2 = 0,9 \quad (2.6)$$

$$\text{Log} N(m) = 5,6 - 1,1 m \quad R^2 = 0,9 \quad (2.7)$$

Es de destacar que en ambos casos el parámetro  $b$  tiene valores próximos a la unidad, siguiendo la tendencia generalizada para este parámetro. Además, los ajustes presentan altos coeficientes de correlación,  $R^2=0.9$ . El valor más bajo del parámetro  $a$  se obtiene para eventos locales (13 febrero). Teniendo en cuenta que el mencionado parámetro representa la tasa de actividad, el resultado indica que ésta es menor en la cadena volcánica que en la fuente de subducción, lo cual era esperable, dado que el sismo del 13 de enero fue de un orden de magnitud mayor al ocurrido el 13 de febrero.

Finalmente se evaluó la relación entre la magnitud y la profundidad para las dos secuencias de réplicas (figura 2.9), Se observó una clara correlación entre los sismos de pequeña magnitud ocurridos a poca profundidad en la cadena volcánica. Las réplicas más fuertes ( $M > 5$ ) de la zona de subducción poseen profundidades mayores de 25 Km.

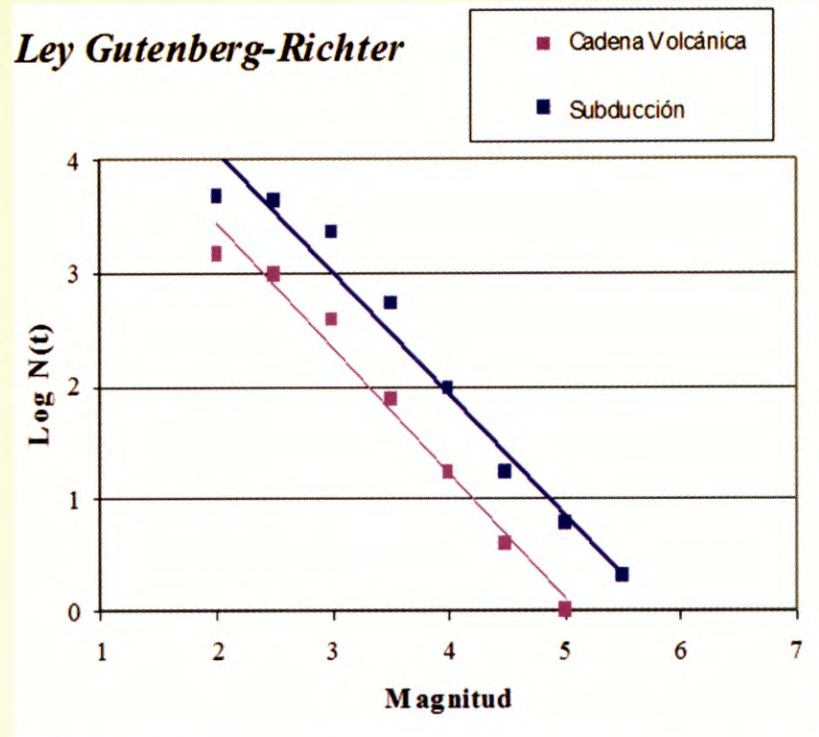


Figura 2.8. Ajustes a la ley Gutenberg-Richter obtenidos para las series de réplicas de los sismos del 13 de enero y del 13 de febrero de 2001.

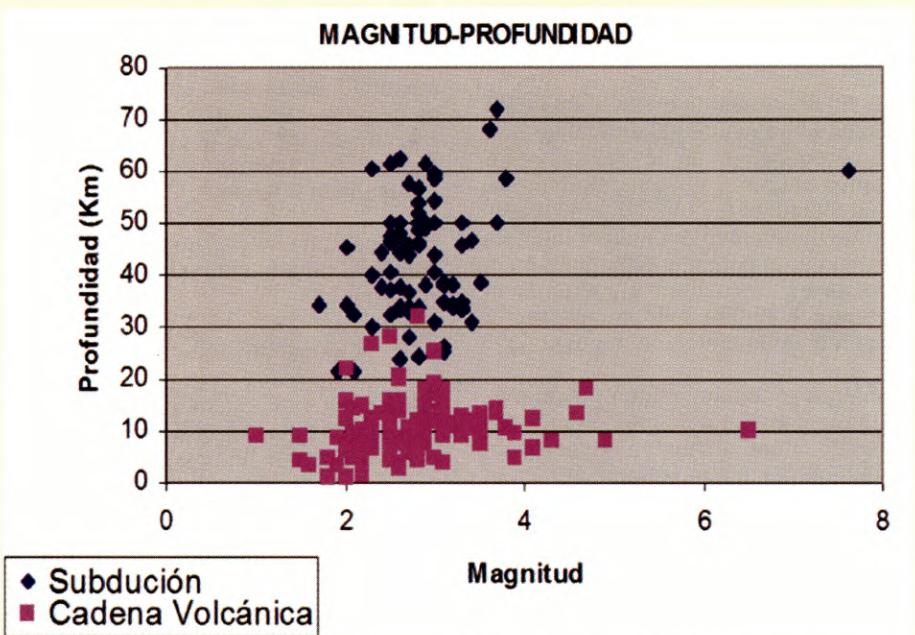


Figura 2.9 Distribución Magnitud-Profundidad para las secuencias sísmicas del 13 de enero y 13 de febrero. Muchos de los sismos de subducción poseen hipocentros con profundidades comprendidas en el rango de 20-80 km; mientras que para los sismos locales los hipocentros varían entre 3-20 km. Las réplicas con magnitud  $M > 5$  de la serie de subducción tienen profundidades mayores de 25 km.

