

Aproximación estadística de la energía acumulada en fallas tectónicas.

Vásquez Mencos A.
Escuela de Química, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia.
Universidad de San Carlos der Guatemala.
Fundación Gabriel Mencos

Resumen

Se desarrollo un análisis orientado a aproximar la energía acumulada en fallas tectónicas en tiempo real así como la energía de activación necesaria para desencadenar un sismo en ella. El análisis se aplico sobre datos históricos para fallas ubicadas en Guatemala, California, Nevada, Haití, Italia, Chile, Rusia, Argentina, Alaska, Filipinas y China y se demostró que permite estimar la energía de activación de una falla con un margen de error inferior al 10%, lo cual resulta útil para diagnosticar el riesgo sísmico de una zona geográfica definida.

Palabras clave: Energía, acumulación, fallas, tectónica, activación, terremoto, predicción, riesgo, sísmico, Escuintla.

The quantification of accumulated energy in tectonic faults, an approach.

Abstract

A analysis was developed to measure accumulated energy in tectonic faults in real time and the activation energy necessary to begin a significant seism. The method was applied on historic data of faults located in Guatemala, California, Nevada, Haiti, Italy, Chile, Russia, Argentina, Alaska, Philippines and China, and demonstrated that it lets the estimation of energy e activation of a fault with an error inferior to 10%. It results convenient to diagnosis the seismic risk of a defined geographic zone.

Key words: Energy, accumulated, faults, tectonic, activation, earthquake, prediction, risk, seismic, forccast, Escuintla.

Introducción

Desde tiempos muy remotos, el ser humano al sentirse amenazado por los terremotos busco formas de explicar, medir y predecir este tipo de fenómenos. Fueron los antiguos chinos a quienes se les atribuye los primeros intentos serios por medir la fuerza de un sismo. Pasaron miles de años sin que hubieran mayores avances en este campo hasta que se desarrollaron escalas empíricas que asignaban un valor al terremoto según el grado de destrucción que produjera. Entre estas escalas la que se popularizó más, fue la escala de Mercalli, que originalmente asignaba un valor de intensidad entre 1 y 10 según el grado de destrucción que produjera. Más tarde se modificó para poseer valores entre 1 y 12. En la década de 1950, Charles Richter desarrolló una nueva escala, más objetiva, que asignaba un valor a un sismo dependiendo de la intensidad de las ondas registradas por un conjunto de sismógrafos de Wood-Anderson. Este tipo de sismógrafos registraban claramente 2 tipos de ondas, *p* y *s*. Para diseñar su escala Richter, medía la amplitud más grande de la onda *s* y el tiempo de diferencia entre el arribo de la primera onda *p* y la primera onda *s*. El valor, en grados Richter de un terremoto se calculaba usando entre otras ecuaciones matemáticas, la siguiente¹:

$$M = \log A + 3 \log(8\Delta t) - 2.92$$

Donde *A* es la amplitud de la onda *s* medida en milímetros y extraída directamente del registro del sismógrafo de Wood-Anderson, Δt , es la diferencia de tiempo de entre el arribo de la onda *p* (primaria) y la onda *s* (secundaria) en la estación donde se encontraba el sismógrafo y *M* era la magnitud (Richter, 1956). Mas tarde a *M* se le denominó *M_L*. Sin embargo la escala de Richter tenía algunos inconvenientes. La más importante es que estaba restringida a las mediciones realizadas por el sismógrafo Wood-Anderson, el cual se saturaba para terremotos grandes, es decir la señal registrada para un terremoto de 8 grados era muy similar a la señal producida por uno de 9. En otras palabras, su respuesta no era lineal. Por ello en 1979, fue introducida por Thomas C. Hanks y Hiroo Kanamori la escala *M_w*, o escala sismológica de magnitud de momento. La cual pretende erradicar el problema de la saturación a grandes magnitudes (Hanks & Kanamori, 1979). Sin embargo sigue siendo una escala basada en un modelo simplista de la realidad. Las escalas *M_s*, *M_L* y *M_w* son muy parecidas entre sí, más aún para sismos entre 4 y 8.³ El presente trabajo no tiene como objetivo desarrollar una nueva forma de cuantificar la energía de un terremoto, sino cuantificar la energía de activación necesaria para desencadenar uno. Si bien se realiza un análisis estadístico, este no se limita a contar cuantos

terremotos hubieron dentro de una zona geográfica, ni tampoco esta basado en el mito de la periodicidad sísmica, válido solamente en casos muy especiales, sino que busca obtener un aproximado de la energía de activación de cada uno de los sismos grandes (mayores de 6) ocurridos dentro de un sector geográfico definido, bajo la hipótesis de que está es proporcional a $\Sigma P_i = \Sigma M_{wi}/d$, donde *P* es el parámetro de activación, *M* es la magnitud de momento de cada sismo obtenida del catálogo NOAA y *d* es la distancia de cada sismo al centroide de la zona geográfica de interés. El análisis se basa en la conservación de la energía. Una fracción de la energía liberada por un sismo contribuye a aumentar el esfuerzo en otro segmento de falla. Esto permite cuantificar un parámetro proporcional a la energía de activación de un evento sísmico. Para los efectos de este artículo se define, energía activación como la energía necesaria para desencadenar un evento sísmico en una zona geográfica definida. El método consiste en cuantificar las contribuciones energéticas de todos los sismos significativos ocurridos en el planeta sobre una zona geográfica definida hasta alcanzar una energía de activación mínima que desencadena un sismo en esa zona, la cual es medida indirectamente por el parámetro *P*. Dicha contribución energética es proporcional a la magnitud del sismo e inversamente proporcional a la distancia hipocentral de la fuente, despreciándose las contribuciones energéticas de sismos con magnitud inferior a 4°R. Un sismo de 4°R es aproximadamente 100 veces menos fuerte que uno de 6°R aún así no se despreciaron por su efecto acumulativo. Sin embargo un sismo de 4°R ocurrido a 60Km de la zona de estudio puede aportar más energía que un sismo de 7 ocurrido a 65,000Km de la misma zona.

