

## **ANÁLISIS DE TIEMPOS DE INCREMENTO DE PROBABILIDAD (TIP'S) DE OCURRENCIA DE GRANDES TERREMOTOS EN EL PERÚ: APLICACIÓN DEL ALGORITMO M8**

Christian Flores y Hernando Tavera

Dirección de Sismología – Instituto Geofísico del Perú. Email: edden.flores@geo.igp.gob.pe - hjtavera@geo.igp.gob.pe  
Instituto Geofísico del Perú - Calle Badajoz 109 - IV Etapa, Mayorazgo ATE

### **RESUMEN**

El objetivo de este estudio es aplicar el algoritmo M8 (Keilis-Borok y Kossobokov, 1990) a la sismicidad ocurrida en el borde occidental del Perú para determinar en un futuro, donde y cuando podría ocurrir el próximo gran terremoto. Este pronóstico está basado en la identificación del Incremento de Probabilidad en el Tiempo (TIP's). De manera retroactiva se ha identificado los TIP's asociados a los terremotos de Arequipa (2001, Mw 8.0) y Pisco (2007, Mw 8.0). El análisis realizado en el borde Oeste del Perú, para el periodo 2010-2015, muestra la formación de un TIP en un área circular con centro en  $-11.8S$  y  $-77.15W$  ( $r=220km$ ) que indica la posible ocurrencia de un gran terremoto de magnitud igual o mayor a 7.0 Mw dentro del periodo 2008-2013. Así también, se observa un incremento en los valores de las funciones en otra área con centro en  $-18.25S$  y  $-70.25W$  ( $r=270km$ ), que indica la posible formación de un TIP para los siguientes años (región sur del Perú).

### **INTRODUCCIÓN**

Los grandes terremotos tienen periodos de recurrencia muy altos y varían en cada región entre 60 y 500 años. La ocurrencia, en la última década, de dos grandes terremotos en Arequipa 2001 (Mw 8.0) y Pisco 2007 (Mw 8.0), y la identificación de este último usando el método de “Laguna Sísmica” (Tavera y Bernal, 2005), incentiva a la búsqueda y la aplicación de otros métodos similares orientados a pronosticar con un tiempo importante de anticipación la ocurrencia de un próximo gran terremoto en Perú.

El análisis de los patrones de sismicidad, realizados con anterioridad para moderados y grandes terremotos, ha sido y es un tema ampliamente investigado. La información recopilada en las últimas décadas sobre la sismicidad global ha permitido realizar estudios sobre la distribución de los terremotos en espacio-tiempo, con el único objetivo de identificar la presencia de patrones sísmicos antes y después de que ocurra un gran terremoto. En general, los patrones de sismicidad (flujo de terremotos, fluctuación de la actividad, flujo de réplicas, etc.) son representados por funciones y algunos han sido probados como precursores de grandes terremotos en varios estudios para diferentes regiones (Italia, Japón, Himalaya, Tíbet, California, etc.), especialmente por Keilis-Borok (1990), Kossobokov (1990), Vorobieva (1999), entre otros.

El Algoritmo M8 permite analizar el flujo sísmico y identificar las áreas en las cuales puede ocurrir el próximo gran terremoto para los siguientes años (2010-2015). Para esto se ha usado datos del Catálogo del IGP (1960 – 2010) previamente evaluado y calificado. El análisis del catálogo considera evaluar tipos de magnitudes, la magnitud de completitud, la distribución espacial y temporal de los terremotos, la eliminación de réplicas, el cálculo de las funciones del algoritmo M8 y finalmente, la evaluación de la formación o no de TIP's o alarmas.

### **1. Algoritmo M8**

El Algoritmo M8 fue propuesto por Keilis-Borok y Kossobokov (1990) para el análisis retroactivo de la sismicidad predecesora a grandes terremotos (M8) en el dominio espacio -tiempo-energía. Para ello se considera un simple esquema físico de predicción en el cual el algoritmo M8 identifica el aumento anormal de los valores promedios de un grupo determinado de funciones dentro de la secuencia de sismicidad, como un patrón predecesor a un gran terremoto (Figura 1).