Las altas concentraciones de esfuerzos a las que se encuentran sometidas las rocas en niveles más profundos de la corteza, producen altas caídas de esfuerzos en fallas más profundas, lo cual puede explicar la diferencia observada en el parámetro de magnitud (Scholz, 1990).

## MODELACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE ESFUERZOS ESTÁTICOS DE COULOMB

La relación espacio-temporal entre los dos sismos principales y sus series de réplicas, sugiere el estudio de las posibles relaciones causales entre ambos eventos, como resultado de los cambios dinámicos y estáticos en el estado de esfuerzos. Algunos cambios pueden adelantar o retardar la ruptura de fallas en la región, tal como se ha observado en otras regiones sísmicamente activas, por ejemplo, la zona norte de la falla de Anatolia (Stein, 1999), y en particular el área del mar de Mármara después del terremoto de Izmit (Parsons et al., 2000).

En el período histórico, algunos sismos de gran magnitud ( $M > 7$ ) en la zona de subducción a lo largo del límite de placas Cocos y Caribe, han sido seguidos por sismos de corteza superficial en la cadena volcánica, en intervalos de tiempo de años o meses (White y Harlow, 1993; Bommer et al., 2002). Lo anterior sugiere la existencia de una interacción dinámica entre las fallas de esas fuentes sísmicas.

Con el fin de realizar la modelación de los esfuerzos sobre planos seleccionados con criterio geológico, se ha llevado a cabo un exhaustivo análisis de imágenes de RADAR (Misión Shuttle de la NASA), de imágenes LANDSAT, así como de modelos digitales del terreno de alto detalle elaborados en el marco de este proyecto a partir de la cartografía 1:25.000 y de la cartografía geológica previa. (Ver figura 1.3)

El contexto geodinámico de esta serie es relativamente sencillo por lo que es adecuado para poner a prueba la metodología planteada. La serie sísmica se enmarca dentro de la sismicidad normal de una zona de subducción, con un terremoto de mecanismo focal extensional, asociado a la flexura de la placa que subduce y otro con mecanismo focal de falla de desgarre en el cinturón volcánico. El primero de los terremotos tuvo una magnitud  $M_s$  7.8, y el asociado a falla de desgarre una magnitud  $M_s$  6.5.

En este sentido, se modeló la transferencia de esfuerzos por los sismos principales del

13 de enero y 13 de febrero, utilizando los parámetros de las superficies de ruptura consistentes con la tectónica regional y con los datos sismológicos.

Es conocido que la caída de esfuerzos en un plano de falla genera un incremento en el esfuerzo de cizalla efectivo alrededor del área de ruptura (Chinnery, 1963). Esta transferencia de esfuerzos estáticos puede explicar la generación y localización de réplicas y otros eventos de importancia, localizados a grandes distancias desde la falla, inclusive a decenas de kilómetros, en aquellas zonas en donde el incremento del esfuerzo de Coulomb (CFS) es cercano a un bar.

Este hecho ha sido reconocido en numerosos trabajos en un marco geodinámico desde 1992, (por ejemplo Jaume and Sikes, 1992; King et al., 1994; Toda et al., 1998). Las peculiaridades de las secuencias sísmicas ocurridas en El Salvador en 2001 proporcionan un interés especial para esta clase de análisis.

Durante los últimos diez años, las observaciones de la sismicidad en diferentes contextos sismogénicos y de diferentes órdenes de magnitud, han indicado que las variaciones de los esfuerzos estáticos menores de un bar son capaces de inducir la reactivación de fallas cercanas a la ruptura, ya sea en forma de réplicas o como sismos de gran magnitud. El fenómeno ha sido descrito como un proceso de disparo (King et al., 1994; Harris et al., 1995), observándose que no sólo puede suponer la generación de réplicas o sismos de gran magnitud, sino también cambios en la tasa de sismicidad en ciertas zonas, incrementándose o decreciendo durante algunos meses después del evento principal (Reasenber y Simpson, 1992; Stein, 1999).

El mecanismo de disparo es atribuido a los cambios en los esfuerzos de Coulomb (CFS):

$$CFS = \tau \beta - \mu (\sigma \beta - p) \quad (2.8)$$

Donde  $\tau \beta$  es el esfuerzo de cizalla sobre el plano de falla,  $\sigma \beta$  es el esfuerzo normal,  $p$  es la presión hidrostática y  $\mu$  es el coeficiente de fricción.

