



**SEGURIDAD**

SECRETARÍA DE SEGURIDAD  
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



**CNPC**

COORDINACIÓN NACIONAL  
DE PROTECCIÓN CIVIL



**CENAPRED**

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN  
DE DESASTRES

**SECRETARÍA DE SEGURIDAD Y PROTECCIÓN CIUDADANA  
COORDINACIÓN NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL  
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES**

**LOCALIZACIÓN DE EVENTOS DE PERIODO LARGO (LPS Y TREMOR ARMÓNICO)  
PARA EL DIAGNÓSTICO Y PRONÓSTICO DE LA ACTIVIDAD ERUPTIVA EN EL  
VOLCÁN POPOCATÉPETL**

Subdirección de Riesgos Volcánicos  
Dirección de Investigación

**Contenido**

- Resumen
- Introducción
- Metodología
- Pruebas de localización
- Sistema de localización de eventos en el volcán Popocatepetl
- Localización de eventos
- Conclusiones
- Referencias

**Resumen**

Se llevaron a cabo localizaciones de explosiones, exhalaciones y sismos volcanotectónicos en el volcán Popocatepetl empleando las metodologías de movimiento de partícula y atenuación por amplitud sísmica de ondas de cuerpo y ondas superficiales. Primero, se verificaron las localizaciones de algunas explosiones y sismos volcanotectónicos donde se pudo inferir de alguna manera su ubicación. Para el caso de las localizaciones de las explosiones se emplearon las ocurridas en febrero y marzo de 2019, las cuales estuvieron asociadas a la destrucción de un domo de 200 m de diámetro, las que se supuso que debieron ocurrir cerca del suelo del cráter interno. Mientras que las localizaciones de los sismos volcanotectónicos registrados de octubre a diciembre de 2021 se contrastaron con el método de primeros arribos. Las localizaciones de los dos tipos de eventos presentaron buenas estimaciones a las esperadas y conocidas.

En la técnica de movimiento de partícula se generó una malla para mostrar, de manera más clara la zona de la posible fuente, de acuerdo con la dirección de fuente de cada estación, esto se hizo con y sin rotación de las componentes en dirección al centro del cráter del





**SEGURIDAD**

SECRETARÍA DE SEGURIDAD  
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



**CNPC**

COORDINACIÓN NACIONAL  
DE PROTECCIÓN CIVIL



**CENAPRED**

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN  
DE DESASTRES

Popocatépetl. Los resultados mostraron que se tuvo una mejor estimación cualitativa cuando se rotan las componentes. Sin embargo, ambos resultados definieron de buena forma la zona de fuente de las explosiones. Para las localizaciones de atenuación por amplitud se calcularon parámetros como factores de sitio para las diferentes estaciones, usando las codas de sismos regionales. Además, se determinó el factor de calidad del volcán ( $Q=25$ ) para garantizar mejores estimaciones en las localizaciones. Presentando menor porcentaje de error en la localización de atenuación por amplitud de ondas de cuerpo.

El sistema de localización de eventos de Popocatépetl, tomó como base estas dos metodologías para estimar la localización de eventos, para un mejor análisis e interpretación el sistema grafica de manera conjunta ambos resultados. El sistema fue escrito en lenguaje de programación de Matlab. Con el sistema se localizaron explosiones y exhalaciones registradas en noviembre y diciembre de 2021. La localización de las explosiones se encontró alrededor de los 4450 m de altura sobre el nivel del mar en la parte sur del volcán. En las exhalaciones se tomaron los eventos de mayor amplitud, con estos eventos se pudo distinguir un posible conducto.

## Introducción

El volcán Popocatépetl es un estratovolcán ubicado entre los límites territoriales de los estados de Morelos, Puebla y México, y desde el 21 de diciembre de 1994 permanece activo. Durante estos más de 26 años de actividad el volcán ha presentado diferente tipo de actividad sísmica como: eventos de periodo largo (LP), eventos de alta frecuencia, señales híbridas, tornillos, tremor (armónico y de alta frecuencia), explosiones y sismos volcanotectónicos (VT).

Cada señal proveniente del volcán está asociada a diferentes procesos físicos en su interior (movimiento de fluidos y rompimiento de roca). A diferencias de los sismos volcanotectónicos en los que se puede conocer la localización de la fuente a través de metodologías convencionales utilizadas en sismos, para el resto de las señales no se cuenta con alguna técnica definida para estimar su ubicación. Sin embargo, se han empleado diferentes métodos en diversos volcanes para conocer el origen de la fuente.

Dentro de las técnicas más conocidas encontramos la que se obtienen del movimiento de partícula y por medio de la atenuación por amplitud sísmica. De manera general, la primera considera la polarización de las ondas sísmicas indicando para cada plano la dirección de la posible fuente mientras que la segunda considera las amplitudes sísmicas registradas en cada estación sísmica para encontrar la localización de la fuente. Para tener con buenas estimaciones se debe contar con una adecuada cobertura de estaciones sísmicas alrededor del volcán.

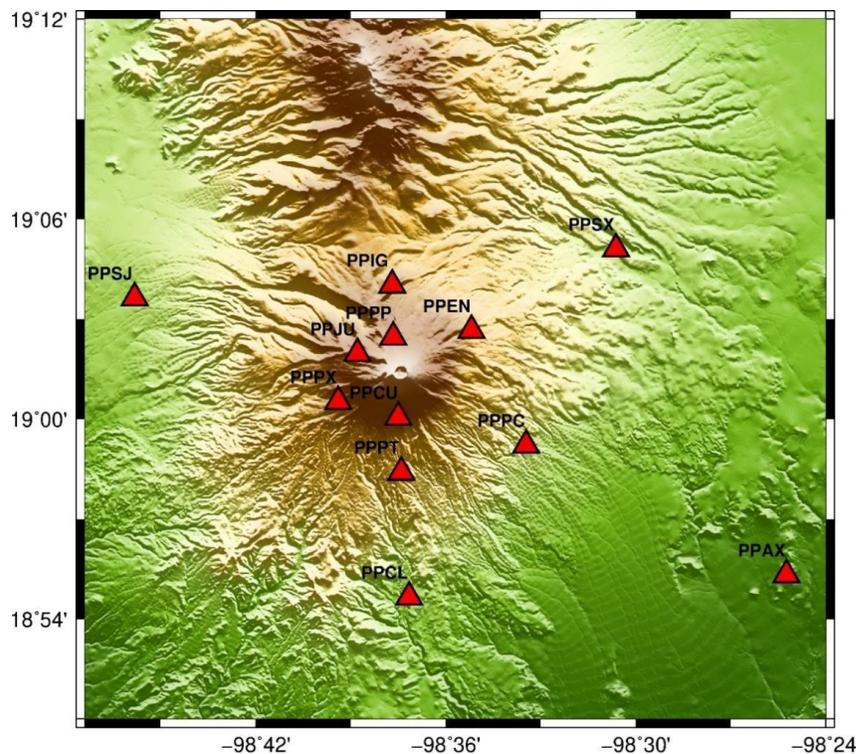
El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) es la institución responsable de monitorear al Popocatépetl, así como de la emisión de alertas cuando sea necesario. En la actualidad se cuenta con 12 estaciones sísmicas, en un radio de aproximadamente 14 km (Tabla 1, Figura 1).



Para las explosiones de febrero y marzo de 2019 y sismos volcanotectónicos registrados de noviembre a diciembre de 2021 se estimó su posible localización por medio de técnicas de movimiento de partícula y atenuación por amplitud sísmica. Se hicieron adecuaciones a las metodologías de acuerdo con las características que se tiene en el Popocatépetl y se obtuvo un sistema de localización de eventos con el propósito de ser una herramienta en el diagnóstico y el pronóstico de la actividad del volcán Popocatépetl.

**Tabla 1 Coordenadas de las estaciones sísmicas alrededor del volcán Popocatépetl.**

Estación	Nomenclatura	Longitud [°]	Latitud [°]	Altura [m]
Canario	PPPP	-98.6277	19.0411	4311
Cuervos	PPCU	-98.6249	19.0010	4186
Juncos	PPJU	-98.6438	19.0330	4416
Chipiquixtle	PPPX	-98.6568	19.0095	3975
Encinos	PPEN	-98.5875	19.0441	3362
Tlamacas	PPIG	-98.6282	19.0670	3950
Tetexcaloc	PPPT	-98.6237	18.9742	3317
Colibrí	PBC	-98.5577	18.9869	2672
Cuilotepec	PPCL	-98.6192	18.9109	2402
Santiago Xalitzintla	PPSX	-98.5103	19.0851	2625
San Juan Tehuixtitlán	PPSJ	-98.7637	19.0607	2470
Atlixco	PPAX	-98.4207	18.9221	1902



**Figura 1 Localización de las estaciones sísmicas de la red del Popocatépetl operada por el CENAPRED**

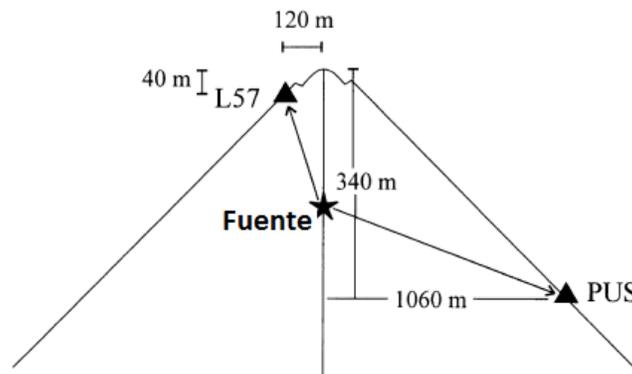


## Metodología

### Movimiento de partícula

Esta técnica permite conocer el movimiento de partícula en cada estación debido a eventos originados en el volcán (LP, tremor, explosiones, derrumbes). El movimiento define la dirección preferencial, es decir, indica la trayectoria que siguió la onda sísmica desde la fuente hasta la estación sísmica. De acuerdo con [Gómez \(2009\)](#) el movimiento de partícula coincide con el acimut de propagación de la energía para las fases compresionales P y es perpendicular al acimut de propagación para las fases transversales S. Mientras que las ondas superficiales de Rayleigh son polarizadas elípticamente en el plano Vertical-Radial. Las ondas Love también son polarizadas linealmente, pero en un plano horizontal perpendicular a la dirección de la onda. Los gráficos de movimiento de partícula se realizan en tres planos usualmente en: este-norte (E-N), este-vertical (E-V) y norte-vertical (N-V).

Al contar con una red de estaciones sísmicas que presente una buena cobertura acimutal en el volcán se puede definir la zona de la posible fuente para cada plano (E-N, E-V y N-V). No obstante, se han realizado localizaciones de eventos con solo dos estaciones en el volcán de Merapi, Indonesia ([Hidayat et al., 2000](#)). Para este caso, la intersección de las trayectorias en cada estación define la localización de la fuente (Figura 2).



**Figura 2 Localización de evento en el volcán Merapi, Indonesia, usando el movimiento de partícula de las estaciones L57 y PUS. Tomada de Hidayat et al. (2000)**

Con esta metodología se han propuesto localizaciones de diferentes eventos (LP, tremor y explosiones) en diversos volcanes del mundo (ej. Tremor del volcán Aso, Japón, [Kawakatsu et al., 2000](#); LP en el volcán Stromboli, Italia, [Neuberg y Luckett, 1996](#); explosiones en Stromboli, [Del Pezzo et al., 1992](#); muy largo periodo VLP y multi fase (MP) en el volcán Merapi, Indonesia, [Hidayat et al., 2000](#); tremor del Popocatépetl, [Arámbula, 2002](#); LP en el Popocatépetl, [Gómez, 2009](#)) en varios de ellos se ha calculado la polarización de las ondas a partir de la linealidad



con el propósito de resaltar la dirección de la trayectoria. Sin embargo, el movimiento de partícula tiene la capacidad de definir en buena medida el área de la posible fuente que ha sido empleado para confirmar resultados de polarización (Gómez, 2009).

**Atenuación por amplitud sísmica**

A diferencia de la técnica pasada, esta metodología utiliza las amplitudes sísmicas. Para conocer la localización de la fuente se calcula la atenuación por amplitud sísmica en función de la distancia suponiendo ondas de cuerpo o superficiales. La atenuación por amplitud ha sido empleada en distintos volcanes para localizar eventos de alta frecuencia (flujos piroclásticos, Jolly et al., 2002; derrumbes, Arámbula, 2011), periodo largo (LP, Battaglia y Aki, 2003; tremor, Battaglia et al., 2005 y explosiones, Arámbula, 2011) e híbridos (Battaglia y Aki, 2003).

