

ENFOQUE DE ENERGÍA SÍSMICA LIBERADA: EN BUSCA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE ECUADOR E IDENTIFICACIÓN DE LAS AMENAZAS SÍSMICAS

APPROACH TO RELEASED SEISMIC ENERGY: IN SEARCH OF THE CHARACTERISTICS OF THE ECUADOR SEISMIC BEHAVIOR AND IDENTIFICATION OF THE SEISMIC RISK

MARCELO MONCAYO THEURER

Universidad de Guayaquil, Ecuador. marcelo.moncayot@ug.edu.ec

RESUMEN

El objetivo de este trabajo de definir las características del comportamiento sísmico del Ecuador, utilizando conceptos de energía sísmica liberada. El patrón histórico de liberación de energía sísmica puede ser utilizado para identificar periodos de comportamiento y proyectarla en el futuro. Con este mismo enfoque se plantea un método alternativo de estimación del riesgo sísmico y mapa que resultado de su aplicación. Los datos utilizados incluyeron 500 años datos históricos y cien años de datos medidos.

PALABRAS CLAVE: energía sísmica liberada, comportamiento sísmico, amenaza sísmica

ABSTRACT

The objective of this work is to define the characteristics of the seismic behavior of Ecuador, using concepts of released seismic energy. The historical seismic energy release pattern can be used to identify behavioral periods and project it into the future. With this same approach, an alternative method of estimating the seismic risk and map resulting from its application is proposed. Data used included 500 years of historical data and one hundred years of measured data.

KEYWORDS: released seismic energy, seismic behavior, seismic risk

INTRODUCCIÓN

La costa ecuatoriana se encuentra a 200 kilómetros del contacto de placas tectónicas de Nazca y Sudamericana. Esta es una de las zonas más sísmicamente activas en el mundo. Las bases de datos muestran que en esta zona se han producido importantes eventos sísmicos. Los datos recogidos con fechas anteriores a los 1900, provienen de una estimación basada en información contenida en documentos históricos, los de fechas posteriores son más exactos, ya que provienen de aparatos de medición sísmica. La magnitud Richter nos da la idea del poder destructivo de un terremoto (3) y a través de la siguiente fórmula que fue planteada por Gutenberg and Richter en 1956, se puede calcular la energía sísmica liberada en el hipocentro.

$$\text{Log}(E_s) = 1.5M_s + 11.8(E_{rgs}) \quad (1)$$

En este trabajo graficaremos la energía sísmica que se ha liberado a lo largo de 500 años en el área del Ecuador, relacionaremos la cantidad de energía liberada versus el número de eventos ocurridos, medida que es útil para el análisis de riesgo sísmico.

AREA DE ESTUDIO

El área de estudio esta comprendida entre la latitud 3°Norte hasta 7°Sur y entre la longitud 84°Oeste hasta 73°Oeste, que constituye una forma casi cuadrada que incluye 200 km. fuera de los límites territoriales de Ecuador. El área adicional analizada contiene importantes fuentes de actividad sísmica que afectan al país.

El área fue dividida en tres zonas de acuerdo a su origen geológico (Figura 1). La zona 1 es la zona costera, que se encuentra a 200 km de la zona subductiva. Esta región tiene un origen reciente y contiene importantes fallas que se encuentran activas (2). La zona 2 corresponde a la sierra que es atravesada por la cordillera de los Andes. La zona 3 es la región Amazónica.

SISMICIDAD Y DATOS SÍSMICOS

Se han utilizado más de 2.400 eventos obtenidos de la base de datos del Servicio Geológico Norteamericano (USGS), en sus siglas en inglés. El área de estudio esta atravesada por la zona subductiva entre la placa de Nazca y la Sudamericana. Esta zona subductiva es la mayor fuente sísmica de la región. El área tiene algunas fallas geológicas activas principalmente paralelas a la zona subductivas (2). Las fallas están perennemente liberando energía sísmica

y produciendo sismos de menor magnitud que la zona subductiva.