Para las series sísmicas del 2001 en El Salvador, se estimó el cambio en los esfuerzos estáticos de Coulomb por medio de la expresión dada en la ecuación 2.8:

$$\Delta CFS = \Delta \tau \beta - \mu' \Delta \sigma \beta \quad (2.9)$$

Donde  $\Delta \tau \beta$  es considerado positivo en la dirección del deslizamiento de la falla, y  $\Delta \sigma \beta$  es positivo en un régimen de

compresional de esfuerzos.  $\mu'$  es el coeficiente de fricción aparente e incluye los efectos intersticiales de las propiedades de los materiales en la zona de falla. (Ver Harris, 1998, para una explicación más extensa acerca de este parámetro). Los valores positivos de  $\Delta CFS$  son interpretados como inductores de la actividad, mientras que los valores negativos indican inhibición de esa actividad.

El cambio de esfuerzo fue estimado para un semi-espacio elástico de acuerdo con el método de Okada (1992), tomando para el módulo de corte un valor de  $3.2 \times 10^{10} \text{ N m}^{-2}$  y para el coeficiente de Poisson un valor de 0.25.

El coeficiente de fricción aparente utilizado fue de 0.4, el cual se considera aceptable, y fue propuesto por Deng y Sykes (1997) de un estudio de 10 años en el sur de California. El coeficiente de fricción aparente, oscila desde 0.2 hasta 0.6 y no produce cambios significativos en los resultados obtenidos.

En este sentido, se construyeron los modelos de transferencia de esfuerzos para las superficies de ruptura de los sismos del 13 de enero y 13 de febrero, respectivamente. La dimensión y orientación de las superficies de ruptura es consistente con lo expuesto anteriormente y toma en consideración los mecanismos focales publicados en estudios previos.

La superficie de ruptura estimada para el sismo del 13 de enero es aproximadamente de 2 mil 500  $\text{km}^2$ . Se hace notar que los mecanismos focales calculados por Harvard, USGS, Buforn et al. (2001) y Bommer et al. (2002), utilizan distintas aproximaciones metodológicas (CMT y polaridades de ondas) (ver tabla 2.1a), pero prácticamente proporcionan la misma orientación del plano de falla (entre N 120° E y N 129° E). Esta dirección es acorde con la orientación de la traza obtenida con la secuencia de réplicas. Se encontró una discrepancia mayor para el buzamiento de la falla, oscilando desde 48° NE hasta 63° NE.

Tomando en cuenta la distribución espacial de las réplicas, el modelo ha sido construido para un plano orientado N128°E, buzando 60° NE. El vector de deslizamiento utilizado es 98°, consistente con el mecanismo focal de Buforn et al. (2001), que corresponde a una falla normal. La secuencia de réplicas delimita en profundidad la extensión de la ruptura entre los 15 y 78 Km.

En el caso del evento del 13 de febrero, la distribución de réplicas, así como los mecanismos focales estimados por el USGS y Buform et al. (2001), indican un plano de ruptura correspondiente a una falla de desgarre con movimiento dextral, orientado  $N94^{\circ}E$ , buzando  $70^{\circ}$  al SO. El área de ruptura previamente estimada de la distribución de réplicas es de  $471 \text{ km}^2$ . Este resultado es consistente con las relaciones empíricas magnitud/área de ruptura presentadas por Wells y Coppersmith (1994).

El modelo de cambio de esfuerzos de falla de Coulomb obtenido para el evento del 13 de enero es presentado en la figura 2.10. La sección A-A en esa figura representa una ilustración del modelo obtenido con el sismo de enero realizada para un plano horizontal a 14 Km. de profundidad, correspondiendo con la profundidad que inicialmente se estimó para el sismo del 13 de febrero.

La escala de colores representa los diferentes valores en bars del cambio de esfuerzos estáticos de Coulomb generados por la ruptura en los planos paralelos a la falla local reactivada del 13 de febrero ( $N94^{\circ}E$   $70^{\circ}S$ ). Asimismo, se proyectan los epicentros de los dos sismos principales y de las réplicas generadas 48 horas después de cada uno. El corte transversal de la figura 2.10 muestra que la secuencia de febrero ocurrió en el área donde el evento de enero produjo un incremento de CFS

El cambio de esfuerzos producido por el evento del 13 de febrero es, en general bajo, pero la profundidad superficial de la ruptura produjo fuertes efectos en zonas adyacentes.