Para conocer la localización de los eventos se emplean leyes de atenuación de las amplitudes en función de la distancia  $A(r)$  para ondas de cuerpo y ondas superficiales. Las cuales se definen de la siguiente manera:

ondas de cuerpo 
$$A(r) = A_0 \frac{e^{-Br}}{r}, \tag{1}$$

ondas superficiales 
$$A(r) = A_0 \frac{e^{-Br}}{\sqrt{r}}. \tag{2}$$

Donde  $B$  es,  $B = \pi f / Q\beta$

$A_0$  es la amplitud en la fuente,  $r$  es la distancia de la fuente a la estación,  $Q$  es el factor de calidad,  $\beta$  es la velocidad de las ondas sísmicas y  $f$  es la frecuencia de la onda de interés.

El método consiste en proponer una malla con posibles fuentes hasta encontrar la mejor estimación, el porcentaje de error ( $E$  (%)) del mejor modelo se expresa como (Battaglia y Aki, 2003):

$$E (\%) = 100 * \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (A_{best}^n - A_{obs}^n)^2}{\sum_{n=1}^N (A_{obs}^n)^2}} \tag{3}$$

Un aspecto importante para considerar en la estimación de la localización de eventos es el efecto de sitio de cada estación. Para conocer este factor, normalmente se obtiene de codas de sismos regionales. La amplificación entre dos estaciones puede ser determinada, si la ventana de análisis es la misma en un rango de frecuencias definido (Arámbula, 2011). Para ello

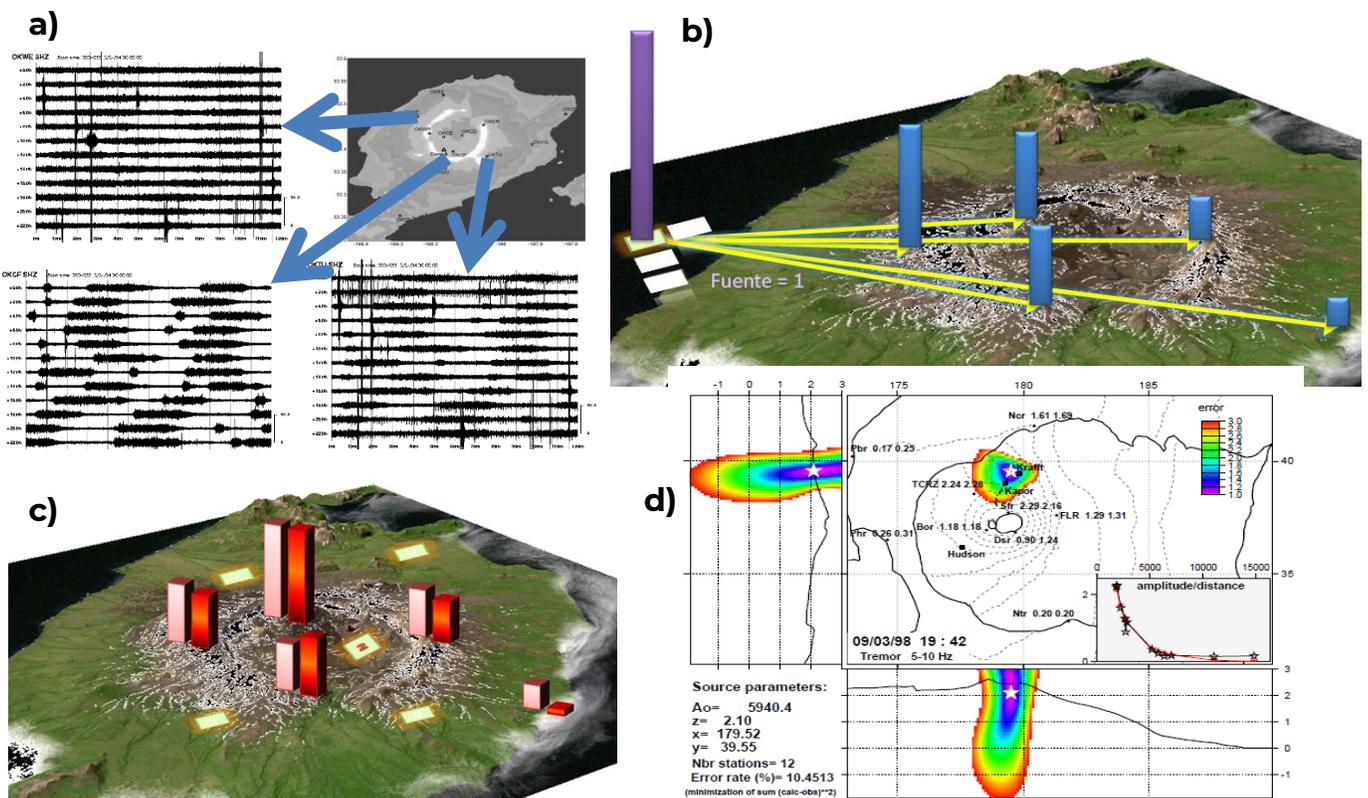


se usa el doble tiempo de arribo de la onda S (Rautian y Khalturin, 1978). Así que, el cociente espectral de la coda de dos estaciones sísmicas en una ventana de tiempo mostrará solo las amplificaciones de sitio en las dos estaciones sin considerar los efectos de fuente y trayectoria. Se puede usar los cocientes del Root-Mean-Square (RMS) de una ventana fija (Battaglia y Aki, 2003) para estimar los factores de amplificación de sitio:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N A_i^2} \quad (4)$$

donde  $A_i$  es la amplitud de la señal al tiempo  $i$ , y  $N$  es el número total de muestras. Cuando se utiliza un mayor número de codas de sismos se tiene una mejor estimación de los factores de sitio.

Conociendo estos parámetros, el método propone una malla de posibles fuentes, para cada una de ellas se calcula la curva de atenuación. Posteriormente, los resultados se comparan con las amplitudes observadas, hasta encontrar el mejor ajuste (Figura 3).



**Figura 3 Localización de eventos por atenuación por amplitud: a) lectura de datos y amplitud sísmica, b) malla propuesta de fuentes, c) cálculo de amplitudes para fuente y d) mejor ajuste en amplitud, parámetros de la fuente y curva de atenuación. Modificado de Battaglia et al. (2005)**



## Pruebas de localización

### Datos

La red sísmica del Popocatepetl está compuesta por 12 estaciones de banda ancha (Figura 1) ubicadas en un radio de 14 km alrededor del cráter del volcán. Sin embargo, actualmente no están operando todas y algunas estaciones no registran adecuadamente los eventos de baja amplitud. Por lo que, para estimar la localización de eventos por medio del movimiento de partículas y atenuación por amplitud sísmica, se utilizaron en promedio seis estaciones, las más cercanas al cráter (PPPP, PPJU, PPIG, PPCU, PPPT y PPCL).

Primero, se verificaron las localizaciones de una explosión y un sismo volcanotectónico debido a que se puede inferir la ubicación de su respectiva fuente. En el caso de las explosiones, se procesaron las que ocurrieron de febrero a marzo de 2019, las cuales estuvieron asociadas a la destrucción de un domo de 200 m de diámetro, estas se considera que ocurrieron cerca del nivel del cráter interno. Para los sismos VT se comparó con la localización tradicional de sismos que se realiza con base en los primeros arribos. Cabe destacar que ambos eventos presentan diferentes frecuencias características por lo que se hicieron adecuaciones para poder estimar la localización. Posteriormente, se hicieron algunas localizaciones de los eventos más representativos del año 2021.

### Localización de explosiones

Se estimó la localización de una de las explosiones más relevantes del 2019, dicha explosión estuvo también asociada a la destrucción del domo de 200 m de diámetro emplazado en febrero de 2019. La explosión tuvo lugar el 1 de marzo a las 03:34 h local, arrojando material incandescente sobre las laderas del volcán a una distancia de 2 km con respecto del cráter (Figura 4).

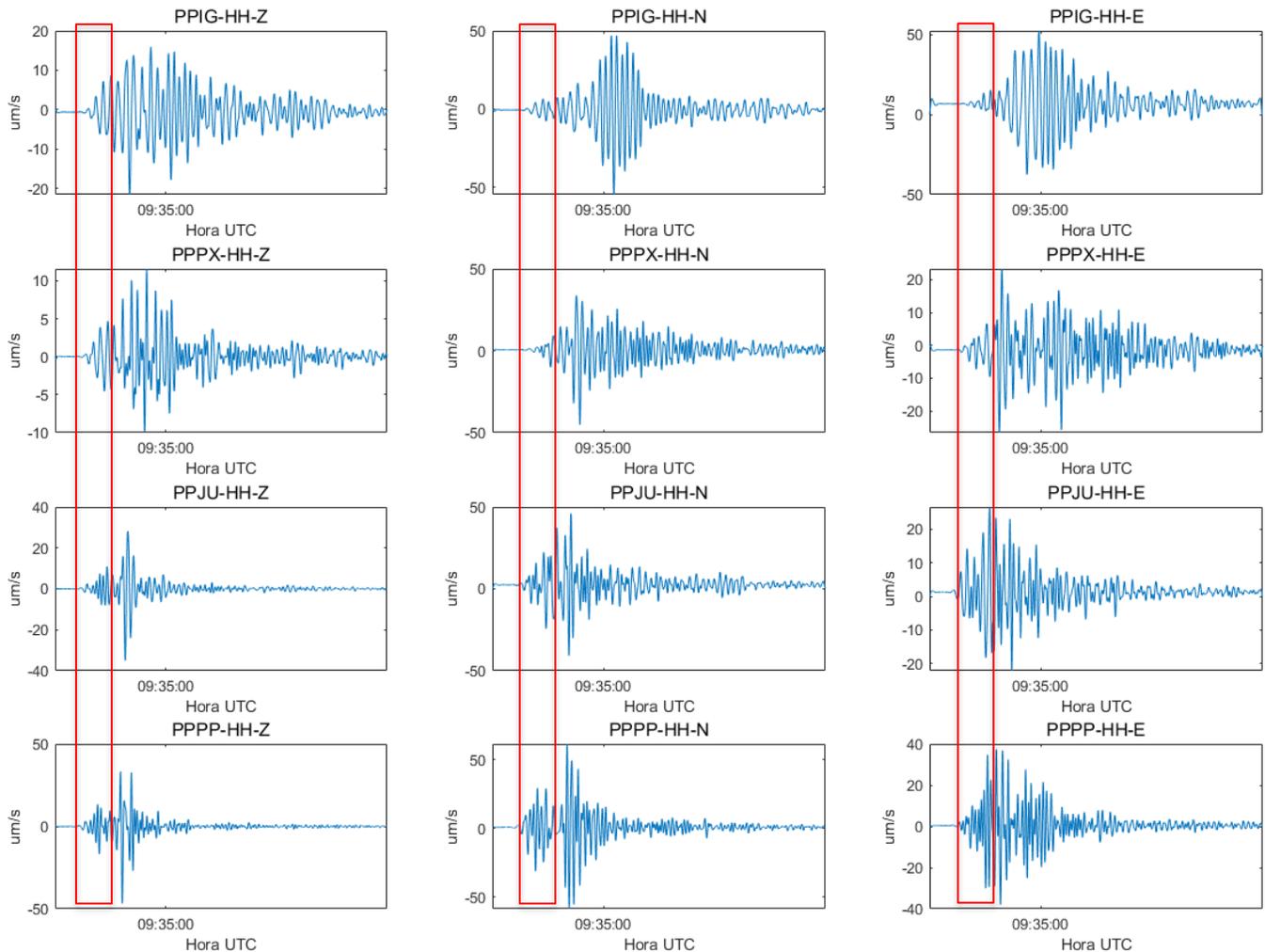


**Figura 4 Explosión del 1 de marzo de 2021 asociada también a la destrucción de domo**



a) Movimiento de partícula

Para estimar la zona de la posible fuente con la metodología del movimiento de partícula. Primero, se seleccionó la ventana de interés (3 segundos), después, se aplicó un filtro pasa bandas de orden 4. Debido a que las explosiones presentan una frecuencia característica de entre 1 y 3 Hz, este fue el rango del filtro utilizado, esto se aplicó a cada estación con sus respectivas componentes (Figura 5).