El método de análisis se evaluó usando el catálogo del NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, Nacional Geophysical Data Center de los Estados Unidos de Norteamérica), el cual contiene datos históricos de 6118 eventos sísmicos significativos registrados desde el año 2150 antes de Cristo hasta 2010 después de Cristo. Con la finalidad de evaluar un rango temporal lo más amplio posible y debido a que los valores *M_s* y *M_w* son esencialmente iguales para sismos con magnitudes entre 4 y 8 (Kanamori, 1983), y que el 80% de los eventos registrados en el catálogo usado se encuentran entre este rango, no se hizo diferenciación alguna entre las escalas *M_s* y *M_w* cuando no se conocía alguna ley de atenuación característica para la zona estudiada. En el caso de los terremotos ocurridos antes de la época instrumental, las intensidades asignadas son estimaciones subjetivas realizadas en función de los daños producidos según se reporta en documentos históricos o estimaciones modernas considerando aproximaciones de los grados de

desplazamiento del terreno según evidencias geológicas. En todo caso si tales eventos fueron registrados en los anales de la historia se supone que su magnitud, de haber sido medida habría sido superior a 5°R. Cuando fue posible los valores de intensidad I , se transformaron en valores de M_w cuando existía alguna ley de atenuación característica de la zona estudiada. Lo mismo se hizo con los valores de M_s . Al aplicar este método sobre fallas ubicadas en Guatemala, California, Haití, Italia, Rusia, Filipinas y Chile se demostró que es posible predecir de manera aproximada el momento en que una falla alcanzará el parámetro de activación con un rango de error bruto inferior a 2 años incluso con décadas de antelación.

Definición de Enfoque de Falla:

Debido a que no se conoce con exactitud las dimensiones de cada falla existente se hace necesario ensayar varios radios y magnitudes de corte para cada sector geográfico seleccionado a fin de encontrar un patrón de comportamiento estadísticamente repetitivo. En el presente trabajo se evaluaron radios de corte de 25, 50, 60, 75, 100, 150, 200, 250 y 300 kilómetros formando esferoides cuyo centro fue el hipocentro de sismos históricamente significativos. Para cada radio de corte se evaluaron las siguientes magnitudes de corte, 8, 7.5, 7.2, 7.0, 6.5, 6.2, 6.0, 5° M_w .

Métodos para Calcular el Error:

Error Temporal Bruto: Se establece el mínimo valor del parámetro de activación que disparará la alarma. Se cuentan los días transcurridos entre el momento en que se disparó la alarma y el momento del evento.

Error Temporal Porcentual: Se divide el error temporal bruto (Tiempo que estuvo encendida la alarma) entre el número de días en que la falla permaneció inactiva.

Diferencia Porcentual del Parámetro de Activación: (Valor Máximo-Valor Mínimo) dividido por el valor promedio del parámetro de activación.

Gráficos de Error: Se construyeron a partir de una cota superior al mayor parámetro de activación. Al disminuir la altura de la cota, se gráfica la fracción de eventos no observados al disminuir la cota con respecto a la fracción del pico más alto que fue necesario disminuir para observar el evento. El eje x contiene entonces la fracción en la cual se disminuyó la cota de energía. Si los parámetros de activación fueran totalmente aleatorios estarían homogéneamente distribuidos a lo largo de toda la

unidad, si la cota se descende a la mitad, se observaría la mitad de los eventos y si se disminuyera hasta 0 necesariamente se observaría la totalidad de los eventos. Esto es lo que representa la diagonal perfecta en la gráfica. Por otra parte si los fenómenos no son aleatorios, la gráfica se alejará más rápidamente de la diagonal.

Observaciones Importantes:

El sismo ocurrido en Italia el 30 de julio de 1627 se considero con una magnitud 5.7 y no de 6.7 como reporta el catálogo.

Método

Considere que la razón de cambio de la función de energía sobre distancia, que experimenta una falla receptora, de longitud l situada a una distancia r , de un sismo ocurrido en una falla emisora, es proporcional a una función de la magnitud c inversamente proporcional a r^2 :

$$-d(g(E)/l) = f(M_w)/r^2 dr \quad (1)$$

Para simplificar la relación entre E y M_w puede calcularse un parámetro:

$$-dP = M_w/r^2 dr \quad (2)$$

Donde:

$$P = g(E)/l \quad (3)$$

La cantidad total de energía entregada por la falla emisora a la falla receptora es entonces proporcional a la integral de (2). Integrando y evaluando entre ∞ y r obtenemos:

$$P = M_w/r \quad (3)$$

Se consideran los límites ∞ y r , porque se supone que a una distancia infinita de la fuente el aporte de energía es 0. Y r , porque constituye la máxima energía que la fuente puede entregar a una falla distante.

Considerando las contribuciones de diferentes sismos tenemos:

$$\Sigma P_i = \Sigma M_i/r_i \quad (4)$$

Cuando ocurre un terremoto dentro de la falla, se libera la energía acumulada, convirtiendo el parámetro nuevamente en 0. El parámetro de activación P_a es el medido justo antes de que ocurra el sismo:

$$P_a = \Sigma P_i \quad (5)$$

Cabe ahora establecer una relación entre P_a y la energía de activación propiamente dicha. Considerando la relación propuesta por Hiroo Kanamori:

$$M_w = 2/3 * (\log_{10} M_o / (N \cdot m) - 9.1) \quad (6)$$

$$M_o = 10^{3/2 * (M_w + 9.1)} \quad (7)$$

$$E_s = M_o * 10^{-4.8} = M_o * 1.6 * 10^{-5} \quad (8)$$

$$M_o = \mu A \times u \quad (9)$$

Donde M_w es la magnitud de momento, M_o es el momento sísmico, E_s la energía radiada durante un sismo, μ , módulo de deformación de la roca, A , área de la falla, y u , el desplazamiento.

