

**SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN
COORDINACIÓN NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES**

ACTIVIDAD DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL

2016

Subdirección de Riesgos Volcánicos
Dirección de Investigación

Amiel Nieto Torres
Gema Caballero Jiménez.
Ramón Espinasa Pereña
Adriana Ramírez Castillo
Lilia Calva Rodríguez
Elizabeth Castañeda Bastida
Ariadna Hernández Osoy

CONTENIDO

Resumen

Actividad sísmica

Eventos de periodo largo (exhalaciones, explosiones, trenes de exhalaciones) y tremor
Sismos volcanotectónicos

Anomalías térmicas

Monitoreo de gases

Monitoreo hidrogeoquímico

Análisis de lixiviados de cenizas

Diagnóstico

RESUMEN

A lo largo de 2016 se registraron 19,182 exhalaciones, 21,884 pulgas, 665 explosiones, 726 sismos volcanotectónicos y 661.7 horas de tremor. Esta actividad sísmica estuvo asociada al emplazamiento y destrucción de nueve domos de lava con volúmenes de hasta 2 millones de metros cúbicos. Los tres sistemas de monitoreo de gases registraron sus valores más altos los días 24 y 25 de enero, cuando se obtuvo un valor de 27,300 t/día de SO₂ con el DOAS; el 25 de enero el OMI obtuvo un valor de 6,300 t y con COSPEC se midieron 9,600 t/día de SO₂ el 28 de enero, durante el emplazamiento del domo de lava número 63. La lava de este domo produjo un NTI de -0.14 y un VRP de 120 Megawatts. Se presentaron entre julio y agosto dos enjambres de sismos volcanotectónicos, que en total sumaron 450 eventos, varios con magnitudes de hasta 3.8, localizados debajo del cono y a 8 kilómetros al sureste del cráter. En septiembre se encontró boro en el manantial Axocopan, en una concentración de 0.4 mg/l. El aeropuerto Hermanos Serdán tuvo que ser cerrado por la caída de ceniza el 18 de abril, mientras que el 1 de agosto fue notable la caída de ceniza en la Ciudad de México

ACTIVIDAD SÍSMICA

De acuerdo con el monitoreo sísmico, el 2016 se caracterizó principalmente por la ocurrencia de señales sísmicas asociadas con el movimiento de fluidos (LP y tremor), así como por el registro de eventos asociados al fracturamiento de roca (sismos volcanotectónicos, VT). Durante 2016 se observó un incremento en el registro de eventos sísmicos respecto del año anterior, prácticamente se duplicaron todos los parámetros de monitoreo sísmico (Tabla 1, Figura 1).

Tabla 1. Resumen de la sismicidad del volcán Popocatepetl durante 2016					
Mes	Exhalaciones	Pulgas	Explosiones	VT	Tremor (horas)
Enero	513	370	97	5	81.95
Febrero	834	625	27	10	1
Marzo	766	892	139	10	36.82
Abril	1452	1568	60	8	22.5
Mayo	1632	2270	69	19	60.7
Junio	2441	3787	42	37	63.1
Julio	2152	1437	52	75	65.7
Agosto	903	1417	83	389*	51.67
Septiembre	1843	2925	22	38	68.03
Octubre	2907	2113	17	40	66.88
Noviembre	3172	3864	13	66	55.46
Diciembre	567	616	34	29	87.86
Total 2016	19,182	21,884	665	726	661.7
Total 2015	12,252	11,767	1708	199	173.02

* De estos solo se pudieron localizar 100 sismos

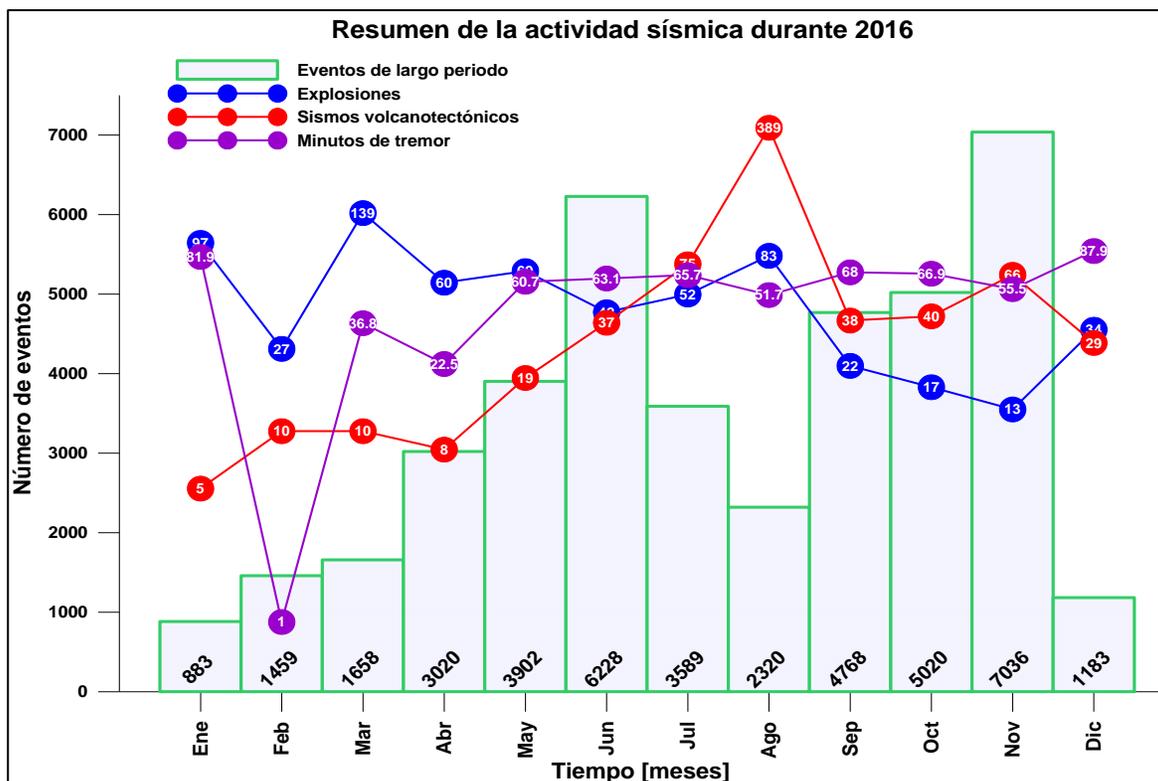


Figura 1 Resumen anual de la actividad sísmica registrada en el volcán Popocatepetl durante 2016

Eventos de periodo largo (exhalaciones, explosiones, trenes de exhalaciones) y tremor

Durante los primeros tres meses del año se contabilizaron 4,263 eventos de periodo largo (LP), de los cuales 4,000 fueron considerados como exhalaciones y pulgas, los 263 eventos restantes se clasificaron como explosiones. Además de estos eventos sísmicos, durante enero se registraron tres episodios de actividad estromboliana, esto es trenes de LP (explosiones y exhalaciones) con una mezcla de tremor armónico, en total se contabilizaron 70.9 horas de trenes de LP tanto de baja como de mediana amplitud, los días 6-7, 23-24 y 24-25 (Figura 2). Además, en este trimestre se registraron 120 horas de tremor armónico, que se presentó en forma de paquetes con duraciones desde unos pocos segundos hasta una hora.

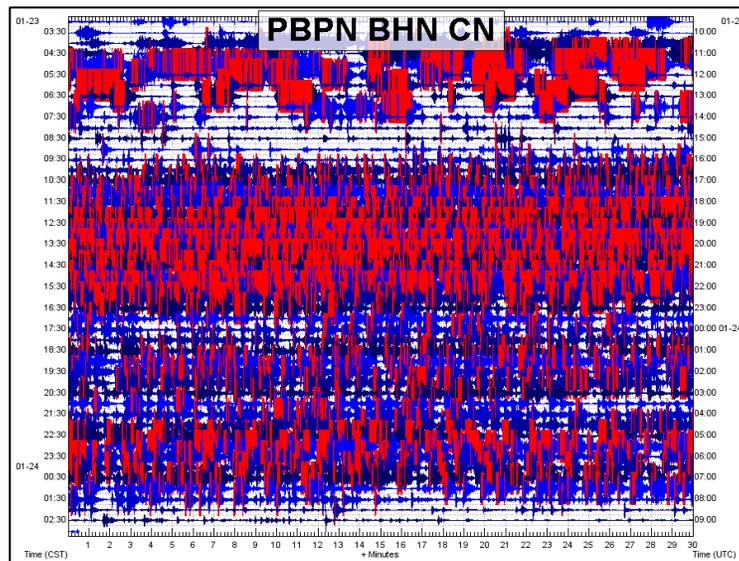


Figura 2 Heligrama de la sismicidad registrada entre el 23 y 24 de enero en la estación Canario (componente norte)

Los episodios ocurridos del 23 al 25 de enero consistieron en explosiones estrombolianas de poca magnitud, que emitieron fragmentos incandescentes por encima del cráter y a distancias de hasta 1 km (Figura 3).



Figura 3 Erupción estromboliana en el Popocatepetl el 23 de enero alrededor de las 20:00 h
Foto de Robin Campion

En un sobrevuelo realizado el 27 de enero se pudo observar que durante los episodios de actividad estromboliana se construyó el domo 63 (Figura 4) al que se le estimaron 300 m de diámetro y un volumen de alrededor de 2,000,000 m³.

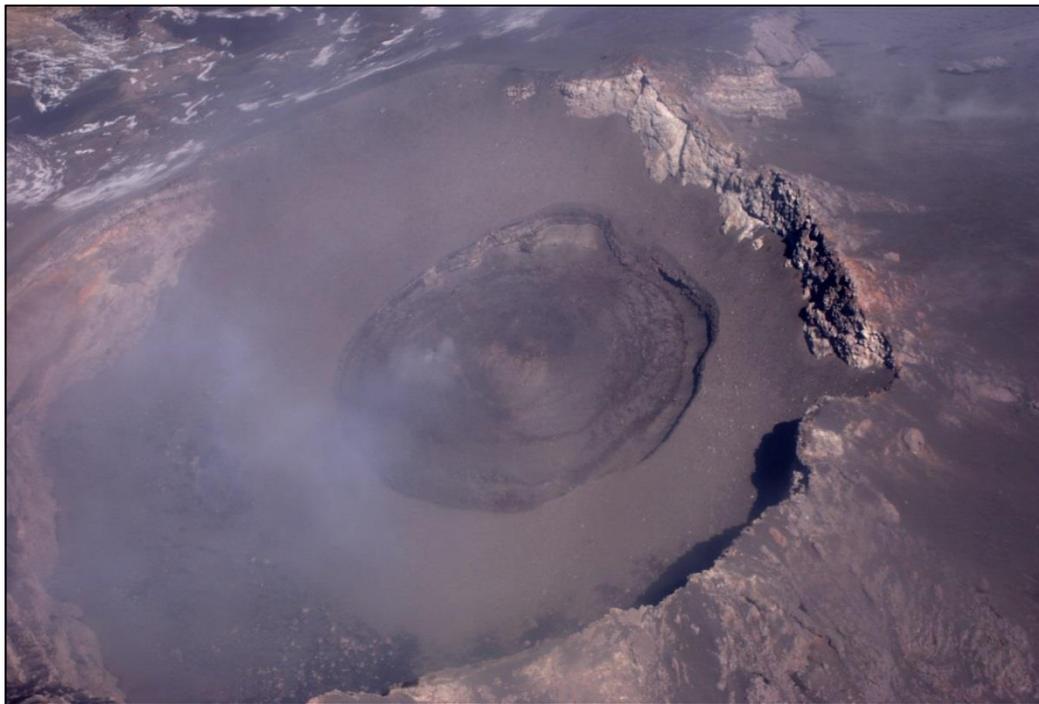


Figura 4 Vista aérea del cráter principal del Popocatepelt desde el suroeste. Puede verse el domo 63 rellenando el cráter interno, casi hasta el nivel del piso del cráter principal

Información proporcionada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos indicó que, para el 18 de febrero, el domo se había desinflado y las explosiones ocurridas habían creado un pequeño y poco profundo cráter en su superficie. Para el 20 de febrero el domo había sido ya completamente destruido. Entre el 24 y el 26 de febrero dio inicio la formación de otro domo (64), que para fin de mes ya superaba los 100 m de diámetro. El 4 de marzo se detectó un nuevo domo de lava (65) que había alcanzado 150 x 115 m, y para el 7 de marzo dicho domo ya empezaba a estar cubierto por tefra y balísticos producto de las explosiones. En este trimestre las explosiones más importantes se registraron durante los días 27, 29, 30 y 31 de marzo, las columnas de estos eventos alcanzaron entre 2 y 3 km por encima del cráter con expulsión de fragmentos incandescentes a corta distancia (Figura 5).