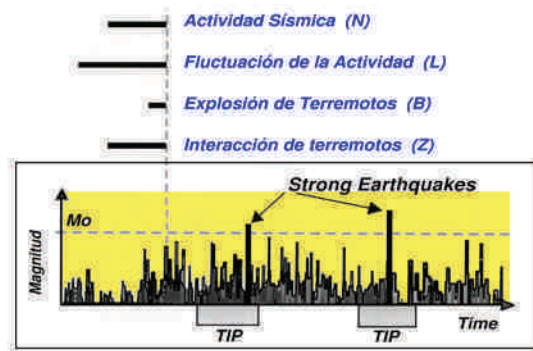


Figura 1. Esquema del análisis temporal y funciones del Algoritmo M8 (Keilis-Borok, 1996).

**Función N:** Considera la actividad sísmica o la intensidad del flujo de terremotos en un intervalo de tiempo  $(t_i-s, t_i)$  y tienen una magnitud mayor que un límite mínimo  $M_{min}$ .

$$N(M_{min}, t_i, s) = n(t_i) - n(t_i - 6)$$

**Función L:** Obtenida a partir de la desviación de la actividad sísmica o fluctuación de la actividad promedio equivalente a la diferencia del número de terremotos para un intervalo  $(t_i-s, t_i)$  y el número de terremotos equivalentes para un periodo “s” para el intervalo  $(t_o, t_i-s)$ . Donde,  $t_o$  es el tiempo de inicio del catálogo.

$$L(M_{min}, t_i, s, t_o) = N - N'; \quad \text{donde: } N' = n(t_o, t_i - 6) * 6 / ((t_i - 6) - t_o)$$

**Función Z:** Se determina por la concentración en el espacio e interacción a gran escala de los terremotos y es aproximadamente equivalente al cociente entre el diámetro o longitud promedio de la fuente “l” y la distancia media “r”, entre ellos.

$$Z(t, M_{min}, M_{max}, s, \alpha, \beta) = S(t, M_{min}, M_{max}, s, \alpha, \beta) / (N(t, M_{min}, s) - N(t, M_{max}, s))^{2/3}$$

**Función B:** Es representado por el agrupamiento de terremotos después de un terremoto principal y es equivalente al máximo número de réplicas ocurridas en los “e” días después de cada terremoto en un determinado rango de magnitud  $(M_{min}, M_{max})$ .

$$B(t, M_{min}, M_{max}, 1 \text{ año}) = B_i(e)_{max}$$

## 2. Aplicación del Algoritmo M8

A fin de aplicar el Algoritmo M8, el borde occidental del Perú, es dividido en áreas circulares con diámetros proporcionales a la magnitud ( $M_o$ ) evaluada (Figura 2). La intensidad del flujo de terremotos o actividad sísmica en las regiones consideradas son obviamente diferentes. Para normalizar la actividad sísmica en el área de estudio se usa una magnitud de umbral mínima “ $M_{min}$ ” de modo que la tasa promedio anual de ocurrencia de terremotos principales con  $M_i \geq M_{min}$  en una área es igual a un valor en común. Para un primer conjunto de funciones nombrado como  $N_1, L_1$  y  $Z_1$  la constante es 10 por año, y es 20 por año para otro segundo conjunto de  $N_2, L_2$  y  $Z_2$ . Para estas seis funciones, la duración del intervalo de tiempo “s” es de 6 años. La magnitud umbral máxima “ $M_{max}$ ” para N y L se ajusta a  $M_o$ . Para la función Z se ha usado  $M_{max} = M_o - 0.5$  y para la función B, los umbrales son  $M_{min} = M_o - 2$  y  $M_{max} = M_o - 0.2$ . Para declarar un incremento de la probabilidad en el tiempo (TIP) dentro de un área analizada al menos seis de las siete funciones del algoritmo M8 deben de tener un incremento en sus valores promedios. Para las funciones N, L y Z, el valor del incremento debe de ser mayor al 10% y para la función b el 25% de sus valores promedios respectivamente.

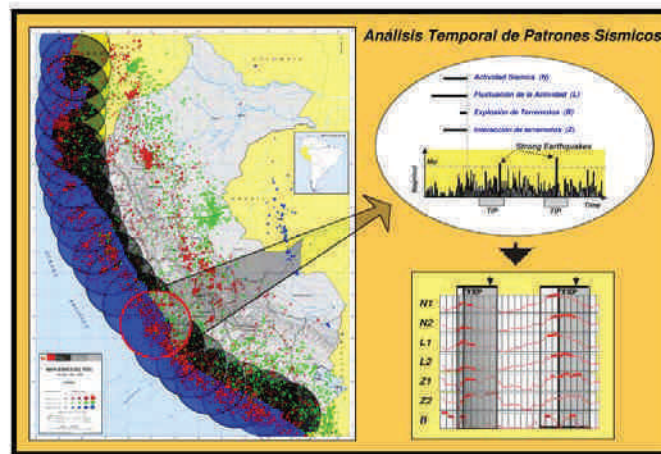


Figura 2. Esquema general de la aplicación del Algoritmo M8 para el borde oeste del Perú

