

ACELERACIÓN DE LA TASA DE SISMICIDAD LP COMO PRECURSOR DE LAS EXPLOSIONES EN EL VOLCÁN UBINAS DURANTE LA ERUPCIÓN DEL 2006 - 2009

Roger Machacca¹, Orlando Macedo¹, Juan Anca¹

(1) Observatorio Vulcanológico del Sur, IGP-Arequipa – Instituto Geofísico del Perú; roger.machacca@igp.gob.pe

Resumen

Durante el último período eruptivo 2006-2009, el volcán Ubinas produjo 162 explosiones, muchos de estos eventos han sido precedidos por enjambres de eventos de largo período (LP). Estos LPs han sido utilizados como elementos de análisis por el método de pronóstico por fallo del material (FFM), y estudiados como posibles precursores a la hora de estructurar un esquema de predicción.

En base a un extenso catálogo sísmico obtenido para el volcán Ubinas, se ha realizado el cálculo de la tasa media de los eventos LP antes de las explosiones, lo que ha mostrado un incremento significativo de dicha tasa entre 1-3 horas antes de la ocurrencia de la explosión.

Valores de **U** o de **efectividad del precursor** (que se considera importante o “precursor fuerte” cuando $U > 1$), determinados para las tres etapas establecidas para este proceso eruptivo, ha proporcionado valores significativos en el caso de la etapa I (con $U=1.22$) y en la etapa II (con $U=2.46$), mientras que para la etapa III la tasa de LPs constituye un precursor muy débil con $U=0.06$.

1 Introducción

El monitoreo intensivo de las erupciones recientes en los volcanes alrededor del mundo ha generado la integración de series temporales como el RSAM, tasas de sismicidad, etc, que han dado lugar a varios ejemplos exitosos en las predicciones que se emiten para las erupciones inminentes.

Estas series temporales cobran mayor importancia cuando se convierten en los elementos a ser utilizados por métodos de predicción, entre los que destaca el Método de Pronóstico por Fallo de Material (FFM Materials Failure Forecast Method) desarrollado y utilizado por Voight (1988) y Voight y Cornelius (1991).

Una aproximación teórica del método, considera que el desencadenamiento de una erupción volcánica es análogo al fallo de un material en un proceso de ruptura. Muchos fenómenos como las erupciones volcánicas, son precedidos por un notorio ritmo acelerado de la sismicidad. Voight [1988] propone una relación entre la aceleración en un precursor Ω (como la tasa de sismos), que varía como una función del tiempo t :

$$\frac{d^2\Omega}{dt^2} = K \left(\frac{d\Omega}{dt} \right)^\alpha$$

donde α y K son constantes determinados empíricamente. Cornelius y Voight (1995) señalan que α toma valores entre 1 y 2 antes de una erupción. Kilburn (2003) señala que la aceleración en la tasa de eventos es más adecuado para predecir el tiempo de un fallo (es decir, erupción), y que $\alpha = 2$ debe ser utilizado. Con estos supuestos, la ecuación se puede simplificar a:

$$1/\left(\frac{d\Omega}{dt}\right) = K(t_f - t)$$

donde t_f es tiempo del fallo y se determina usando la regresión lineal de mínimos cuadrados.

Uno de los parámetros más utilizados por el FFM es el RSAM. Esta técnica es usada para caracterizar el cambio en la sismicidad de un volcán en tiempo real.

$$RSAM(iT) = \frac{1}{T} \sum_{t=iT-T/2}^{iT+T/2} |S(t)|$$

donde, T es el intervalo promedio (1 – 10 min), y $S(t)$ es la muestra de la traza sísmica.

2 Sismicidad Durante el Periodo Eruptivo

El análisis de toda la actividad sísmica registrado durante el último periodo eruptivo del volcán Ubinas (a partir del 24/05/2006 hasta 31/12/2009), ha permitido generar un catálogo sísmico. Este catálogo ha sido usado como base de datos en el presente trabajo. El número total de eventos sismo-volcánicos que se han identificado y clasificado es de 118694, predominando los eventos LP con 97836 eventos, seguidos por los Tremores con 16373 eventos y finalmente otros como VT y Híbridos con 4485 eventos en total. Como eventos sobresalientes, se ha identificado, además, 162 explosiones.