EL GRAN TERREMOTO ECUATORIANO DE 1906

De acuerdo a los datos recolectados, el primer gran terremoto del siglo ocurrió el 7 de Enero de 1901, fue de Magnitud de 7.8, su epicentro fue en zona 1 a 100 km de Guayaquil, que es la ciudad más grande del Ecuador, que tiene cerca de 3.5 millones de habitantes (figura 1).

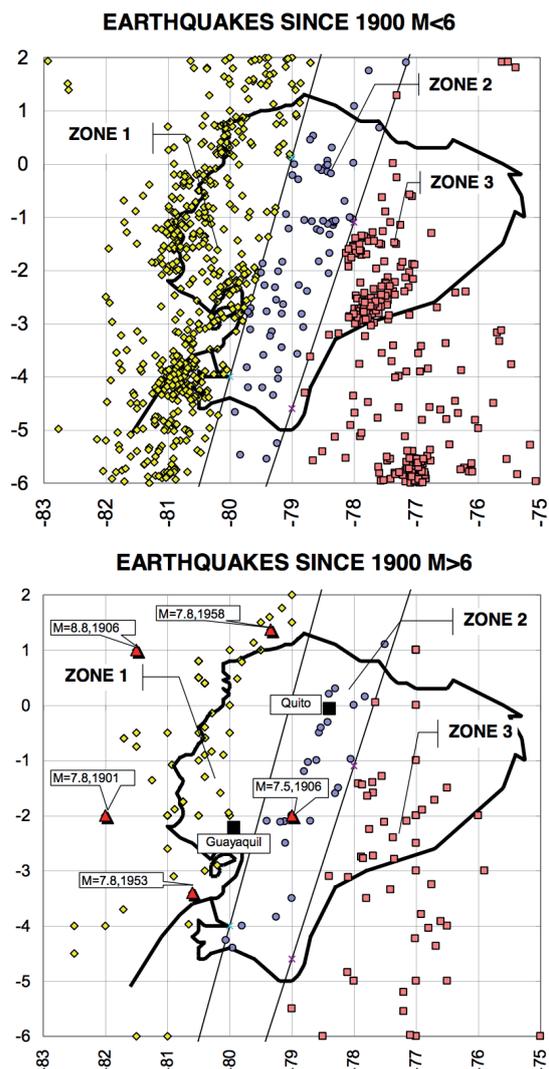


Figura 1.

El más grande terremoto que azotó Ecuador ocurrió el 31 de Enero de 1906 con una magnitud Richter de 8.8 una profundidad de 25 km, este sismo golpeo la parte norte de la zona 1, su epicentro fue 100 km fuera de la costa del país en el océano Pacífico. Los documentos revisados muestran que este evento produjo varias olas tsunami de 3.6 metros de altura con 30 minutos de espaciamiento en Hawái, matando más de

1500 personas (5), este evento es considerado el 4to más fuerte terremoto del mundo y el segundo más fuerte en Latinoamérica en el siglo XX, de acuerdo al USGS

El tercer terremoto más fuerte de Ecuador en el siglo XX ocurrió el 28 de septiembre de 1906 con una magnitud de 7.5 y una profundidad de 150 km. Este fue un evento ocurrido en la zona 2 (Fig.1) fue muy cercano a Guayaquil. Estos tres sismos constituyen una etapa de reactivación sísmica de la región en estudio

PATRÓN DE COMPORTAMIENTO HISTÓRICO

Como se observa en la gráfica, poseemos datos sísmicos desde los años 1500. Los datos recogidos con fecha anterior a 1900 son estimados de documentos históricos, los posteriores a 1900 contienen magnitudes exactas ya que son medidas con aparatos modernos de medición sísmica. Ambos tipos de datos son válidos para identificar etapas de mayor actividad sísmica y su recurrencia. La grafica muestra sismos desde los 7 grados de magnitud.