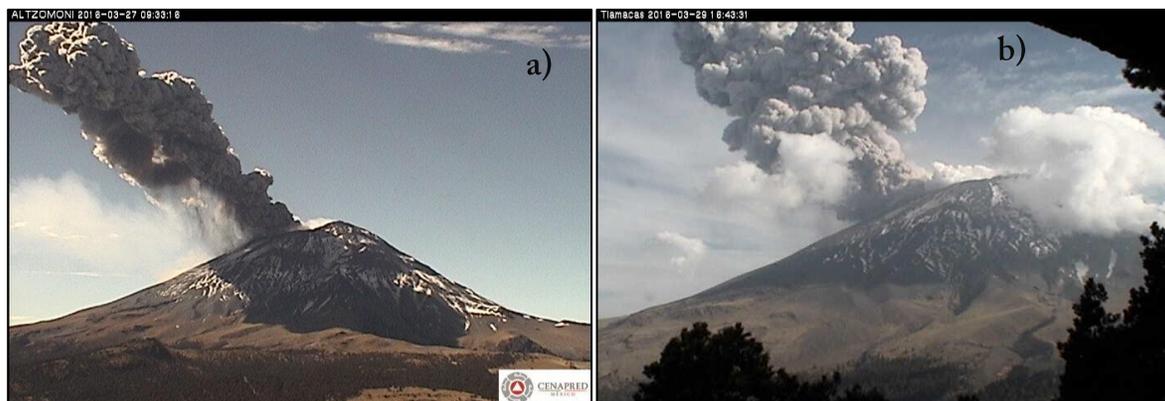


Figura 5 Imágenes de explosiones registradas durante los últimos días de marzo: a) 27 de marzo, b) 29 de marzo

A partir de abril se duplicó el registro de eventos tipo LP; entre abril y mayo, se registraron en promedio 136 eventos por día. Este elevado número de eventos LP tuvo un máximo en junio, mes en el que se presentó el promedio máximo de 184 por día. Las explosiones más importantes de este trimestre se registraron los días 3 de abril (Figura 6), 19 y 24 de mayo y el 5 y 12 de junio (Figura 7). Estos eventos generaron columnas de ceniza de más de 3 km de altura por encima del cráter; además, se observó la caída de fragmentos incandescentes en las laderas este y sureste del volcán, a una distancia aproximada de 3.5 km. En este mes el número total de minutos de tremor disminuyó, sin embargo los episodios aumentaron su duración, con eventos que duraron hasta dos horas.



Figura 6 Imágenes de la explosión registrada el día 3 de abril de 2016 (izquierda vista de Tlamacas; derecha vista de Tianguismanalco)

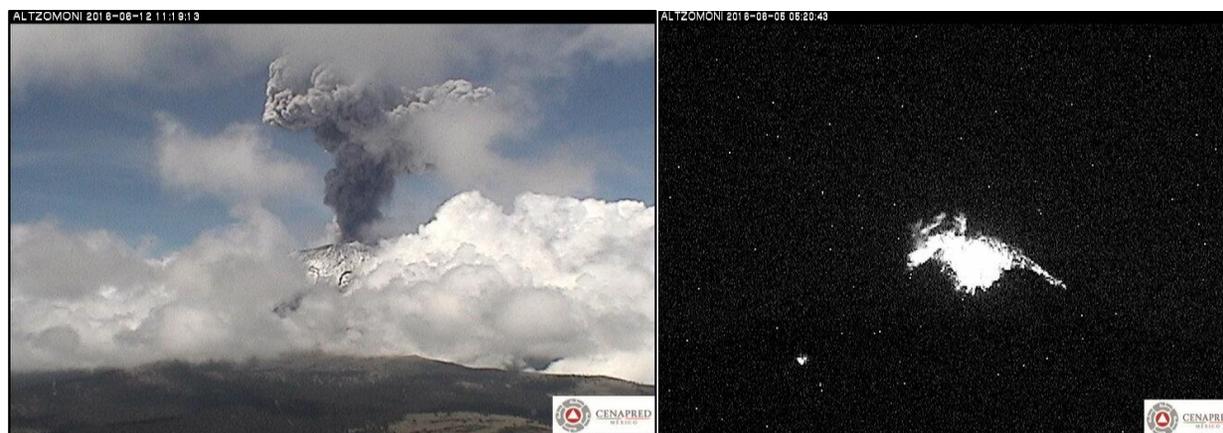


Figura 7 Imágenes de las explosiones registradas el 5 y 12 de junio de 2016

El 18 de abril se registró un episodio de actividad estromboliana caracterizado por la emisión de fragmentos incandescentes y columnas de ceniza. Este episodio inició a las 02:32 h, se incrementó de manera gradual y se intercaló con segmentos de tremor armónico de baja amplitud; durante la fase más intensa, se observó que los fragmentos arrojados alcanzaron distancias de hasta 1.6 km sobre las pendientes de la ladera noreste del volcán. El episodio concluyó a las 05:50 h (Figura 8). Las columnas de ceniza alcanzaron una altura promedio de 3 km por encima del cráter, desplazándose con dirección este-noreste (Figura 9), lo que produjo abundante caída de ceniza en la ciudad de Puebla (Figura 10) y el cierre del aeropuerto Hermanos Serdán durante 15 horas para realizar limpieza de las pistas.

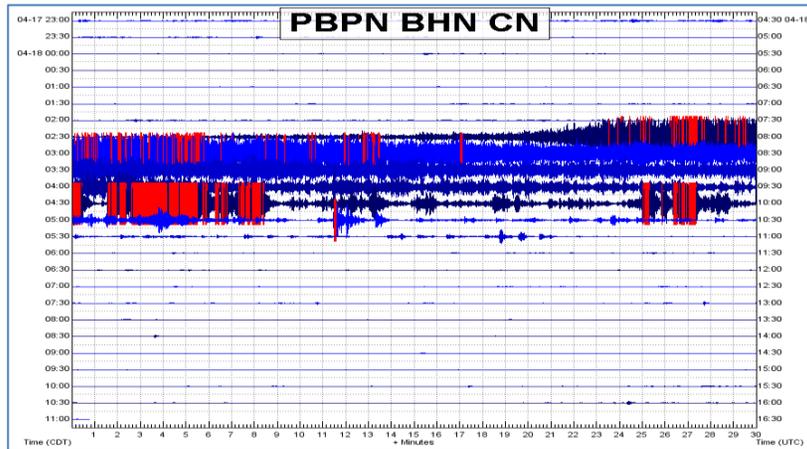


Figura 8 Heligrama del episodio de actividad estromboliana registrado el 18 de abril



Figura 9 Episodio de actividad estromboliana del 18 de abril.
Izquierda, desde Tlaxiaco; derecha, desde Altzomoni



Figura 10 Imágenes de la caída de cenizas durante la madrugada del 18 de abril en Puebla

Durante abril, mayo y junio no se realizaron sobrevuelos. Sin embargo, a partir de información proporcionada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, se confirmó que el domo 65 fue destruido por las explosiones ocurridas a finales de marzo. El fondo del cráter interno se mantuvo cubierto por tefra, al menos hasta el 16 de abril. La actividad estromboliana registrada la madrugada del 18 acompañó el emplazamiento del domo 66, que para el 25 de abril ya había rellenado la mayor parte del cráter interno, por lo que se le estimaron unos 250 m de diámetro y 15 de espesor, para un volumen de 736,000 m³. La superficie de este domo presentaba muchas crestas de presión, lo que sugiere una menor viscosidad que anteriores domos, y confirma que el emplazamiento se dio mediante una fuente de lava. Para el 27 de abril la superficie del domo había comenzado a desinflarse. A lo largo de mayo y junio se presentaron diversos episodios de tremor armónico que en total sumaron 60.7 horas, con duraciones entre 1 y 600 minutos. Durante mayo el domo 66 continuó su deflación y destrucción mediante las explosiones ocurridas durante este mes, generándose un cráter profundo en su centro, rodeado por los restos de la superficie de lava del domo.

El 4 de junio, se registró un episodio de actividad estromboliana con exhalaciones y explosiones de baja intensidad. Mediante el monitoreo visual se observó una emisión continua de ceniza y gases volcánicos, con una altura de 1.5 km por encima del cráter, así como fragmentos incandescentes en las laderas del volcán (Figura 11).

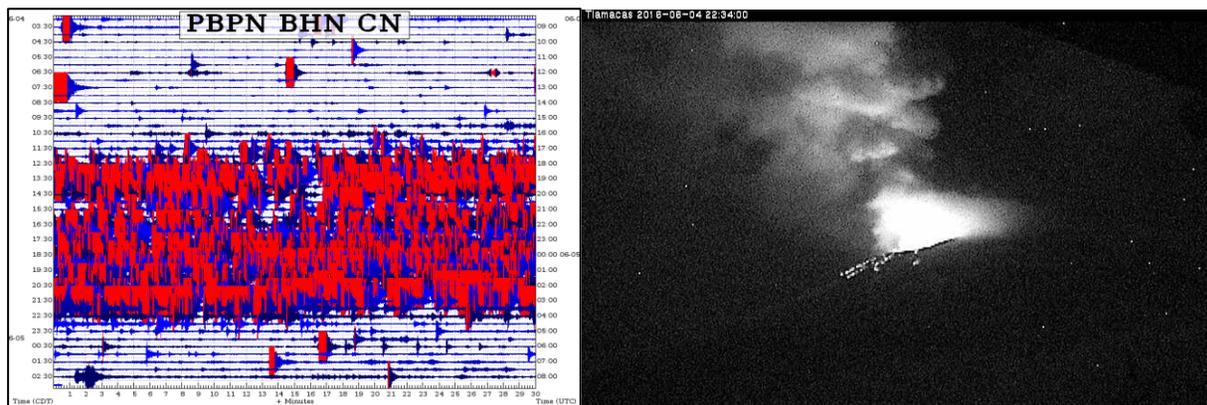


Figura 11 Episodio de actividad estromboliana registrado el 4 de junio de 2016

Dos días después, el 6 de junio se registró otro episodio de actividad estromboliana, que tuvo una duración de 2 horas con 58 minutos. Finalmente, el 9 de junio se registró un tercer episodio, de las 06:38 a las 11:30 horas; la altura de la emisión de gases volcánicos y ceniza alcanzó 1.5 km por encima del cráter. Solamente se tuvo reporte de ligera caída de ceniza el 9 de junio, en el municipio de Tepetlixpa, ubicado al este del volcán, a unos 20 kilómetros en línea recta desde el cráter. Para el 12 de junio se había emplazado el domo 67 en el interior del cráter interno, con un diámetro de 200 metros. Para el 26 este domo ya había sido destruido mediante las explosiones ocurridas durante estos días.

En julio se observó un ligero decremento en el registro de eventos LP, aunque el promedio continuó siendo alto, en promedio se registraron 115 eventos por día. También se presentaron más eventos explosivos, con la emisión de fragmentos incandescentes a corta distancia sobre las laderas del volcán (Figura 12). El registro de tremor aumentó ligeramente en julio, se presentaron 65 horas de tremor pero en segmentos más cortos que el mes anterior, de hasta 280 minutos.



Figura 12 Imágenes de las explosiones registradas el 26 y 30 de julio de 2016

El 10 de julio, de las 05:11 a las 07:52 h se registró un episodio de actividad estromboliana, que consistió en exhalaciones y explosiones de baja intensidad. Debido a las condiciones de nubosidad en la zona no se tuvo visibilidad hacia el volcán. El 31 de julio se registró un nuevo episodio de actividad estromboliana, que tuvo una duración de 10 horas con 26 minutos. La columna eruptiva alcanzó hasta 2.5 km por encima del cráter y los fragmentos incandescentes cayeron principalmente en el flanco noreste del volcán, a una distancia máxima de 1.2 km (Figura 13). Se tuvo reporte de caída de ceniza en nueve delegaciones de la Ciudad de México, así como en los municipios de Ozumba, Atlautla, Tlalmanalco, Ecatzingo, Tepetlixpa y Amecameca, pertenecientes al Estado de México.

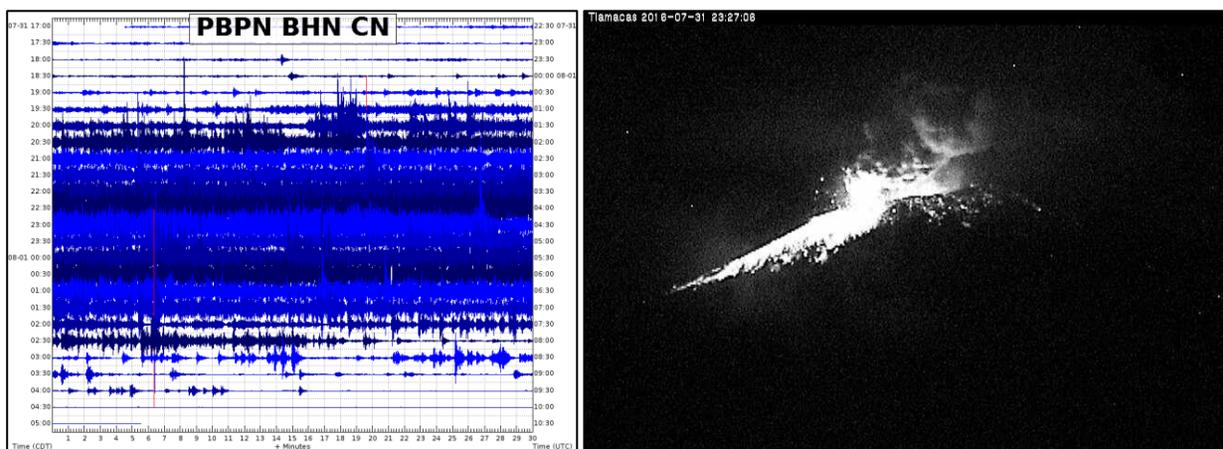


Figura 13 Episodio de actividad estromboliana registrado el 31 de julio de 2016

A lo largo de agosto el número de exhalaciones y pulgas disminuyó, el promedio mensual fue de apenas 89 por día. Sin embargo, aunque se registró un incremento en el número de eventos explosivos, se trató de eventos menores (Figura 14).