Por tanto la relación entre P_a y la energía de activación es:

$$E_a = t * 10^{3/2 * (P_a + 9.1)} \quad (10)$$

Se eligen las coordenadas donde se desea evaluar la amenaza de un sismo. Generalmente estas coordenadas coinciden con las del hipocentro de algún evento sísmico importante ocurrido en la zona elegida.

Se establece un radio de influencia sobre el cual se evaluará energía acumulada. Generalmente este radio es igual a la mitad de la longitud de la falla estudiada. Definiéndose un esferoide de influencia.

Se establece una magnitud de corte por encima de la cual todo sismo ocurrido dentro del esferoide de influencia se considera que descarga toda la energía acumulada.

Se miden las distancias entre los hipocentros de todos los sismos ocurridos en el planeta con magnitud superior a 4°, al centro del esferoide de influencia. A cada una de estas distancias llamaremos r_i .

Se evalúa la magnitud de cada sismo M_i dividida la distancia, r_i , a la cual ocurre del centro del esferoide de influencia. ($P_i = M_i / r_i$). A P_i llamaremos contribución i -ésima al parámetro de activación.

Se suman todas las contribuciones M_i / r_i .

El contador de $\Sigma P_i = \Sigma M_i / r_i$ se convierte en cero cuando ocurre un sismo superior a la magnitud de corte dentro del radio de influencia.

Se repiten los pasos 2 a 7 modificando el radio de influencia y la magnitud de corte hasta observar una regularidad o patrón de comportamiento predecible en la gráfica de P_i vs *Número de Eventos Registrados*. Se procede de esta manera debido a que no siempre se puede precisar con exactitud la extensión de la falla, existen muchos factores que pueden ocultarla superficialmente.

Establecer la variabilidad de P máximo. Para el efecto establecer una regresión lineal entre los P máximos contra el tiempo. Idealmente debería observarse una línea recta y horizontal.

Establecer mediante una regresión lineal de P_i contra tiempo, la velocidad actual de incremento de P_i . Extrapolar esta ecuación para encontrar el intercepto con P máximo.

Resultados

Lugar	Latitud Del Censor	Longitud del Censor	Radio de Corte	Magnitud de Corte	Promedio Parámetro de Activación	Máximo del Parámetro de Activación	Mínimo del Parámetro de Activación	Diferencia Porcentual del parámetro de activación
Guatemala	14.16	-91.26	60	6.5	1.108	1.066	1.171	9.47
Chile	-36.122	-72.898	75	7.5	1.926	1.938	1.914	1.25
Japón	37.812	142.619	75	7.2	2.998	3.066	2.930	4.54
Haití	18.443	-72.57	150	5	2.016	2.025	2.007	0.89
Argentina	-32.938	-69.259	150	5.5	0.804	0.839	0.758	10.1
Japón	33.07	136.618	150	7.5	3.85			
California	40.64	-124.76	200	7.2	1.359	1.399	1.313	6.3
Indonesia	-3.935	103.058	200	6.5	0.63	0.671	0.608	10.0
Perú	-11.779	-75.63	250	8	1.401	1.45	1.36	6.42
China	30.901	83.52	300	6.2	1.98	2.000	1.948	2.63
Italia	42.334	13.334	300	6.2	2.234	2.294	2.167	5.68
Rusia	53.872	154	350	7.0	2.48	2.49	2.47	0.81
Grecia	37.963	21.525	300	6.2	0.33	0.34	0.32	6.0

Ubicación	Lat	Long	Profundidad	Fecha			Parámetro de activación	Magnitud	Error Temporal Bruto/días	Error Porcentual Temporal
California	41.0	-125.0	0	31	1	1922	1.4	7.6	2156	0.11
California	41.11	-124.25	19	8	11	1980	1.4	7.2	309	1.49
California	41.301	-125.97	10	15	6	2005	1.3	7.2	88	0.99
Guatemala	14	-91	33	19	4	1902	1.1	7.5	53	0.00
Guatemala	14	-91	50	6	8	1942	1.2	7.9	2457	17.1
Guatemala	13.83	-90.88	58	27	10	1979	1.1	6.8	115	1.10
Guatemala	14.37	-91.47	33	10	1	1998	1.1	6.6	259	3.95
Perú	-10.5	-77	60	24	5	1940	1.4	8.2	12	0.02
Perú	-12.27	-77.79	13	3	10	1974	1.4	8.1	268	2
Perú	-13.39	-76.60	39	15	8	2007	1.5	8	487	4
Italia (L'Aquila)	43.4	10.6	10	14	8	1846	2.2	6.1	0	0.00
Italia (L'Aquila)	42	13.5	20	13	1	1915	2.2	7.5	420	2.32
Italia (L'Aquila)	42.33	13.334	9	6	4	2009	2.3	6.3	700	6.36
Haití	18.4	-73.4	0	25	1	1953	2.0	5.7	298	0.02
Haití	18.46	-72.53	13	12	1	2010	2.0	7	134	0.60
China	30	81	33	28	8	1916	2.0	7.7	899	0.05
China	29.598	81.092	18	29	7	1980	2.0	6.5	493	2.14
China	30.901	83.52	12	25	8	2008	1.9	6.7	14	0.14
Rusia	54.9	156.8	350	28	11	1943	2.5	7.6	470	0.02
Rusia	53.882	152.886	633	5	7	2008	2.5	7.7	37	0.16
Japón	38.19	142.028	44	12	6	1978	3.0	7.7	0	0.00
Japón	38.297	142.373	29	11	3	2011	2.9	9.1	-647	-2.5
Indonesia	-4.5	104	200	21	4	1958	0.6	6.7	102	1.07
Indonesia	-3.299	102.712	33	15	12	1979	0.7	6.6	623	8.02
Indonesia	-4.967	104.302	23	15	2	1994	0.6	6.9	467	9.17
Indonesia	-4.438	101.967	34	12	9	2007	0.6	8.4	87	3.33
Argentina	-32	-68.5		27	10	1894	0.8	7.5	-642	-8.00
Argentina	-33.5	-69.5		4	9	1958	0.8	6.8	256	-4.92
Argentina	-33.053	-68.467	5	26	1	1985	0.8	6.9	444	4.00
Argentina	-33.131	-68.707	22	5	8	2006	0.8	5.6	165	0.53
Chile	-36.25	-72.28	60	25	1	1939	1.9	8.3	236	0.18
Chile	-36.122	-72.898	23	27	2	2010	1.9	8.8	437	2.00