En la figura 2 observamos como al iniciar cada siglo siempre se producen varios eventos de magnitudes grandes y por ende se libera una gran cantidad de energía sísmica, a lo que le hemos denominado reactivación sísmica. Esta reactivación no ocurre exactamente cada 100 años, su recurrencia varía entre 98 a 125 años. El ultimo repunte ocurrido a inicios del siglo XX y su patrón de repetición a lo largo de 4 siglos, nos permitió inferir que desde el año 2000 entraríamos en un periodo de reactivación sísmica, el mismo que fue demostrado a través de la gran actividad volcánica que hemos sufrido. Sin descartar que la reactivación sísmica se caracteriza, como se observa en la gráfica, por la ocurrencia de sismos de gran magnitud en la zona subductiva principalmente.

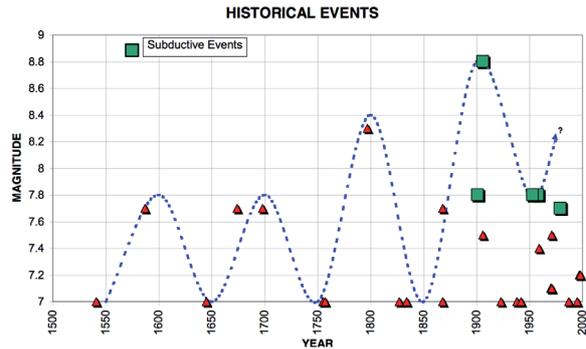


Figura 2. Sismos vs Años y Diario Universo año 2000.

LA LEY DEL 95% DE LA ENERGÍA SÍSMICA LIBERADA

Un resultado del análisis muestra que el 95% de los eventos sísmicos de la región son menores 6 en magnitud Richter y liberan solamente el 5% de la energía sísmica contenida. Por ende, el 5% de los eventos liberaron, el siglo pasado, el 95% de la energía sísmica, esto se ha dado a llamar la ley del 95% de la energía liberada.

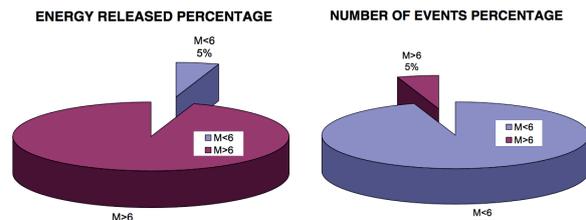


Figura 3.

ENERGÍA ACUMULADA Y LIBERADA

La Energía es definida como la capacidad para ejecutar un trabajo, cuando se ejecuta un trabajo sobre un material, esta se guarda en el cuerpo como energía de deformación (1). Si no se considera absorción, ni disipación se aplica la siguiente igualdad:

$$Energía\ de\ Deformación = Trabajo\ Realizado \quad (2)$$

El teorema de Castigliano indica que: “La derivada, con respecto a la fuerza, de la energía de deformación, es la deformación en el punto de aplicación y en la dirección de la carga”.

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial F} \quad (3)$$

Donde δ es el desplazamiento, U es la energía acumulada y F es la fuerza externa. La relación entre el estrés y la energía se la expresa de la siguiente manera:

$$U = \frac{\sigma^2}{2E} ; U = \frac{\tau^2}{2G} \quad (4)$$



El movimiento de placas tectónicas genera un incremento en la deformación de las rocas cercanas a la zona de contacto entre placas tectónicas y fallas geológicas. Con el teorema de Castigliano se puede inferir que esto se traduce en una acumulación de energía de deformación (Ecuación. 4). Esta energía de deformación contenida se vuelve energía sísmica liberada, luego de la ruptura en la falla y la ocurrencia del sismo.

El número de eventos sísmicos en la región está gobernado por zonas que provocan sismos de magnitud menor a 6, son zonas donde la roca existente y las características geomorfológicas no permiten que se acumule grandes cantidades de energía de deformación, por lo que a medida que esta se acumula, se va liberando con frecuencia y entonces se producen gran número de sismos de magnitud relativamente baja.

La mayor energía liberada está gobernada por zonas donde la roca es muy capaz de acumular energía y los sismos son mucho más espaciados, los procesos de acumulación de energía son más largos. En el momento en que el sector libera energía genera sismos de grandes proporciones. En estas zonas mayor movimiento de las capas, no provoca más sismos, sino más acumulación de energía y al final del procesos sismos de mayores magnitudes.