Figura 14 Imágenes de explosiones registradas el 12 y 13 de agosto

Los segmentos de tremor registrados en agosto sumaron 51 horas, con duraciones entre 1 y 280 minutos. En general fueron de baja amplitud. La frecuencia fundamental de la mayoría de los episodios estuvo entre 1 y 4 Hz e incluso menor. En algunos segmentos se observaron hasta cuatro sobretonos bien definidos, equiespaciados cada 1.3 Hz, con frecuencia fundamental de 2.6 Hz (Figura 15).

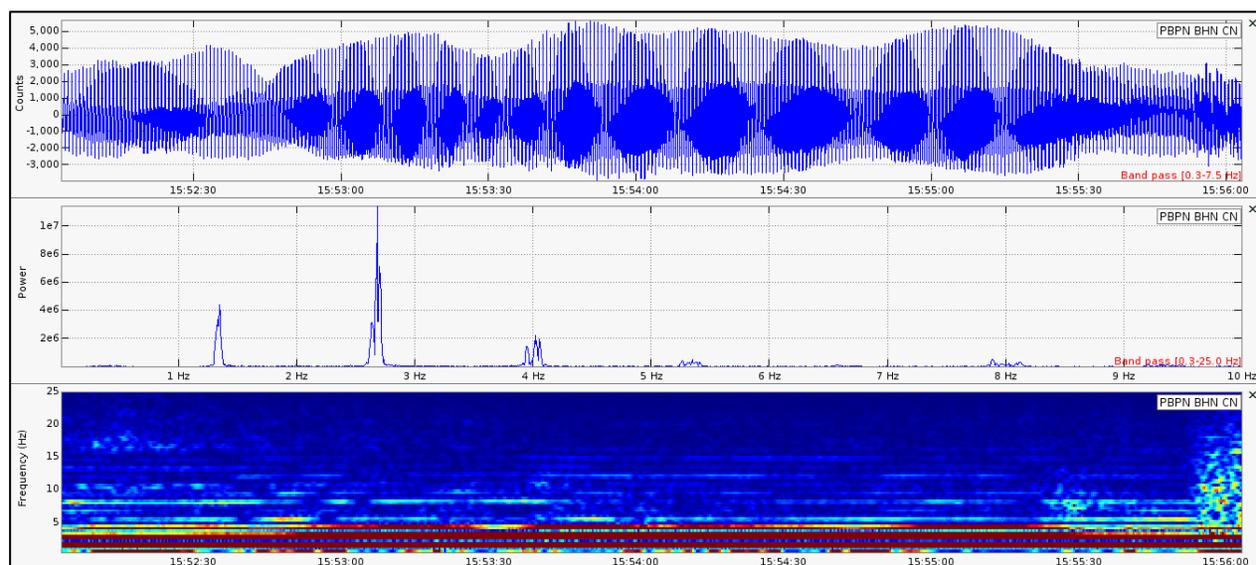


Figura 15 Forma de onda, espectro y espectrograma de un segmento de tremor registrado el 9 de agosto, en la estación Canario (PBP) en su componente norte

A las 17:56 del 10 de agosto se registró en las estaciones sísmicas del volcán una señal sísmica con las características de un derrumbe (Figura 16).

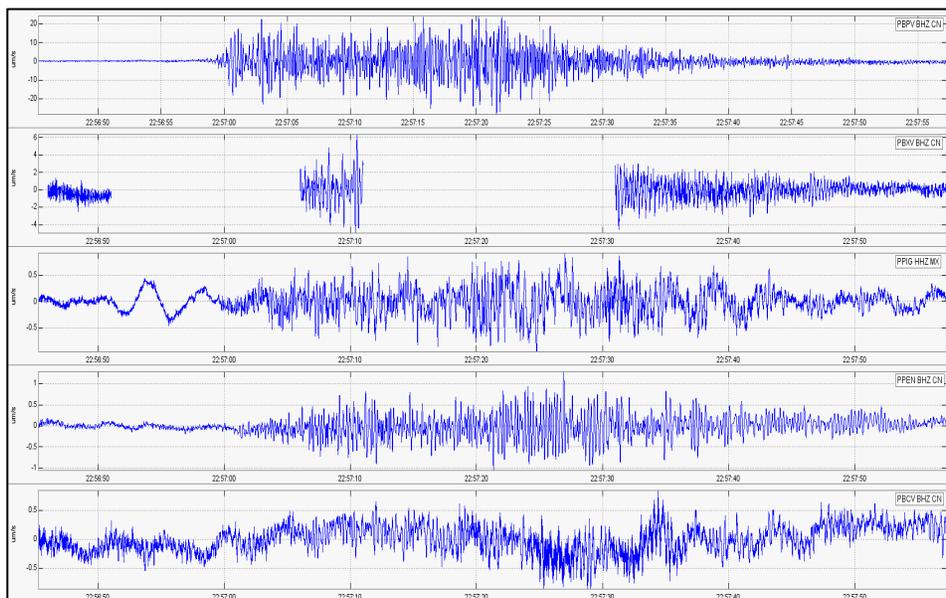


Figura 16 Señal sísmica del derrumbe ocurrido el 10 de agosto

El análisis de las imágenes de las cámaras fijas en Altzomoni y Tlamacas permitió confirmar que se había tratado de un derrumbe de uno de los *seracs* remanentes del glaciar que estuvo alojado en la cara norte hasta su destrucción en enero de 2001. (Figura 17), y que por tanto el derrumbe no fue resultado directo de la actividad volcánica.

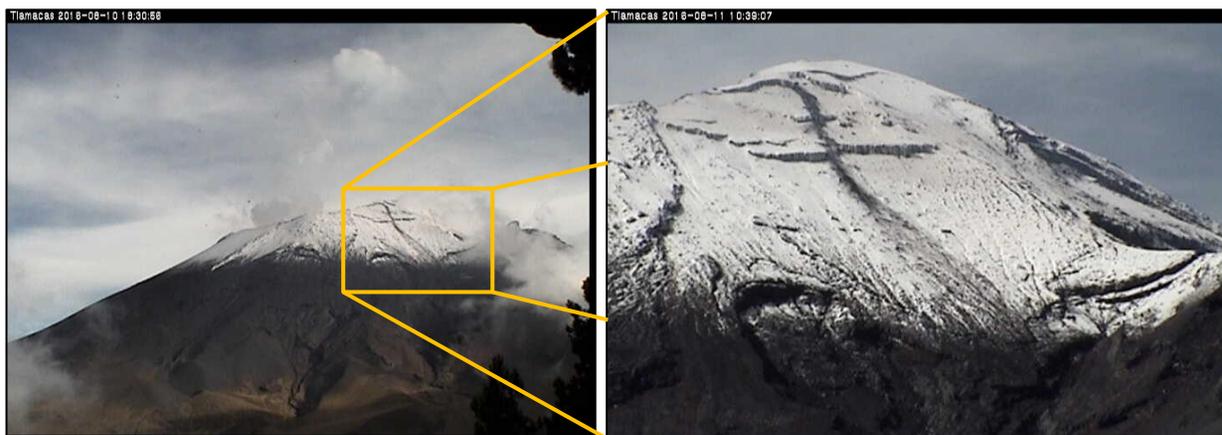


Figura 17 Huellas del derrumbe de un serac remanente del glaciar en la cara norte del volcán, ocurrido el 10 de agosto de 2016

El 30 de agosto, con apoyo de la Secretaría de Marina, se realizó un sobrevuelo al cráter del volcán. Se pudo confirmar que las explosiones ocurridas el 27 y 28 de agosto destruyeron el domo No 69, emplazado entre el 31 de julio y el 1° de agosto; en su lugar quedó un cráter con un diámetro estimado de 300 m (Figura 18).



Figura 18 Imagen del cráter del volcán Popocatepetl, no se observa la presencia de domo

En septiembre nuevamente se registró un incremento en el registro de eventos tipo LP; en promedio se presentaron 158 por día. El tremor armónico también aumentó, pues se presentaron más de 66 horas durante este mes. Esta misma tendencia se presentó durante octubre. Sin embargo en noviembre el número de eventos LP promedio por día fue de 234, lo que representa un notable incremento en el registro de este tipo de eventos. El 25 de noviembre a las 9:45 a.m. se registró una explosión, que generó una columna eruptiva que alcanzó 5 km por encima del cráter, y la duración del registro sísmico fue de 105 minutos (Figura 19). Derivado de esta explosión, se reportó ligera caída de ceniza en los municipios de Atlixco, Tochimilco y San Pedro Benito Juárez, pertenecientes al estado de Puebla.

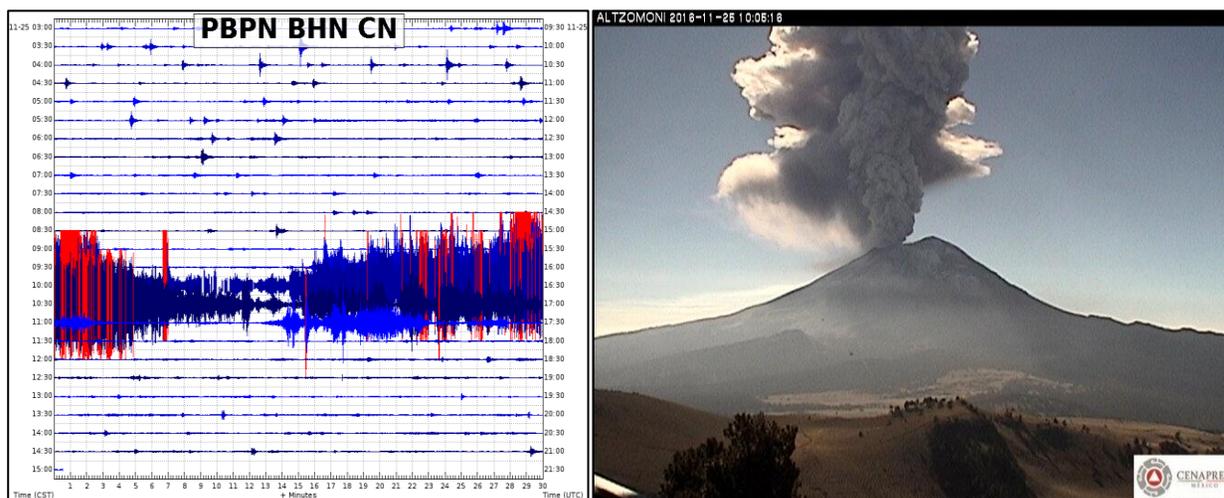


Figura 19 Sismograma e imagen de la explosión registrada el 25 de noviembre de 2016

A través del análisis de las imágenes del satélite Landsat 7, del 20 de noviembre, se pudo determinar que, previo a la explosión del viernes 25 de noviembre, existía un domo de lava en el interior del cráter interno con un diámetro aproximado de 120 m, que correspondería al domo número 70 (Figura 20).

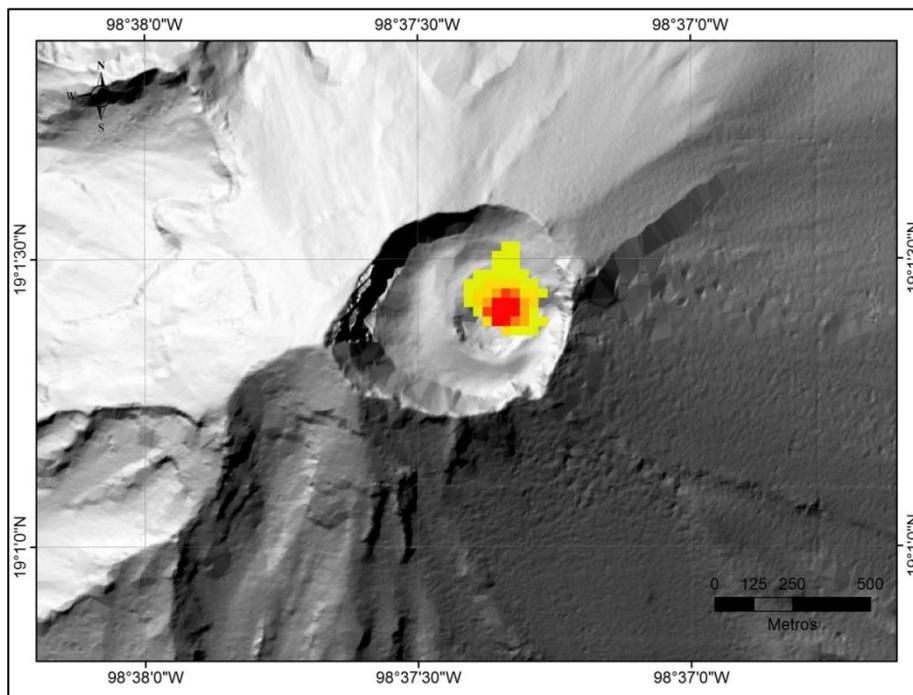


Figura 20 Modelo digital de elevación del Popocatepetl con las zonas de mayor temperatura de la Imagen Landsat 7 (bandas 6 y 7) del 20 de noviembre 2016

Los últimos dos días de noviembre se registraron dos episodios de actividad estromboliana, que produjeron el crecimiento del domo número 71. El primero inició a las 05:58 h del día 29 y tuvo una duración de cuatro horas, con emisión de gases volcánicos y ceniza cuya altura no rebasó los 1,500 m sobre el cráter. Al inicio del episodio se observaron fragmentos incandescentes sobre las laderas del volcán (Figura 21).