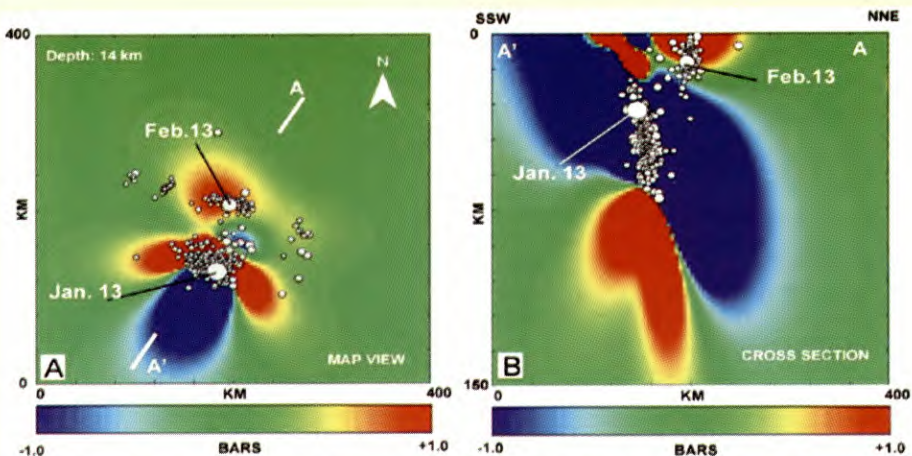


Figura 2.10 Transferencia de esfuerzos de Coulomb generados por el terremoto de subducción del 13 de enero. Los colores rojo y amarillo representan áreas en donde se predice un incremento de esfuerzos, mientras que el color azul indica un decrecimiento de esfuerzos. La representación A corresponde a la vista en planta de un plano horizontal ubicado a 14 km. de profundidad. La representación B es un corte transversal NE-SW. Se muestran los epicentros e hipocentros de los réplicas ocurridas dentro de las 48 posteriores a los dos sismos principales (13 de enero y 13 de febrero). La localización de la secuencia del 13 de febrero parece estar controlada por el lóbulo de incremento de esfuerzos generado por el evento del 13 de enero.

La figura 2.11a muestra una ilustración del cambio de esfuerzos producidos por el deslizamiento lateral de este sismo a través de planos paralelos al plano de ruptura de enero, calculado para un plano horizontal de 5 Km. (esta profundidad corresponde al sismo del 17 de febrero).

El evento del 17 de febrero ocurrió en un lóbulo en donde el (CFS) se incrementó más de 0.8 bars después del evento del 13 de febrero. Se observó que el área de réplicas del evento de enero sufrió incrementos y decrementos relativos de CFS. La figura 2.11b representa el cambio de CFS en el modelo producido por los dos

sismos principales ( $M_w$  7.8 y  $M_w$  6.5) en planos paralelos al plano de ruptura de febrero. Después de este sismo, algunas áreas en la cadena volcánica fueron afectadas por incrementos de CFS mayores de 0.4 bars. Las réplicas con magnitudes mayores de 4.5 del 17 de febrero, 24 de febrero y 11 de noviembre ocurrieron en áreas de incremento de esfuerzos (véase figura 2.11b). Sin embargo, los dos sismos del 8 de mayo sucedieron en zonas de reducción de esfuerzos, si bien están localizados próximos a la ruptura del evento del 13 de febrero, donde la propagación de esfuerzos estáticos puede ser más compleja.

En resumen, se concluye que la transferencia de esfuerzos generada por el evento del 13 de enero indujo un incremento de esfuerzos mayor de 0.8 bars en la zona hipocentral del evento del 13 de febrero. Muchas de las réplicas que ocurrieron durante las 48 horas posteriores al evento principal de febrero están localizadas en áreas de incrementos de CFS, y muchas de las réplicas que delimitan la superficie de ruptura están localizadas en el área que posee incrementos de esfuerzos mayores de 1.5 bars.

El sismo del 13 de febrero incrementó el CFS en 0.4 bars en la zona hipocentral del evento del 17 de febrero (ver figura 2.11a). Este proceso, repetido para todos los eventos con  $M > 4.5$  pudo inducir alternativamente incremento y decaimiento de esfuerzos, bien en tiempo o en espacio, generando entonces la complejidad observada en la tasa de réplicas.

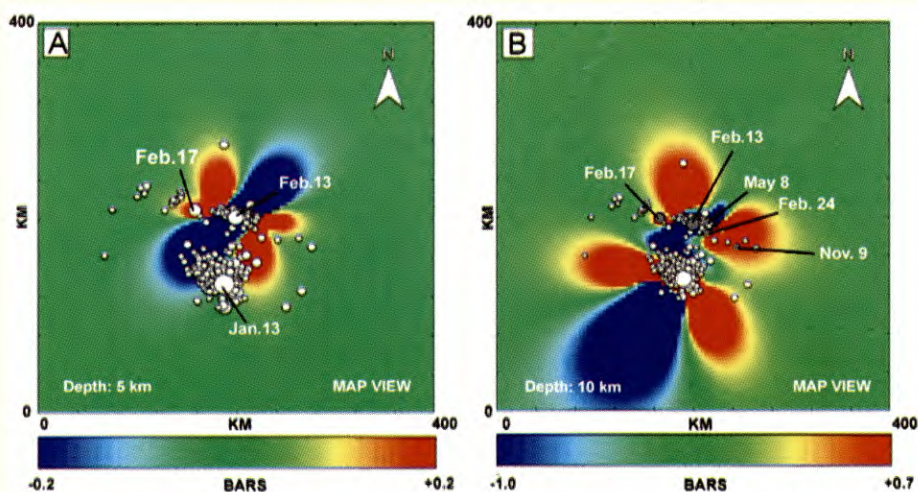


Figura 2.11 Transferencia de esfuerzos de Coulomb generados por el terremoto del 13 de febrero. La representación A corresponde a la vista en planta de un plano horizontal para la profundidad focal del 17 de febrero (5 km). Este evento ocurrió en un lóbulo de incremento de esfuerzos. La representación B corresponde a la vista en planta de un plano horizontal ubicado a 5 km de profundidad para el efecto combinado de los dos eventos principales. Los círculos grises representan sismos de cadena volcánica con magnitudes superiores a 4.5 que ocurrieron después del evento del 13 de febrero.