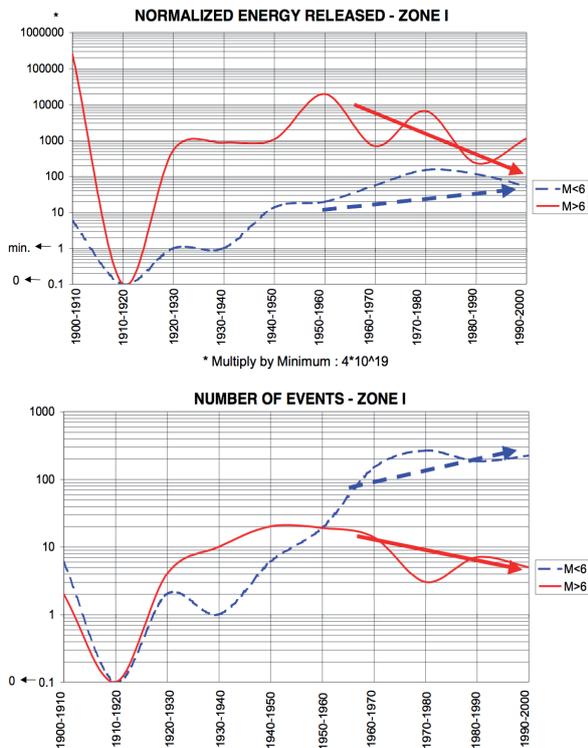


Figura 4.

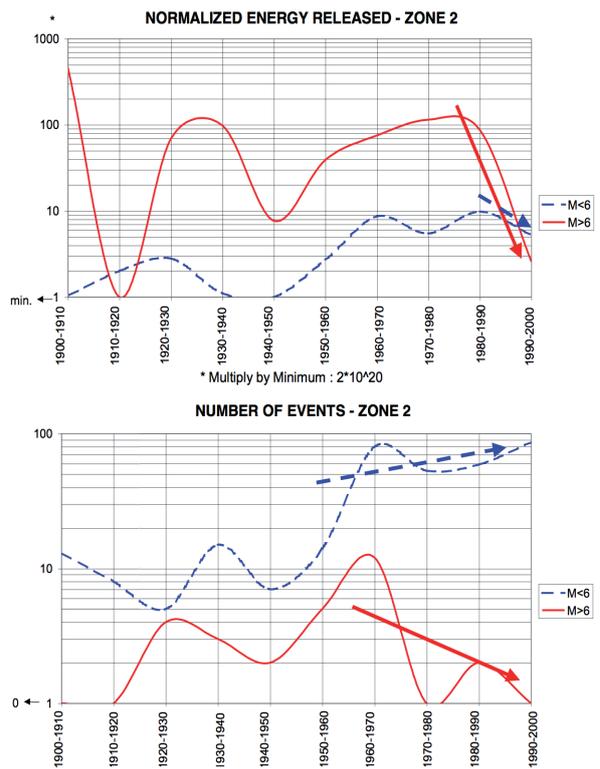


Figura 5.

La teoría de la potencialidad de energía de deformación liberada (SERPT) por sus siglas en inglés, declara que: “Si la probabilidad de ocurrencia de varios mecanismos de daño es la misma, el mecanismo que con más certeza ocurrirá primero será uno que tiene el potencial de liberar la mayor cantidad de energía” (4). Este es un principio que es útil en la estimación de riesgo sísmico, además que se ajusta a los resultados obtenidos, ya que como patrón de comportamiento en nuestro análisis, la mayor cantidad de energía que se liberó en las zonas de análisis siempre estuvo gobernada en un 90% por un solo sismo, que sería el sismo esperado. Si se provocó un tipo de sismo, en una zona, podemos inferir que una vez cumplido su tiempo de recurrencia un sismo de la misma magnitud volverá a ocurrir, cercano a la zona donde ocurrió primero.

