

Análisis de los métodos utilizados para la identificación automática de fases P y su aplicación a las señales sismo-volcánicas del Misti (Perú)

Riky Centeno¹, Gerardo Alguacil², Luz Garcia³ y Orlando Macedo¹

¹ Instituto Geofísico del Perú, Sede Arequipa. – rceneno@igp.gob.pe

² Instituto Andaluz de Geofísica, Universidad de Granada, España.

³ Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones, Universidad de Granada, España.

Palabras clave: *Picking*, curtosis, AIC, VT.

Introducción

A diferencia de los terremotos que se originan en el límite de placas tectónicas, los sismos asociados a ambientes volcánicos son los más difíciles de estudiar. Esto debido a que su fuente implica una dinámica de fluidos compleja, así como una ruptura de roca de todas las escalas y orientaciones; producto de ello, los trayectos de propagación de ondas suelen ser extremadamente heterogéneos, anisótropos y absorbentes: más aun, con topografías e interfaces irregulares como la de los volcanes (Aki, K., 1992).

Es por ello que, uno de los retos más importantes en sismología volcánica es determinar con la máxima precisión posible el momento de llegada de las diferentes fases sísmicas, en especial las ondas P y S, así como otros tipos de ondas (reflejadas, refractadas superficiales, etc.). Pero un análisis de este tipo demanda mucho tiempo y recurso humano calificado. Sin embargo, un gran volumen de información puede hacer que este análisis (manual) sea tedioso y subjetivo. Este último, debido a la inconsistencia de lectura fases asociadas a diferentes analistas.

En los últimos años se han desarrollado diferentes algoritmos que tratan de complementar el trabajo humano con modernos sistemas de reconocimiento automático de fases sísmicas. La mayoría desarrollados para un determinado conjunto de datos o para un problema en particular, como: la alerta temprana de terremotos, localización de sismos en tiempo real, tomografía sísmica, etc. Y solo unos cuantos fueron ampliamente difundidos en la comunidad científica.

Este trabajo tiene como propósito fundamental dar solución al problema de la identificación automática de fases P en señales sismo-volcánicas: tomando como referencia los sismos del volcán Misti (Perú). Para ello, se realizó un análisis de cinco enfoques muy utilizados en la identificación automática de la llegada de onda P. Seguidamente, se hará un análisis comparativo del desempeño de los mismos. Finalmente, se propone un algoritmo robusto para la identificación automática de fases P, como una herramienta útil en la alerta temprana de erupciones volcánicas de la zona sur del Perú, y aprovechando la consistencia y rapidez del método, utilizarlo en otro

tipo de estudios muy útiles como una tomografía sísmica.

Datos

Fueron seleccionados 150 sismos VT registrados por la red de estaciones sísmicas del volcán Misti (MISA, MISC, MISD, MISE, MISF, MISG), los cuales fueron localizados con 655 lecturas de fases P y 573 de S (Figura 1).

Estas lecturas, sobre todo de la onda P, se utilizaron como referencia al momento de evaluar similitudes con las obtenidas automáticamente. Permitiendo probar la robustez de los diferentes algoritmos de *picking* automático utilizados.

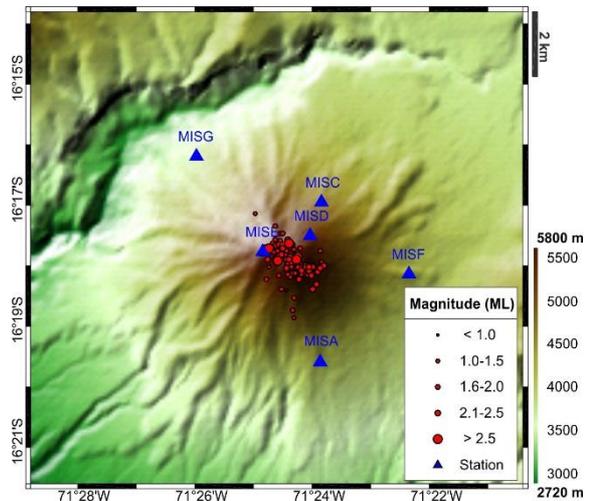


Fig. 1 – Distribución de la red sísmica de vigilancia sísmica del volcán Misti (los triángulos en azul). Los círculos rojos de diferente tamaño corresponden a la localización y magnitud de los 150 sismos seleccionados para este estudio. Estos sismos tienen magnitudes menores a 2.8 (ML) y con profundidades entre 1 y 6km, por debajo del cráter del volcán.