## DISCUSIÓN SOBRE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LOS SISMOS DE 2001

El estudio de la sismicidad histórica en El Salvador muestra que grandes sismos ocurridos en la zona de subducción han sido frecuentemente seguidos por sismos superficiales a lo largo de la cadena volcánica, en un intervalo de tiempo de 4 a 5 años. La cuestión que se plantea ante la sismicidad del 2001 es si el terremoto del 13 de febrero pudo ser de alguna forma *disparado* por el evento de gran magnitud ocurrido un mes antes.

Una explicación posible es que el segundo evento habría ocurrido de todas formas, aun sin ser disparado por el movimiento telúrico de enero. Según datos históricos, un terremoto destructor de cadena volcánica ha ocurrido en El Salvador aproximadamente cada 20 años durante el siglo XX, (como el registrado el 10 de octubre de 1986). El evento del 13 de febrero simplemente podría haber sido el último de los eventos de cadena volcánica en esta serie y habría ocurrido, incluso, en ausencia del sismo del 13 de enero.

Sin embargo, los resultados de este estudio sugieren que el terremoto del 13 de enero disparó una o varias fallas locales, y al mismo tiempo éstas se activaron recíprocamente e indujeron nuevos eventos en la zona de subducción. La falla donde ocurrió el sismo del 13 de febrero probablemente tenía suficiente energía acumulada, y el esfuerzo derivado del ajuste de las tracciones después del 13 de enero actuó como disparo, en otras palabras *“la gota que colmó el vaso”*.

De cualquier forma, muchos eventos en El Salvador han ocurrido en secuencias conjuntas subducción-eje volcánico a través de la historia. De especial interés debe ser el estudio del tiempo de retraso de los eventos de subducción a los eventos continentales, así como el estudio del intervalo de tiempo entre los sismos de gran magnitud en la zona de subducción.

La figura 2.12 muestra la correlación en tiempo entre los principales terremotos de cadena volcánica y de subducción ocurridos desde 1900 hasta el 2001. Los eventos de subducción ocurren menos frecuentemente que los de cadena volcánica, por lo que los intervalos de recurrencia son mayores, pero también lo son las magnitudes generadas. De igual forma se aprecia un retraso de tres a cuatro años para los sismos continentales que ocurren después de uno de subducción, con excepción de los dos eventos del 2001.

El análisis de ese retraso, combinado con la acumulación de esfuerzos a largo plazo, puede proporcionar nuevos elementos para

