

# Tasa de Sismicidad LP como una Herramienta Útil en el Pronóstico de Explosiones Caso Volcán Ubinas, Periodo 2006 - 2009

R. Machacca<sup>1</sup>, O. Macedo<sup>1</sup> y J. Anca<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geofísico del Perú (IGP), Observatorio Vulcanológico de Arequipa (OVA), Cayma, Arequipa, Perú

**Resumen.** Durante el último período eruptivo del volcán Ubinas, 2006-2009 se han registrado 162 explosiones; muchas de éstas fueron precedidas por enjambres de eventos de largo período (LP). En este trabajo, los LPs han sido analizados con métodos de pronóstico como el FFM (Materials Failure Forecast Method), y estudiados como una herramienta en la estructuración de un esquema de predicción ante las explosiones que acompañaron al proceso eruptivo.

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. El resultado muestra que entre 1 a 3 horas antes de la ocurrencia de la explosión ocurre un incremento significativo de dicha tasa, por lo que puede considerarse como un precursor de explosiones. La efectividad del incremento de tasa de LPs como precursor de explosiones ha sido estimado por medio de un algoritmo de pronóstico simple propuesto por (Grasso y Zaliapin, 2004).

La efectividad del precursor (U) ha sido determinada para cada una de las tres etapas identificadas del proceso eruptivo, es decir etapa de inicio, intermedia y final. Los valores (que se consideran importantes o “precursor fuerte” cuando  $U > 1$ ) son significativos en el caso de la etapa de inicio (con  $U = 1.22$ ) y en la etapa intermedia (con  $U = 2.46$ ), mientras que en la etapa final la tasa de LPs constituye un precursor muy débil con  $U = 0.06$ .

## 1 Introducción

El volcán Ubinas pertenece a la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC) que se prolonga desde el sur del Perú hasta el norte de Chile (Fig. 1). De acuerdo a los estudios geológicos y vulcanológicos se sabe que el volcán Ubinas es el producto de una intermitente y variada actividad volcánica ocurrida desde el Pleistoceno superior (Thouret et al., 2005; Rivera et al., 2007). Este volcán es considerado como el más activo del Perú con 24 erupciones desde 1550, la última de las cuales ocurrió entre 2006-2009.

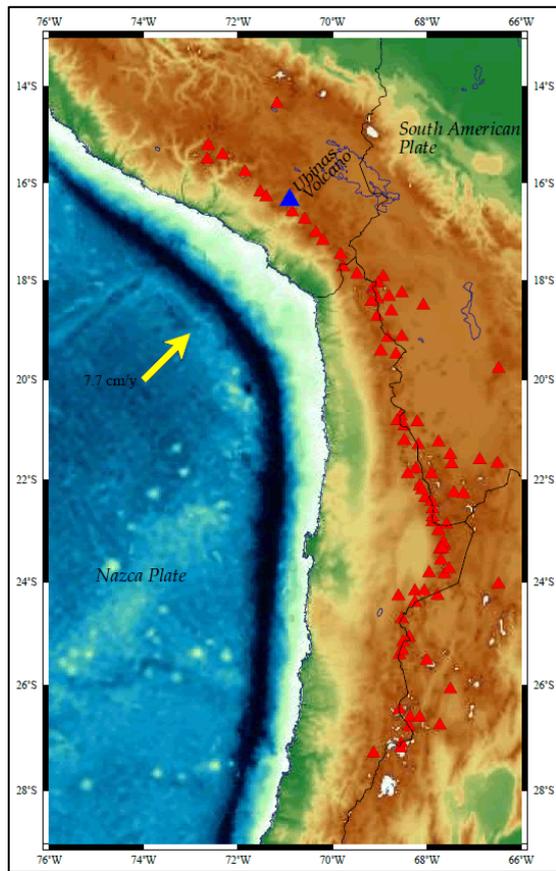
Meses antes del inicio de la erupción, entre julio 2005 al 25 de marzo 2006, se observaba un leve incremento en la frecuencia de emisión de gases que se elevaban entre 100 y 300 m por encima de la caldera. Entre el 25 de marzo y el 18 de Abril, la emisión de gases fue acompañada de emisiones de ceniza cada vez más frecuentes. El día 19 de Abril se observó el emplazamiento de un tapón de magma incandescente en el fondo del cráter del volcán. El día 20 de abril, por primera vez ocurrieron fuertes explosiones que generaron altas columnas eruptivas, de hasta 3 Km. La importante actividad explosiva continuó hasta el 14 noviembre del 2006, lapso en que el incremento de las manifestaciones eruptivas determinó la necesidad la evacuación de pequeños poblados situados a 5Km al SE del volcán. Posteriormente, luego de una relativa calma de cerca de un mes, se reanudaron las explosiones, aunque fueron de magnitudes menores; este segundo periodo de explosiones se extiende hasta fines de agosto del 2007. Posteriormente, la actividad sísmica decae notoriamente, con explosiones débiles y poco frecuentes.