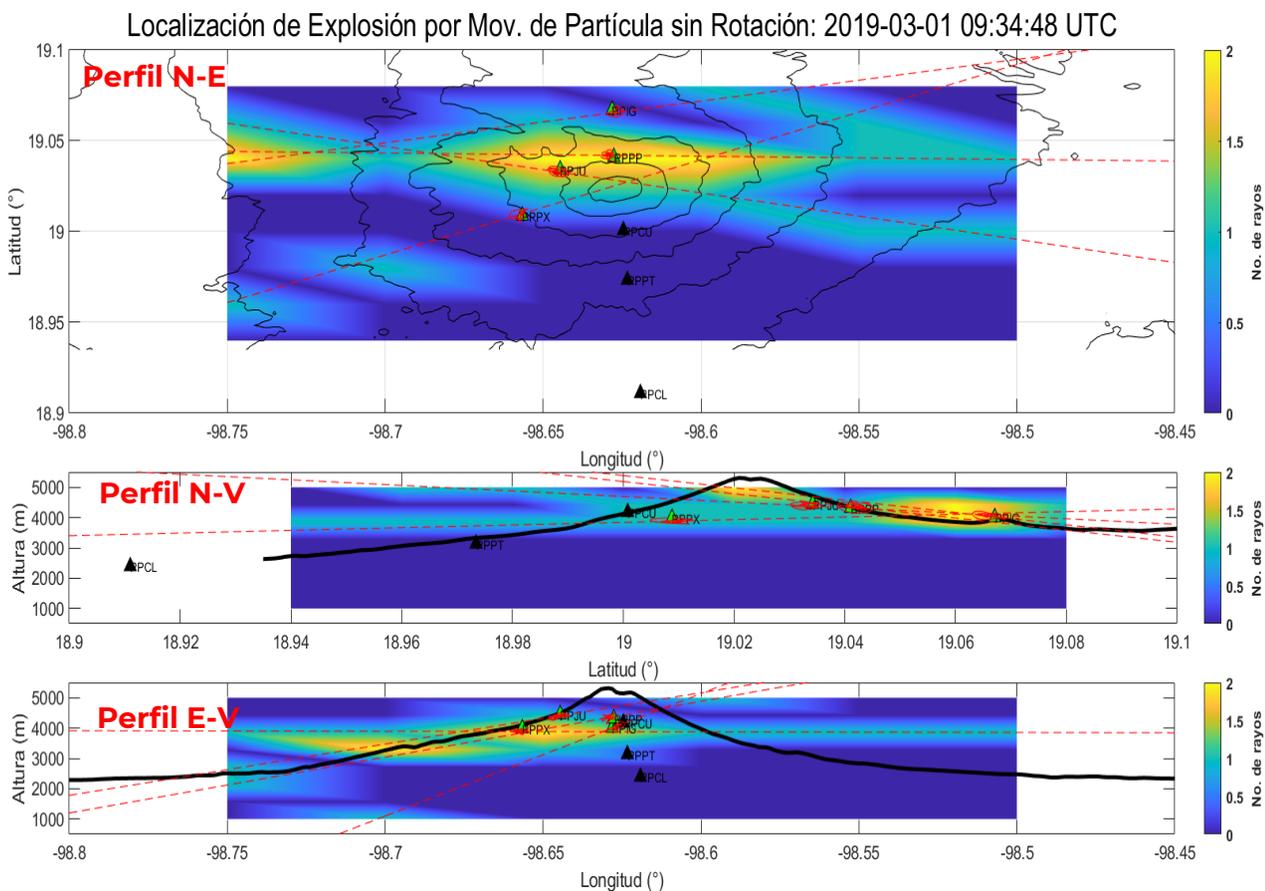
**Figura 5 Explosión del 1 de marzo, registrada en PPIG, PPPX, PPJU y PPPP en sus tres componentes (vertical, norte y este). Señales filtradas de 1 a 3 Hz, en cuadro rojo se tiene una longitud de ventana de 3 segundos utilizada para el cálculo del movimiento de partícula**

Posteriormente, se calculó el movimiento de partícula en cada estación en sus tres planos E-V, N-V y E-N. También se rotaron las componentes hacia el centro del cráter del volcán para tener las componentes: radial, transversal y vertical; y obtener después su movimiento de

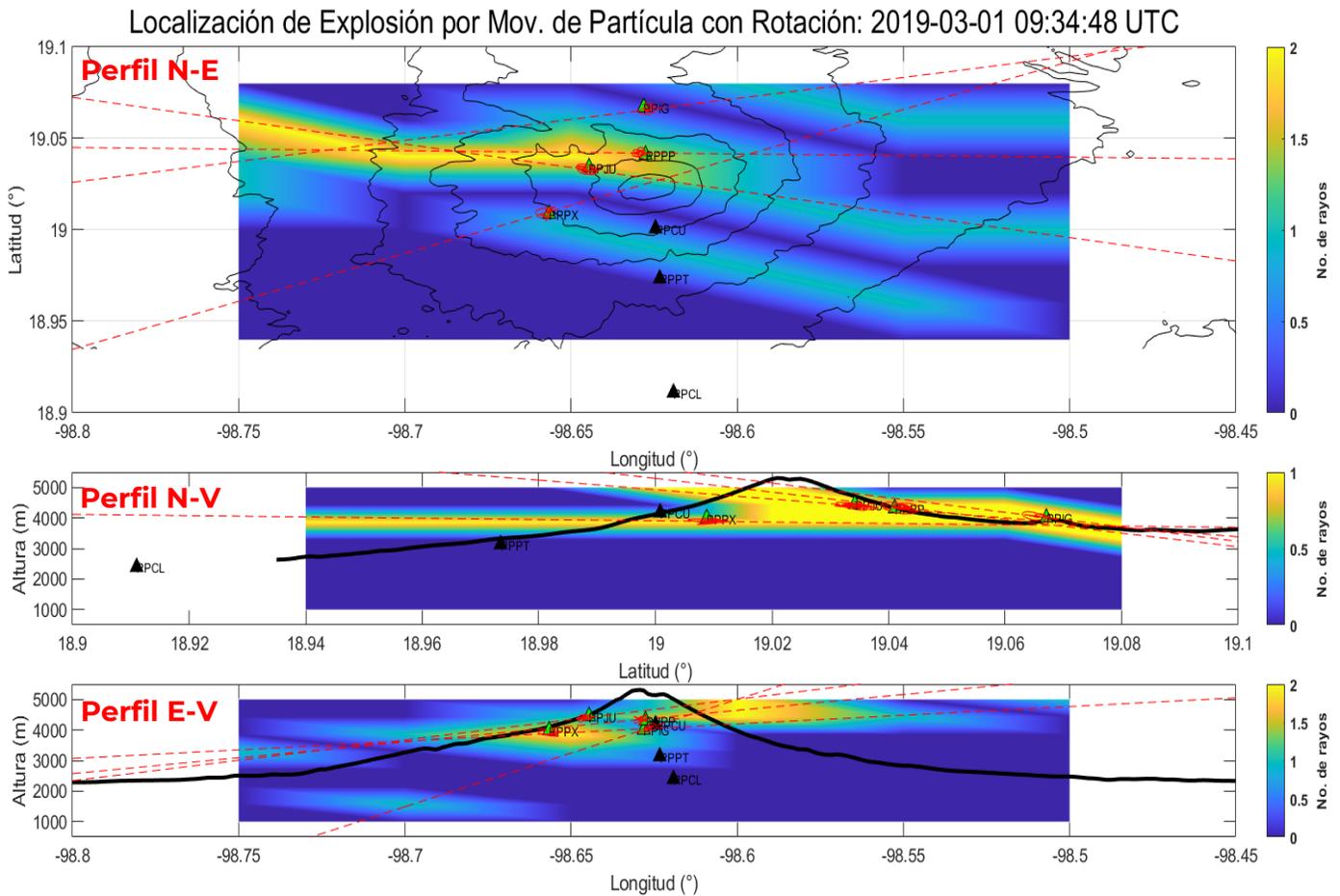


partícula. Finalmente, se graficaron los movimientos de partícula, sin y con rotación en cada estación en su respectivo plano. Para cada movimiento de partícula de obtuvo la línea de tendencia, la cual define la dirección de la fuente. Asimismo, se hizo un mallado para definir la zona de la posible fuente, mientras más trayectorias convergen hacia una dirección más certeza se tiene en la ubicación de la fuente (Figuras 6 y 7).

Las figuras 6 y 7 definen las zonas de las posibles fuentes (color amarillo), para esta localización se emplearon cuatro estaciones, en color verde se representan las estaciones que registraron el evento y en negro las que no. De acuerdo con los gráficos del perfil N-V, se define que la explosión se presentó en el centro del cráter a una altitud entre 4200 a 5000 m snm, que es consistente con lo que podríamos esperar, en el resto de los perfiles no es clara la localización.



**Figura 6 Localización de la explosión del 1 de marzo de 2019 por movimiento de partícula sin rotación en sus tres planos E-N, N-V y E-V. Estaciones que registraron el evento (triángulo verde) las que no (triángulo negro), dirección de la fuente (línea punteada roja) y zona de posible fuente (zonas amarillas). La imagen muestra la hora UTC**



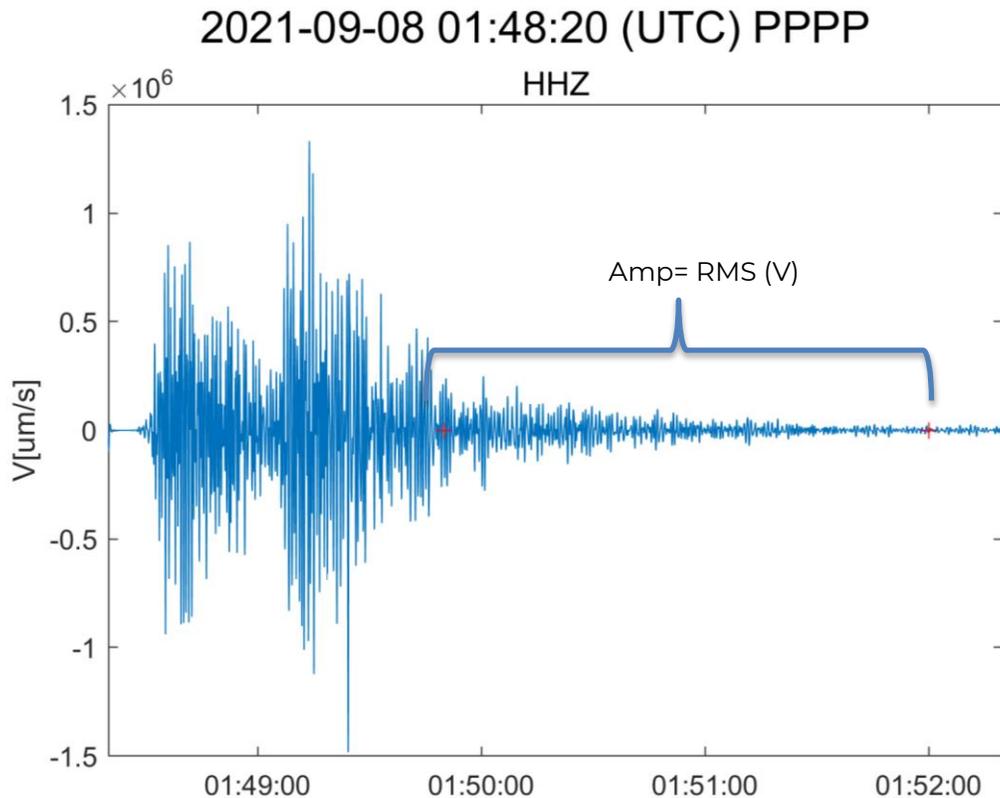
**Figura 7** Localización de la explosión del 1 de marzo de 2019 por movimiento de partícula con rotación en sus tres planos E-N, N-V y E-V. Estaciones que registraron el evento (triángulo verde) las que no (triángulo negro), dirección de la fuente (línea punteada roja) y zona de posible fuente (zonas amarillas). La imagen muestra la hora UTC

Con base en los resultados obtenidos por movimiento de partícula, la localización de la explosión del 1 de marzo de 2019 se ubicaría en las siguientes coordenadas:  $\text{latitud}=19.0225^\circ$ ,  $\text{longitud}=-98.628^\circ$  y  $h=4600$  m snm, tomando como referencia el punto central de la zona de la posible fuente.

#### b) Atenuación por amplitud sísmica

Para estimar la localización por esta metodología primero se estimó el efecto de sitio. Para conocer los factores de sitio se utilizaron las codas de sismos regionales provenientes de Guerrero, Michoacán y Oaxaca. Principalmente, se emplearon las réplicas y el registró del sismo del 7 de septiembre de 2021 de magnitud 7.1, originado a 11 km al suroeste de Acapulco, Guerrero (Figura 8). En total fueron 80 codas de sismos; 28 originados en Oaxaca, 5 en Michoacán y 47 en Guerrero.

Las codas de los sismos fueron filtradas en tres rangos diferentes: 1-3 Hz (rango de frecuencia de explosiones, tremor armónico y eventos de largo periodo), 3-5 Hz (rango de frecuencia de eventos de largo periodo y tremor) y 5-10 Hz (rango de frecuencia de sismos volcanotectónicos). Para calcular el efecto de sitio de los diferentes rangos de filtro se utilizó la ecuación (4), por medio de cocientes de los RMS.