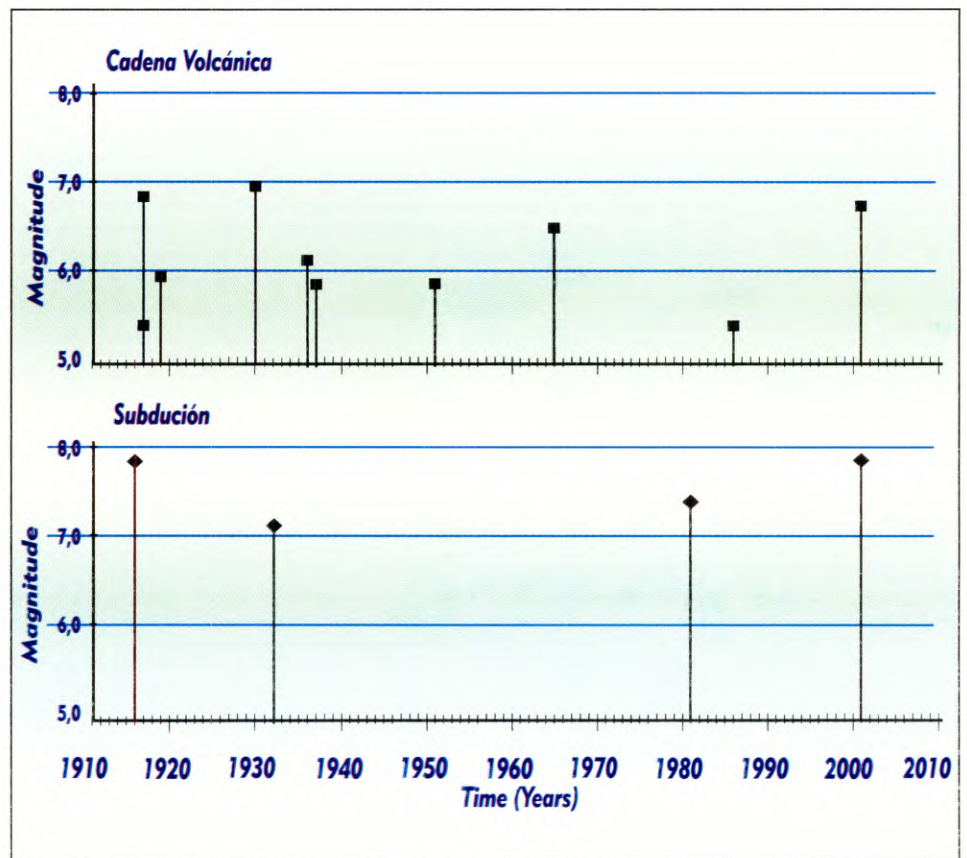


Figura 2.12 Evolución temporal de los sismos importantes ocurridos en El Salvador desde 1900 hasta el 2001, mostrando las magnitudes reportadas en función del tiempo tanto para sismos de cadena volcánica como para los de subducción. Puede observarse que los eventos de subducción poseen una menor frecuencia de ocurrencia y una mayor magnitud que los de cadena volcánica. Nótese que en general existe un retraso de 3 a 4 años de los eventos locales después que ha ocurrido un sismo de importancia en la subducción, con excepción del caso del 13 de enero y 13 de febrero de 2001.

comprender la coherencia mecánica de un comportamiento sistemático de disparo.

### INTERPRETACIÓN TECTÓNICA GLOBAL

Los resultados obtenidos para los sismos de 2001 han sugerido la existencia de un mecanismo de disparo asociado a la transferencia de esfuerzos estáticos controlado por la interacción de fallas normales situadas en la zona de subducción centroamericana, con fallas de desgarre situadas a lo largo de la zona volcánica de El Salvador.

Los datos geológicos locales, así como las imágenes de satélite analizadas, apuntan a la existencia de una gran zona de falla de desgarre de más de 100 Km. de longitud, por primera vez identificada como tal, que se ha denominado Zona de Falla de El Salvador (ZFES). Esta es la fuente responsable de algunos de los terremotos destructivos ocurridos en la zona volcánica durante el último siglo.

Para ratificar esa interpretación, se han evaluado los esfuerzos de Coulomb CFS para el sismo del 19 de junio de 1982, observándose que el sismo del 10 de octubre de 1986 ocurrió en área de incremento de CFS. Asimismo, se evaluó el efecto combinado de los sismos del 19 de junio de 1982 y del 13 de enero de 2001 sobre planos paralelos a la orientación de la ZFES.

La figura 2.13 muestra los resultados de las diferentes fases de la transferencia de esfuerzos analizadas. Puede observarse en la figura que la secuencia de sismos 1982-1986 proporciona resultados bastante similares a los del 13 de enero y 13 de febrero de 2001.

El sismo de 1982 tuvo un mecanismo de falla normal y ocurrió en la placa que subduce, lo que hizo que algún tiempo después, en 1986, tuviera lugar el otro sismo en la zona de cadena volcánica, en un lóbulo de máximo incremento de esfuerzos tras el sismo anterior. (Martínez-Díaz et. al, 2004).