Lugar	Latitud Del Censor	Longitud del Censor	Tipo de Falla
Guatemala	14.16	-91.26	Subducción/Convergente
Chile	-36.122	-72.898	Subducción/Convergente
Japón	37.812	142.619	Subducción/Convergente
Haití	18.443	-72.57	Transformante/Mixta
Argentina	-32.938	-69.259	Intraplaca?
Japón	33.07	136.618	Subducción/Convergente
California	40.64	-124.76	Transformante
Indonesia	-3.935	103.058	Subducción
Perú	-11.779	-75.63	Subducción/Convergente
China	30.901	83.52	Subducción
Italia	42.334	13.334	Subducción
Rusia	53.872	154	Subducción/Intraplaca?
Grecia	37.963	21.525	Subducción

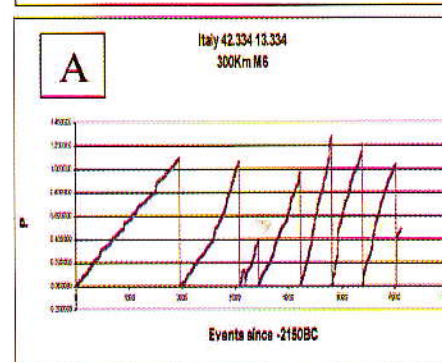
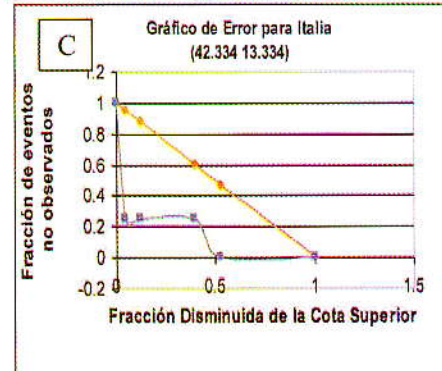
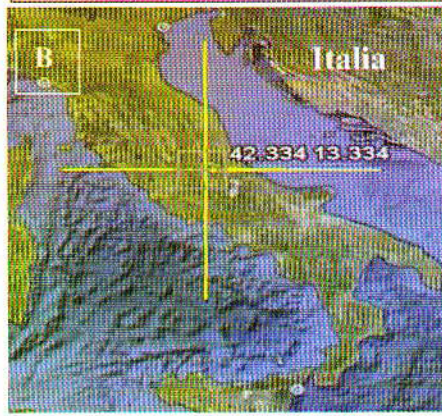
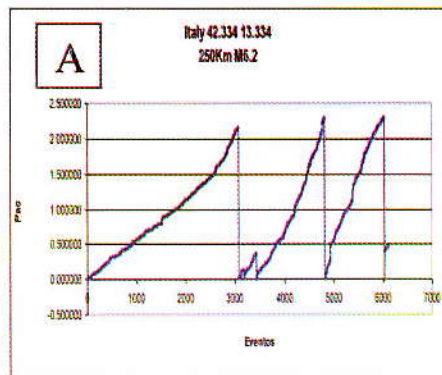
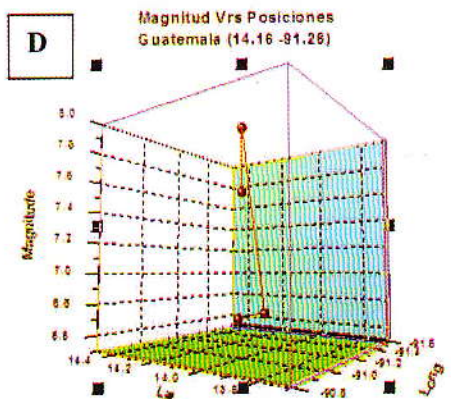
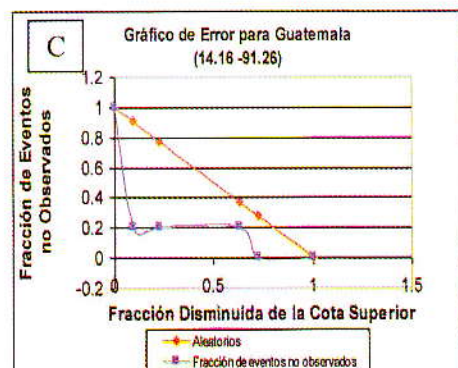
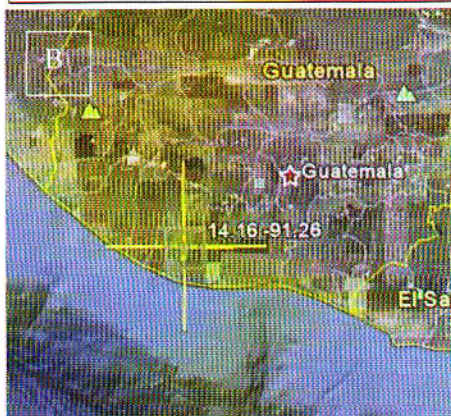
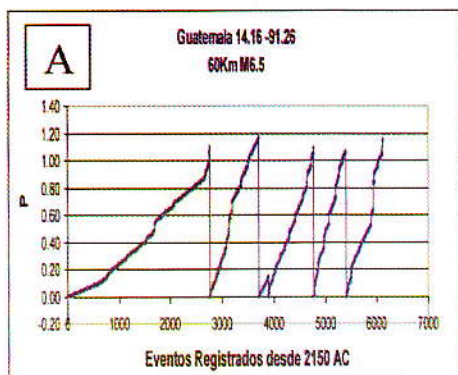
Gráficas:

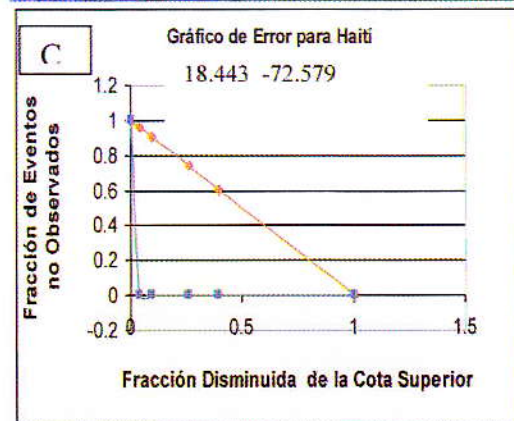
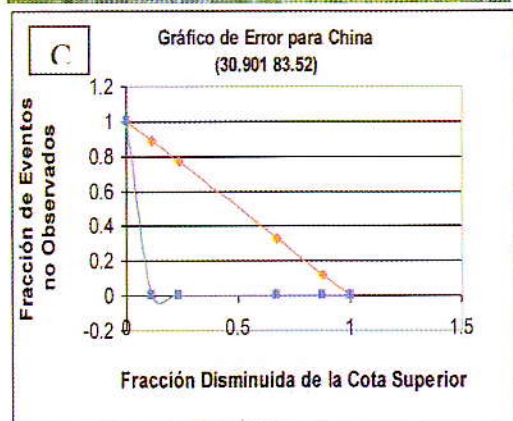
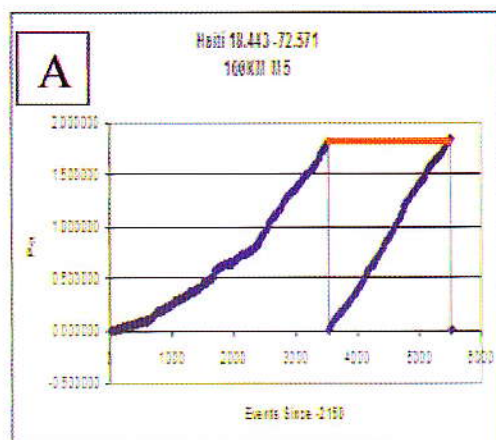
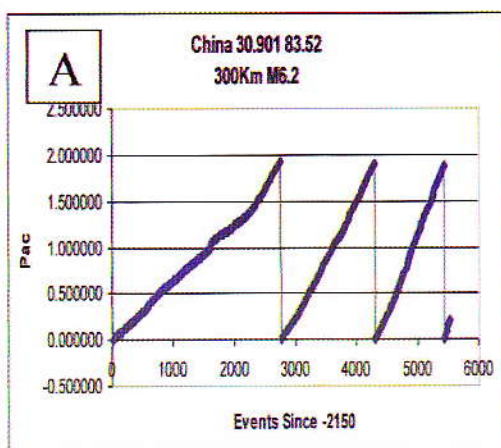
A Gráfica que representa la evolución temporal del parámetro de activación para el sector geográfico que se indica en el título de la misma. En el eje y , se encuentra la evolución del parámetro de activación que es a su vez proporcional a la energía de activación. El eje x , representa el tiempo. El título de la gráfica indica el país donde se encuentra la falla, los dos números siguientes indican la latitud y longitud geográfica donde se colocó el sensor virtual. El tercer número del título, representa el radio de corte seleccionado para trazar la gráfica. El cuarto número representa la magnitud de corte seleccionada.