El segundo episodio inició a las 20:47 h del día 29 y terminó a las 04:35 h del día 30, la emisión constante de gases volcánicos, ceniza y fragmentos incandescentes sobre las laderas del volcán tuvo una duración de ocho horas, con una altura promedio de la columna eruptiva de 1 km sobre el cráter. Se tuvo reporte de caída de ceniza en los municipios de San Nicolás de los Ranchos, Cholula, Puebla, San Andrés Calpan, Huejotzingo y San Martín Texmelucan en el estado de Puebla, además en San Pablo del Monte, en el estado de Tlaxcala.

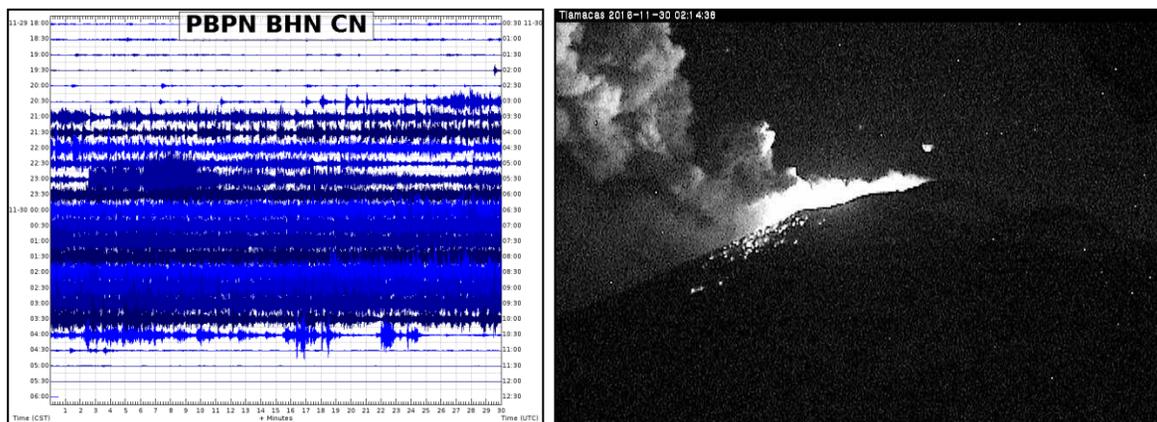


Figura 21 Sismograma e imagen del episodio de actividad estromboliana registrado el 29-30 de noviembre

Durante diciembre se registraron varios trenes de eventos de tipo LP que en total sumaron 12.67 horas; los más importantes se registraron los días 2, 9 y 19 de diciembre (Figura 22). Finalmente en diciembre el registro de eventos LP disminuyó considerablemente, solamente hubo 38 por día en promedio, mientras que hubo un incremento considerable en el registro de tremor, con más de 84 horas en segmentos con duraciones de hasta 200 minutos.

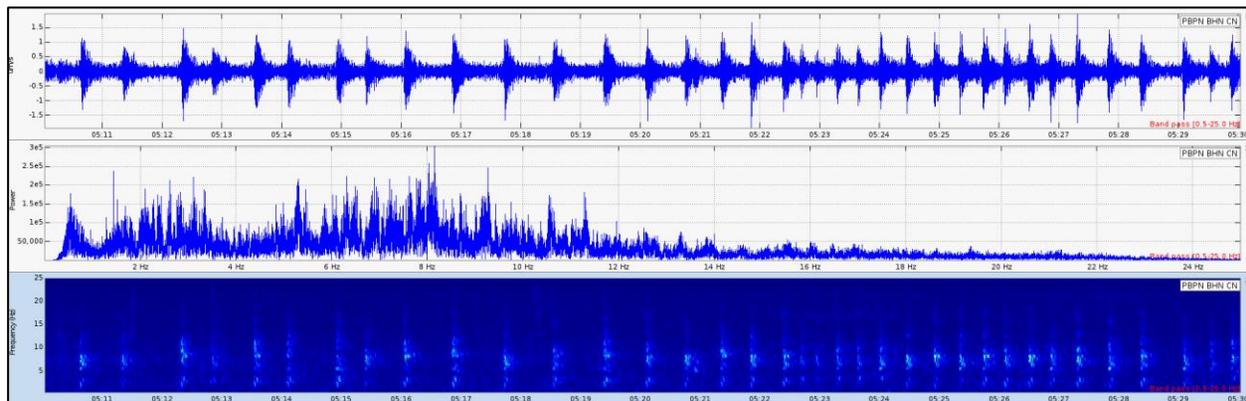


Figura 22 Forma de onda, espectro y espectrograma de un segmento de trenes de eventos tipo LP, registrado en diciembre de 2016 en la estación Canario (PBP) en su componente norte

Sismos volcanotectónicos

A lo largo de la primera mitad del 2016 los sismos volcanotectónicos fueron aumentando en número progresivamente. En enero se registraron cinco VT, Los hipocentros se situaron entre los 5.2 y 8.6 km bajo el cráter, y sus magnitudes variaron entre 1.2 y 2.8. Estos eventos volcanotectónicos se registraron días previos a los episodios de trenes de LP y de tremor. En febrero el número de eventos VT se duplicó, se registraron 10, este número de VTs se mantuvo en marzo, en abril disminuyó ligeramente pero luego en junio aumentó hasta alcanzar un máximo en agosto (Figura 23).

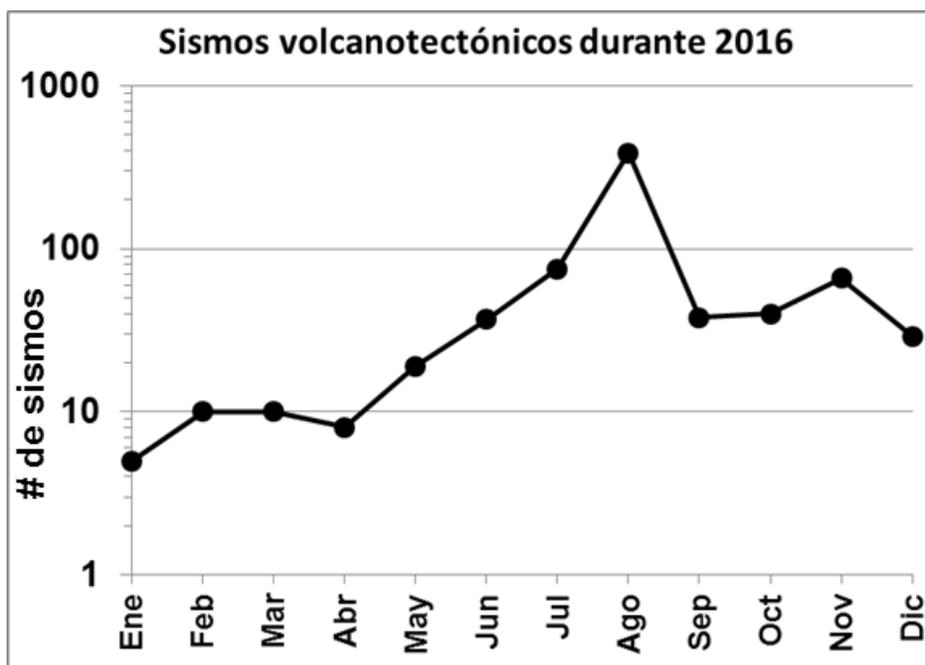


Figura 23 número mensual de sismos volcanotectónicos registrados durante 2016 en el Popocatepetl

A lo largo del año los sismos volcanotectónicos se localizaron en dos regiones principales: directamente bajo el cráter en las cercanías del cono volcánico y en una región ubicada 8 km al sureste del cráter. Algunos otros eventos menores se localizaron al noroeste y al norte del cráter (Figura 24).

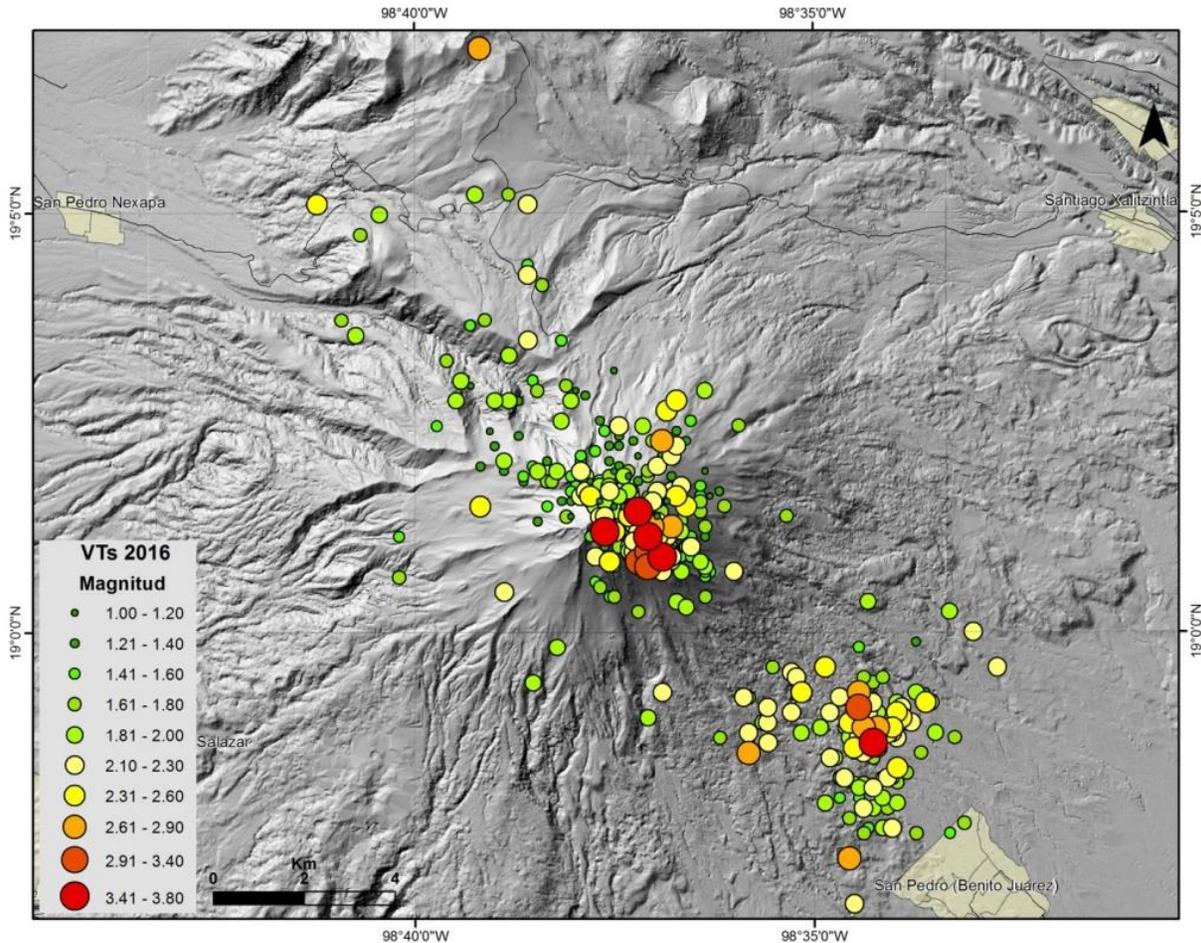


Figura 24 epicentros de los sismos volcanotectónicos registrados durante 2016 en el Popocatepetl

Durante el primer trimestre del año los hipocentros de los VT localizados en el sector sureste tuvieron profundidades entre 5 y 8 km, mientras que los VT que se localizaron bajo el cono del volcán tuvieron profundidades entre 3.6 y 5.4 km. De enero a marzo la profundidad de los VT fue disminuyendo, hasta alcanzar una profundidad mínima de 2 km, sin embargo para la segunda quincena de abril y la primera quincena de mayo, la profundidad de los hipocentros volvió a aumentar. Durante junio los hipocentros se situaron entre los 1.4 y 9.5 km bajo el cráter, y sus magnitudes variaron entre 1.4 y 2.7. En promedio se registraron 1.2 eventos por día. A partir de la segunda quincena de mayo se notó un incremento en el número de VT, la mayoría de los sismos registrados y localizados en ese mes tuvieron profundidades más someras que en meses anteriores, aunque también se incrementaron las profundidades máximas de algunos hipocentros (Figuras 25).