ETA PAS SISMICAS

Se le llama etapa a un específico momento de comportamiento sísmico histórico (figura 7), cada etapa cuenta con dos fases, la primera una fase de gran liberación de energía y la segunda un periodo de descanso y recarga de energía sísmica.

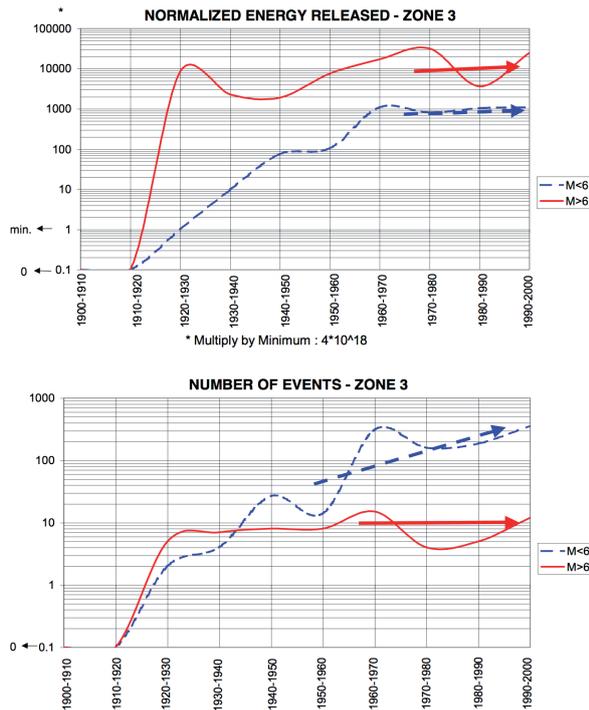


Figura 6.

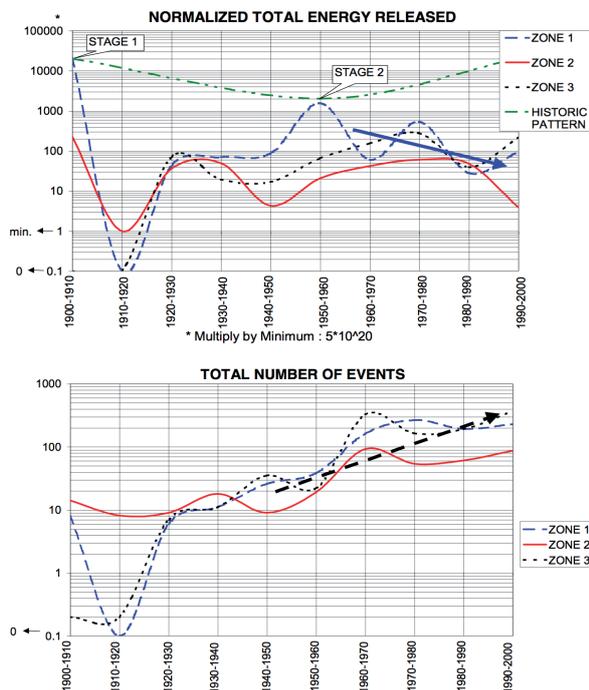


Figure 7.

ETAPA 1

La primera etapa de reactivación sísmica, en el siglo XX, ocurre al inicio de cada siglo y se compone de uno o dos décadas de alta actividad sísmica y liberación de energía. Tres grandes sismos ocurrieron en esta etapa el siglo pasado, hasta ahora no hemos registrado un sismo del

nivel que ocurrió en 1906. Pero se lo puede considerar como esperado.

Luego se presenta una etapa de tranquilidad sísmica que dura 10 años aproximadamente y luego la actividad comienza a crecer de nuevo, una vez que los niveles de energía contenida se elevan.

ETAPA 2

La segunda etapa de reactivación sísmica, en el siglo XX ocurre a partir de los años 50 de cada siglo (Figura 2). Considérese que la energía que se liberó en la etapa 1 es 100 veces mayor que la liberada en etapa 2, luego es comportamiento parecido a la etapa 1. Se inicia con una reactivación sísmica que dura un par de décadas, luego viene la fase de tranquilidad sísmica y luego la fase de recuperación del nivel de liberación de energía empieza a aumentar paulatinamente. Como conclusión a las gráficas observadas se desprende que en las primeras décadas del siglo XXI se produciría una reactivación sísmica (Figura 2), la misma se ha visto reflejada en la perenne y constante actividad volcánica, sin descartar que se pudiera generar sismos parecido a los que ocurrieron al inicio del siglo XX.