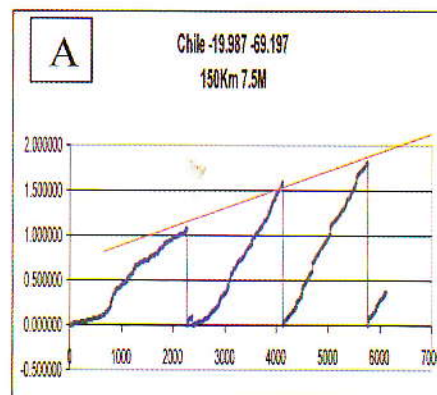
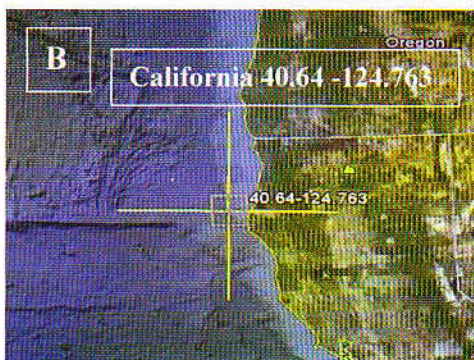
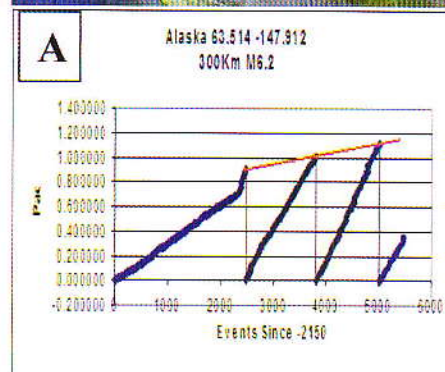
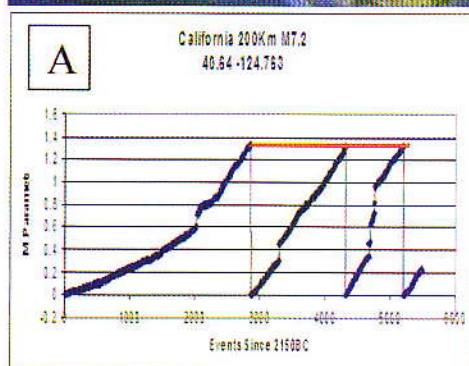
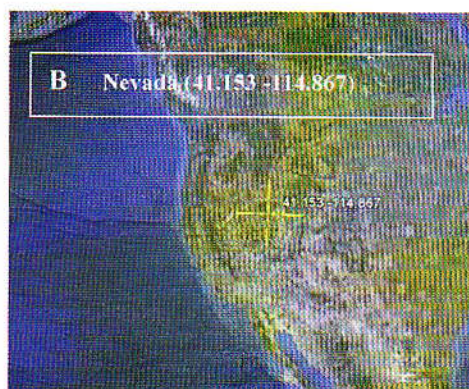
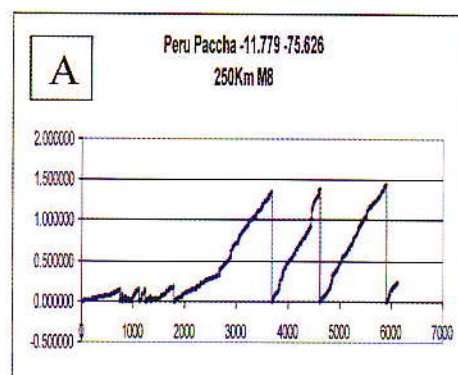
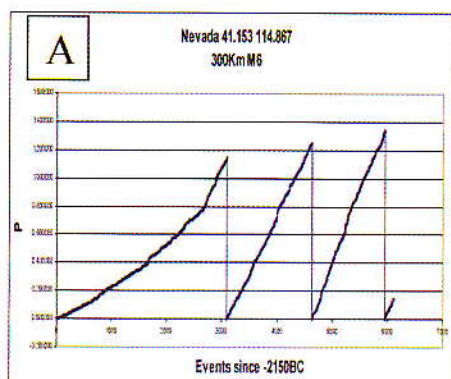
B Mapa que ubica la posición del sensor virtual, la cruz amarilla identifica las dimensiones de la zona geográfica estudiada. Los mapas fueron

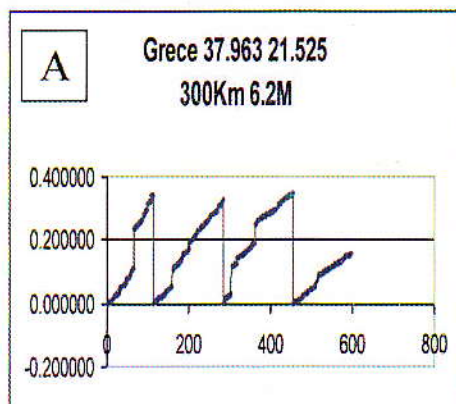
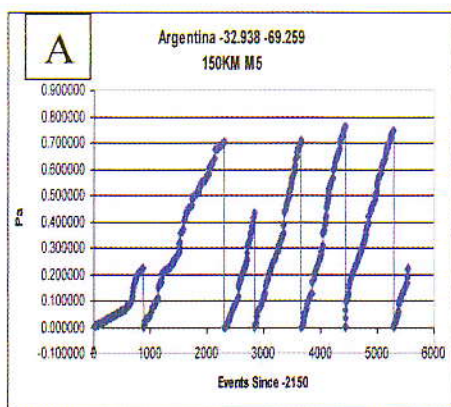
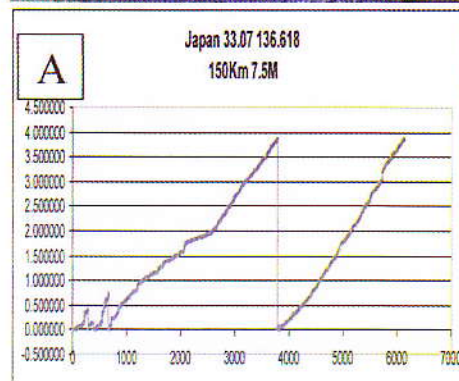
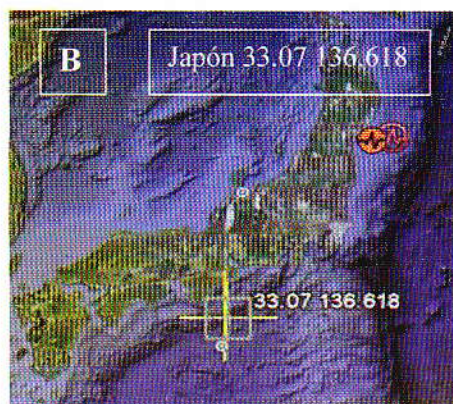
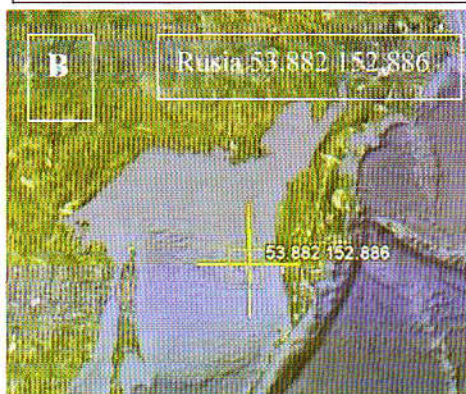
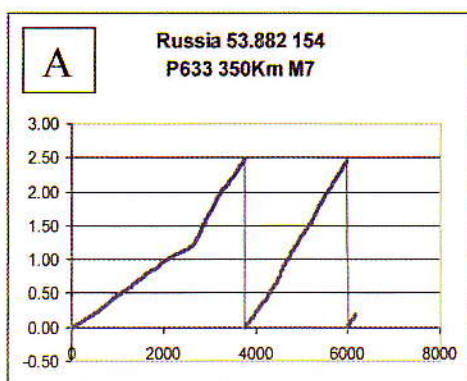
C Gráfico de error. En la dimensión vertical se observa la fracción de eventos no observada cuando se hace disminuir hipotéticamente el parámetro de activación. La dimensión horizontal indica el factor en el que se ha hecho disminuir el parámetro de activación. La línea roja representa el comportamiento esperado de esta gráfica si los resultados fueran totalmente aleatorios, la línea azul representa los datos experimentales. En este tipo de gráfico, entre más rápidamente se aleje la línea azul de la roja, más se alejan los datos experimentales de un comportamiento aleatorio. En otras palabras el comportamiento no es aleatorio.