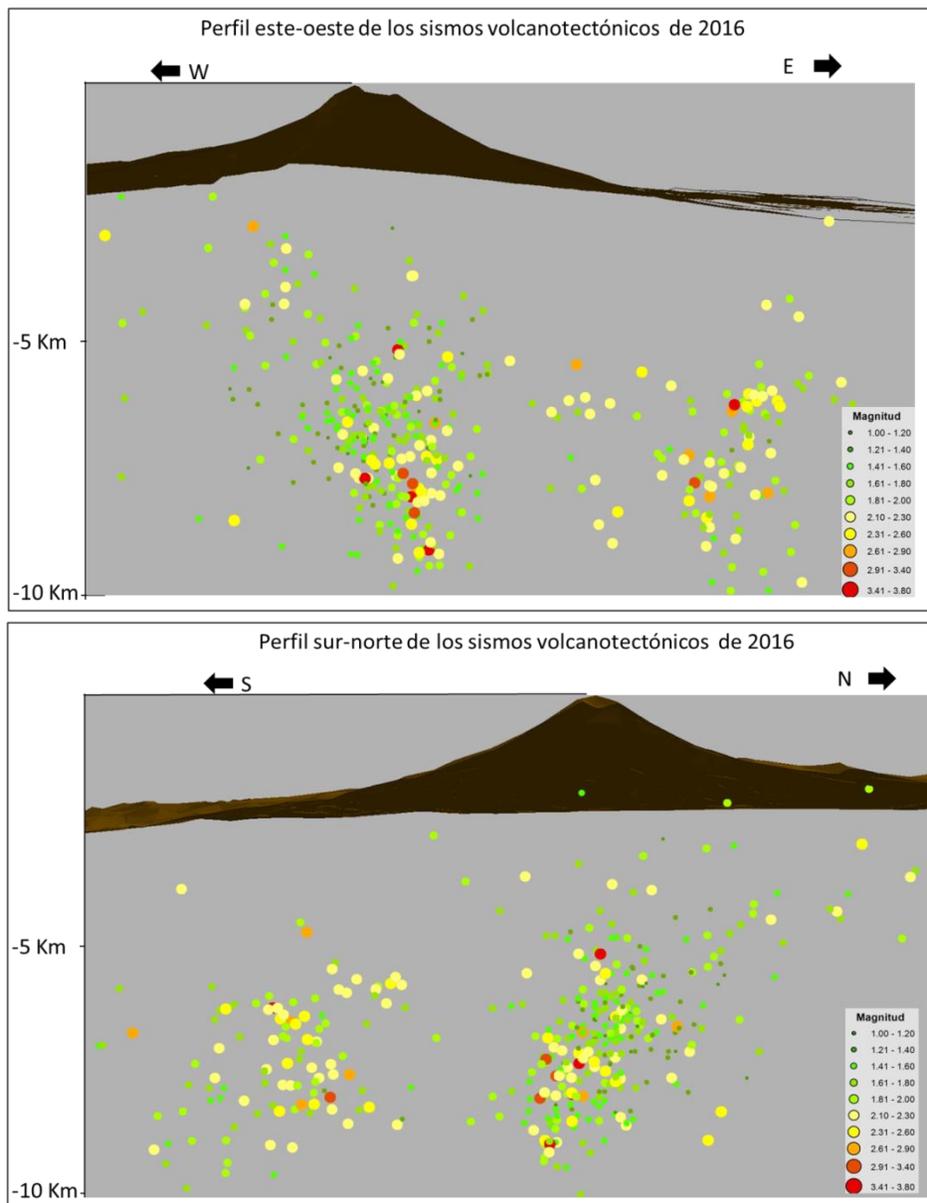


Figura 25 Hipocentros de los VTs localizados durante 2016. Arriba, perfil oeste-este; abajo, sur-norte

Durante julio se registraron 75 eventos VT, 38 más que el mes anterior. Los hipocentros se situaron entre 1 y 9 km bajo el cráter, y sus magnitudes variaron entre 1.3 y 3.8. En promedio se registraron 2.4 eventos por día. El 8 de julio se registró un enjambre de 39 sismos volcanotectónicos, de los cuales se pudieron localizar 32; estos eventos se registraron a profundidades entre 1 y 4.2 km por debajo del cráter, con magnitudes entre 1.3 y 3.8; después del 8 de julio se registraron 37 sismos más. El sismo de magnitud 3.8 está entre los tres más importantes que se han registrado en el Popocatepetl desde que reinició su actividad a principios de los 90's. Durante agosto se registraron 389 VT. De éstos, 41 ocurrieron durante los primeros 29 días del mes, con magnitudes entre 1.3 y 2.7, a profundidades entre 2 y 8.1 km bajo el cráter. Los 348 restantes se registraron entre el 29 y el 31 de agosto como un enjambre. Únicamente 59 se pudieron localizar con tres estaciones o más, y se ubicaron en el sector sureste del volcán. El evento principal tuvo una magnitud de 3.8 y una profundidad de 6.2 km bajo el cráter; los restantes eventos tuvieron magnitudes entre 0.7 y 3, con profundidades entre 3 y 6.6 km.

Con ayuda del Servicio Sismológico Nacional (SSN), se realizó la inversión del tensor de momento del sismo principal, para obtener su mecanismo de falla. Las estaciones utilizadas en la inversión fueron Platanillo (PPIG), Oaxaca(OXIG) y Pinotepa (PNIG). El mecanismo obtenido fue de tipo normal, con rumbo de 118° y echado de 75° al NE (Figura 26).

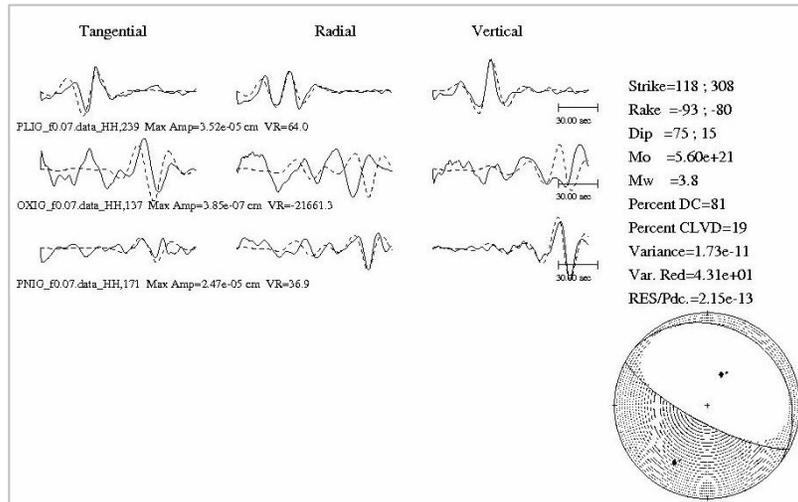


Figura 26 Resultado de la inversión del tensor de momento del sismo principal

A finales de septiembre se observaron nuevamente hipocentros profundos, lo que indica un cambio en el estado de esfuerzos del volcán. Durante octubre la profundidad máxima de estos eventos fue de 7.3 km, mientras que la mayoría se concentraron entre los 3 y 6 km por debajo del cráter (Figura 27).

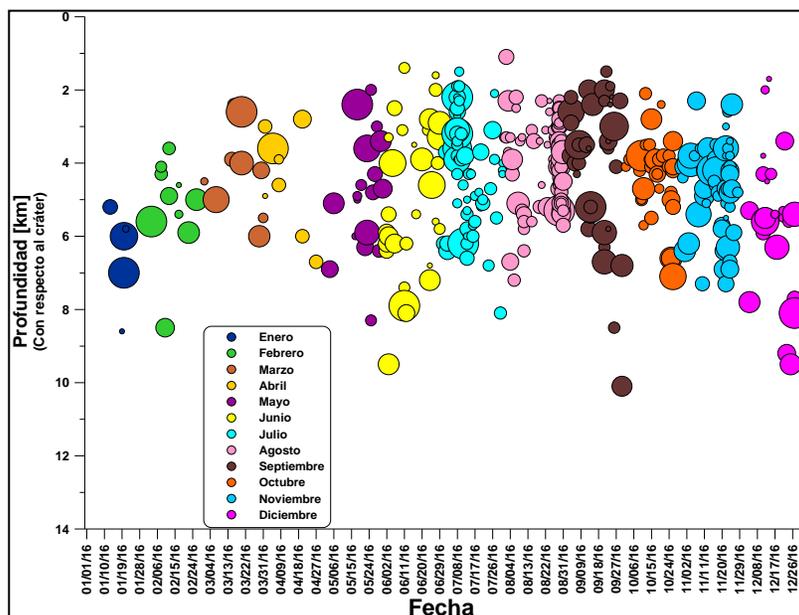


Figura 27 Variación en profundidad y magnitud de los sismos volcanotectónicos de 2016
Los colores representan los meses, el cero corresponde al nivel del cráter

Durante noviembre se registraron en total 66 sismos volcanotectónicos con magnitudes de entre 1.1 y 2.5. Se observaron dos tendencias, los VT que se ubican justo bajo el edificio volcánico, a profundidades entre los 0 y 3 km con respecto al nivel medio del mar, y los que se ubican en el sector sureste. Del 21 al 24 de noviembre se observó un incremento en el registro de estos eventos, teniendo un total de 27 sismos

durante estos días. A lo largo de diciembre se registraron 29, cuyas magnitudes variaron entre 1.5 y 2.3, y sus hipocentros se localizaron a profundidades entre 1.7 y 9.5 km por debajo del cráter. Se observó una alineación NW-SE de los epicentros y los eventos que quedaron a los extremos de ésta alineación son los que registraron mayor profundidad.

La energía acumulada por los sismos volcanotectónicos que se presentaron de diciembre de 2015 a diciembre de 2016 es de 3.52906×10^{11} J (Figura 28). Los principales cambios en la pendiente de esta curva se debieron a los enjambres sísmicos ocurridos en julio y agosto. La aportación de los sismos volcanotectónicos fue de 1.3147×10^{11} J, debido principalmente al enjambre de 39 VT el día 8, mientras que la energía sísmica de los eventos de agosto fue de 4.4319×10^{10} J, lo que representa un cambio menor en la pendiente, en comparación con el enjambre registrado en julio que tuvo sismos de mayor magnitud.

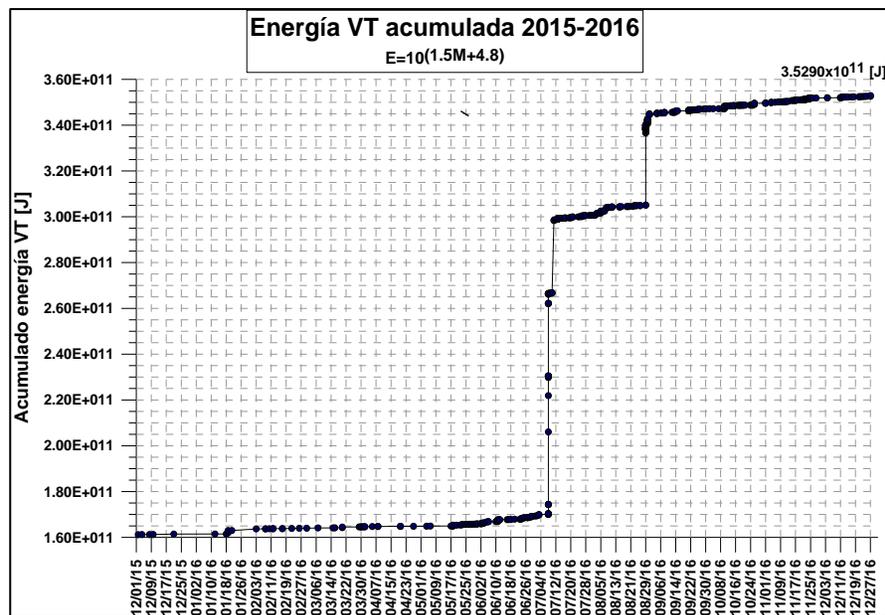


Figura 28 Izquierda, energía acumulada desde noviembre de 2015 hasta noviembre de 2016; derecha, energía acumulada durante diciembre de 2016

ANOMALÍAS TÉRMICAS

El sistema MODVOLC de la Universidad de Hawai, basado en el análisis de imágenes MODIS (resolución de 1 km) emitió, durante 2016, 137 reportes de anomalías térmicas en el cráter del Popocatepetl (Figura 29). Las más importantes estuvieron asociadas al emplazamiento de los distintos domos de lava que se formaron a lo largo de este año, y en una ocasión la anomalía estuvo asociada a un evento explosivo. El valor NTI más importante del 2016 corresponde al 24 de enero, con un NTI de -0.14, durante el episodio de tremor armónico que culminó en el emplazamiento del domo 64 en el cráter interno, con un volumen de $2,000,000 \text{ m}^3$. En febrero solamente hubo 13 anomalías, con un NTI máximo de -0.57, nuevamente asociado a un episodio de tremor. En marzo se emplazó el domo número 65 y la intensidad de las anomalías térmicas tuvo un repunte, alcanzando un valor NTI de -0.45 el día 5. En abril el número de anomalías térmicas bajó a siete eventos, con un NTI máximo de -0.7. Esta tendencia a la baja continuó de mayo a octubre, con menos de 10 eventos en promedio y con valores máximos de NTI de -0.47. Durante noviembre se registraron 10 anomalías térmicas, la más importante el día 25, con un valor NTI de -0.36; esta anomalía estuvo asociada a la explosión de más de 5 km de altura que ocurrió ese día. Finalmente la anomalía más importante de diciembre se presentó el día 30, con un valor NTI de -0.52.