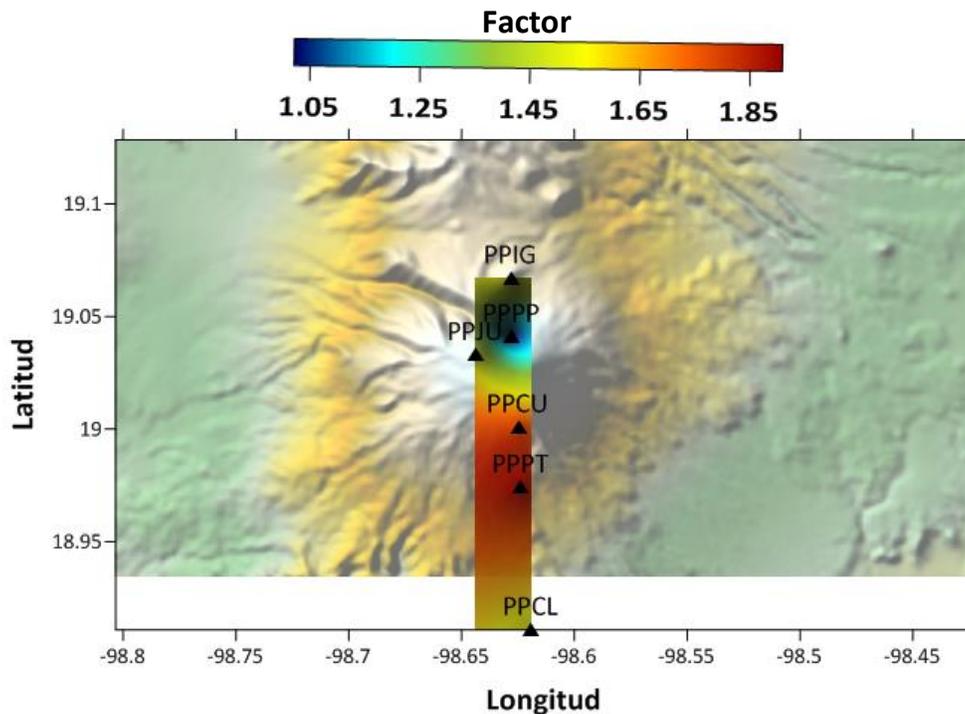


**Figura 8 Sismo del 7 de septiembre de 2021 de magnitud 7.1 observado en la estación de PPPP en su componente vertical. Efecto de sitio por medio de cocientes de los RMS. La imagen muestra la hora UTC**

Posteriormente, se promediaron los factores de los 80 sismos y se obtuvo el factor o efecto de sitio de cada estación para cada rango de frecuencia (Tabla 2). Debido a la disposición de las estaciones al momento de hacer el análisis, fueron seis las que se usaron: PPIG, PPPP, PPJU, PPCU, PPPT y PPCL. La estación de referencia fue Canario (PPPP), la cual es la más cercana al cráter del volcán a 2.1 km. Los valores de factor mayores a 1, indican que sufren atenuación con respecto a PPPP mientras que valores menores a 1, suponen amplificación. Para el rango de 1-3 Hz todas las estaciones sufren atenuación con respecto a PPPP (Figura 9), presentando el mayor valor la estación PPPT. En este rango de frecuencia se encuentran los eventos de mayor interés para localizar (explosiones, tremor armónico y exhalaciones). Para los otros rangos (3-5 y 5-10 Hz) se presenta atenuación y amplificación, con un mayor factor en PPIG (Tabla 2).

**Tabla 2 Factores para las estaciones, en sus componentes verticales en los distintos rangos de filtro.**

Estación	Factor		
	1-3 Hz	3-5 Hz	5-10 Hz
PPPP	1	1	1
PPCU	1.81	1.21	1.01
PPPT	1.91	1.15	0.64
PPJU	1.53	0.63	0.85
PPIG	1.59	0.38	0.28
PPCL	1.5	0.75	1.08



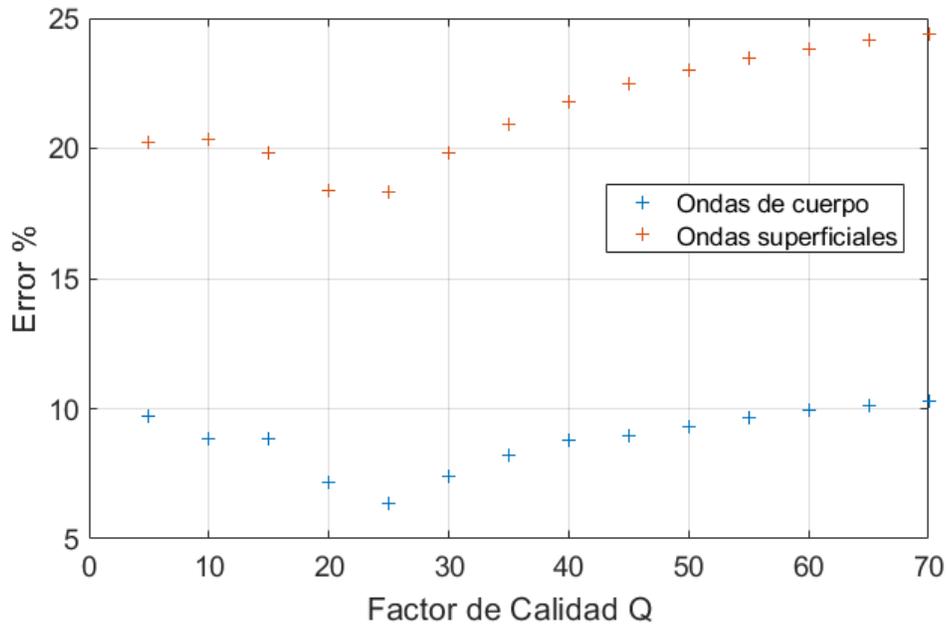
**Figura 9 Factores de sitio de las estaciones alrededor del volcán Popocatepetl para un filtro de 1-3 Hz**

Después de conocer el efecto de sitio se calculó la localización, utilizando las ecuaciones (1) y (2), suponiendo ondas de cuerpo y ondas superficiales, respectivamente. No obstante, es necesario conocer el factor de calidad  $Q$ . Debido a que no existe un valor conocido para el volcán, se llevaron a cabo pruebas variando los valores de  $Q$ , hasta encontrar el menor error, definido por la ecuación (3). Este método fue empleado en el volcán Fuego de Colima (Arámbula, 2011). Para los demás parámetros se utilizó la velocidad de onda  $P$  igual a 3500 m/s (Valdés et al., 1997), frecuencia a 2 Hz, ya que se trataba de una explosión y factores de sitio de 1 a 3 Hz (Tabla 2).

La estimación del valor  $Q$  fue realizada tanto para ondas de cuerpo como para ondas superficiales. Con base en los resultados de ambas localizaciones se tiene un mejor ajuste con



Q=25 (Figura 10), por lo que para las demás localizaciones fue empleado el mismo valor.

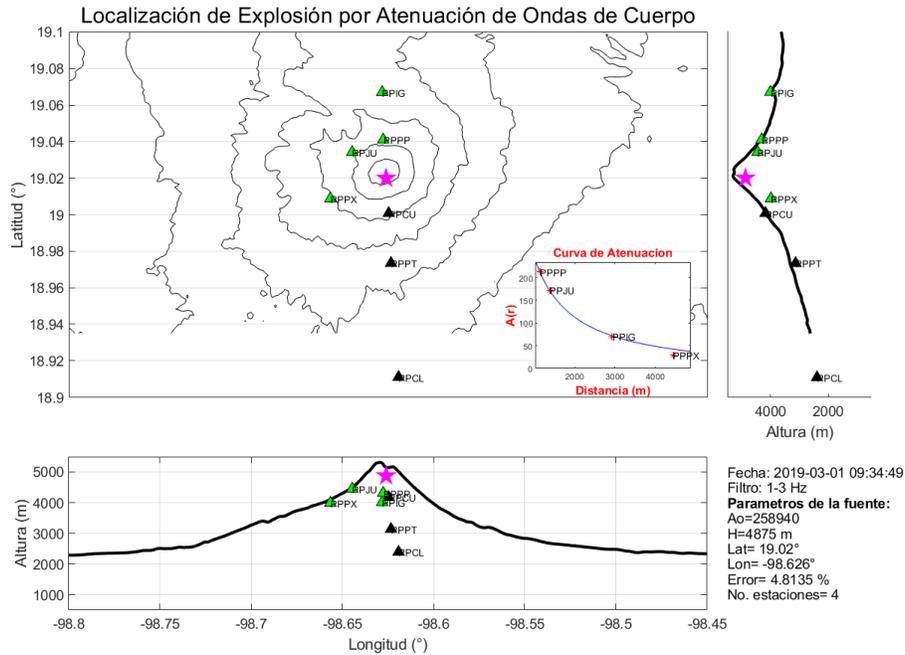


**Figura 10 Variación del error en la localización de una explosión con respecto del factor de calidad Q. El mínimo error se encontró con Q=25, de acuerdo con ondas de cuerpo y ondas superficiales**

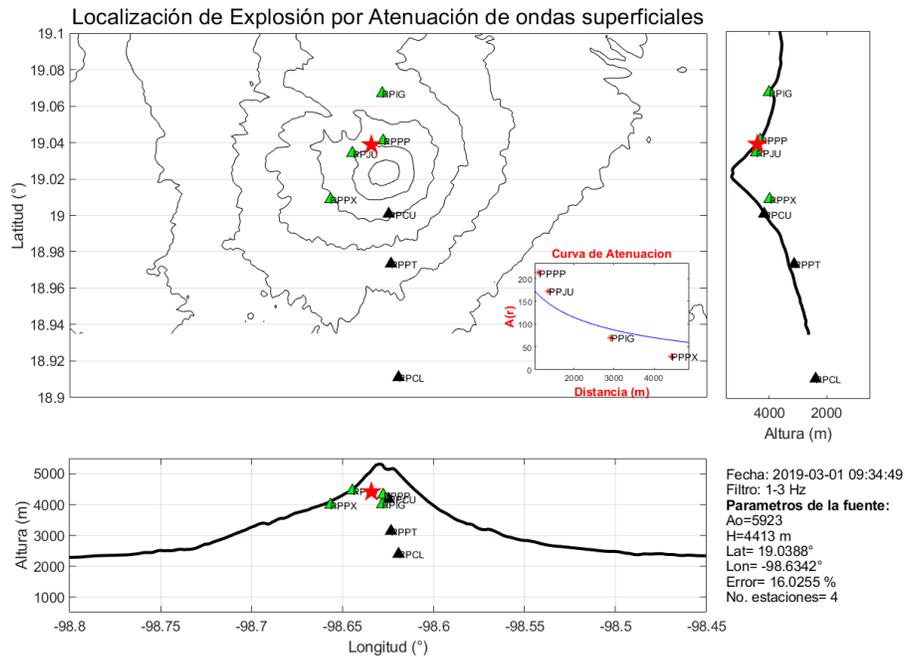
Finalmente, para realizar las localizaciones se utilizó una malla con las siguientes coordenadas: longitud de -98.7 a -98.55, latitud de 18.96 a 19.06 y altitud de -1000 a 5000 m (Figura 11). Dentro de esta malla se propusieron una serie de fuentes hasta encontrar el mejor ajuste (ec. (3)). La técnica de inversión que se utilizó para hacer la búsqueda fue *grid search*, la cual fue programada en Matlab. Esta técnica consiste en encontrar el mínimo error de acuerdo con la mejor combinación de parámetros (coordenadas de la fuente (longitud, latitud, altitud) y amplitud). En cada corrida se obtiene la curva de atenuación y se compara con los datos observados.

La resolución de los resultados es de 1 m. Debido al gran número de datos a evaluar, se necesita de una gran capacidad de cómputo. Sin embargo, para aminorar la capacidad de cómputo y el tiempo requerido para conocer el resultado, se hicieron una serie de *grid search* en cascada. Primero, el espaciamiento entre cada fuente fue 200 m, (dx, dy y dz), después de 100, 20, 5 y 1 m. El tiempo de cómputo varía de dos a cinco minutos dependiendo las características de la maquina utilizada, en nuestro caso demoró aproximadamente tres minutos (Procesador i7-4770 @3.4 GHz, RAM 4 GB).