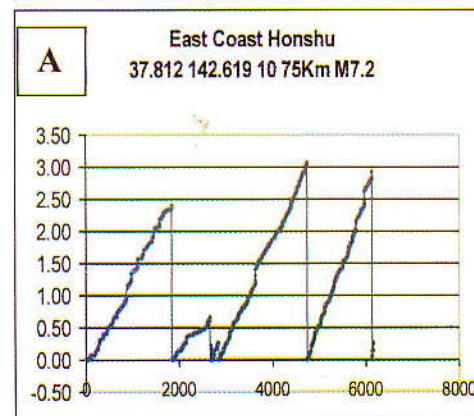
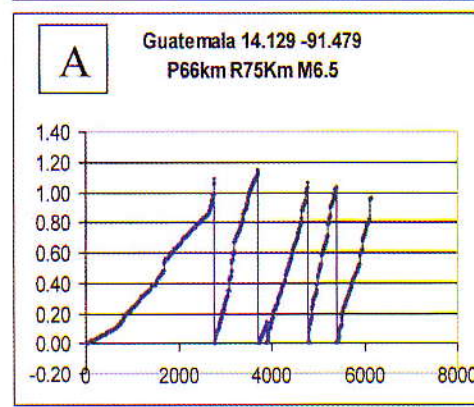
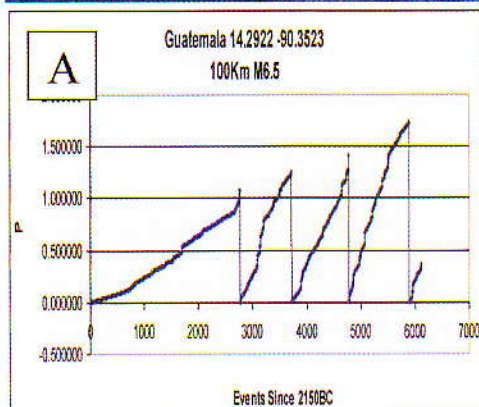
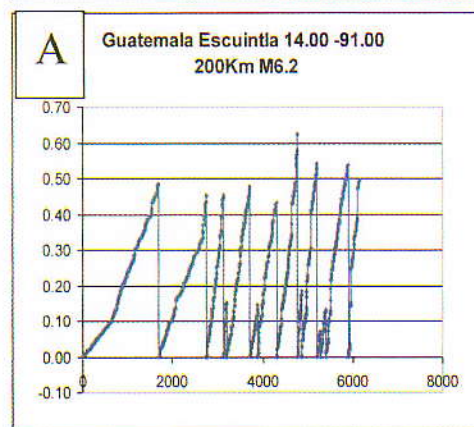
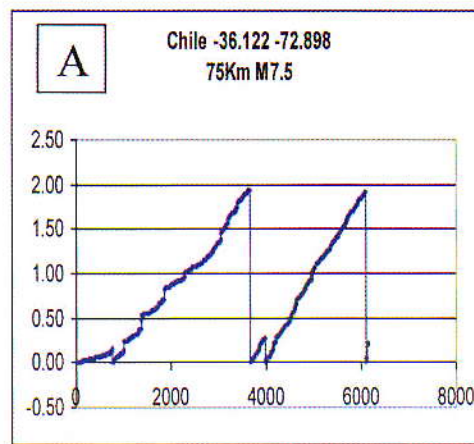
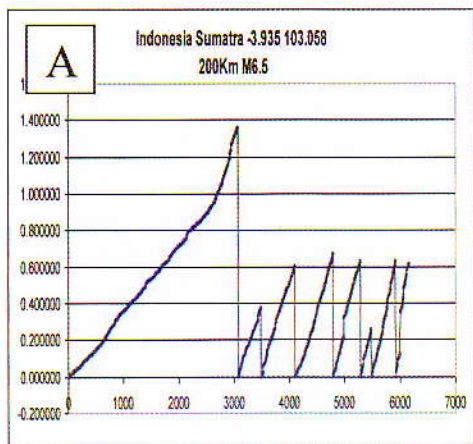
D El plano xy representa la latitud y longitud donde se registro un sismo significativo. En el eje z , se grafica la magnitud del evento.