### 3. Resultados

Los resultados del análisis retroactivo muestra la formación de dos TIP's para los terremotos de Arequipa (2001, Mw8.0) y Pisco (2007, Mw 8.0) con un periodo de anticipación de 3.5 y 2.5 años respectivamente (Figura 3). El análisis prospectivo realizado con el algoritmo M8 en el borde Oeste del Perú, permite para el periodo 2010-2015 un área circular probable con centro en  $-11.8S$  y  $-77.15W$  y radio de 220km en el que podría ocurrir un gran terremoto de magnitud igual o mayor a 7.0 Mw (Figura 4). Así también se observa un aumento en el área circular con centro en  $-18.25S$  y  $-70.25W$  ( $r=270km$ ), que indica la posible formación de un TIP para los siguientes años (Región Sur del Perú).

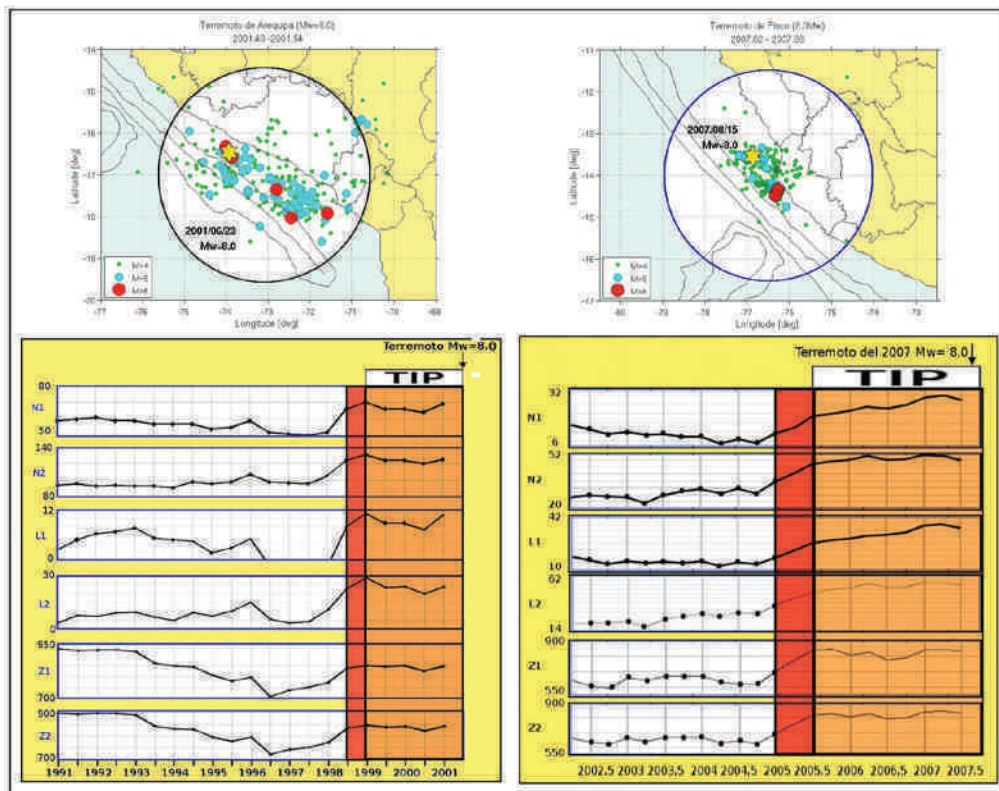


Figura 3. El análisis retroactivo realizado con el Algoritmo M8, muestra dos TIP's para los terremotos de Arequipa (Mw=8.0) del 23 de Junio del 2001 y Pisco (Mw=8.0) del 15 de Agosto del 2007, con un tiempo de anticipación de 3.5 y 2.5 años respectivamente.