A lo largo del proceso eruptivo ha sido frecuente observar enjambres de eventos LP seguidos de Explosiones. Estos enjambres premonitores se presentaron hasta con tres horas de anticipación a las explosiones. Haciendo uso de estas observaciones, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) llegó a enviar con éxito avisos de “alertas de explosiones inminentes” a las autoridades encargadas de la gestión directa de la crisis (COER- Moquegua), en diversas ocasiones.

El incremento de la actividad sísmica antes de las explosiones, así como durante la formación de domos, ha sido observado en muchos volcanes (Cruz y Chouet, 1997; Umakoshi et al., 2008; Moran et al., 2008, Arciniega et al., 2008; García A., 2007; Neuberger et al., 2000; Thelen et al., 2008; Macedo et al., 2008), y con frecuencia son utilizados por métodos de pronóstico tal como el FFM, mostrando ser de gran utilidad en el pronóstico de las explosiones. El incremento de eventos LPs se ha explicado en términos de un aumento en la tasa de ascenso de magma (Hammer et al., 2009). Una tasa alta de ascenso de magma resulta en la mayor generación de LPs debido al incremento en la tasa de la deformación. Se puede esperar, por tanto, que los eventos LP se presenten como enjambres energéticos en un ambiente que soporta fuerte presurización, como es un sistema explosivo, en contraposición a un sistema efusivo en donde la presurización es más débil.

---

*Correspondencia a:* Roger Machacca  
(roger.machacca@igp.gob.pe)



**Fig. 1** Localización del volcán Ubinas dentro de la Zona Volcánica Central de los Andes, producto de la subducción de la placa de Nazca debajo de la Sudamericana

## 2 Datos

Inicialmente, luego de ocurridas las primeras explosiones, el IGP instaló estaciones sísmicas temporales en los alrededores del volcán. A partir del 24 de mayo de 2006 se puso en funcionamiento una estación sísmica permanente (estación UB1) en el flanco noreste del volcán. Desde el 23 de Setiembre del 2006 se incorporaron otras 3 nuevas estaciones sísmicas (UB2, UB3 y UB4), formando la actual red del volcán Ubinas. Los datos son enviados por telemetría hasta la oficina central de Cayma en la ciudad de Arequipa. Para el presente trabajo, se ha efectuado el análisis de toda la actividad sísmica del proceso eruptivo (del 24/05/2006 hasta 31/12/2009), y se ha construido un extenso catálogo sísmico de 118694 eventos. Se han identificado y clasifica-

do 97836 eventos LP, 16373 Tremores; asimismo se han observado otro tipo de eventos como VTs e Híbridos que sumados hacen 4485 eventos. Además, se han identificado 162 eventos sobresalientes, los cuales corresponden a explosiones.