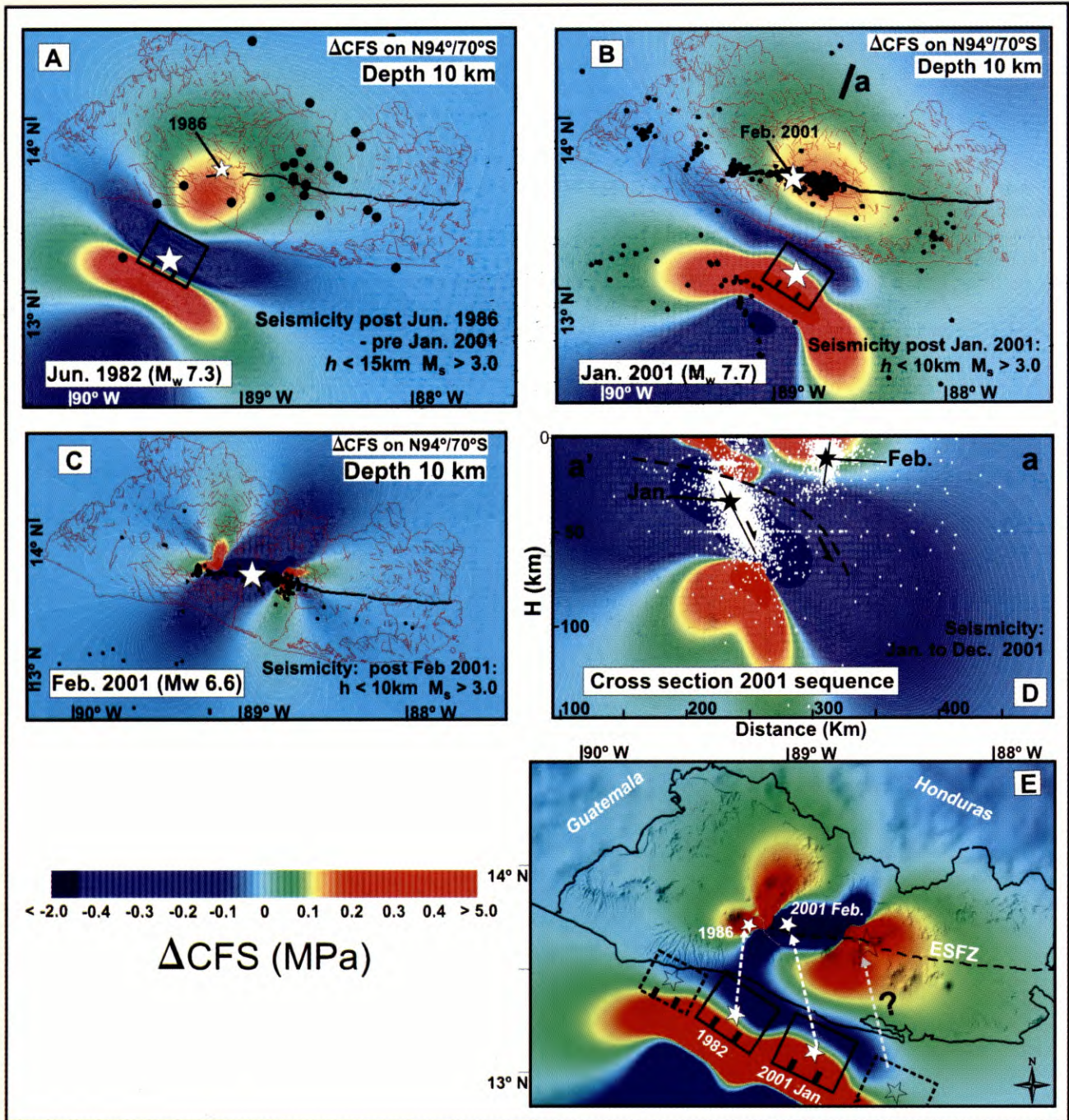


Figura 2.13 Figura 5. A: Modelo en planta de la transferencia de esfuerzos de Coulomb (CFS) inducido por el terremoto de 1982 sobre la ZFES. Se incluye la localización del sismo local de 1986 y los eventos posteriores con  $M > 3$ . B: Modelo conjunto en planta de la transferencia de CFS inducida por los eventos de 1982, y enero de 2001 sobre la ZFES para una profundidad de 10 km. Un sector importante de ZFES ha quedado cargado de esfuerzo de Coulomb. En él que se produjo el sismo del 13 de Febrero, cuya localización se indica, junto con la de otros eventos ocurridos con  $M > 3$ . C: Modelo de CFS generado únicamente por el sismo del 13 de febrero, con representación de otros eventos locales ocurridos posteriormente. Se aprecia la localización de éstos fundamentalmente en zonas cargadas positivamente. D: Modelo conjunto de CFS generado por los eventos de 2001 en la cross-section aa' de la figura 5B. E: Modelo conjunto del CFS generado por los eventos principales de 1982, 1986 y 2001. Los rectángulos continuos representan superficies de ruptura. Los rectángulos discontinuos representan rupturas hipotéticas de zonas que han quedado cargadas.

La correlación entre los incrementos en el CFS y la sismicidad observada en el 2001, junto con el patrón histórico de los terremotos de subducción, seguido de eventos de cadena volcánica sugieren que la transferencia de esfuerzos estáticos puede ser un mecanismo importante para la región. Los eventos de magnitud mayor de 7.0 generados en la subducción de la placa de Cocos parecen responsables de la reactivación de las fallas a lo largo de la cadena volcánica en la placa del Caribe. Todo parece indicar la existencia de relaciones causa-efecto entre los grandes terremotos de falla normal en la zona de subducción y los terremotos de desgarre de carácter catastrófico de la zona volcánica.

Al ahondar en la interpretación tectónica global, el mapa de fallas extraído del mapa geológico de El Salvador, escala 1: 100.000 (Bosse et al., 1978), muestra la existencia de tres conjuntos de fallas con orientación Noroeste, Norte-Noreste y Este, que se distribuyen por toda la región. La mayor parte de esas fallas tienen longitud menor que 30 Km. La figura 2.14 muestra una imagen de interferometría radar de Shuttle Radar Topography Misión (SRTM), cortesía de Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautical and Space Administration, (NASA), junto con el modelo digital del terreno construido a partir de los mapas topográficos 1:25.000.

Esa figura muestra la existencia de una larga estructura, de más de 100 Km. de longitud, que es la que se ha identificado como ZFES. Esta falla es orientada N90°-100° E y es compuesta por varios segmentos que se extienden desde el borde Este de El Salvador hasta el lado Oeste del lago de Ilopango.

Esa zona de falla deforma los depósitos cuaternarios con movimiento lateral derecho y buzamiento oblicuo. Estos movimientos son evidentes cuando la falla afecta las rocas piroclásticas ácidas de Tierra Blanca y Tobas color Café.