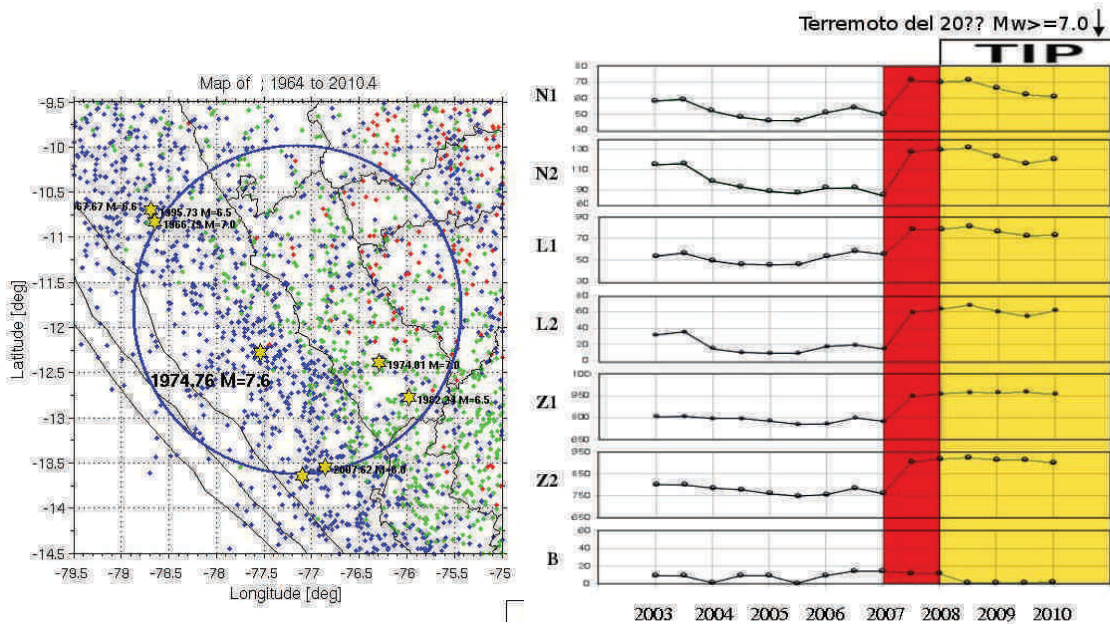


Figura 4. El análisis realizado en el área circular con centro en  $-11.8S$  y  $-77.15W$  ( $r=220km$ ) muestra un TIP que se inicia en el año 2008 e indica la posible ocurrencia de un gran terremoto de magnitud igual o mayor a 7.0 Mw dentro del periodo 2008-2013.

## CONCLUSIONES

Los resultados del análisis retroactivo realizado con el Algoritmo M8 muestran la formación de dos TIP's antes de los terremotos de Arequipa 2001 (8,0Mw) y Pisco 2007 (8.0Mw) con un tiempo de anticipación de 3.5 y 2.5 años respectivamente.

Los resultados del análisis prospectivo realizado en el borde oeste del Perú muestra la presencia de un TIP en una área circular con centro en  $-11.8S$   $-77.15W$  y Radio= $220km$ , que indica la posible ocurrencia de un gran terremoto de magnitud igual o mayor a 7 dentro del periodo 2008 – 2013. Así también, se observa un aumento en los valores de las funciones en el área que abarca los departamentos de Tacna, Moquegua, Sur de Arequipa y Puno, y el Norte de Chile (Centro:  $-18.25S$   $-70.25W$ ,  $R=270$ ), lo cual indicaría la formación de un TIP para los siguientes años.

Los resultados en las demás áreas de investigación muestran que los valores de las funciones del algoritmo M8 presentan una tendencia de atenuación lenta lo que indicaría que en estas zonas no se podría esperar la ocurrencia de un gran terremoto durante el periodo 2010-2015.

## REFERENCIAS

- Tavera H. & Bernal I. (2005).- “Distribución Espacial de Áreas de Ruptura y Lagunas Sísmicas en el Borde Oeste del Perú”. Volumen Especial N°6 Alberto Giesecke Matto (2005) pp. 89-102.
- Keilis-Borok V. & Kossobokov V. (1990). “Localization of intermediate-Term earthquake prediction”. Journal of Geophysical Research, Vol. 95, No B12, pp. 19,763-19,772 November 10, 1990
- Keilis-Borok V. (1996). “Intermediate-term earthquake prediction” Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Colloquium Paper Vol. 93, pp. 3748-3755, April 1996
- Kossobokov V., Romashkova L., Keilis-Borok V. & Healy J. (1999). “Testing earthquake prediction algorithms: statistically significant advance prediction of the largest earthquakes in the Circum-Pacific 1992-1997 ”. Physics of the Earth and Planetary Interiors 111(1999) 187-196
- Vorobieva I. (1999). “Prediction of a subsequent large earthquake”. Physics of the Earth and Planetary Interiors vol. 111(1999) 187-196