Según el análisis de las características de la sismicidad encontrada durante el proceso de erupción, se ha podido establecer tres etapas:

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

**Etapa 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 en comparación a la anterior.

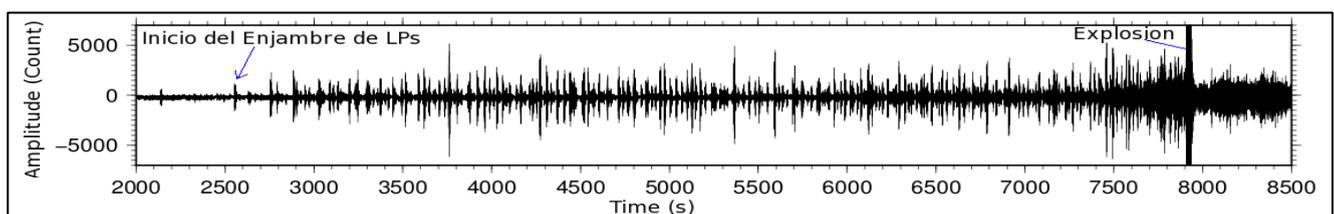
**La Etapa III** (del 01/09/2007 al 31/12/2009): baja sismicidad y ocurrencia de explosiones débiles y espaciadas en el tiempo, corresponde al final del proceso eruptivo.

Efectuando el análisis de la sismicidad, se observa que la ocurrencia de los eventos LP esta estrechamente asociada con las explosiones, a las cuales las preceden. Así por ejemplo, más de 1 y ½ horas antes de la explosión del 31/08/2006 10:11:49 UTC, se observa un incremento de eventos LP, en forma de enjambre (Fig. 2). Asimismo, se observa actividad tremorica que empiezan a ocurrir 10 min antes de la explosión y que continúa luego de la explosión. En otras explosiones, estos tremores pueden continuar hasta varias horas después de la explosión.

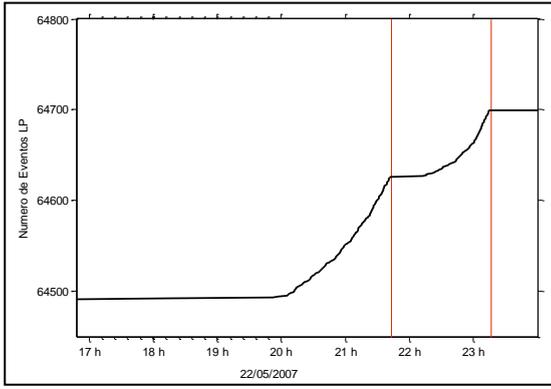
Habiéndose observado que esta secuencia se ha repetido en múltiples ocasiones, se puede entonces considerar a los enjambres de LPs como un fenómeno precursor a la ocurrencia de una explosión.

La Fig. 3 es un típico ejemplo del incremento de la sismicidad LP antes de las explosiones. Se ha ploteado el número acumulado de eventos LP registrados en función del tiempo para el día 22/05/2007 en que se produjeron hasta dos explosiones. Se observa que el incremento en el número de LPs se inicia cerca de dos horas antes de las explosiones de ese día, y luego de ocurrida la explosión disminuye drásticamente o se detiene.

Este tipo de comportamiento se presenta exclusivamente antes de las explosiones y parece ser un carácter precursor de las explosiones.



**Fig. 2** Enjambre de LPs antes de la explosión registrada el 31/08/2006 10:11:49.09 UTC, el enjambre se presenta con cerca de hora y media de anterioridad a la explosión y comparten características sísmicas (Forma de onda, duración, frecuencia, etc) muy similares



**Fig. 3** Número de eventos LP en función del tiempo. Se observa un notorio incremento en la ocurrencia de LPs cerca de dos horas antes de las explosiones ocurridas a las 21:42:46 y 23:16:20 UTC del 22/05/2007.

### 3 Metodología

De los métodos de pronóstico en vulcanológicos el Material Failure Forecast Method (FFM) o Método de Pronóstico por Fallo de Material es más extendido. 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 [Voight, 1988; Voight y Cornelius, 1991; Cornelius y Voight, 1994; Kilburn y Voight, 1998; Kilburn, 2003; Smith et al, 2007], son precedidos por un notorio ritmo acelerado de la sismicidad. Se ha afirmado con frecuencia que estas señales precursoras podría ser la base para el pronóstico del tiempo de fallo. Voight [1988] propone una relación entre la aceleración en un precursor  $\Omega$  (como la tasa de sismos), que varía como una función del tiempo  $t$ :

$$\frac{d^2\Omega}{dt^2} = K \left( \frac{d\Omega}{dt} \right)^\alpha \quad (1)$$