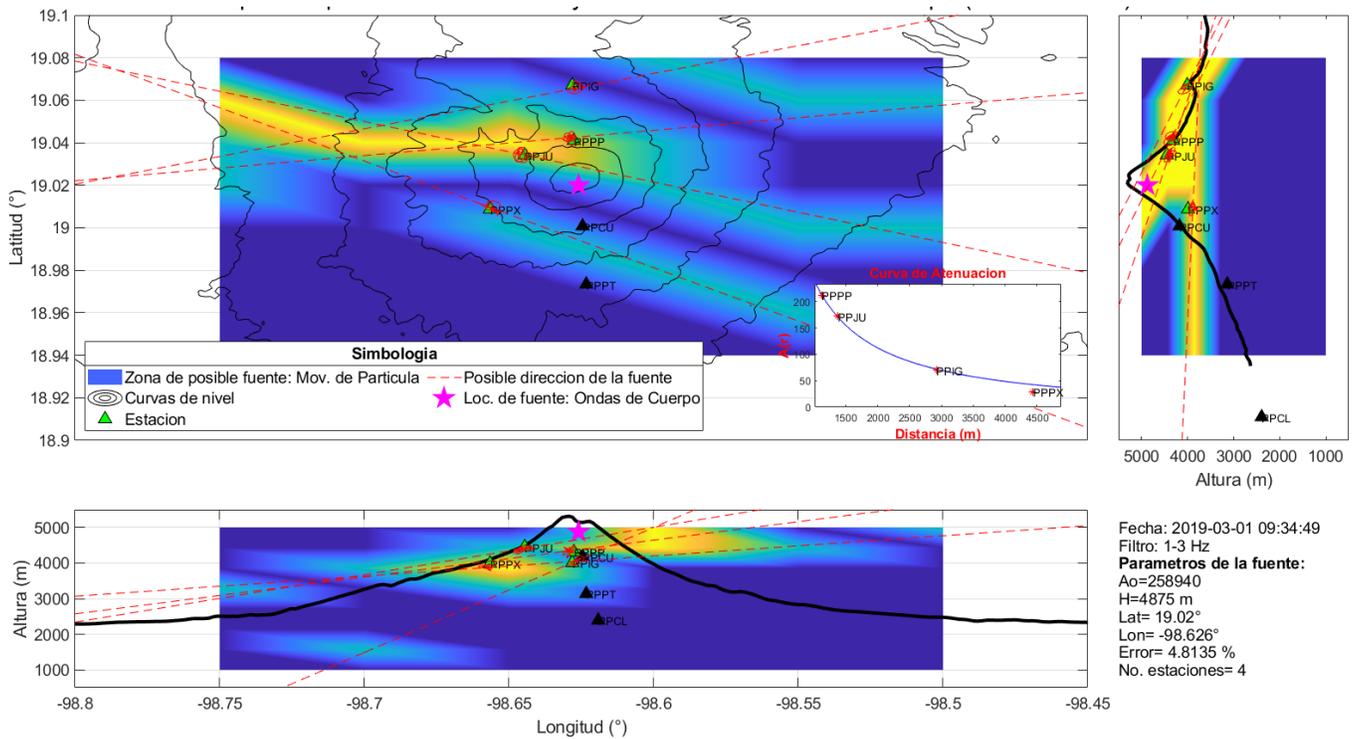


**Figura 12** Localización de la explosión del 1 de marzo de 2019 por atenuación de ondas de cuerpo (estrella rosa). Estaciones que registraron el evento (triángulo verde) y las que no (triángulo negro). La imagen muestra la hora UTC



**Figura 13** Localización de la explosión del 1 de marzo de 2019 por atenuación de ondas superficiales (estrella roja). Estaciones que registraron el evento (triángulo verde) y las que no (triángulo negro). La imagen muestra la hora UTC





**Figura 14** Localización de la explosión del 1 de marzo de 2019 por atenuación de ondas de cuerpo (estrella rosa) y movimiento de partícula. Estaciones que registraron el evento (triángulo verde) y las que no (triángulo negro). La imagen muestra la hora UTC

A través de sobrevuelos, el día de 19 de febrero de 2019 se pudo confirmar la dimensión del domo, de un diámetro de 200 m y su confirmación de destrucción el 15 de marzo de 2019 (Figura 15). Durante este lapso se presentaron una serie explosiones que destruyeron el domo.

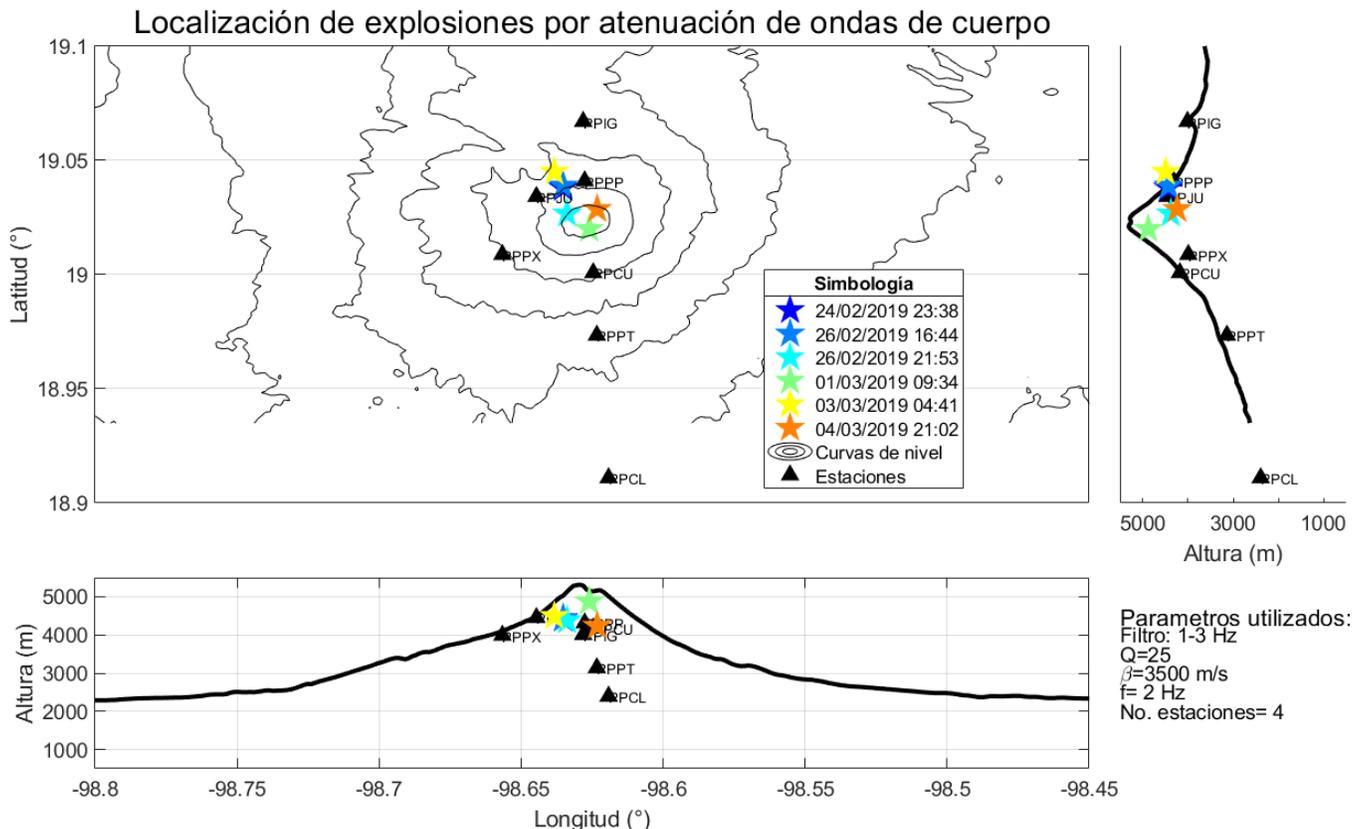


**Figura 15** Imágenes de sobrevuelos del día 19 de febrero (lado izquierdo) y 15 de marzo (lado derecho) del 2019

Se localizaron seis explosiones con atenuación por amplitud sísmica de ondas de cuerpo por presentar un menor error. Las explosiones analizadas se registraron del 24 de febrero al 4 de marzo de 2019 (Tabla 3, Figura 16). Para cada estimación, se usaron los siguientes parámetros: filtro 1-3 Hz, factores de efecto de sitio 1-3 Hz (Tabla 2),  $f=2$  Hz,  $Q=25$  y  $\beta=3500$  m/s. Se emplearon cuatro estaciones para estimar su ubicación.

**Tabla 3 Localización de explosiones asociadas a la destrucción de domo**

No.	Fecha UTC	Longitud (°)	Latitud (°)	Altitud (m)	Error (%)
1	24/02/2019 23:38	19.038	-98.6352	4436	1.043
2	26/02/2019 16:44	19.0389	-98.6352	4425	2.55
3	26/02/2019 21:53	19.0267	-98.6338	4378	7.8
4	01/03/2019 09:34	19.02	-98.626	4875	4.81
5	03/03/2019 04:41	19.045	-98.6383	4491	0.72
6	04/03/2019 21:02	19.0287	-98.6232	4237	16.19



**Figura 16 Localización de explosiones asociadas a la destrucción de domo entre el 24 de febrero al 04 de marzo de 2019, las fuentes de las explosiones se presentan en estrellas de colores**

Los resultados muestran que las explosiones que destruyeron el domo se localizaron a una



altitud de entre 4237 y 4875 m, siendo la explosión del 1 de marzo de 2019 la más cercana a la superficie del cráter inferior, a 125 m y la más centrada al volcán. Resulta interesante que de acuerdo con el tiempo de retraso entre el registro sísmico y el infrasonido registrados en Tlamacas, muestra un menor retraso para la explosión del 1 de marzo (12.00 s), en comparación con las otras analizadas (12.24 a 12.45 s). La explosión del 4 de marzo fue la más profunda, a 4237 m de altitud, sin embargo, presentó el mayor error, por lo que debe tomarse con reserva este resultado. En promedio, las explosiones se encontraron en los 4474 m de altitud a aproximadamente 526 m por debajo del cráter interno.

## Localización de sismos volcanotectónicos

Para el caso de las localizaciones de sismos VT se siguió el mismo procedimiento que el llevado a cabo por las explosiones. Se utilizaron algunos sismos someros registrados de octubre a diciembre de 2021. Los resultados se compararon con las localizaciones hechas a través de los primeros arribos mediante métodos tradicionales. Para contrastar los resultados obtenidos por movimiento de partícula y atenuación por amplitud sísmica, se utilizó el sismo VT del 4 de octubre de 2021, registrado a las 18:56 h local de magnitud calculada de 2.1.

### a) Movimiento de partícula

Nuevamente se utilizó una ventana de 3 s para determinar el movimiento de partícula y poder conocer las zonas de la posible fuente. Para este sismo se usaron seis estaciones, en las señales se aplicó un filtro de 5-10 Hz. Los resultados se obtuvieron sin y con rotación (Figuras 17 y 18) de las componentes, para el sismo VT del 4 de octubre de 2021. En ambos gráficos se observa que algunas estaciones indican de manera adecuada la dirección de la fuente, destacando el perfil de longitud vs altura, teniendo una mejor aproximación cuando se rotan las componentes. Para la vista en planta se tiene una zona coincidente. Para los perfiles de latitud vs altura se muestra una zona de fuente cercana al epicentro algo desfasa. De manera general, los resultados lograron definir una zona cercana al epicentro. La interpretación anterior se hizo tomando en cuenta la localización del sismo VT por medio del método de primeros arribos.

### a) Atenuación por amplitud sísmica

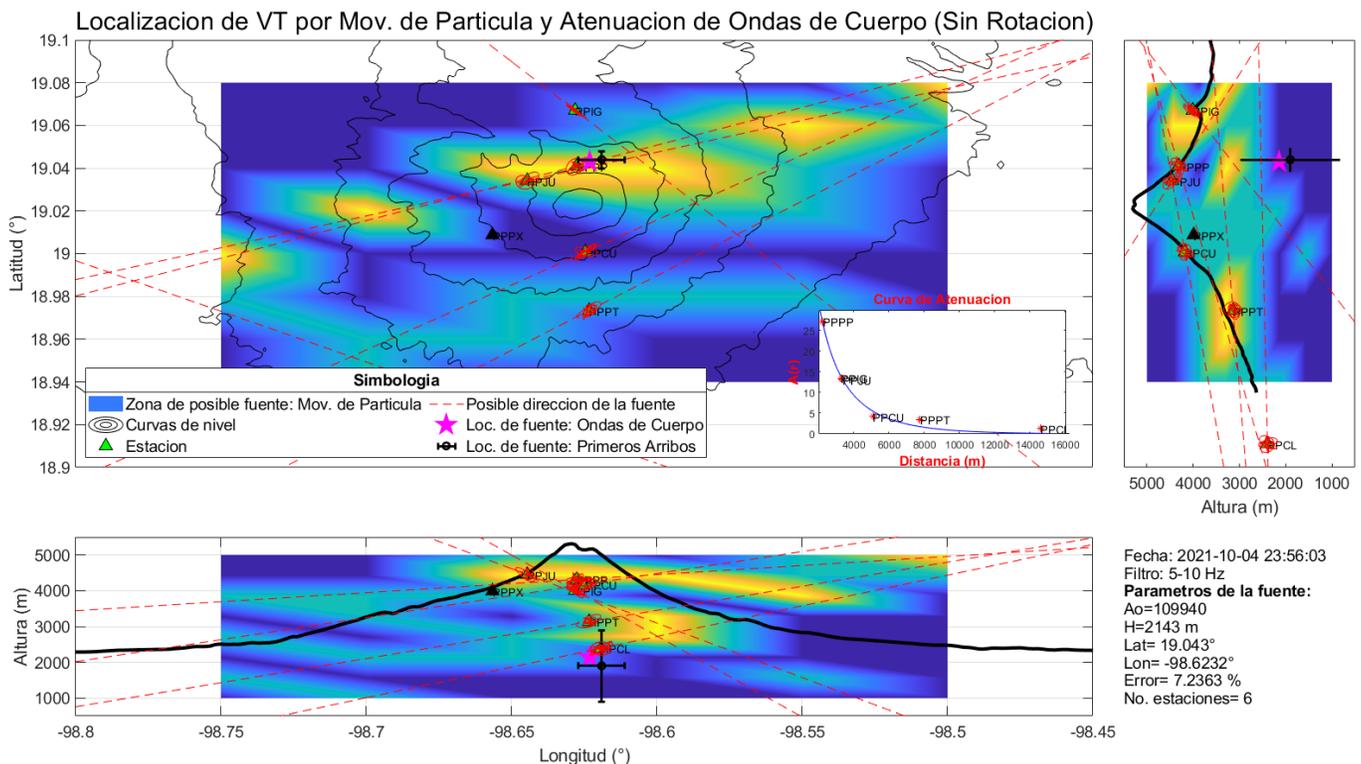
La estimación de la localización del sismo VT se realizó a través del método de atenuación por amplitud sísmica, suponiendo ondas de cuerpo por tratarse de un VT. Se emplearon parámetros similares al de las explosiones, cambiando el filtro de las señales (5-10 Hz), los factores de sitio de las estaciones para un rango de 5-10 Hz (Tabla 2) y una frecuencia de 7.5 Hz. Los restantes valores fueron los mismos ( $Q=25$  y  $\beta=3500$  m/s). Para la localización se emplearon seis estaciones, quedando las coordenadas del sismo en longitud a  $-98.6232^\circ$ , en latitud a  $19.043^\circ$  y 2143 m de altitud. Se tuvo un error del 7.23%. El resultado obtenido se