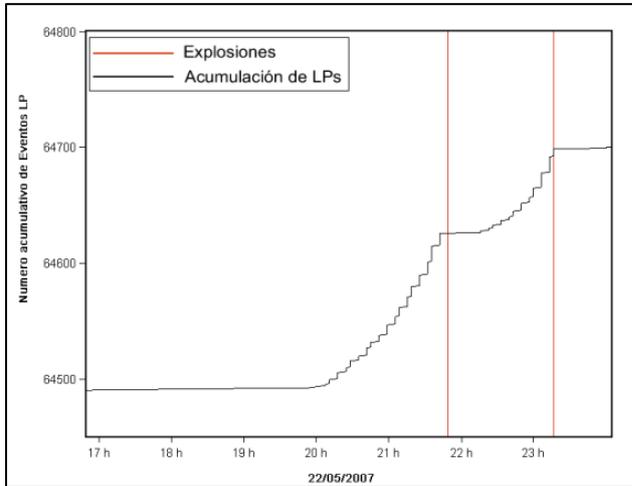
Por otro lado, según el análisis de las características de la sismicidad encontrada, podemos distinguir tres etapas principales en el proceso de erupción:

Etapla I (del 20/04/2006 al 14/11/2006): alta sismicidad y ocurrencia de explosiones de relativa gran energía.

Etapla II (del 14/11/2006 al 13/08/2007): se observa disminución de la sismicidad aunque continúa permaneciendo en relativos altos niveles; la energía de las explosiones disminuye.

Etapla III (del 01/09/2007 al 31/12/2009): baja sismicidad y ocurrencia de explosiones débiles y espaciadas en el tiempo; final del proceso eruptivo.

Al realizar el análisis de la sismicidad, se observa que la ocurrencia de los eventos LP esta estrechamente asociada con las explosiones, a las cuales preceden. La figura 1 muestra un ejemplo típico del comportamiento precursor de los LPs en relación a explosiones. Se ha planteado el número



acumulado de eventos LP registrados en el catálogo en función del tiempo, para el día 22/05/2007 en que se produjeron hasta dos explosiones. El incremento en el número de LPs se inicia cerca de dos horas antes de las explosiones de ese día; en cada caso, después de ocurrida la explosión la ocurrencia de LPs disminuye drásticamente o se detiene.

Figura 1 Gráfico del número de eventos LP en función del tiempo. Se observa un notorio incremento en la ocurrencia de LPs (pendiente fuerte) cerca de dos horas antes de las explosiones ocurridas a las 21:42:46 y 23:16:20 UTC del 22/05/2007

3 Sismicidad Pre-Eruptiva

Se han apilado las series temporales de la actividad LP que preceden y que siguen a todas las explosiones registradas en el volcán Ubinas. Ello nos va a permitir observar mejor cuales son las características de la ocurrencia de los enjambres de LPs precursores a las explosiones. Para tal fin, se calcula la tasa media $R(t)$ de los eventos LP antes de las explosiones, que se puede escribir como:

$$R(t) = \frac{1}{T N_{ex}} \sum_{i=1}^{N_{ex}} \sum_{j=1}^N \theta(t_i^{EX} - t_j^{LP} \in [t, t + T])$$

donde N_{ex} es el numero de explosiones en el catalogo, N es el número de eventos LPs en el catálogo, T es la duración del intervalo de tiempo considerado, y θ es una función tal que $\theta(P) = 1$ si P es verdadero y 0 de otro modo. Para cada intervalo, T , solo usamos las explosiones que satisfacen $t_i^{EX} - T > t_j^{LP}$.

Al apilar el promedio de la tasa LPs se observa que el aumento de los eventos LP, se presenta entre 1-3 horas antes de presentarse la explosión (Figura 2, izquierda). Luego de la explosión sigue una disminución significativa de la actividad LP, que desciende nuevamente al nivel de fondo (Figura 2, derecha).