donde  $\alpha$  y  $K$  son constantes determinados empíricamente. Cornelius y Voight (1995) señalan que  $\alpha$  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 este supuesto, la ecuación se puede simplificar a:

$$1 / \left( \frac{d\Omega}{dt} \right) = K(t_f - t) \quad (2)$$

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

Uno de los parámetros mas utilizados por el FFM es el RSAM (Real-time Seismic Amplitude Measurement). Esta técnica es usada para caracterizar el cambio en la sismicidad de un volcán en tiempo real. El RSAM es una variable que se actualiza cada  $n$  datos y su cálculo es inmediato de acuerdo con la ecuación 3.

$$RSAM(iT) = \frac{1}{T} \sum_{t=iT-T/2}^{iT+T/2} |S(t)| \quad (3)$$

donde,  $T$  es el intervalo promedio (en nuestro caso cada minuto), y  $S(t)$  es la muestra de la traza sísmica.

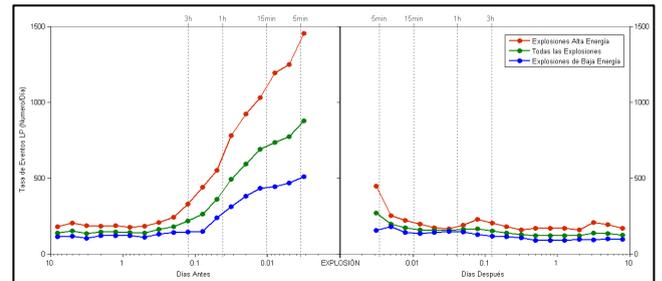
### 4 Sismicidad Pre-Eruptiva

Se han apilado las series temporales de la actividad LP que preceden y que siguen a todas las explosiones registradas en el volcán Ubinas, así como para las explosiones Fuertes y Débiles (clasificadas de acuerdo a su energía liberada). Ello nos permite 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, y que se puede escribir como:

$$R(t) = \frac{1}{TN_{ex}} \sum_{i=1}^{N_{ex}} \sum_{j=1}^N \Theta(t_i^{EX} - t_j^{LP} \epsilon[t, t + T]) \quad (4)$$

donde  $N_{ex}$  es el numero de explosiones en el catalogo,  $N$  es el número de eventos LPs en el catalogo,  $T$  es la duración del intervalo de tiempo considerado, y  $\Theta$  es una función tal que  $\Theta(P) = 1$  si  $P$  es verdadero y 0 de otro modo. Para cada intervalo,  $T$ , nosotros 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 (Fig. 4, izquierda). Luego de la explosión sigue una disminución significativa de la actividad LP, que desciende nuevamente al nivel de fondo (Fig. 4, derecha).



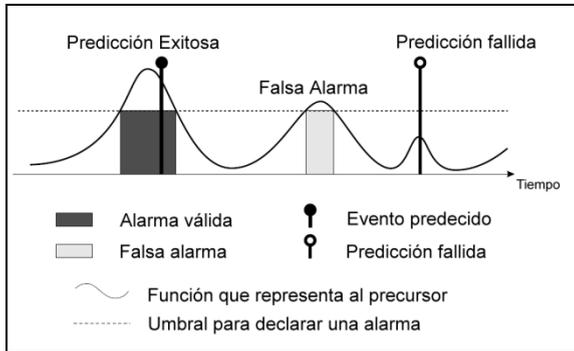
**Fig. 4** Apilamiento de la tasa de LPs antes y después de una EXPLOSIÓN, según la energía liberada

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.

### 5 Modelo de pronóstico

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 un esquema de predicción sencilla que fue propuesta por Grasso y Zaliapin, en el 2004 (Fig. 5), donde la tasa de

eventos LPs es calculado para una ventana de tiempo con una duración de  $D$ , si la tasa de eventos excede un umbral fijado  $N_c$ , una alarma es emitida para una duración de  $T_{aler}$ . Con este algoritmo se calcula la probabilidad de generar: Alarma válida (se presenta el precursor y ocurre el fenómeno), Falsa alarma (se presenta el precursor pero el fenómeno no ocurre) y Alarma fallida (no se evidencia el precursor pero ocurre el fenómeno).



