

Monitoreo térmico continuo y discreto del volcán Santa Ana, periodo septiembre 2006- septiembre 2017, El Salvador, C. A.

Benancio Henríquez Miranda

Docente, Facultad Multidisciplinaria de Occidente,
Universidad de El Salvador.
Grupo de Investigación Vulcanológica
Universidad de El Salvador.
Correo electrónico: benancio.henriquez@ues.edu.sv

Efraín Benítez

Docente, Facultad Multidisciplinaria de Occidente,
Universidad de El Salvador.
Grupo de Investigación Vulcanológica
Universidad de El Salvador.

Edgar Marinero

Docente, Facultad Multidisciplinaria Paracentral,
Universidad de El Salvador.
Grupo de Investigación Vulcanológica
Universidad de El Salvador.

Samuel Dueñas

Docente, Facultad Multidisciplinaria de Occidente,
Universidad de El Salvador.
Grupo de Investigación Vulcanológica
Universidad de El Salvador.

Eduardo Gutierrez

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN),
área de vulcanología, El Salvador.

Dina L. López

Department of Geosciences,
Ohio University, Athens, Ohio 45701.

Rafael Cartagena

Docente, Facultad Multidisciplinaria de Oriente,
Universidad de El Salvador.
Grupo de Investigación Vulcanológica
Universidad de El Salvador.

Renán Funes

Docente, Facultad Multidisciplinaria Paracentral,
Universidad de El Salvador.
Grupo de Investigación Vulcanológica
Universidad de El Salvador.

Demetrio Escobar

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN),
área de vulcanología, El Salvador.

Francisco Montalvo

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN),
área de vulcanología, El Salvador.

Resumen

El Volcán de Santa Ana se localiza a 15 kilómetros al sureste de la ciudad de Santa Ana, en la zona occidental de El Salvador con una altura de 2,381 msnm. En el fondo del cráter se encuentra una laguna con agua ácida y un campo de fumarolas. La última erupción ocurrió el 1 de octubre de 2005. El monitoreo de temperatura en la laguna se realiza de manera continua (MARN) y en el borde sur este del cráter de manera discreta (UES). Se cuenta con una red sísmica (tres estaciones) para el monitoreo de la sismicidad asociada al volcán. Los resultados de este monitoreo en el periodo de septiembre de 2006 a septiembre de 2017 presenta 2 periodos con cambios significativos en temperatura, Amplitud Sísmica en tiempo Real (RSAM), sismos asociados a movimiento de fluidos y color y nivel de la laguna. El primer cambio se observó el 2007, el cual concluyó con una erupción freática y la reducción considerable del volumen de la laguna. La anomalía térmica en el borde sur-este del cráter fue de 38 °C y en la Laguna 61 °C, el RSAM presento cambios significativos. El segundo cambio ocurrió en el año 2017 con anomalías térmicas de 52 °C en el borde sur-este del cráter y de 51 °C en la laguna. En este periodo los valores de RSAM no presentaron cambios significativos, solamente los sismos asociados al movimiento de fluidos. Según estos resultados las anomalías de temperatura en el sector sur-este del volcán y la laguna, son sensibles a los cambios de RSAM, sismos asociados al movimiento de fluidos y flujo de calor que presenta el volcán.

Palabras clave: Volcán, Temperatura, Anomalía, RSAM.

Introducción

El Volcán de Santa Ana se localiza en la zona occidental de El Salvador, a 15 kilómetros al sureste de la ciudad de Santa Ana, en las coordenadas 13° 51.2 N y 89° 37.5 W. Este volcán es la estructura principal (estratovolcán) del Complejo Volcánico de Santa Ana, parte de la Cordillera Volcánica de El Salvador. Es el estratovolcán activo más alto del país con 2,381 metros. Tiene un cráter circular con un diámetro aproximado de 1.5 kilómetros, en el cual existen evidencias de