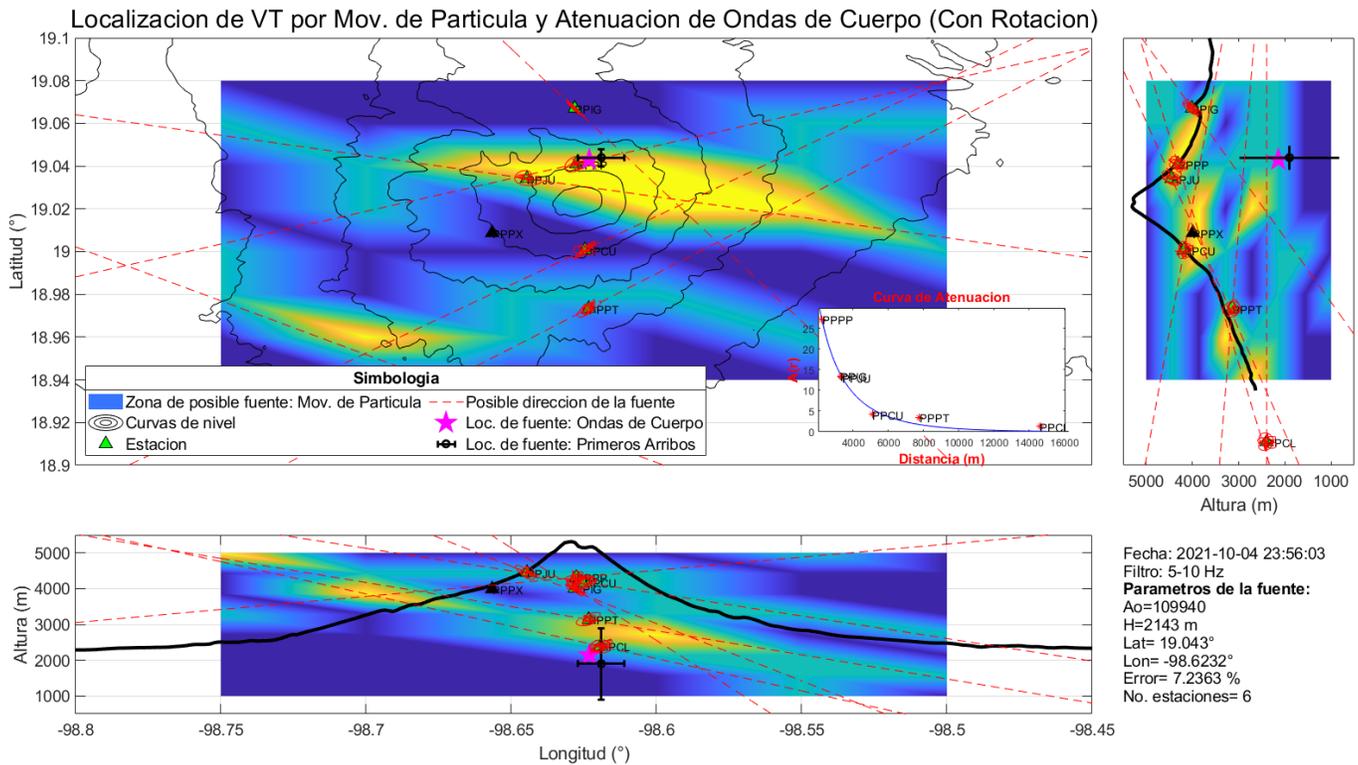
sobrepuso al del movimiento de partícula (Figuras 17 y 18, estrella rosa). También se muestra la ubicación del sismo VT por primeros arribos con sus barras de errores. Como se visualiza en la localización, ambas técnicas presentan ubicaciones similares (Tabla 4). Al igual que en el método de primeros arribos se tiene una mejor aproximación en latitud, debido a que hay una mayor distribución en las estaciones. En longitud se obtuvo el mayor error, ya que las estaciones no se encuentran bien distribuidas, esto también es observable en las barras de error. Para el caso de la profundidad, se tuvieron valores similares. Se tiene una distancia de 516 m entre ambas localizaciones.

**Tabla 4 Localización del sismo VT del 22 de noviembre de 2021**

Método	Longitud (°)	Latitud (°)	Altitud (m)
Primeros arribos	19.044	-98.619	1900
Atenuación por amplitud	19.043	-98.6232	2143



**Figura 17 Localización del sismo volcánotectónico del 4 de octubre de 2021 registrado a las 18:56 h local, por atenuación de ondas de cuerpo (estrella rosa) y movimiento de partícula sin rotación en sus componentes. Estaciones que registraron el evento (triángulo verde) y las que no (triángulo negro). La locación del sismo por primeros arribos con sus barras de errores se muestra en color negro. La imagen muestra la hora UTC**



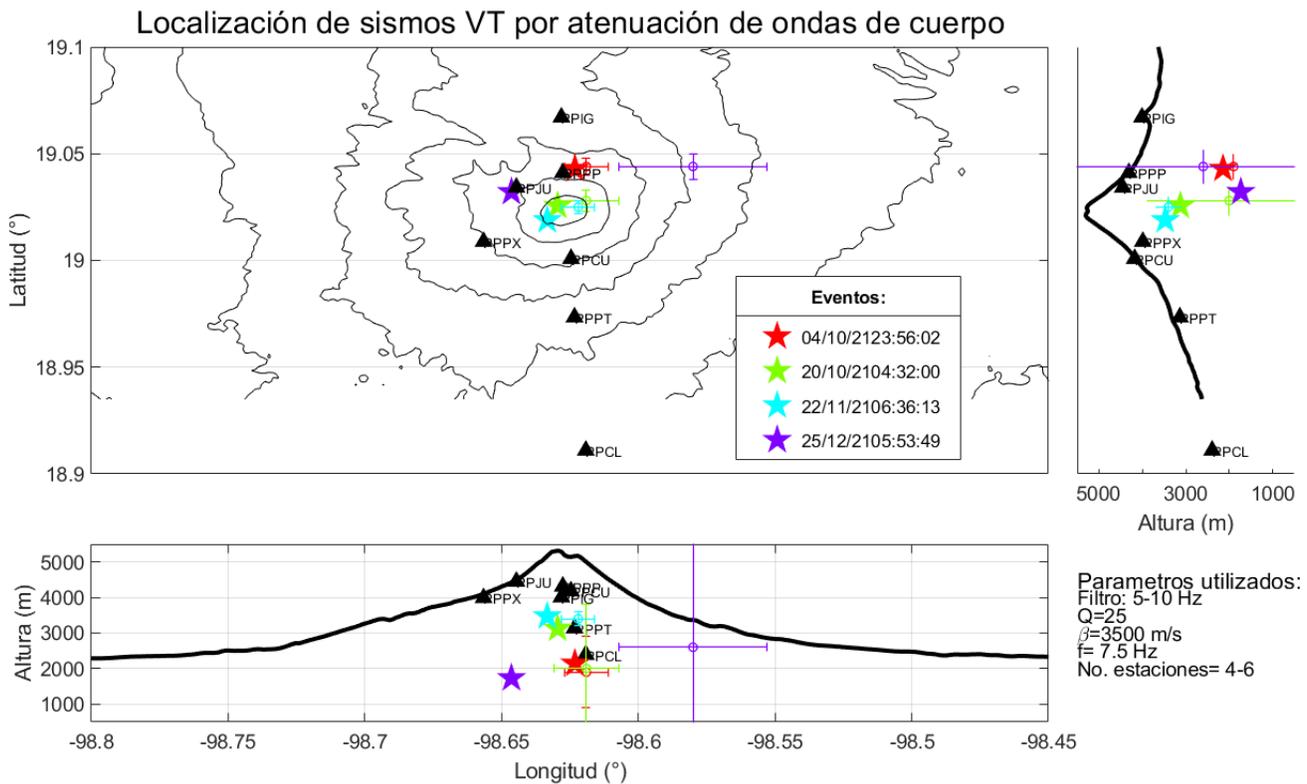
**Figura 18 Localización del sismo volcanotectónico del 4 de octubre de 2021 registrado a las 18:56 h local, por atenuación de ondas de cuerpo (estrella rosa) y movimiento de partícula con rotación en sus componentes. Estaciones que registraron el evento (triángulo verde) y las que no (triángulo negro). La locación del sismo por primeros arribos con sus barras de errores se muestra en color negro. La imagen muestra la hora UTC**

Aunque existen métodos más especializados para localizar sismos, se empleó esta técnica para conocer su capacidad en la localización de sismos VT del Popocatepetl. Además, se verificó nuevamente la eficacia del método y los factores de sitio. Adicionalmente, esta metodología puede ser usada para tener estimaciones de sismos VT de forma rápida, para garantizar buenos resultados se necesita contar con un número mayor a tres estaciones. Sin embargo, se pueden hacer localizaciones con una sola estación, presentando un mayor error en su estimación.

Finalmente, se realizaron cuatro localizaciones de sismos VT someros registrados entre octubre a diciembre de 2021 (Tabla 5, Figura 19), empleando de cuatro a seis estaciones. Se eligieron eventos con magnitud mayor a 1.7 y profundidades entre 1 a 4 km por debajo del cráter, con el propósito de poder llevar de mejor manera las localizaciones, al ser registradas en un mayor número de estaciones y que no se encontraran a profundidades mayores a 6 km por debajo del cráter.

**Tabla 5 Localizaciones de sismos VT mediante primeros arribos y atenuación por amplitud**

Datos del sismo VT		Localización por primeros arribos				Localización por atenuación de amplitud		
Fecha	Hora UTC	Longitud (°)	Latitud (°)	Altitud (m)	Magnitud	Longitud (°)	Latitud (°)	Altitud (m)
04/10/21	23:56:02	-98.619	19.044	1900	2.1	-98.6232	19.043	2143
20/10/21	04:32:00	-98.619	19.028	2000	1.7	-98.6295	19.0256	3125
22/11/21	06:36:13	-98.622	19.025	3400	1.8	-98.6333	19.0189	3473
25/12/21	05:53:49	-98.58	19.044	2600	1.8	-98.6464	19.0321	1733



**Figura 19 Localización de sismos VT por medio de primeros arribos (con barra de errores) y atenuación por amplitud de ondas de cuerpo (estrellas)**

Los resultados indican que se tiene una mejor aproximación en la localización para sismos de mayor magnitud debido a que se observa en un mayor número de estaciones y de manera clara. En general, las localizaciones por atenuación por amplitud entraron en el margen de error de las localizaciones por primeros arribos. Por las características del sismo del 25 de diciembre fue un evento difícil de localizar para el método de primeros arribos también para la localización de atenuación por amplitud, presentando el mayor error (43.16 %). Este evento fue el único que no quedó dentro del área de la barra de errores.





## Sistema de localización de eventos en el volcán Popocatepetl

El programa que se utilizó para llevar a cabo las localizaciones de explosiones y sismos VT se escribió en lenguaje de Matlab. Este sistema de localización requiere de varias funciones y librerías, la mayoría de ellas se encuentran cargadas en el propio software. Una paquetería importante para la conexión de las señales del Popocatepetl es *GISMO* (Thompson y Reyes, 2016). La paquetería se conecta al servidor Winston a través de la IP. Además, se programaron algunas funciones, las cuales filtran las señales y revisan las estaciones que registraron el evento.