**Fig. 5.** Esquemas de predicción y resultados de predicción (Modificado de Grasso et al, 2004)

La efectividad del precursor  $U$  viene definida como:

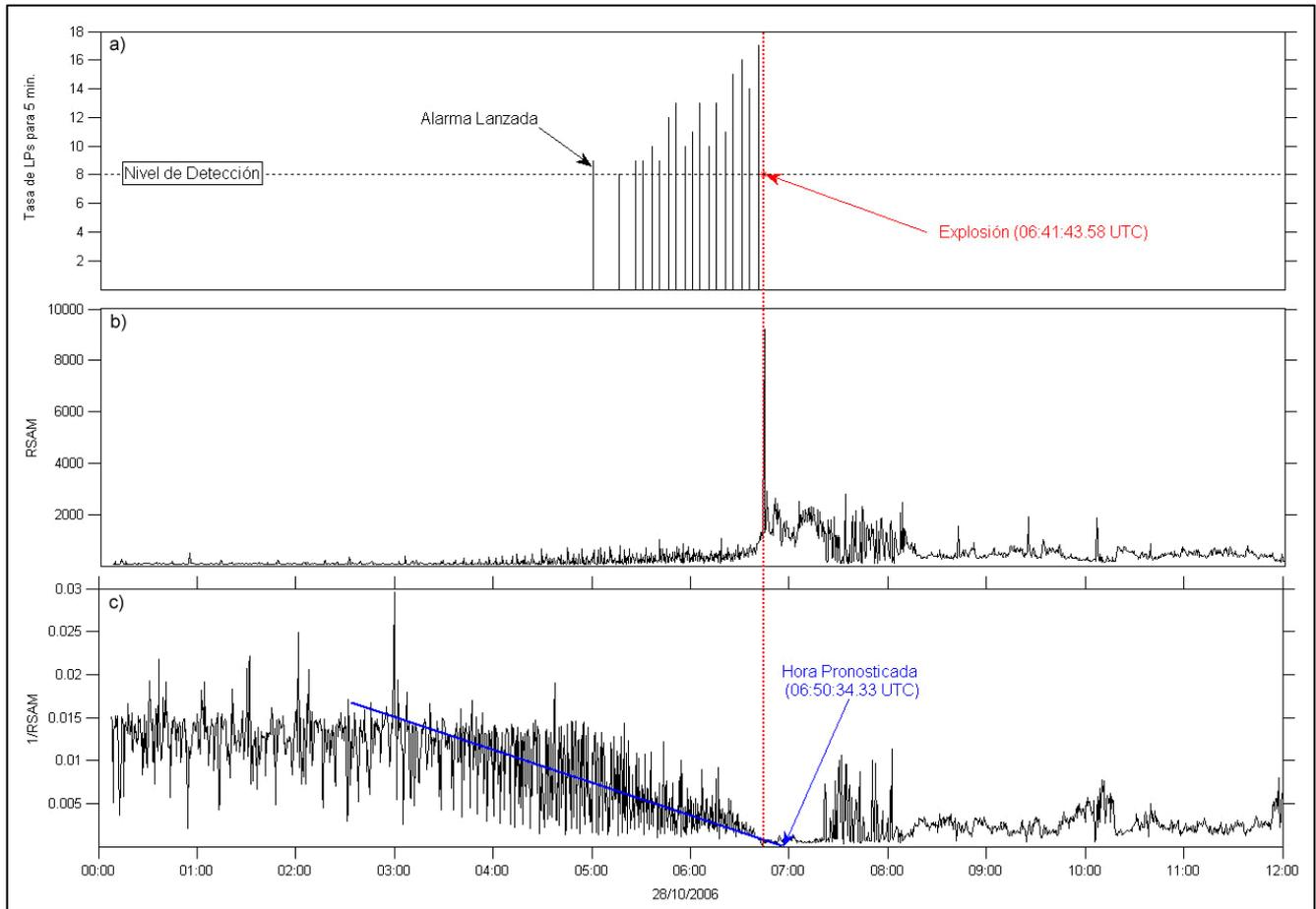
$$U = \frac{s}{f+m} \quad (5)$$

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 precusores 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  $T_{aler} = 1h$ ; 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.