Metodología

Se trabajó en dos etapas: pre-procesamiento y aplicación de los métodos. En la primera etapa, los eventos fueron segmentados en ventanas de 50 segundos alrededor de la llegada de cada evento, esto tratando de evitar la ocurrencia de más de un evento por traza o ventana de análisis, luego se eliminó la media y tendencia de los datos. Seguidamente, con el

fin de realzar la llegada de ondas P y atenuar el ruido de fondo, se aplicó la potencia específica instantánea (Olea et al, 2011; Alguacil y Vidal, 2012). Para ello, antes fue necesario definir un filtro óptimo que resalte la energía espectral útil de las señales, esto en función de la relación espectral señal-ruido (SSNR); obteniéndose las siguientes bandas de frecuencia, por estación: MISA, 1-17Hz; MISC, 1-23Hz; MISD, 1-27Hz; MISE, 1-22Hz; MISF, 1-12Hz; y MISG, 1-17Hz. Al final de esta etapa, se obtuvieron dos tipos de datos: los originales y los mismos realizados.

En la segunda etapa se aplicaron seis métodos de *picking* automático de ondas P: el basado en la energía, curtosis(K), criterio de la información Akaike (AIC), periodo predominante amortiguado (T^{pd}) y AMPA (algoritmo de *picking* multibanda adaptativo) y uno propuesto en este estudio, AR-K (una combinación de procesos autorregresivos y la curtosis). El método de la energía consiste en comparar muestra a muestra la señal, entre un valor actual y uno predicho a partir de muestras anteriores; si la relación entre ambas supera un valor umbral, entonces se declara una posible llegada de fase. Este es el mismo principio por el cual se basan la mayoría de algoritmos convencionales de tipo STA/LTA, ampliamente utilizados en la identificación automática de ondas P (Allen, 1978,1982; Baer y Kradolfer, 1987; Lomax et al., 2012; Vassallo et al., 2012; Chen y Holland, 2016). El método de la curtosis asume que la señal, en ausencia de un terremoto, tiene una distribución aproximadamente gaussiana y, cuando ocurre un terremoto, las

propiedades estadísticas de la señal cambian; esto se evidencia calculando los parámetros característicos de una distribución en una ventana móvil y del cual se determina la llegada de fase P (p. ej. Panagiotakis et al., 2008; Baillard et al., 2014; Hibert et al., 2014). El método AIC consiste en buscar un mínimo global de la función AIC (Criterio de la información Akaike) entre dos segmentos del sismograma, antes y después de la llegada de la onda P (Maeda, 1985; y Chen y Holland, 2016). El método T^{pd} consiste en calcular el periodo predominante en una serie de ventanas móviles a lo largo de toda la señal sísmica; entendiéndose que el periodo dominante del ruido y la onda P, deben ser distintos. El método AMPA, en un comienzo, busca reducir el ruido de la señal a través de la mejora de su envolvente en distintas bandas de frecuencia. Luego, se busca una forma de envolvente típica de una fase P, es decir, trata de reconstruir una llegada de fase impulsiva de la señal y en el preciso instante en que la nueva envolvente se hace mas impulsiva se declara la llegada de la onda P (Álvarez et al. 2013, Romero et al. 2016). Por último, el método AR-K se basa en la estacionariedad del ruido y que se puede modelar mediante un proceso autorregresivo (AR); si, se asume que el residuo o error de predicción es aleatorio y tiene una distribución gaussiana, entonces, la “curtosis” del residuo será más sensible a la llegada de la onda P, que solo a través del sismograma.