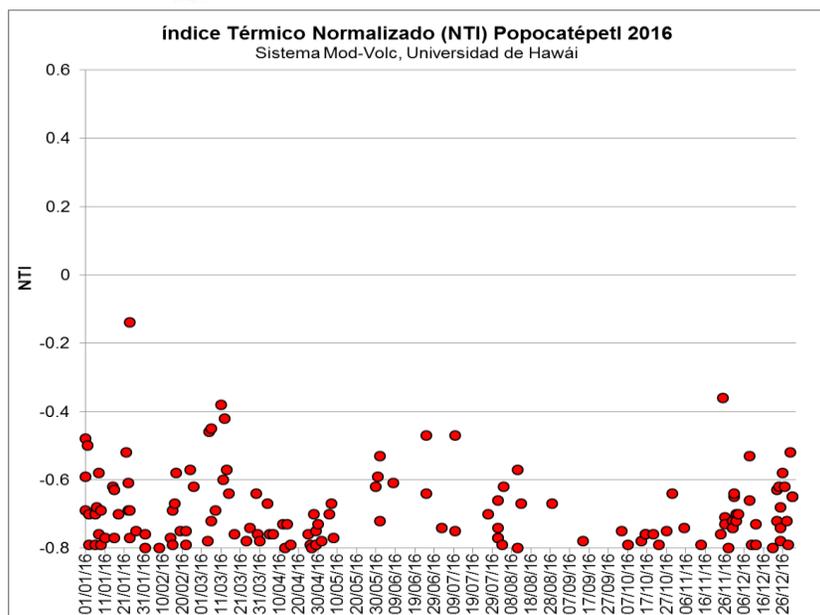


Figura 29 Anomalías térmicas detectadas por el sistema MODVOLC 2016

El Volcanic Radiative Power (VRP) de la Universidad de Turin y Florencia, Italia, a través del Middle InfraRed Method (MIR), detectó durante el 2016, 293 anomalías térmicas (Figura 30). En enero, 32 eventos produjeron alertas, el más importante de ellos el 24, con un valor de 120 Megawatts. En febrero este sistema detectó 29 eventos, el más importante de ellos el 22, con valor de 40 Megawatts, durante el episodio de temblor de mayor duración. A lo largo de febrero, el sistema MIROVA presentó diversas fallas en la obtención de datos alrededor del mundo. Para el caso de México y parte de Centroamérica el registro de anomalías térmicas del día 25 es erróneo, afectando los valores obtenidos tanto para el volcán de Colima como para el Popocatepetl. En otras partes del mundo la falla se registró en diferentes días del mes. En marzo se detectaron 38 alertas, la más importante el día 12, con un valor de 57 Megawatts. Durante abril y mayo el registro de anomalías tuvo un promedio de 24 por mes, con valores máximos de 35 MW. En junio se produjeron 16 alertas, la más importante el día 12, con 233 Megawatts. Esta anomalía se registró a las 17:20 GMT (11:17 hora local), tres minutos después de la explosión que produjo una columna de cenizas mayor a 2.5 km de altura. En los meses de julio a octubre el registro máximo por mes fue de 26 eventos, con un valor máximo de 45 Megawatts el 28 de octubre. En noviembre se detectaron 29 alertas, las más importantes los días 26 y 30, con valores cercanos a 100 Megawatts, que estuvieron asociados a la actividad estromboliana y al crecimiento de un nuevo domo de lava. Finalmente en diciembre se detectaron 42 eventos, el más importante el día 27 con un valor de 120.

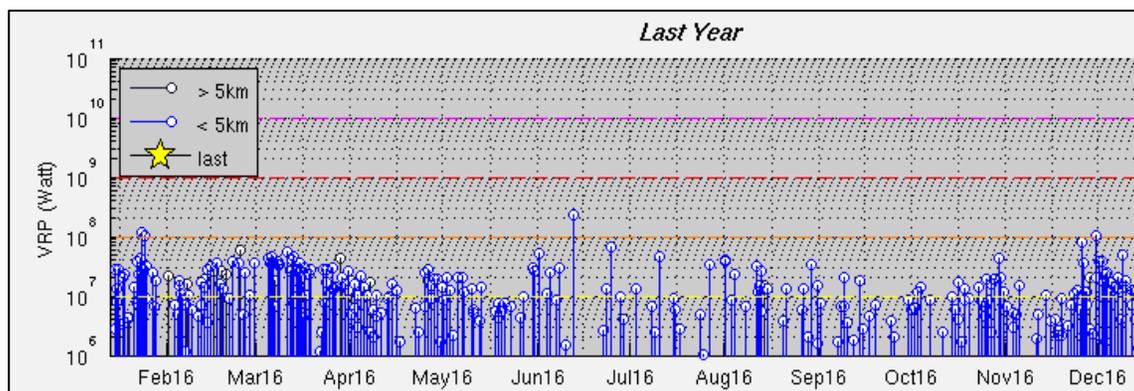


Figura 30 Anomalías térmicas detectadas por el sistema VRP 2015-2016

MONITOREO DE GASES

A lo largo del 2016 los tres sistemas de monitoreo de gases mostraron variaciones equiparables. En enero se presentaron los valores de SO₂ más altos con COSPEC y con OMI; los días 24 y 25 fue más notable este incremento, alcanzando valores de 27,300 t/día de SO₂ durante el episodio de tremor armónico que acompañó el emplazamiento del domo 63 en el interior del cráter. El sistema OMI mostró el mismo comportamiento, con un valor máximo, medido también el día 25, de 6,300 toneladas. El día 28 se realizó una campaña para la medición de SO₂ con COSPEC y se obtuvo un valor de 9,600 t/día de SO₂. En febrero se observó una tendencia a la baja en la emisión de gases en los tres sistemas, tendencia que se prolongó hasta marzo, aunque el 10 de marzo se midió el valor más alto con COSPEC de 13,600 t/día de SO₂. En marzo el DOAS comenzó a tener fallas y no fue posible obtener datos continuos, aunque la tendencia general de la emisión de gases fue a la baja. En abril se presentó un repunte en la emisión de gases, los días 13 y 21 se realizaron campañas para la medición de SO₂ con COSPEC y se obtuvieron valores de 7,000 y 8,200 t/día de SO₂, respectivamente, mientras que con DOAS se midió un valor de 10,200 t/día de SO₂ el día 25. De mayo a septiembre la emisión de gases decreció a los valores más bajos de todo el año, la emisión promedio de SO₂ no superó las 3,500 t/día, a excepción de los días 13 de junio, 8 y 13 de julio y 3 de agosto, cuando se obtuvieron valores superiores a las 7,000 t/día. A finales de octubre se observó un incremento en la emisión de gases, el 24 se midieron con DOAS 10,400 t/día de SO₂. A partir de este mes ya no se realizaron campañas con COSPEC y el DOAS presentó fallas por lo que únicamente se cuentan con los datos del OMI y escasos datos de DOAS. La tendencia de la emisión de gases observada con OMI mostró un incremento desde finales de noviembre, alcanzando un máximo el 13 de diciembre, ese mismo día se obtuvo una medición con DOAS de 5,700 t/día de SO₂. (Figura 31). Los últimos días del año la emisión de gases decreció.

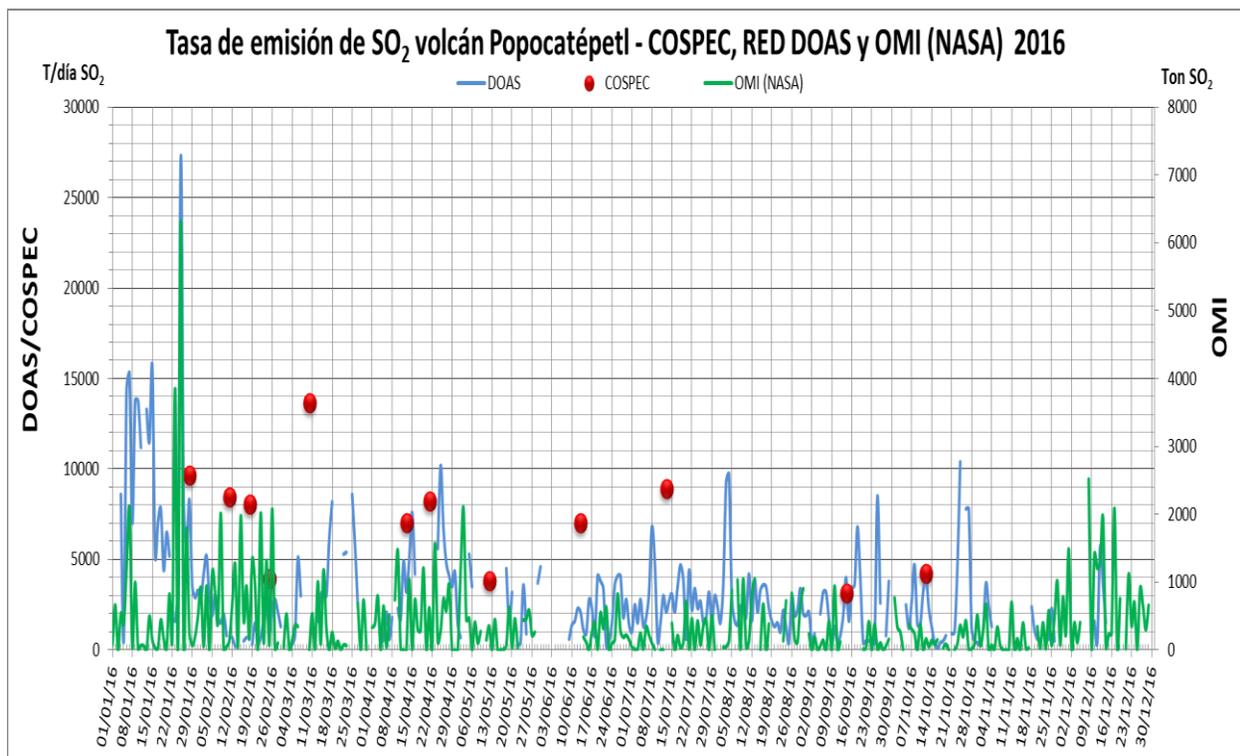


Figura 31 Tasa de emisión de SO₂ durante 2016

MONITOREO HIDROGEOQUÍMICO

A lo largo de 2016 se realizaron cuatro campañas para el monitoreo hidrogeoquímico. En cada campaña se midieron *in situ* temperatura, pH y conductividad, en cinco manantiales situados alrededor del volcán Popocatepetl (Figura 32).

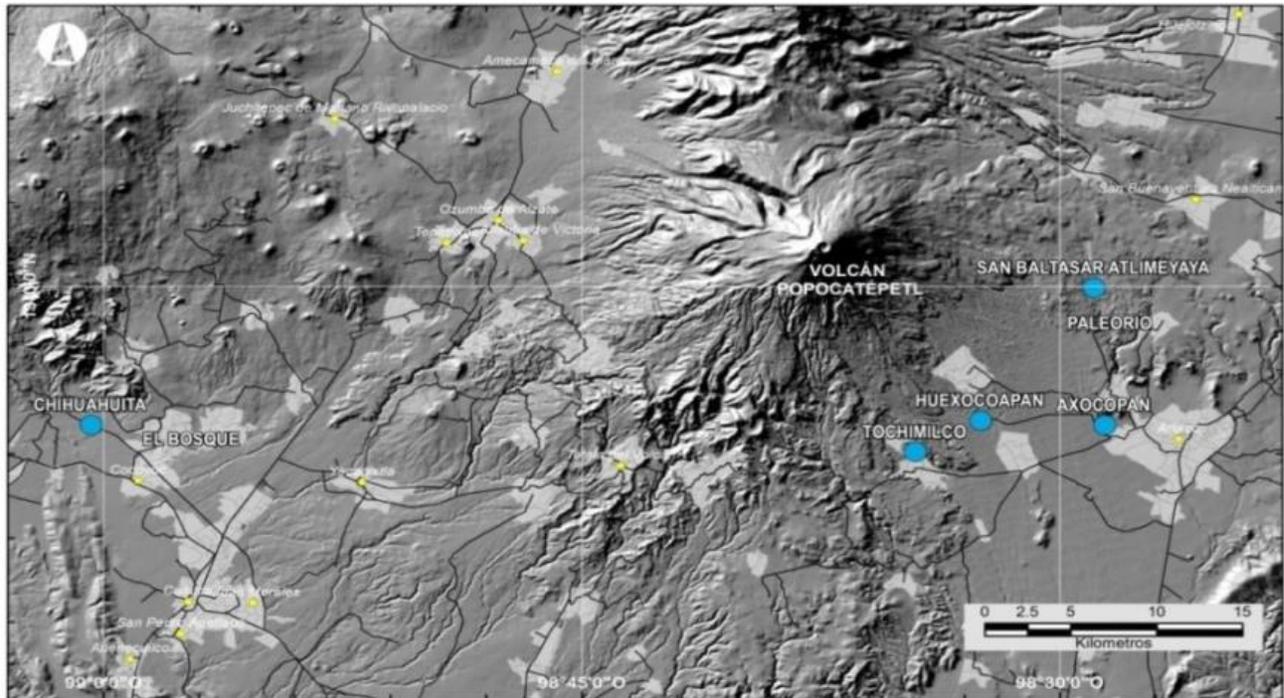


Figura 32 Ubicación de los cinco manantiales donde se toman muestras de agua, en los sectores SE, S y SW del volcán Popocatepetl

Las muestras de aguas fueron entregadas al Laboratorio de Química Analítica (LQA) del Instituto de Geofísica de la UNAM y al Laboratorio de Muestras Ambientales (LMA) del CENAPRED, para su análisis. En este informe se analizan los resultados del LMA, ya que los resultados proporcionados por el LQA son únicamente cualitativos.

En el manantial Axocopan se observó que los iones de magnesio, fluoruros y cloruros tuvieron muy ligeras variaciones a lo largo del año. En cambio, los iones de carbonatos y sílice mostraron una tendencia a la baja, mientras que la tendencia de los sulfuros durante todo el año fue de aumento. El pH medido en campo mostró variaciones significativas: bajó en la primera mitad de año pero luego incrementó en el último muestreo, mientras que la temperatura tuvo un comportamiento inverso al pH. Finalmente en el último muestreo del año, en septiembre, se detectó boro en una concentración de 0.4 mg/l (Figura 33). Este fue el único manantial en el que se encontró este elemento en todo el año.