El sistema de localización (*Loc\_mvpart\_atenuacion.m*) está diseñado para localizar eventos de largo periodo (exhalaciones, tremor armónico, explosiones) y alta frecuencia (sismos VT) de acuerdo con las características de los eventos. Como se ha mostrado el sistema realiza las localizaciones por medio del movimiento de partícula y atenuación por amplitud sísmica.

Para poder llevar a cabo las localizaciones se deben ingresar cinco parámetros de entrada: a) evento a clasificar (explosión, exhalaciones, tremor armónico o sismo VT), b) fecha y hora de inicio del evento, c) fecha y hora de termino del evento, d) ventana de tiempo para el movimiento de partícula y e) tipo de evento (1; f=2 Hz y filtro 1-3 Hz, 2; f=4 Hz y filtro 3-5 Hz o 3; f=7.5 Hz y filtro 5-10 Hz). El tipo de evento dependerá de la frecuencia característica para explosiones, exhalaciones y tremor armónico que se encuentra alrededor de 2 Hz, por lo que se utilizó este valor y un filtro pasa bandas de 1 a 3 Hz y para sismos VT la frecuencia se encuentra entre 5 a 8 Hz con un filtro pasa bandas de 5 a 10 Hz. Finalmente, para eventos con frecuencias intermedias como el tremor de alta frecuencia o algunas exhalaciones se puede usar el tipo 2. Los parámetros de entrada que se modificarán de acuerdo con el evento se encuentran en las líneas 7 a 11 del script (Figura 20).

```

7 - evento='Explosion';           % LP, Explosion, tremor, VT, derrumbe, etc.
8 - startTime='2021-12-26 02:39:28'; % Hora UTC de inicio del evento
9 - endTime1='2021-12-26 02:39:40'; % Hora UTC de termino del evento
10 - s=3;                       % Ventana de Mov. de Particula
11 - tipo=1;                    % 1:F[1-3 hz]; 2:F[3-5 hz]; 3:F[5-10 hz]

```

**Figura 20** Parámetros de entrada para localizar la explosión del 25 de diciembre de las 20:39 h local, por movimiento de partícula y atenuación por amplitud sísmica. La imagen muestra la hora UTC

Para el caso de localizar sismos VT el sistema tiene la opción de ingresar las coordenadas del evento estimado por primeros arribos con sus correspondientes errores, con el propósito de comparar ambas localizaciones (Figura 21).





15 -	lats=19.044;	⌘ Latitud (°)
16 -	lons=-98.58;	⌘ Longitud (°)
17 -	alts=2600;	⌘ Altitud (m)
18 -	errlon=2.7;	⌘ Error longitud
19 -	errlat=0.6;	⌘ Error latitud
20 -	erralt=3.2;	⌘ Error altura

**Figura 21 Localización del sismo del 25 de diciembre de 2021 por primeros arribos (ver Figuras 17, 18 y 19)**

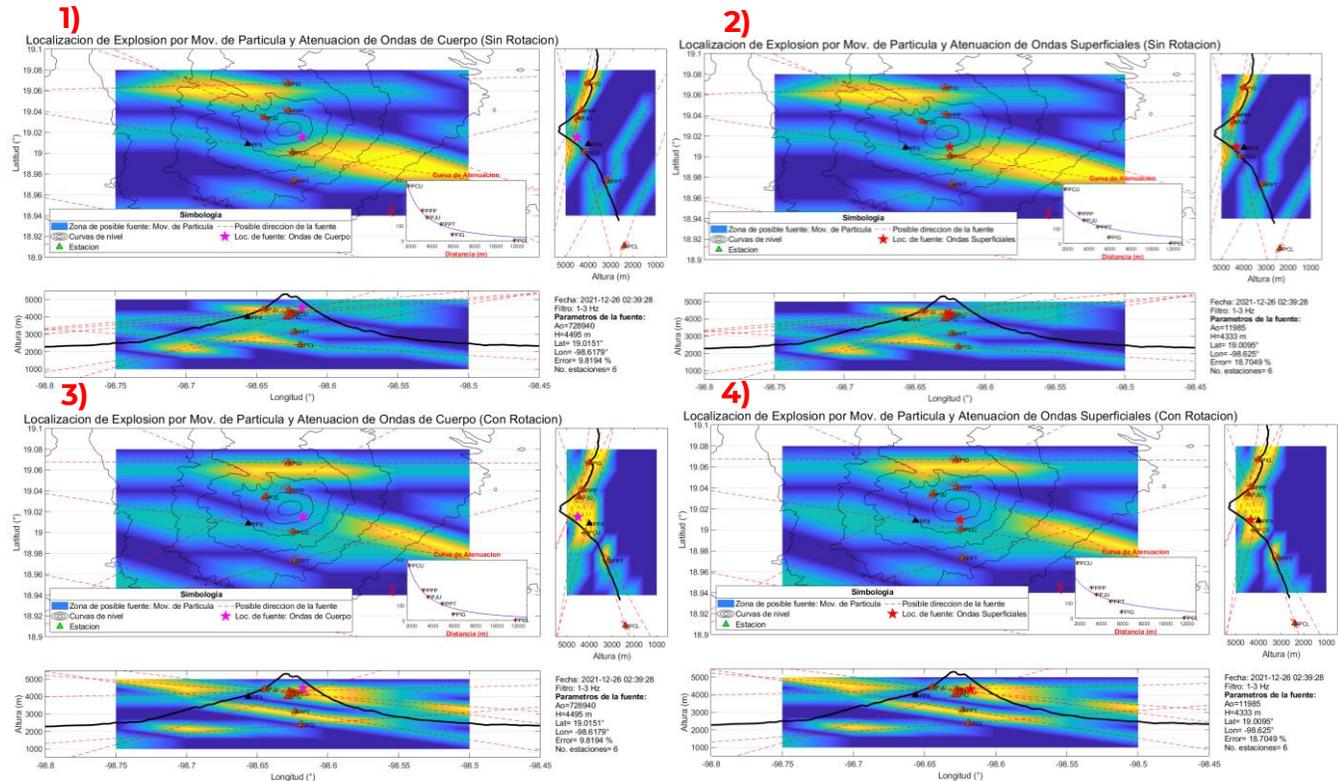
Una vez ingresados los parámetros de entrada, el sistema de localización estima la localización de los eventos. Primero, por movimiento de partícula, para esta parte se obtiene la línea de tendencia del movimiento de partícula en cada estación, con el objetivo de encontrar las zonas de la posible fuente. La malla que se encarga de encontrar las posibles fuentes, abarca en longitud de -98.75° a -98.5°, en latitud de 18.94° a 19.08°, con espaciamentos cada 0.02° y en altitud de 1000 a 5000 m, con espaciamiento de 285.7 m. Esto se realiza sin y con rotación de las componentes. Con base en las localizaciones realizadas se tiene un mejor resultado cuando se rotan las componentes.

Para la localización de amplitudes por amplitud sísmica se calculan considerando ondas de cuerpo y ondas superficiales definidas por las ecuaciones 1 y 2. También se calcula el porcentaje de error de acuerdo con los datos observados usando la ecuación 3. El proceso que se realiza en este paso, se hace por técnicas de inversión conocida como *grid search*. Se hicieron varias búsquedas con esta metodología para optimizar los tiempos, hasta llegar a una resolución de 1 m en longitud, latitud y altitud. El tiempo en encontrar la localización del evento varía de dos a cinco minutos dependiendo las capacidades de cómputo. Más del 90% del tiempo es debido a la búsqueda de localización de atenuación por amplitud.

Una vez que terminada la estimación de las localizaciones por movimiento de partícula y atenuación por amplitud, el sistema de localización despliega cuatro imágenes donde se presenta de manera conjunta la localización de ambas técnicas para una mejor interpretación: 1) movimiento de partícula sin rotación en las componentes y atenuación por amplitud de ondas de cuerpo; 2) movimiento de partícula sin rotación en las componentes y atenuación por amplitud de ondas superficiales; 3) movimiento de partícula con rotación en las componentes y atenuación por amplitud de ondas de cuerpo y 4) movimiento de partícula con rotación en las componentes y atenuación por amplitud de ondas superficiales. En las imágenes se muestran las diferentes vistas del volcán Popocatepetl, en planta y en perfiles. Además, en la parte inferior derecha de cada imagen, se muestran los parámetros de la fuente del mejor ajuste (coordenadas, amplitud, error) y el número de estaciones empleadas (Figura 22). También se guardan las localizaciones de atenuación por amplitud sísmica en un archivo csv con todos los parámetros mencionados anteriormente (Tabla 6). A continuación, se



presenta la serie de imágenes de salida del sistema de localizaciones, usando como parámetros de entrada la explosión del 25 de diciembre de 2021 vistos en la figura 20.



**Figura 22** Localización de la explosión del 25 de diciembre de 2021 por: 1) movimiento de partícula sin rotación en las componentes y atenuación por amplitud de ondas de cuerpo; 2) movimiento de partícula sin rotación en las componentes y atenuación por amplitud de ondas superficiales; 3) movimiento de partícula con rotación en las componentes y atenuación por amplitud de ondas de cuerpo y 4) movimiento de partícula con rotación en las componentes y atenuación por amplitud de ondas superficiales

**Tabla 6** Archivo de salida de la explosión del 25 de diciembre

Fecha y hora de inicio [UTC]	Fecha y hora de fin [UTC]	Longitud (°)	Latitud (°)	Altura (m)	Amplitud (Ao)	Error [%]	No. estaciones	Método	Evento
26/12/2021 02:39	26/12/2021 02:39	-98.6179	19.0151	4495	728940	9.8194	6	Ondas de Cuerpo	Explosión
26/12/2021 02:39	26/12/2021 02:39	-98.6179	19.0095	4333	11985	18.7049	6	Ondas Superficiales	Explosión

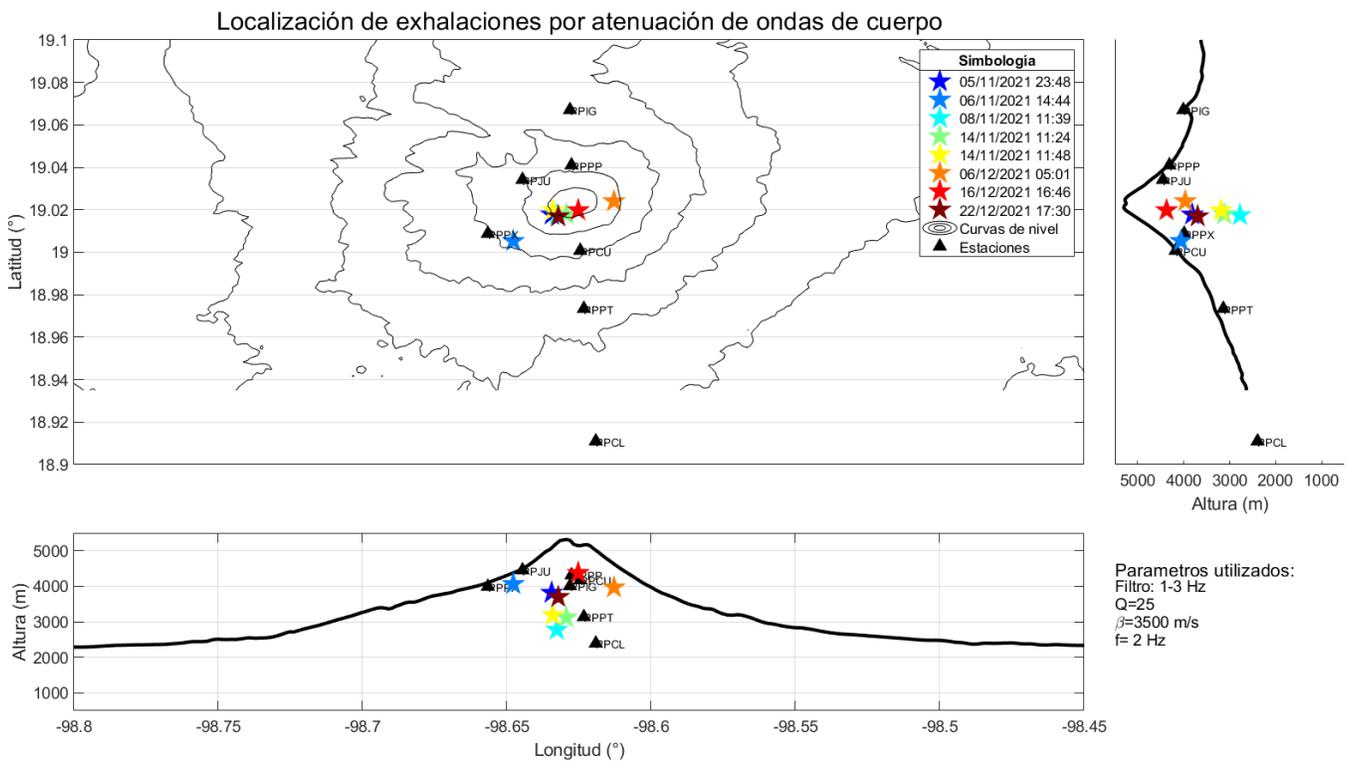
Después de una breve explicación del funcionamiento del sistema de localización de eventos en el volcán Popocatepetl se localizaron algunos eventos relevantes (exhalaciones y explosiones) registrados en noviembre y diciembre de 2021.