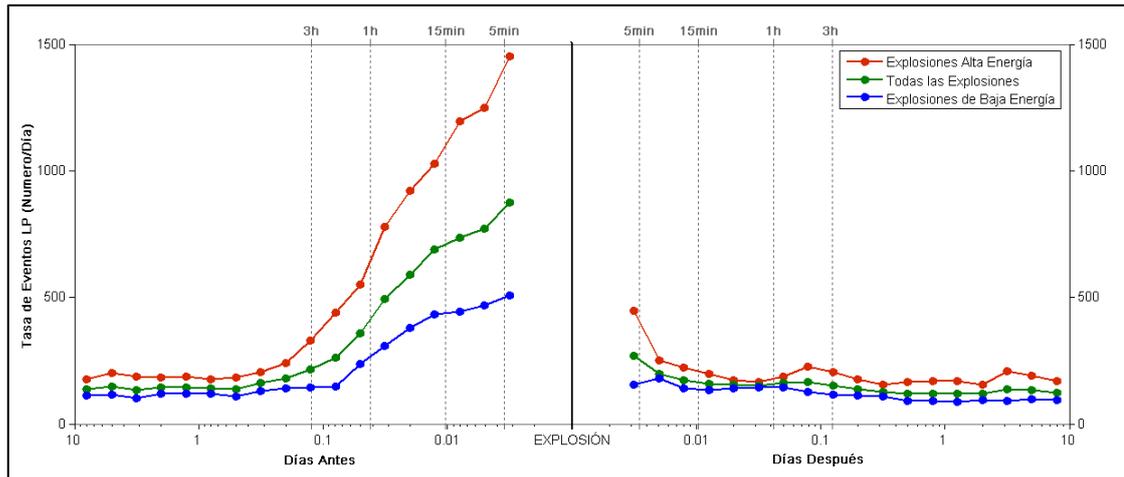


Figura 2 Apilamiento de la tasa de LPs antes y después de una explosión (EXP).

4 La Previsibilidad de las Explosiones

La puesta en evidencia del incremento de la tasa promedio de LP que precede a las explosiones en el volcán Ubinas, hace pensar en la posibilidad de predecir una explosión pocas horas antes de su ocurrencia. Muchos son los casos registrados en la literatura en que el aumento de la sismicidad es señalado como un precursor que ayuda a pronosticar erupciones volcánicas. En este trabajo usamos

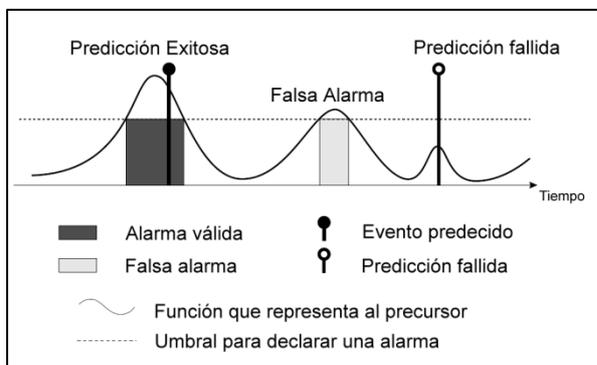


Figura 3 Esquemas de predicción y resultados de predicción

La efectividad del precursor U viene definida como:

$$U = \frac{s}{f + m}$$

siendo s el número total de aciertos, f el número de falsas alarmas y m el número de alarmas fallidas. Ortiz y García (1996) definen los tipos de precursores de acuerdo al valor de la efectividad U , donde el precursor puede considerado débil si $U < 1$, fuerte si $U > 1$, o ideal si $U = \infty$.

En nuestro esquema de predicción, los parámetros utilizados fueron: una ventana de tiempo $D = 5$ min para hallar la tasa de LPs, una duración de la alerta Taler = 1h; los umbrales de detección se fijaron para cada etapa ya que la sismicidad (amplitud y frecuencia de ocurrencia) fueron variando en el tiempo. Para la etapa I el umbral fue fijado en 8 LPs; para la etapa II en 6 LPs; y para la etapa III el umbral fue fijado en 3 LPs.

En nuestro esquema de predicción se calcula la tasa de LPs cada 5 min., si esta supera el umbral fijado se activa una alarma, luego se evalúa la evolución del precursor para tomar la decisión de lanzar o no un alerta ante una explosión inminente. Para la previsión de la hora de inicio de la explosión (ver figura 4), usamos el RSAM como un elemento del Método de Pronóstico por Fallo de Material (FFM), además la solución a la relación de Voight (ecuación 1) implica que la aceleración positiva con el tiempo de la tasa de señal precursora toman la forma de un incremento de la ley de potencias, entonces el RSAM debe aumentar mientras más se aproxime el momento de la explosión.