Para la aplicación de cada uno de los métodos, así como el procesamiento de las señales se utilizó Python (obspsy) y Matlab (Figura 2).

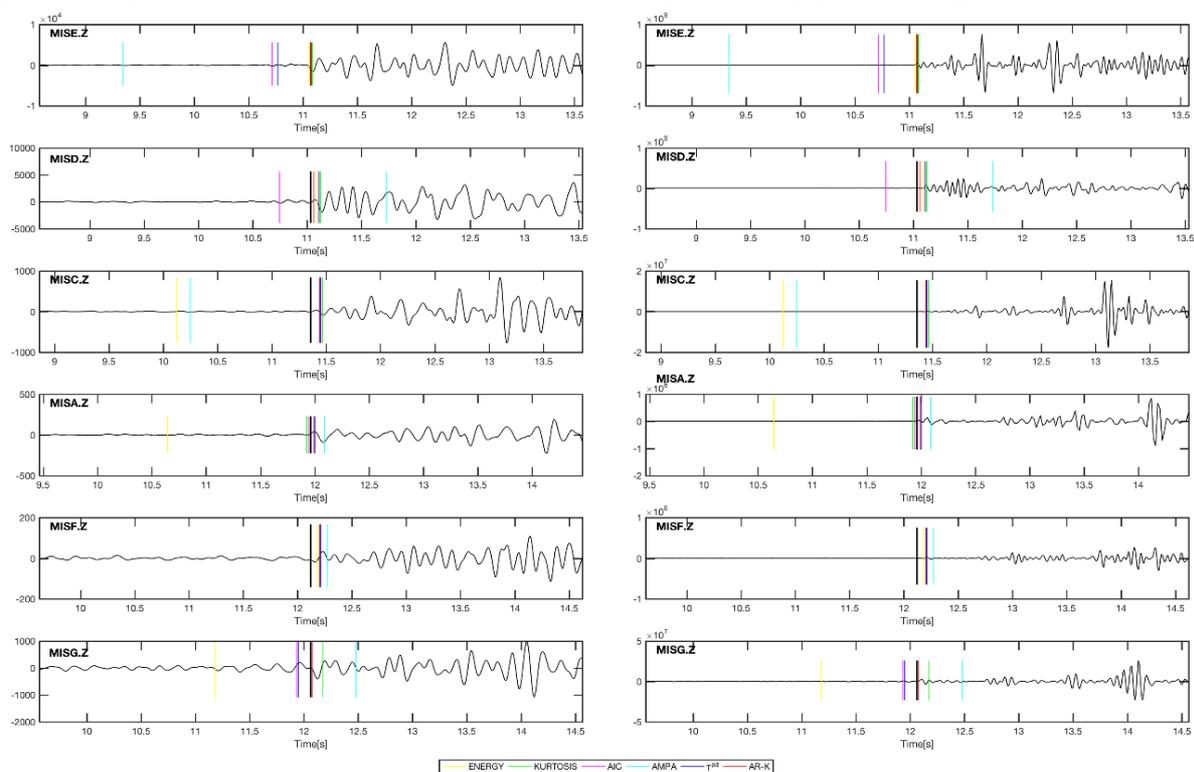


Fig. 2 – Desempeño de los seis métodos de *picking* automático de onda P frente al obtenido manualmente (línea de color negro), para un evento representativo registrado en la componente Z de todas las estaciones de la red Misti, en a) su versión original, y b) los mismos, pero utilizando la potencia específica instantánea. La línea en amarillo, corresponde a la onda P con el método de la energía; la verde, con la curtosis; la magenta, con AIC; la celeste, con AMPA; la azul, con T^{pd}; y la roja con el método AR-K

Resultados y su discusión

Los resultados muestran el buen desempeño del método propuesto AR-K, el cual demostró ser un método robusto en términos de detección y precisión. Se identificó automáticamente la llegada de la onda P con un margen de error medio de $\pm 0.2s$ (segundos) con el 92% de las trazas realizadas y un 90%, con las trazas originales. Además, se obtuvo una precisión muy buena, con un residuo medio mínimo $0.02 \pm 0.02s$ (media y desviación estándar), con los datos originales y $0.01 \pm 0.02s$, con los datos realizados.