La expresión topográfica de esta zona muestra que el movimiento lateral derecho ha producido la deflexión del río Lempa, el río Grande de San Miguel y la red fluvial noroeste de Jucuapa. En la parte Oeste, la ZFES pasa cerca de la ciudad de San Vicente y corta la pendiente noreste del volcán Chichontepec en San Vicente y de la depresión del lago de Ilopango en San Salvador.

Seis de los mayores terremotos destructivos a lo largo del eje volcánico ocurrieron en la parte Oeste de la ZFES. La distribución de réplicas del terremoto del 13 de febrero de 2001 muestra claramente que este evento fue producido por la ruptura de un segmento de la ZFES comprendido entre el río Lempa y el lago de Ilopango. En resumen, la geología soporta que los diferentes segmentos de la ZFES son las fuentes de los sismos destructores a lo largo del eje volcánico.

Ratificando lo anterior, el estudio de transferencia de esfuerzos realizado, cuyos resultados fueron mostrados en la figura 2.13, indica que los sismos de cadena volcánica ocurrieron en segmentos de la

ZFES donde el cambio en CFS es superior a 0.1 MPa. La mayor parte de las réplicas del 13 de febrero ocurrieron en un lóbulo de incremento de esfuerzos situado en la ZFES. Además, la misma figura muestra que, tras el sismo del 13 de febrero de 2001, una importante área de la ZFES al este del río Lempa ha quedado cargada con un cambio positivo de esfuerzos (> 0.15 MPa).

Un hipotético evento extensional, localizado al sureste del epicentro del 13 de enero, produciría una recarga de CFS en la zona que podría promover la actividad sísmica en el área Este del río Lempa. En cualquier caso, la localización del próximo sismo de subducción, deberá tenerse en cuenta en la evaluación de la probabilidad del movimiento esperado en la cadena volcánica.

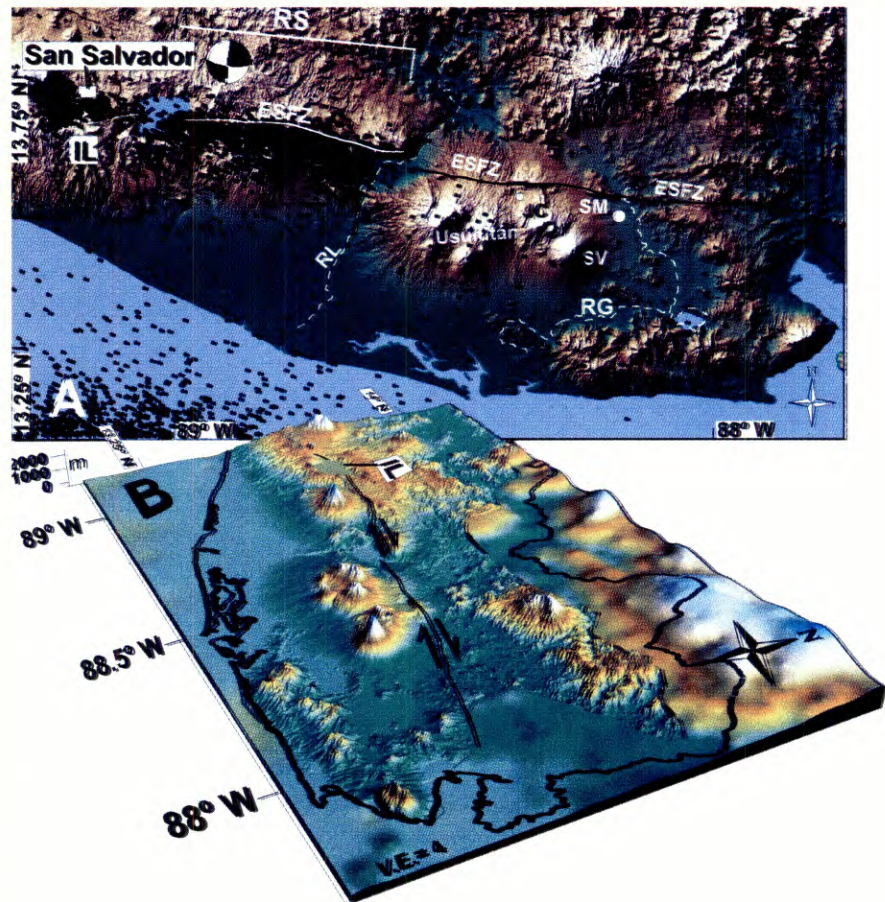


Figura 2.14. A) Secuencia de réplicas del 13 de febrero de 2001 (Mw 6.6) proyectada sobre la imagen RADAR de la Zona de Falla de El Salvador (ZFES). SM\_volcán San Miguel; IL\_Lago Ilopango; JC\_Jucuapa; RL\_Río Lempa; RG\_Río Grande. B) Vista Oblícuca del modelo de elevación digital del arco volcánico con la traza de la Zona de Falla y EL Salvador (ZFES).