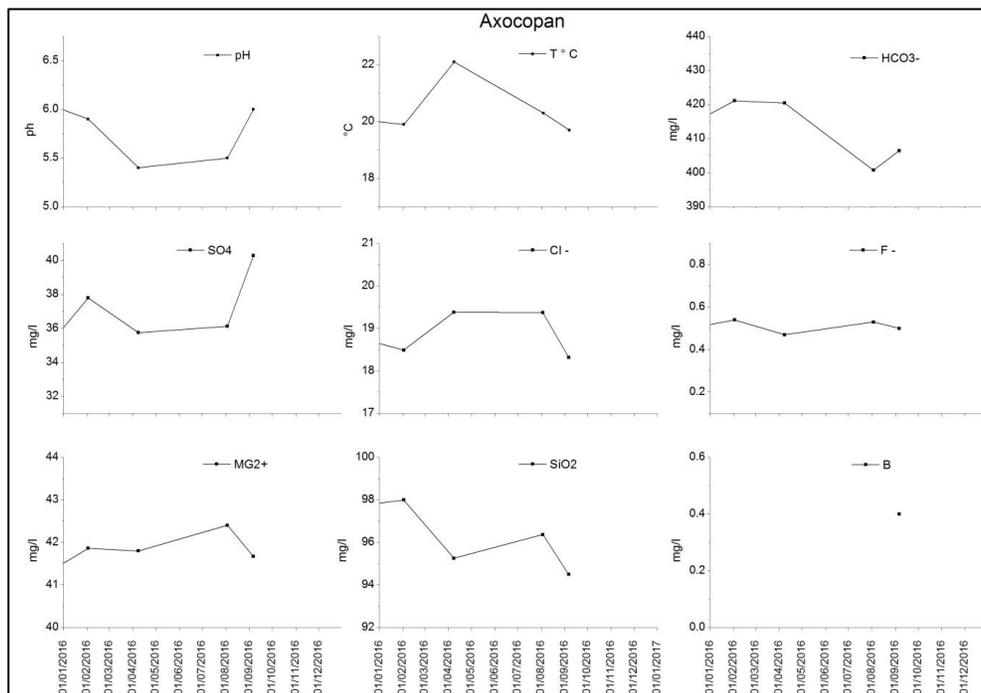


Figura 33 Resultados de los análisis químicos realizados a las aguas del manantial Axocopan durante 2016

En el manantial Chihuahuita se observó que, a lo largo del 2016, las concentraciones de bicarbonatos, sulfatos, magnesio y sílice tuvieron una tendencia a la baja. Los fluoruros por su parte incrementaron a lo largo del año, mientras que los cloruros disminuyeron, pero mostraron una leve recuperación en el último muestreo. En este manantial no se detectó boro. El pH medido en campo se mantuvo prácticamente sin cambios, mientras que la temperatura disminuyó casi dos grados (Figura 34).

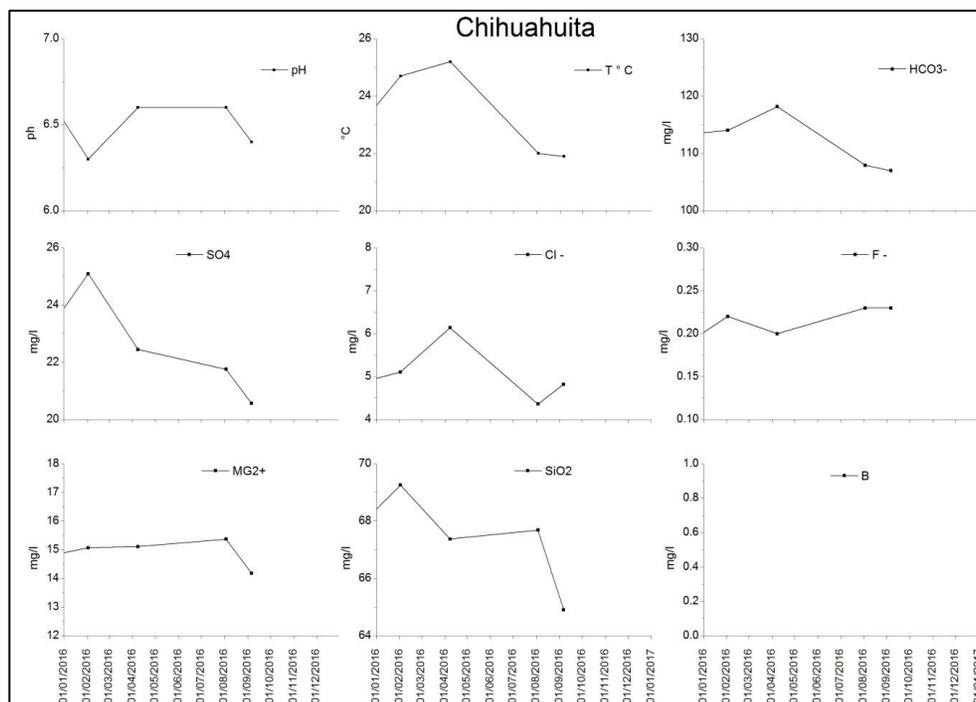


Figura 34 Resultados de los análisis químicos realizados a las aguas del manantial Chihuahuita durante 2016

El manantial Huexocoapan mostró un comportamiento muy errático a lo largo del 2016. Se observaron cambios drásticos en los parámetros analizados. Los bicarbonatos, sulfatos y sílice tuvieron una notable disminución a lo largo del año, mientras que fluoruros, cloruros y magnesio tuvieron una fuerte caída en abril, pero se recuperaron en los muestreos siguientes, aunque el cloruro volvió a caer a su concentración más baja en septiembre. El pH medido en campo tuvo un aumento significativo en septiembre. En este manantial no se detectó boro en ninguno de los cuatro muestreos realizados en el año (Figura 35). Este manantial tiene una variación muy importante en el nivel del agua, en abril no se encontró agua en el lugar donde habitualmente su muestrea por lo que las variaciones identificadas pueden deberse a este factor.

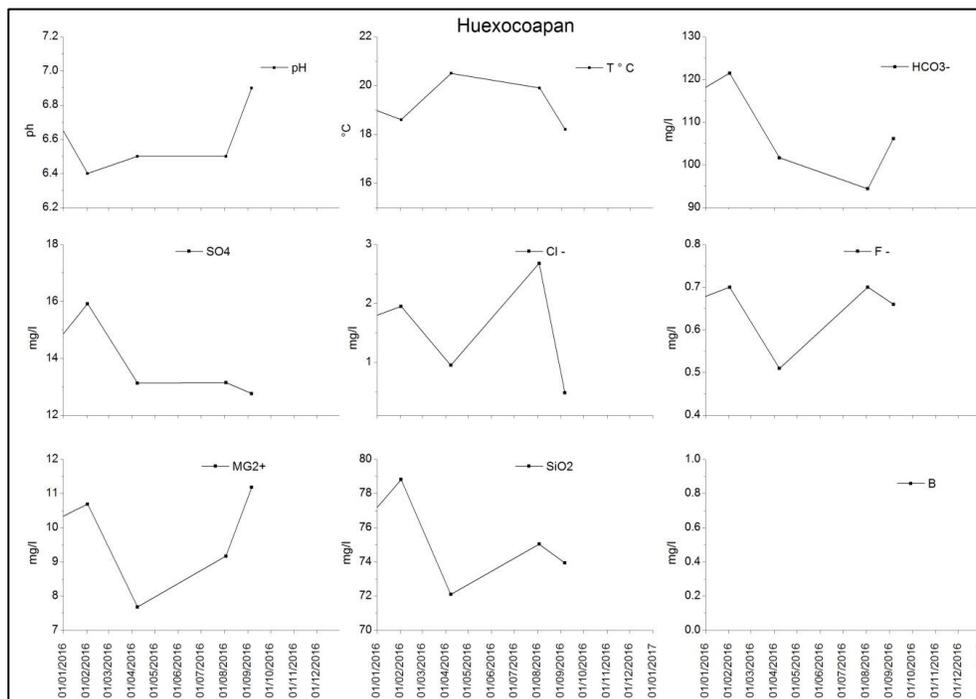


Figura 35 Resultados de los análisis químicos realizados a las aguas del manantial Huexocoapan durante 2016

Las concentraciones de los iones analizados en el manantial San Baltazar mostraron diversos comportamientos. Los bicarbonatos, sulfatos y el sílice tuvieron a lo largo del año una tendencia a la baja. Los cloruros aumentaron a lo largo del todo el año. Los fluoruros tuvieron un mínimo en enero pero se recuperaron en abril y en agosto para terminar en los niveles vistos en 2015. El magnesio tuvo una tendencia a la baja en los primeros tres muestreos del año y finalmente se recuperó ligeramente en septiembre. El pH medido en campo bajó drásticamente en abril, luego se recuperó ligeramente en agosto y tuvo una pequeña pérdida en septiembre, en general tuvo una tendencia a la baja (Figura 36).

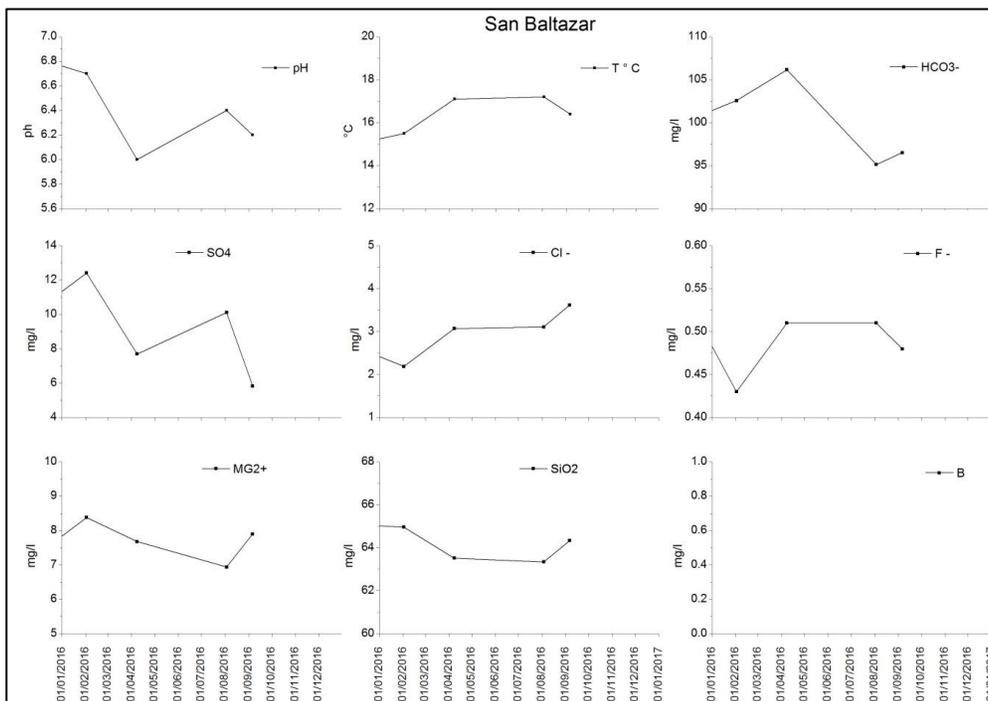


Figura 36 resultados de los análisis químicos realizados a las aguas del manantial Huexocoapana durante 2016

En el manantial Tochimilco el pH y la temperatura, medidos en campo, disminuyeron a lo largo del año. Los sulfatos, magnesio y sílice permanecieron prácticamente sin cambios. Los bicarbonatos y los fluoruros disminuyeron a lo largo del año. En este manantial tampoco se detectó boro a lo largo del año (Figura 37).