**Localización de eventos**

Se llevaron a cabo localizaciones de los eventos más destacados registrados en noviembre y diciembre de 2021 (exhalaciones y explosiones). Para el caso de las exhalaciones se consideraron las que presentaron más de 100 um/s pico a pico. Se localizaron ocho eventos (Tabla 7, Figura 23) pudiendo distinguirse una alineación en los resultados, lo que podría relacionarse con un posible conducto volcánico.

**Tabla 7 Localizaciones de exhalaciones mediante atenuación por amplitud de ondas de cuerpo**

Fecha inicio [UTC]	Longitud (°)	Latitud (°)	Altura (m)	Amplitud (Ao)	Error [%]	No. Estaciones
05/11/2021 23:48	-98.6345	19.0178	3817	43500	14.4446	6
06/11/2021 14:44	-98.6478	19.0053	4063	132240	12.5655	6
08/11/2021 11:39	-98.6327	19.0175	2776	53050	20.8198	5
14/11/2021 11:24	-98.6294	19.0179	3120	76940	12.3074	5
14/11/2021 11:48	-98.6341	19.0197	3188	48220	10.4547	5
06/12/2021 05:01	-98.6129	19.024	3966	79140	17.3762	6
16/12/2021 16:46	-98.6253	19.0198	4375	98240	9.4227	6
22/12/2021 17:30	-98.6322	19.0169	3697	135850	3.904	6



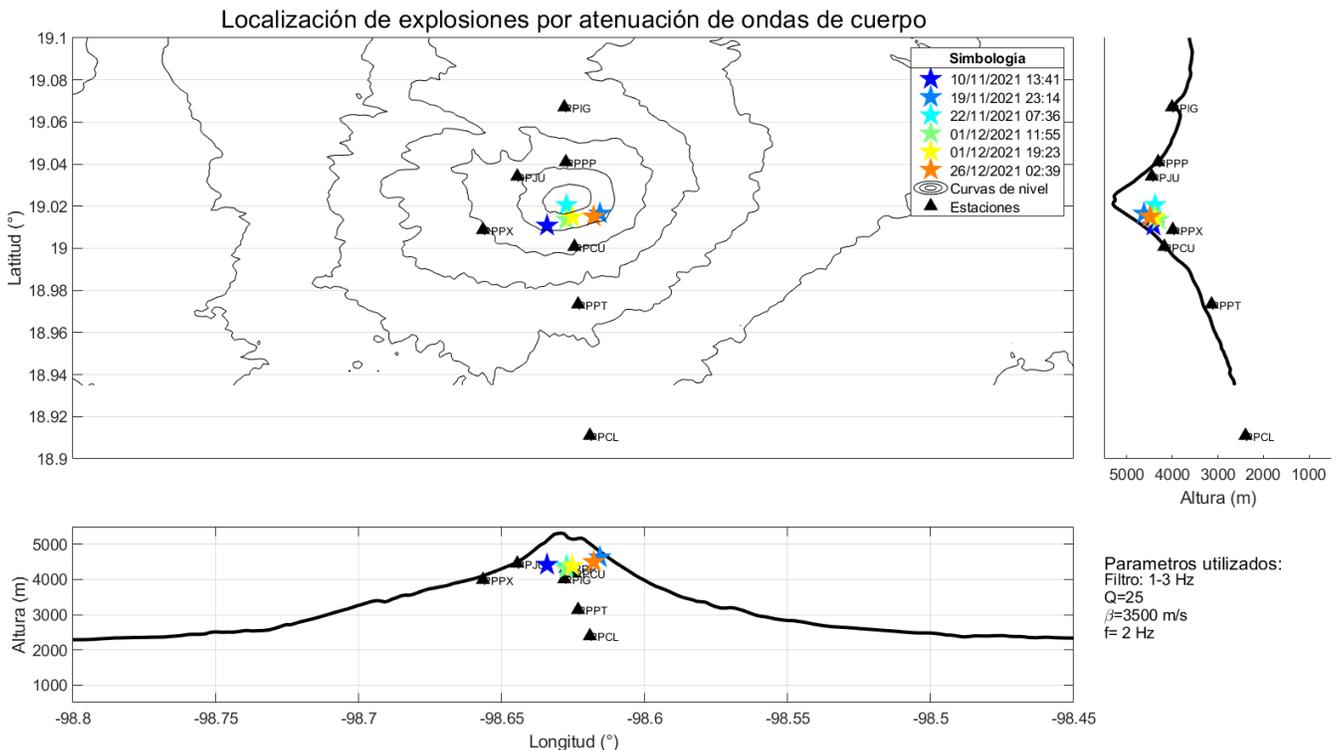
**Figura 23 Localizaciones de exhalaciones mediante atenuación por amplitud de ondas de cuerpo**



En el caso de las explosiones se pudieron localizar seis registradas entre noviembre y diciembre de 2021. Al igual que en las exhalaciones se muestran las coordenadas de la fuente, el error estimado y el número de estaciones (Tabla 8, Figura 24). De acuerdo con su localización las explosiones tuvieron lugar alrededor de los 4 mil metros de altura todas ellas ocurrieron sin la presencia de un domo visible. Para ambos tipos de eventos se usó la atenuación por amplitud de ondas de cuerpo debido a que presentaron menor error en su localización. Asimismo, se usaron los mismos parámetros ( $f=2$  Hz,  $Q=25$  y  $\beta=3500$  m/s).

**Tabla 8 Localizaciones de explosiones mediante atenuación por amplitud de ondas de cuerpo**

Fecha inicio [UTC]	Longitud (°)	Latitud (°)	Altura (m)	Amplitud (Ao)	Error [%]	No. estaciones
10/11/2021 13:41	-98.6342	19.0108	4415	288940	8.9333	5
19/11/2021 23:14	-98.6157	19.0165	4625	908940	12.4033	6
22/11/2021 07:36	-98.6274	19.0206	4380	218940	17.9904	5
01/12/2021 11:55	-98.6275	19.0136	4300	198640	8.6714	5
01/12/2021 19:23	-98.6254	19.0148	4380	433940	8.4507	6
26/12/2021 02:39	-98.6179	19.0151	4495	728940	9.8194	6



**Tabla 24 Localizaciones de explosiones mediante atenuación por amplitud de ondas de cuerpo**





## Conclusiones

Las localizaciones realizadas por medio de movimiento de partícula y atenuación por amplitud, dieron resultados satisfactorios como lo indica la ubicación de las explosiones de febrero y marzo de 2019, así como los sismos volcanotectónicos someros registrados en octubre, noviembre y diciembre de 2021.

La metodología de movimiento de partícula, brinda localizaciones cualitativas indicando zonas de posibles fuentes, lo que conlleva a hacer un análisis posterior para definir la zona de fuente más adecuada. En el caso de las explosiones se tuvieron mejores estimaciones ya que varias estaciones indicaron que la dirección de la fuente provenía del cráter. También se rotaron las componentes en dirección del centro del cráter, lo que ayudó a definir mejor las zonas de fuente. La metodología de partícula de forma conjunta con la localización de atenuación por amplitud, ayuda a distinguir mejor la zona de fuente.

La localización de atenuación por amplitud permitió conocer el factor de calidad (Q) del volcán, así como los factores de sitio de las estaciones para tener mejor estimación en las localizaciones. Se determinó que el mejor valor de factor de calidad fue  $Q=25$  al presentar un error menor. Para determinar los factores de sitio se utilizaron las codas de sismos filtrados en diferentes frecuencias, con la finalidad de adecuarse al evento que se presenta a localizar desde baja a alta frecuencia. Las localizaciones por atenuación supusieron ondas de cuerpo y ondas superficiales. De acuerdo con las aproximaciones se tuvieron errores menores para las ondas de cuerpo. Para garantizar mejores resultados y asegurar solo la presencia de las ondas de cuerpo se tomaron los primeros segundos del registro. Esta técnica brindó resultados muy interesantes que llevarán a un análisis futuro enfocado al lugar donde pudieran ocurrir las explosiones, localización de posibles conductos, estimaciones preliminares de la velocidad de ondas sonoras en el interior del volcán, entre otros.

Con el sistema de localización por el momento han realizado localizaciones de exhalaciones, explosiones y sismos volcanotectónicos. Sin embargo, está diseñado para hacer adecuaciones y ser amigable al usuario. Las localizaciones de las explosiones muestran que, de manera general ocurren a una altura promedio de 4450 m snm, es decir a aproximadamente 550 m por debajo del cráter interno. De acuerdo con los resultados las explosiones del 2019 estuvieron agrupadas al norte del volcán a diferencia de las del 2021 que se ubicaron al sur. En las localizaciones de las exhalaciones registradas en noviembre y diciembre de 2021 se pudo distinguir un posible conducto que al menos recorre desde los 2776 a 4375 m de altitud. El sistema de localización tiene como finalidad ser una herramienta útil para el análisis de la actividad sísmica, así como apoyo en la toma de decisiones del Comité Científico Asesor del volcán Popocatepetl.





## Bibliografía

- Arámbula, M, R. (2002), Interpretación del tremor armónico registrado en el Volcán Popocatepetl durante la crisis eruptiva de diciembre del 2000. Tesis de licenciatura. UNAM.
- Arámbula, M, R. (2011), Clasificación automática de eventos sísmicos volcánicos y análisis de la actividad sísmica reciente en el volcán de Colima. Tesis doctoral. UNAM.
- Battaglia, J., y Aki, K. (2003), Location of seismic events and eruptive fissures on the Piton de la Fournaise volcano using seismic amplitudes, J. Geophys. Res., 108, 2364, doi:10.1029/2002JB002193, B8.
- Battaglia, J., Aki, K. y Ferrazzini, V., (2005), Location of tremor sources and estimation of lava output using tremor source amplitude on the Piton de la Fournaise volcano: 1. Location of tremor sources. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 147, 31-53.
- Del Pezzo E., Godano C., Gorini A., Martini M. (1992) Wave Polarization and Location of the Source of the Explosion Quakes at Stromboli Volcano. In: Gasparini P., Scarpa R., Aki K. (eds) Volcanic Seismology. IAVCEI Proceedings in Volcanology, vol 3. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-77008-1\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-642-77008-1_21)
- Gómez-Santiago, F. (2009). Sísmicidad del Volcán Popocatepetl durante el crecimiento de dos domos de lava en Agosto de 2001. Tesis de Maestría. UNAM.
- Hidayat, D., Voight, B., Langston, Charles, Ratdomopurbo, A, Ebeling, C. (2000). Broadband seismic experiment at Merapi Volcano, Java, Indonesia: Very-long-period pulses embedded in multiphase earthquakes. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 100. 215-231. 10.1016/S0377-0273(00)00138-4.
- Jolly, A. D., Thompson, G., Norton, G. E. (2002). Locating pyroclastic flows on Soufrière Hills Volcano, Monserrat, West Indies, using amplitude signals from high dynamic range instruments. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 118, 299-317.
- Kawakatsu, H., Kaneshima, S., Matsubayashi, H., Ohminato, T., Sudo, Y., Tsutsui, T., Uhira, K., Yamasato, H., Ito, H., Legrand, D. (2000). Aso94: Aso seismic observation with broadband instruments, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 101, 129-154. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(00\)00166-9](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00166-9).
- Neuberg J, Luckett R. (1996). Seismo-volcanic sources on Stromboli volcano. Ann. Geophys, Vol 39 (2). <https://doi.org/10.4401/ag-3969>





**SEGURIDAD**

SECRETARÍA DE SEGURIDAD  
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



**CNPC**

COORDINACIÓN NACIONAL  
DE PROTECCIÓN CIVIL



**CENAPRED**

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN  
DE DESASTRES

- Rautian, T. G., Khalturin, V. I., (1978), The use of the coda for determination of the earthquake source spectrum. Bulletin of the Seismological Society of America. 68, 923-948.
- Thompson, G. y Reyes, C. (2016). GISMO: A MATLAB toolbox for seismic research, monitoring and education. 10.13140/RG.2.1.3085.7202.
- Valdés, C., González, G., Arciniega, A. (1997), El Popocatepetl un volcán sísmicamente activo. Rev. de Ingeniería Civil 334, 33-38.

**Elaboró:** Sergio Valderrama Membrillo

**Revisó:** Alicia Martínez Bringas y Carlos Gutiérrez Martínez