subsistencia y migración progresiva del conducto hacia el sureste. En el fondo del mismo se encuentra una laguna con agua ácida y un campo de fumarolas. La actividad histórica que ha presentado el volcán es de tipo freática y freatomagmática. Las últimas erupciones han ocurrido en enero 1904, el 1 de octubre de 2005 y 24 de abril de 2007. El monitoreo del volcán lo realiza el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (MARN) y la Universidad de El Salvador, (UES). En este artículo se presentan los resultados del monitoreo de temperatura realizado por estas dos instituciones en el periodo de septiembre de 2006 a septiembre de 2017. Esta información de temperatura se correlaciona con otros parámetros o cambios que presenta el volcán como: Amplitud Sísmica en tiempo Real (RSAM) y color y nivel de la laguna.

Metodología

Para monitorear la actividad térmica del volcán de Santa Ana, se cuenta con una estación de monitoreo continuo de temperatura, ubicada en el centro de la laguna del volcán (Fig. 1). La estación consta de un sensor de temperatura y un data logger, programado para registrar cada 10 minutos. También se realizan medidas discretas en suelo en el borde sureste del cráter, en un perfil de 150 metros de longitud (Fig. 1) con 20 puntos de medición, con separación de 10 m en los extremos y 5m en la parte central, utilizando un termómetro digital tipo T, cada mes o dos meses.

Resultados

Durante el periodo de septiembre de 2006 a septiembre de 2017 el volcán presenta 2 periodos con cambios significativos en temperatura, Amplitud de la Señal Sísmica en Tiempo Real (RSAM), sismos asociados a movimiento de fluidos y cambios en el color y nivel del espejo de agua de la laguna. El primer cambio se observa el 2007 y el segundo el 2017. Durante los años 2008 al 2016 el volcán no presentó incrementos significativos en su actividad y datos de monitoreo asociados.



Figura 1. Área de estudio del cráter del volcán Santa Ana, ubicación del perfil de mediciones de temperatura y estación térmica en la laguna. (Google Earth, 2017)

Periodo I: septiembre 2006 – septiembre de 2007

Medidas discretas de temperatura en suelo, en el borde sur-este del cráter

En septiembre y octubre de 2006 se midieron temperaturas máximas en el perfil de 26.8 °C, (Fig. 2). El comportamiento que presenta el perfil en estos meses se considera dentro de la línea base de la temperatura para este sector del volcán. Etapa previa a la crisis sísmica del mes de marzo de 2007.

En diciembre del año 2006, la temperatura máxima del perfil se incrementa a 30.7 °C, un aumento de 5.8 °C con respecto a los meses anteriores de este mismo año, esta incrementó progresivamente en los meses de febrero, marzo y abril de 2007, hasta alcanzar valores de 38 °C (Fig. 3).

Mediciones de temperatura, perfil sur-este del cráter del VSA.
Septiembre -octubre de 2006

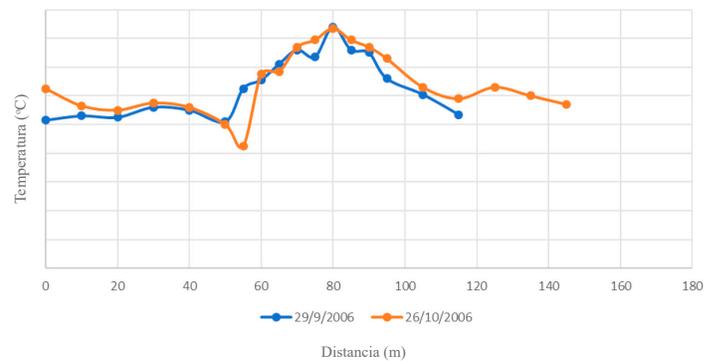


Figura 2. Periodo de mediciones de temperatura en el perfil sur-este del cráter del VSA, entre los meses de septiembre y octubre de 2006.