COMPARACIÓN DE PATRÓN DE LIBERACIÓN DE ENERGÍA SÍSMICA ENTRE ECUADOR Y EL MUNDO EN EL SIGLO XX

La investigación alcanzo el análisis de la energía liberada a nivel mundial para ser comparado con el patrón a nivel de Ecuador. La curva de color azul muestra la tendencia mundial de liberación de energía y donde se observa que hubo una reactivación sísmica al inicio del siglo XX, al igual que en Ecuador. También ambas curvas al final del siglo mantienen niveles bajos de liberación, infiriéndose que en adelante vendría una nueva reactivación. Hoy en día la reactivación sísmica determinada gracias a este análisis se demostró por la gran actividad volcánica y telúrica en los últimos. En los últimos años se han producido 3 sismos cercanos a 9 grados Richter y otros que también has sido muy fuertes.

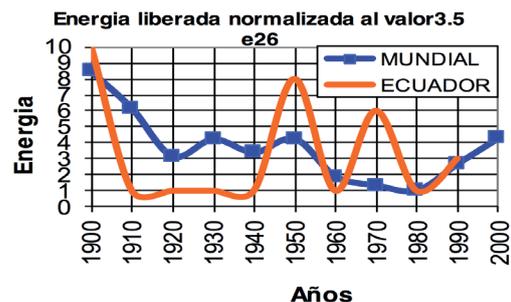


Figura 8.

MÉTODO DE LIBERACIÓN DE ENERGÍA SÍSMICA APLICADO A LA ESTIMACIÓN DE RIESGO SÍSMICO

El estudio continuó desarrollando un método de estimación de riesgo sísmico basado en energía liberada que brevemente se detalla a continuación:

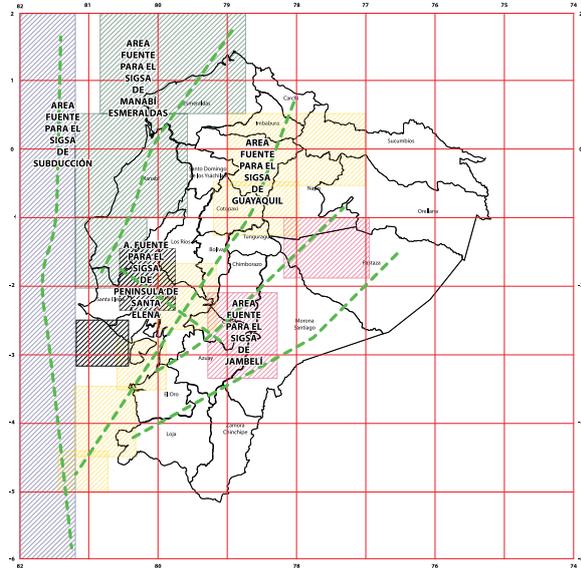


Figura 9.

IDENTIFICACIÓN DE SIGSAS Y ÁREAS DE TRABAJO

Ahora explicaremos el procedimiento para estimar el riesgo sísmico utilizando el método de la energía liberada, como calcular el sismo esperado. Se identificaron las fallas geológicas principales alrededor de la ciudad y se recopiló la información sísmica del sector.

Se mapean las fallas geológicas y la información sísmica, se encuentra una dirección preponderante en las fallas geológicas, se define el concepto de SIGSA (Sistema Integrado Geológicamente Activo), que es una falla geológica virtual que sigue la orientación principal de la falla reales existentes y donde deliberadamente acumularemos la actividad sísmica del sector.

En la gráfica se observan los SIGSAS de Subducción, Santa Elena, Jambeli, Guayaquil, con sus respectivas áreas de aportación.