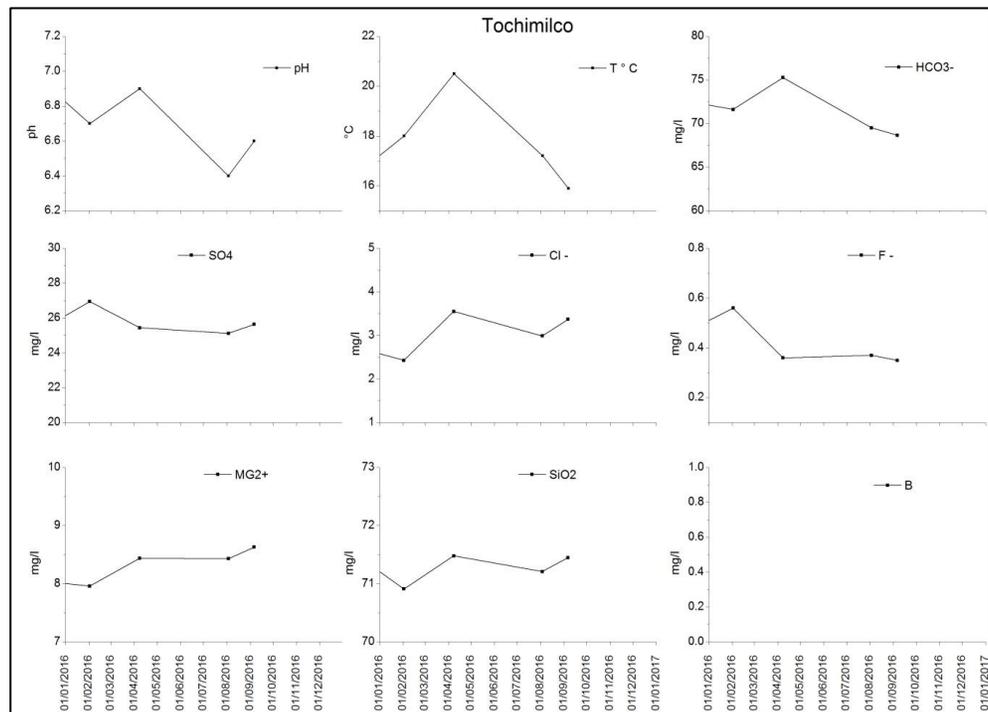


Figura 37 resultados de los análisis químicos realizados a las aguas del manantial Tochimilco durante 2016

ANÁLISIS DE LIXIVIADOS DE CENIZAS

El análisis químico de cenizas volcánicas consiste en la obtención de lixiviado acuoso de la muestra y su posterior análisis, para la determinación de flúor (F^-), cloruros (Cl^-), y sulfatos (SO_4^{2-}). Estos parámetros son analizados debido a que, dentro de la columna eruptiva del volcán, una fracción de los gases y otros compuestos se retienen en la superficie de las cenizas expulsadas y son solubles en agua. En particular, HCl , SO_2 y HF , que con agua y CO_2 comprenden la principal proporción de gases eruptivos, producen Cl^- , SO_4^{2-} y F^- en lixiviados acuosos. La concentración de estos iones y la relación entre ellos se ha asociado a diversos grados de contribución magmática, así como al estado de degasificación del magma, ya que conforme este se acerca a la superficie, el SO_2 se emite antes que el HF y el HCl , lo que es una herramienta útil para el monitoreo de volátiles expulsados por el volcán (Martín del pozo *et al.*, 1995; Armienta *et al.*, 2010).

La actividad eruptiva ocurrida entre el 31 de julio y el 1 de agosto de 2016 provocó caída de ceniza, que se distribuyó hasta la ciudad de Toluca (Figura 38). Se estimó un volumen total de $2.1 \times 10^6 \text{ m}^3$.

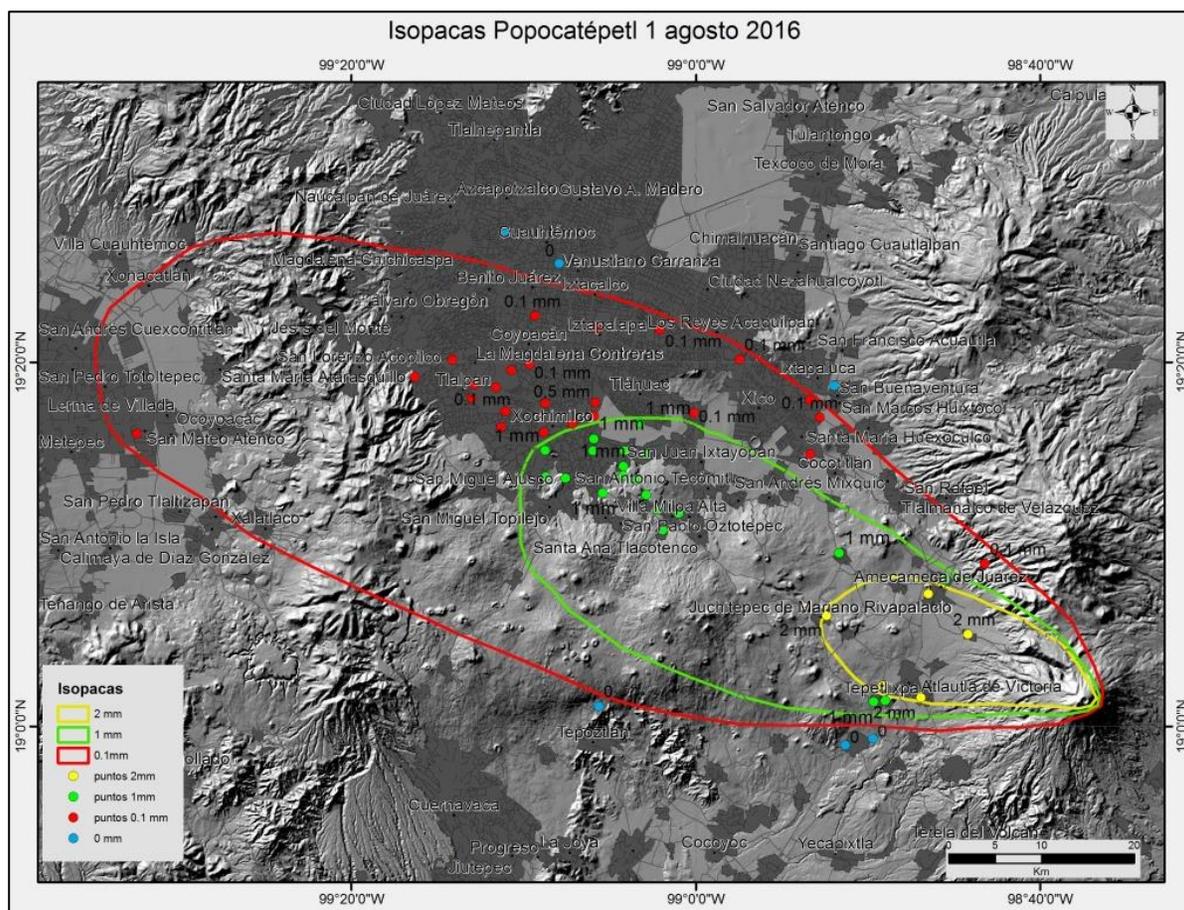


Figura 38 Isopacas de la caída de ceniza del 1 de agosto de 2016, elaborado en colaboración con la Dra. Martín Del Pozzo

Estas cenizas se muestrearon y entregaron al Laboratorio de Muestras Ambientales del CENAPRED para su análisis, donde se obtuvieron los lixiviados.

Comparando las concentraciones de Cl^- , SO_4^{2-} y F^- de las cuatro muestras con las obtenidas por Armienta *et al.* (2011), entre los años 1998-2006, las muestras analizadas se encuentran entre los rangos reportados: Cl^- (18-776 mg/kg), SO_4^{2-} (50-11330 mg/kg) y F^- (5-513 mg/kg). Las concentraciones de cloruros se encuentran en un rango de 29.15 mg/kg a 120.67 mg/kg.

Tabla 2 Concentraciones de lixiviados encontrados en las cenizas del 1 de agosto de 2016 del Popocatepetl

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	PARÁMETROS		
	Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	Cloruros (Cl ⁻)	Fluoruros (F ⁻)
La Joya	2242.50 ± 3.54	73.39 ± 2.28	332.80 ± 1.57
Cenapred	1360.00 ± 35.36	29.15 ± 3.04	214.42 ± 0.76
Ozumba	1105.00 ± 28.28	59.96 ± 0.51	230.36 ± 1.23
Xochimilco	1327.50 ± 17.68	120.67 ± 0.25	297.38 ± 3.58

Las concentraciones de sulfatos, cloruros y fluoruros se reportan en mg.kg-1

DIAGNÓSTICO

A lo largo del 2016 se construyeron y destruyeron 9 domos de lava, todos con volúmenes menores a 2 millones de metros cúbicos. La construcción de estos domos estuvo asociada principalmente a episodios de actividad estromboliana, conocidos también como trenes de exhalaciones por su registro sísmico, con duraciones variables de hasta 12 horas, algunos también acompañados por episodios de tremor armónico. Durante el emplazamiento de los domos fue común la emisión de cenizas, los episodios más notables fueron el 18 de abril y del 31 de julio al 1 de agosto. El primero produjo abundante caída de ceniza en la ciudad de Puebla y causó que el aeropuerto de Puebla fuera cerrado por 15 horas para limpiar la pista. El episodio de julio-agosto produjo caída de ceniza notable hasta la Ciudad de México.

Estos domos fueron destruidos por explosiones en su mayoría pequeñas, de hasta 3 km de altura, como la registrada el 3 de abril. Este evento lanzó además fragmentos balísticos a distancias de hasta 3.5 km del cráter, lo que produjo incendios en los pastizales del sector sureste del volcán. La explosión más importante fue la registrada el 25 de noviembre, cuya columna eruptiva alcanzó más de 5 km de altura y tuvo una duración cercana a una hora y media.

Entre julio y agosto del 2016 se registraron más de 450 sismos volcanotectónicos, divididos en dos enjambres. El primer enjambre ocurrió el 8 de julio y constó de 39 VT. En este enjambre se registraron dos sismos con magnitud 3.8 que se localizaron a poco más de 1 kilómetro bajo el cráter del volcán, además de otros eventos con magnitudes de 3.6, 3.4 y 3.2. El segundo enjambre sísmico ocurrió entre el 29 y el 31 de agosto y se compuso de 348 VT. En este enjambre se registró un VT con magnitud 3.8, pero el resto de los sismos tuvo magnitudes menores a 3 y todos se localizaron en el sector sureste del volcán, a 8 kilómetros bajo el nivel del cráter. Estos enjambres de eventos tipo VT son los más importantes desde que se tiene registro sísmico en el Popocatepetl.

El episodio de actividad estromboliana ocurrido entre el 23 y el 25 de enero fue el más importante del año, produjo un domo de lava de 2,000,000 m³, cuyo emplazamiento estuvo acompañado por una elevada emisión de SO₂, con valores de hasta 27,300 t/día de SO₂ con el sistema DOAS entre los días 24 y 25, de 6,300 t el 25 de enero con OMI, y 9,600 t/día el 28 de enero con el COSPEC. La lava emitida durante estos días produjo el 24 de enero las anomalías térmicas más altas del año, con un NTI de -0.14, mientras que el VRP más importante se obtuvo ese mismo día, con un valor de 120 Megawatts.

El análisis de las aguas de los manantiales mostró un comportamiento errático a lo largo del año, con variaciones al alza y a la baja en todos los iones analizados. Sin embargo, destaca la presencia de boro en una concentración de 0.4 mg/l, en el muestreo de septiembre en el manantial Axocopan. Es posible que este incremento de boro esté relacionado con el enjambre de VTs ocurrido a finales de agosto, pues estuvieron localizados en el sector en el que se encuentra este manantial.

Por todo lo anterior es posible que, durante los primeros meses del 2017, se presente un incremento en la actividad del volcán, posiblemente caracterizado por el aumento en el número de sismos volcanotectónicos y eventos de periodo largo, así como por temblor, que acompañen el crecimiento de domos de lava. Estos domos podrían ser destruidos por eventos explosivos.

Finalmente, los enjambres de sismos volcanotectónicos que se presentaron entre julio y agosto de 2016 podrían estar asociados a una nueva intrusión magmática, por lo que se puede esperar que en 2017 los eventos de crecimiento de domos y explosiones que se presenten sean mayores a los observados en los últimos años.

Referencias

Armienta M.A., De la Cruz Reyna, S., Soler. A., Cenicerros, N., and Aguayo, 2010 A. Chemistry of ash-leachates to monitor volcanic activity: An application to Popocatepetl volcano, central México. Applied Geochemistry. 25, 1198-1205.

Armienta, M.A., De la Cruz-Reyna, S., Cruz, O., Cenicerros, N., Aguayo, A., and Marin, M. 2011. Fluoride in ash leachates: environmental implications at Popocatepetl volcano, central Mexico, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 1949-1956,

Martin Del Pozzo, A. L., Espinasa-Pereña, R., Armienta, M.A., Aguayo, A., Reyes, M., Sánchez, G., Cruz, O., Cenicerros, N., Lugo, J., González, V., Butrón, M.A., y Villareal, M. 1995. La emisión de cenizas y variaciones geoquímicas durante diciembre-marzo en el volcán Popocatepetl. Volcán Popocatepetl Estudios realizados durante la crisis de 1994-1995, Comité Científico Asesor CENAPRED-UNAM. Edición especial, 285-294.

Notas

El contenido de este informe se elaboró con datos proporcionados por los sistemas de monitoreo del CENAPRED, la red DOAS del Instituto de Geofísica de la UNAM, así como el Sistema MODVOLC de la Universidad de Hawái, el Atmospheric Chemistry and Dynamics Laboratory del Goddard Space Flight Center de la NASA, el Middle Infrared Observation of Volcanic Activity de las Universidades de Torino y Florencia e información proporcionada por el United States Geological Survey. Este informe ha sido elaborado como herramienta para la discusión interna del estado de actividad del volcán Popocatepetl, entre los miembros del Comité Científico Asesor y el equipo del CENAPRED. La información y datos contenidos en el mismo no pueden ser reproducidos sin previa autorización de los especialistas que elaboraron este informe.

Elaboraron: Amiel Nieto Torres, Gema Caballero Jiménez, Ramón Espinasa Pereña, Adriana Ramírez Castillo, Lilia Calva Rodríguez, Elizabeth Castañeda Bastida, Ariadna Hernández Osoy.

Responsables del mantenimiento de los equipos que generan los datos:

Paulino Alonso, Bernabé Juárez, Margarita Vidal, Diana Vázquez, Felipe Paniagua, Lucio Cárdenas, Ricardo Calderón y Oscar Rodríguez

Guardia de fin de semana y días festivos: Cristina García.

Guardia nocturna: Juan Rosales, Arturo Gascón, Martín Peña y Germán Espitia.