Discusión

Cuando el parámetro de activación de una falla es igual o mayor al observado para una secuencia de sismos en la misma zona geográfica, indica una elevada probabilidad de que ocurra un sismo en esa zona con una magnitud similar a la magnitud de corte seleccionada para realizar los cálculos. Sin embargo si es inferior, no puede ser interpretada como una ausencia total de riesgo, más bien debe interpretarse diciendo que, con la magnitud y radio de corte seleccionados no es posible evaluar el riesgo de un sismo a corto plazo y debe sugerirse cambiar las condiciones de enfoque de la falla.

Entre mayor sea el número de sismos ocurridos en la zona geográfica seleccionada que posean el mismo parámetro de activación, mayor será el nivel de certeza o probabilidad de que el próximo sismo tendrá el mismo parámetro de activación.

Si el máximo valor del parámetro de activación es variable para cada sismo ocurrido dentro de la zona geográfica estudiada es variable puede tratar de ajustarse una línea recta que toque todos los máximos. Y luego establecer la tasa de variación al que el parámetro de activación esta aumentando, para finalmente encontrar el punto de intersección entre ambas rectas. Tal punto de intersección constituirá un estimado para el futuro parámetro de activación. No se observó dependencia entre el comportamiento del parámetro de activación respecto al tipo de falla debido a que esté no es proporcional a fuerzas, es decir no es un vector, sino es proporcional a la energía, la cual es un escalar, independiente de la dirección del desplazamiento. La repetibilidad del parámetro de activación para una misma falla es un indicador del grado de homogeneidad de los materiales o rocas implicadas, de manera que una zona de elevada

heterogeneidad es esencialmente impredecible. Dado que las gráficas de P vs N comienzan en un tiempo arbitrario, se recomienda que el primer pico de toda gráfica siempre se descarte para cualquier análisis. Este el caso de Indonesia (3.935 ± 103.58) ± 200 Km, en cuya gráfica se puede observar que el primer pico es inusualmente mayor que todos los siguientes, esto no se debe necesariamente a que en los primeros 2000 años de la gráfica no haya habido sismos significativos, sino que probablemente el catálogo esta incompleto en esa región temporal. Por ello se debe tener especial prudencia cuando se analicen sismos muy antiguos.

Conclusiones

No existe un período definido entre cada sismo importante de un mismo elipsoide estudiado. Lo que existe es una energía de activación o ruptura estadísticamente repetitiva siempre y cuando el borde de placa tenga una composición homogénea. En otras palabras para romper el equilibrio estático de una misma falla se necesita aproximadamente la misma energía.

La velocidad a la que se alcanza la energía de activación suele ser variable, pero la metodología de análisis propuesta permite estimarla.

No se observó dependencia del comportamiento de las gráficas P vs N con respecto al tipo de falla.

Existe suficiente energía acumulada en la falla ubicada en Guatemala ($14.129, -91.479 \pm 60$ Km) a una profundidad de 43.5 ± 10 Km como para desencadenar un sismo de $7.2^\circ R$ ($6.2 - 8.3^\circ R$) en un futuro cercano, con una probabilidad del 80%.

Otros países con elevado riesgo de sufrir un sismo significativo en un futuro cercano son: Japón ($33.07 - 136.618$) ± 150 Km mayor a $7.5^\circ R$, Filipinas (3.935 ± 103.58) ± 200 Km mayor a $6.5^\circ R$, probabilidad $\geq 80\%$.

El método presentado explica bien los patrones de comportamiento sísmico de las zonas estudiadas.

El rango de error temporal bruto suele ser variable dependiendo de la frecuencia sísmica de la zona estudiada, siendo este inferior a 2 años.

El error temporal porcentual suele ser inferior al 10% del período de calma de la falla.

El error en la estimación del parámetro de activación es de ± 0.1 unidades siendo generalmente inferior al $\pm 10\%$ del valor del parámetro de activación promedio de la zona estudiada.

Se analizaron 13 fallas tectónicas, 6171 eventos sísmicos superiores a 5°R. El algoritmo se ejecuto 539 veces. Se realizaron 3, 326,169 operaciones matemáticas. Se explico el comportamiento de 32 sismos históricos de magnitud superior a 6.0°R.

Referencias:

Richter, C., (1956) Elementary Seismology. Edn. Vol., W. H. Freeman and co., San Francisco.

Hanks, T. y Kanamori, H.(1979) A Moment Magnitude Scale. Journal of Geophysical Research. Vol. 84. NO. B5. May 10.

Kanamori, H.(1983). Magnitude Scale and Quantification of Earthquakes. Tectonophysics, 93 (1983) 185-199.

National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center. Significant Earthquake Catalog from 2150BC to 2011AC. Disponible en

Google Earth. ©2011 Europa Technologies. US Dept of State Geographer. ©2011 Google. ©2011 Map Link Tele/Atlas.

Google Earth	6.0.3.2197
Fecha de la compilación	5/17/2011
Hora de la compilación	2:19:09
Procesador	DirectX 9
Sistema operativo	Microsoft Windows (6.0.6001.1)
Driver de video	00008086 (00007.00014.00010.01437)
Tamaño máx. de la textura	2048x2048
Servidor	kh.google.com