LEY DE RECURRENCIA

La ley de recurrencia planteada por Guttemberg y Richter en 1956, se aplicó para tener una idea de la recurrencia de sismos en los diferentes SIGSAS de la región.

Se observa que el SIGSA de subducción tiene una recurrencia de 100 años para un sismo de grado 9 como el de 1906 y 60 años para un sismo de grado 8 de subducción. Se observa que el SIGSA de Guayaquil puede generar un sismo de grado

7 cada 50 años y el SIGSA de Santa Elena podría generar sismos de 6.5 grados cada 70 años.

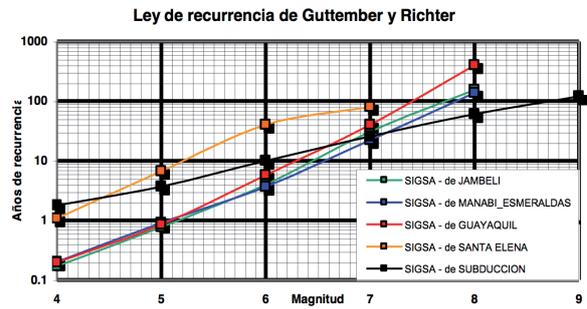


Figura 10.

MÉTODO DE LIBERACIÓN DE ENERGÍA SÍSMICA APLICADO A LA ESTIMACIÓN DE RIESGO SÍSMICO

El porcentaje de energía liberada por década se muestra en el cuadro, para cada SIGSA.

El SIGSA de Subducción liberó el 95% de la energía del siglo en la primera década del siglo pasado, El SIGSA de Guayaquil, liberó el 75% del total de su energía en los años 50 y el resto al final del siglo, El SIGSA de Santa Elena liberó el 73% de su energía contenida en los años 40 y el resto del siglo se mantuvo en régimen constante de liberación.

El SIGSA de Jambeli liberó el 65% de su energía en la primera década y luego el 33% en los años 60.

TABLA 1.

| AÑOS | SIGSAS | | | | |
|-----------|-------------|-----------|---------|-------------------|------------|
| | SANTA ELENA | GUAYAQUIL | JAMBELÍ | MANABÍ-ESMERALDAS | SUBDUCCIÓN |
| 1900-1910 | | | 65% | | 95% |
| 1910-1920 | | | | | |
| 1920-1930 | 17% | 10% | 5% | 10% | 1% |
| 1930-1940 | | | | | |
| 1940-1950 | 73% | | | | 4% |
| 1950-1960 | | 75% | | 83% | |
| 1960-1970 | | | 22% | | |
| 1970-1980 | | | | | |
| 1980-1990 | 17% | 15% | 6% | 7% | 1% |
| 1990-2000 | | | | | |

**MAPA DE AMENAZAS SÍSMICA PARA LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.
APLICACIÓN AL ANÁLISIS DE RIESGO**

Como resultado del análisis tenemos:

- Un mapa que identifica las amenazas que tiene la ciudad y para cada amenaza identifica un sismo probable.
- Hay tres zonas de color rojo oscuro que muestran las amenazas de sismos de mayor magnitud, tipo grado 8, pero se consideran lejanas a la ciudad.
- En coloración rojo claro tenemos amenazas de sismos de grado 7.7.
- De color rosado tenemos amenazas de sismos de grado 7,2 pero por ser tan cercanas a la ciudad, estas amenazas podrían ser inclusive más peligrosas que las anteriores.
- El resto de colores azul, celeste y amarillo representan zonas que no tienen tanta actividad sísmica y no representan una gran amenaza para la ciudad.

Finalmente luego de la aplicación de leyes de atenuación, los SIGSAS mas peligrosos son el de Chongón-Colonche que según la primer de CORNWELL pudiera generar hasta de 200 a 500 gals. Y el SIGSA de Guayaquil que pudiera generar de 100 a 300 gals en roca y de la misma forma el SIGSA de subducción pudiera general hasta 150 gals en caso de un sismo severo.