Etapa donde se presenta la crisis sísmica, erupción freática del volcán y reducción considerable del volumen de la laguna. La mayor temperatura de la zona 38 °C, se midió a finales del mes de marzo y abril 2007.

Mediciones continuas de temperatura de la estación termométrica y RSAM

Las mediciones de temperatura de la estación térmica en la laguna se realizaron entre los meses de febrero-abril de 2007. El promedio diario de temperaturas en la laguna entre el 7 de febrero al 9 de marzo de 2007 representa la línea base: 30.8 °C, (Fig. 4), esta temperatura se incrementa a partir del 10 de marzo, hasta alcanzar un valor de 61 °C, el 14 de marzo. Según Laiolo *et al.* (2017), la máxima temperatura ocurrió el 13 de marzo con un valor de 67 °C. Estos incrementos de temperatura correlacionan con el aumento del RSAM de 40 a 138 unidades entre el 9 y 11 de marzo de 2007 (MARN, 2007).

Medidas discretas de temperatura en suelo, en el borde sur-este del cráter

Para los meses de mayo a septiembre del 2007, etapa posterior a la crisis sísmica del mes de marzo y abril de 2007, las mediciones de temperatura discretas en suelo reflejaron que el sistema aún presentaba una anomalía térmica (etapa final) con respecto a la línea base que se tenía en los meses de septiembre y octubre de 2006. Para el mes de septiembre de 2007 las mediciones de temperatura alcanzaron los valores de la línea base de esta zona, (Fig. 5).

Resumen de los datos discretos de temperatura descritos

En la figura 6 se muestran todas las mediciones realizadas en el perfil al sur-este del cráter del volcán Santa Ana durante el periodo septiembre 2006 – septiembre 2007. Los incrementos de temperatura de este sector del cráter se presentan entre los 60 y 120m del perfil, límites del área de influencia de la fumarola.

En la figura 7 se muestran los valores máximos de temperatura de los perfiles anteriores, en el borde sur este del cráter del volcán Santa Ana, entre 2006 -2007 y su correlación con la erupción freática e inicio de la

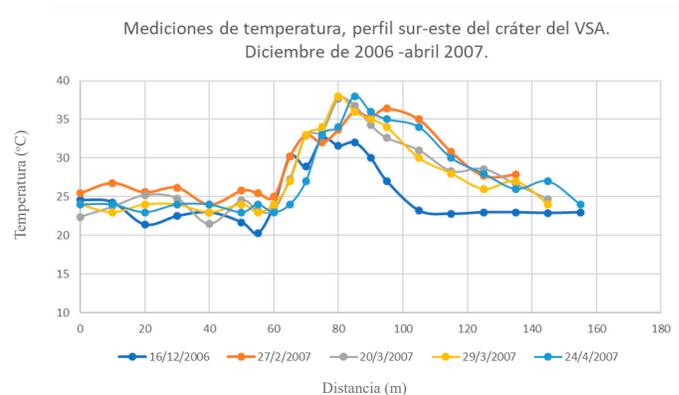


Figura 3. Periodo de mediciones de temperatura en el perfil sur-este del cráter del VSA, entre los meses de diciembre 2006 - abril 2007.

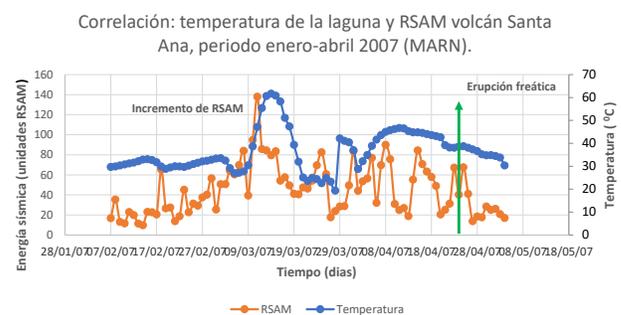


Figura 4. Comportamiento de RSAM y temperatura de la laguna del volcán Santa Ana, febrero-abril 2007 (MARN, 2007).