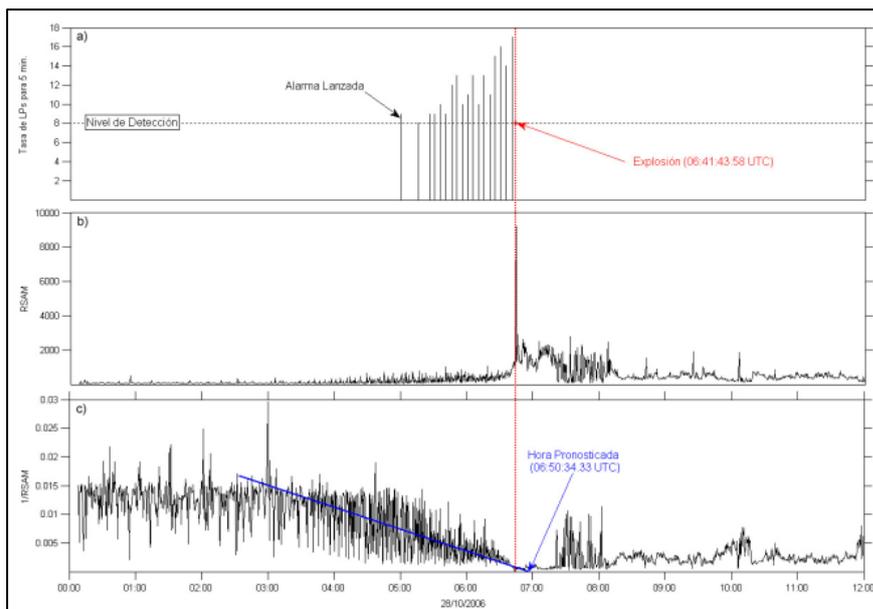


Figura 4 Ejemplo de un caso exitoso de pronóstico para la explosión del 28/10/2006 **a)** Se activa la alarma, **b)** El RSAM aumenta en función a la cercanía de la explosión, **c)** La proyección de la pendiente negativa del $1/RSAM$ al eje del tiempo proporciona el posible momento de la Explosión

Aunque el tiempo pronosticado difiere (por 9 min), este método resulta ser muy eficiente, sobre todo en la explosiones más energéticas.

Para calcular la efectividad de la tasa de LPs como precursores de explosiones, utilizamos la ecuación 5, y los datos obtenidos con nuestro esquema de predicción. De un total de 162 explosiones observadas en el catálogo, en la **etapa I** se registraron 52 explosiones, 41 alertas, 33 aciertos, 8 falsas alarmas y 19 alarmas fallidas; y el valor de la efectividad $U=1.22$. En la **etapa II** se registraron 40 explosiones, 37 alertas, 32 aciertos, 5 falsas alarmas y 8 alarmas fallidas; y el valor $U=2.46$. En la **etapa III** se registraron 70 explosiones, 7 alertas, 4 aciertos, 5 falsas alarmas y 66 alarmas fallidas; y el valor $U=0.06$. Por los valores de la efectividad se determina entonces que la tasa de LPs es un precursores fuertes ($U>1$) para las explosiones de las dos primeras etapas, mientras que para las explosiones de la etapa III, es un precursor muy débil ($U<1$).

5 Conclusiones

El uso del esquema de predicción propuesto por Grasso y Zaliapin, 2004 combinado con el FFM, ha demostrado ser una herramienta valiosa en el pronóstico de las explosiones registradas en el volcán Ubinas, sobre todo en las explosiones mas energéticas (Etapa I y Etapa II).

El apilamiento de la tasa de LPs, muestra que el precursor se presenta entre 1-3 horas (~ 0.1 días) de anterioridad.

Los enjambres de LPs precursores se caracterizan por que los eventos tienen forma de la onda y contenido espectral muy similares. También, la frecuencia de ocurrencia se incrementa rápidamente hasta desencadenar la explosión. Estas observaciones sugieren un mismo mecanismo (fuente repetitiva) que soportan fuerte presurización debido probablemente al ascenso de magma juvenil.

6 Referencias

- [Alarcón, 2008] Sistema de Identificación Sísmica para el volcán Popocatepetl. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 97 p.
- [Kilburn, 2003] Multiscale fracturing as a key to forecasting volcanic eruptions. Journal of Volcanology and Geothermal Research 125 (2003), 271- 289.
- [Macedo et al., 2006] Monitoreo y vigilancia sísmicos de la erupción del volcán Ubinas en 2006. Instituto Geofísico del Perú, Área de Vulcanología, 23 p.
- [Machacca, 2011] Evaluación de Eventos Sísmicos de Largo Periodo (LP) como Precursores en las Explosiones del Volcán Ubinas, 2006 – 2009. Tesis, Universidad Nacional de San Agustín, 120 p.
- [Sparks, 2003] Forecasting volcanic eruptions. Earth and Planetary Science Letters 210, 1-15.
- [Sebastien et al., 2003] Statistical analysis of daily seismic event rate as a precursor to volcanic eruptions. Geophysical research letters, vol. 30, N° 13, 4 p.
- [Grasso y Zaliapin, 2004] Predictability of volcano eruption: Lessons from a basaltic effusive volcano. Geophysical research letters, vol. 31, 4 p.