En segundo lugar, destaca el método AMPA con una efectividad del 81% con los datos originales y un 84% con los datos realizados. En tercer lugar, destaca el método T^{pd} con una efectividad del 71%, con los datos originales y un 85%, con los realizados. Los métodos de energía y curtosis mostraron tener una menor cantidad de detecciones aceptables, así como una menor precisión que el resto de métodos; con un residuo medio de $0.35 \pm 0.34s$. El método AIC, funciona de regular a bien, la única desventaja de este método es su lentitud respecto a los demás.

Finalmente, se propone una combinación de los métodos AR-K, AMPA y T^{pd}, para la identificación automática de la onda P para los sismos del volcán Misti. Debido a que estos dos últimos son mucho más rápidos que AR-K y de esta manera, conseguir rapidez y precisión. De igual forma estos métodos pueden adecuarse muy bien a las señales del resto de volcanes del sur del Perú.

Agradecimientos

Agradecer de manera especial al Instituto Geofísico del Perú, por permitirme trabajar con los datos sísmicos del volcán Misti, desde los inicios de mi carrera. De la misma manera, al Instituto Andaluz de Geofísica y al Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones de la Universidad de Granada (España) por el apoyo invaluable a mi trabajo de investigación.

Referencias

- Aki, K., 1992. State of the art in volcanic seismology. In: Gasparini, P., Scarpa, R., Aki, K. (Eds.), *Volcanic Seismology*. IAVCEI Proc. Volcanol. 3, 3-10.
- Alguacil, G., Vidal, F., 2012. Medidas Instrumentales De La Intensidad Del Movimiento Del Suelo. Aplicación A Terremotos Europeos. En *Homenaje A La Profesora María Dolores Romacho Romero*, pp 15-32. Universidad De Almería.
- Alvarez, I., Garcia, L., Mota, S., Cortes, G., Benitez, C., de la Torre, A., 2013. An automatic P-phase picking algorithm based on adaptive multiband processing. *Geosci. Remote Sens. Lett.*, IEEE 10, 1488–1492.
- Baillard, C., Crawford W. C., Ballu V., Hibert C., and Mangeney A., 2014. An automatic kurtosis-based P- and S-phase picker designed for local seismic networks, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 104, no. 1, 394–409.
- Chen, C., and Holland A. A., 2016. PhasePapy: A Robust Pure Python Package for Automatic Identification of Seismic Phases, *Seismological Research Letters*, 87(6).
- Baillard, C., Crawford W. C., Ballu V., Hibert C., and Mangeney A., 2014. An automatic kurtosis-based P- and S-phase picker designed for local seismic networks, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 104, no. 1, 394–409.
- Hibert, C., Mangeney A., Grandjean G., Baillard C., Rivet D., Shapiro N. M., Satriano C., Maggi A., Boisser P., Ferrazzini V., and Crawford W., 2014. Automated identification, location, and volume estimation of rockfalls at Piton de la Fournaise volcano, *J. Geophys. Res.* 119, no. 5, 1082–1105.
- Maeda, N., 1985. A method for reading and checking phase times in autoprocesing system of seismic wave data, *Zisin* 38, no. 2, 365–379.
- Panagiotakis, C., Kokinou E., and Vallianatos F., 2008. Automatic P-phase picking based on local- maxima distribution, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 46, no. 8, 2280–2287.
- Romero, J.E., Titos, M., Bueno, A., Alvarez, I., Garcia, L., de la Torre, A., Benitez, M.C., 2016. APASVO: a free software tool for automatic P-phase picking and event detection in seismic traces. *Comput. Geosci.* 90, 213–220.