## 5 Resultados

En nuestro esquema de predicción se calcula la tasa de LPs en ventanas de 5 min., si esta supera el umbral fijado; según la etapa; 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.



**Fig. 6** 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

	Numero de Alarmas	Numero de Aciertos	Numero de Falsas Alarmas	Numero Alarmas Fallidas	Efectividad U
<b>Etapa 1</b>	41	33	8	19	1.22
<b>Etapa 2</b>	37	32	8	8	2.46
<b>Etapa 3</b>	7	4	5	66	0.06

**Tabla 1.** Resultados de la efectividad del precursor para pronosticar las explosiones en las tres etapas del proceso eruptivo del volcán Ubinas periodo 2006 – 2009, donde los valores de la Efectividad, columna 6, dan valores mayores a 1, lo que indica que el incremento en la tasa de eventos LP es un precursor es fuerte en las dos primeras etapas, mientras que en tercera se comporta como un precursor muy débil.

Para la previsión de la hora de inicio de la explosión (Fig. 6), usamos el RSAM como elemento de análisis 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, por tanto el inverso del mismo tiende a cero, haciendo posible la proyección al eje del tiempo para obtener un estimado del momento en el cual se puede producir el fallo (explosión). Aunque el tiempo pronosticado para la explosión del 28/10/2006 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, resumido en la Tabla 1. De un total de 162 explosiones observadas en el catálogo, en la **etapa I** se registraron 52 explosiones, y el valor de la efectividad fue de  $U=1.22$ . En la **etapa II** se registraron 40 explosiones, y el valor  $U=2.46$ . En la **etapa III** se registraron 70 explosiones, 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 ( $U<1$ ).

## 6 Conclusiones

El uso del esquema de predicción propuesto por Grasso y Zaliapin en el 2004, combinado con el FFM (1/RSAM), ha demostrado ser una herramienta valiosa en el pronóstico de las explosiones registradas en el volcán Ubinas durante la última erupción, sobre todo en las explosiones más energéticas que se presentaron en la Etapa I y la Etapa II.

El apilamiento de la tasa de LPs, muestra que el precursor (incremento de la tasa de LPs) se presenta con 1-3 horas (~0.1 días) de anterioridad, siendo mayor en las explosiones fuertes, esto es bueno ya que son más propensos a ser predichos.

Los enjambres de LPs precursores se caracterizan por que los eventos tienen forma de la onda y contenido espectral muy similares. También, la tasa 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

## 7 Bibliografía

- [Araña et al., 1993] La Volcanología Actual, Volumen 21, Capítulo 5, Consejo Superior de Investigaciones Científicas CSIC, Madrid, España, primera edición, 1993, 277-386.
- [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.
- [Quintero, 2005] Quinteros A. Evaluación bayesiana de escenarios eruptivos a través del procesamiento de datos sísmicos. Tesis profesional, Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 45-60.
- [Rivera, 2008] Rivera M. Petrología y geoquímica de rocas de los Volcanes Misti y Ubinas. Informe Técnico, Instituto Geológico Minero Y Metalúrgico, 34 p.
- Rivera M., Thouret J-C., Macedo O., Finizola A., Davila J. & Gourgand A. (1997).- Ubinas, el volcán más activo del Perú desde 1552: reconocimiento geológico y evaluación de amenazas volcánicas actuales.- IX Congreso Peruano de Geología, Soc Geol del Perú, Volc Esp. 1, 489-492
- [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.
- [Traversa et al., 2011] Traversa P., Lengliné O., Macedo O., Metaxian J.P., Grasso J.R., Inza A. y Taípe E. Short Term Forecasting of Explosions at Ubinas Volcano, Peru. *Journal of geophysical research*, Vol. 116, 15 p.
- [Grasso y Zaliapin, 2004] Predictability of volcano eruption: Lessons from a basaltic effusive volcano. *Geophysical research letters*, vol. 31, 4 p.
- [Voight y Cornelius, 1991] Voight B. y Cornelius R. Prospects for eruption prediction in near real-time. *Nature* vol 350, 695-697