TABLA 2.

| COLOR | NIVEL DE RIESGO | MAG. | ENERGIA LIBERADA | |
|--------------|-----------------|-------|---------------------|---------------------|
| | | ESPER | DESDE | HASTA |
| [Red] | Muy alto | 8.0 | 3.1E ⁺²³ | 8.0E ⁺²³ |
| [Red-Orange] | Alto | 7.7 | 5.0E ⁺²² | 3.1E ⁺²³ |
| [Pink] | Medio alto | 7.2 | 8.0E ⁺²¹ | 5.0E ⁺²² |
| [Blue] | Medio | 6.7 | 9.0E ⁺²⁰ | 8.0E ⁺²¹ |
| [Light Blue] | Medio bajo | 6.0 | 3.1E ⁺²⁰ | 9.0E ⁺²⁰ |
| [Green] | Bajo | 5.7 | 6.0E ⁺¹⁸ | 3.1E ⁺²⁰ |
| [Yellow] | Mínimo | 4.6 | ----- | 6.0E ⁺¹⁸ |

CONCLUSIONES

- El método de la energía liberada permite estimar el riesgo sísmico de una zona determinada.
- Los SIGSAS permiten acumular información sísmica a lo largo de su longitud
- El mapa de potencialidad de energía liberada determina cinco zonas de amenaza sísmica lejana y dos fuentes cercanas, esto servirá en el futuro para ampliar esta situación.
- El análisis de riesgo sísmico basado en energía sísmica liberada arroja que las amenazas cercanas son las más peligrosas para Guayaquil y que se podrían generar hasta 300 gals en roca con un sismo provocado en el SIGSA de Santa Elena.
- El método permitió determinar que a partir del año 2000 arrancaba una etapa de reactivación sísmica que está demostrada por la actividad volcánica y telúrica que estamos atravesando.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Hearn E. J., Mechanics of Materials, volume 1, Pergamin Press Ltd., 1977.
2. Lara O., "Seismic Risk study for a Hydroelectrical Power System in Ecuador"(in Spanish), Proceedings 3er Latin American Conference on Earthquake Engineering, ESPOL-OEA.
3. Olsson R., "Some Aspects on Stress, Seismic Moment, Energy and Earthquake Volume".
4. Williams R.S., Reifsnider K.L., "Strain Energy Released Rate method for predicting failure modes in composites materials", Part I, Proceedings of the 11th national Symposium on Fracture Mechanics, (1978): 629-650.
5. U.S. Geological Survey (USGS) Catalogue, www.usgs.gov, web page, 2000.
6. Proyecto Radius - Universidad Católica Santiago de Guayaquil.
7. Proyecto Mapa de potencialidad de liberación de energía sísmica para la ciudad de Guayaquil ESPOL - 2003.

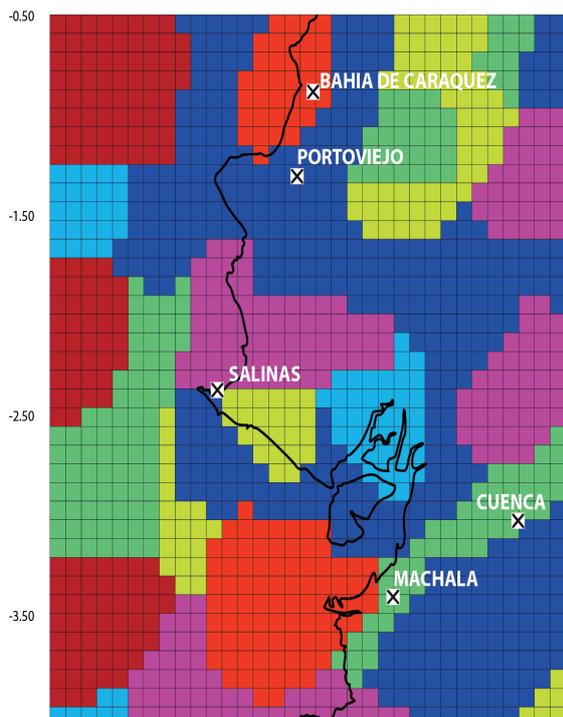


Figura 11.