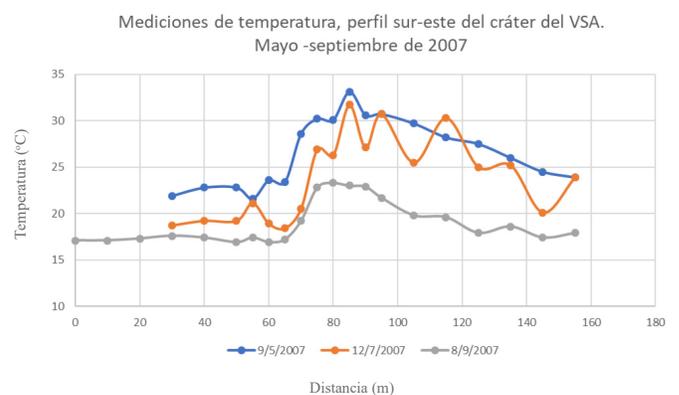


Figura 5. Mediciones de temperatura en el perfil del sector sur-este del VSA, durante los meses de mayo, julio y septiembre de 2007.

crisis sísmica (incremento de RSAM) para comparar los cambios de temperatura con el incremento del RSAM (crisis sísmica) y erupción freática del VSA.

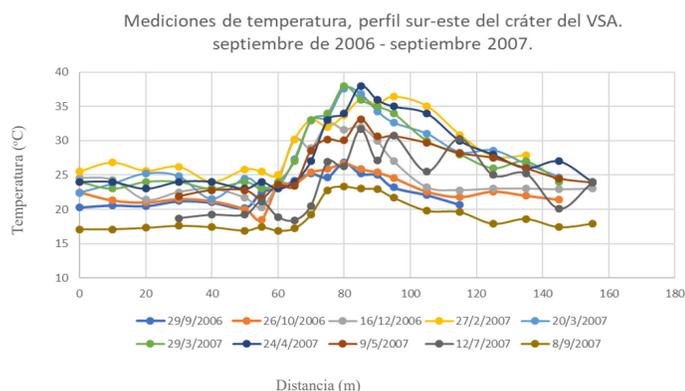


Figura 6. Mediciones de temperatura en el perfil ubicado al sur-este del cráter del volcán Santa Ana, durante el periodo de septiembre 2006 – septiembre 2007.

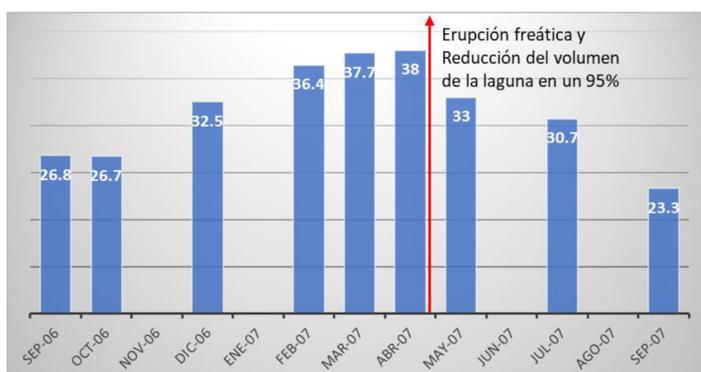


Figura 7. Mediciones de temperatura máximas del perfil en el borde sur este del cráter del volcán Santa Ana, entre 2006 -2007 y su correlación con la erupción freática e inicio de la crisis sísmica (incremento de RASM).

En la figura 8 se muestra el estado de la laguna el día 24 de abril del 2007 y la secuencia de la erupción freática del VSA, ocurrida este mismo día, entre las 12:50 a 2:30 pm.

Los incrementos de temperatura observados en este periodo, continuos y discretos, correlacionan con cambios que el volcán experimentó en:

a) Incrementos de Amplitud Sísmica en tiempo Real (RSAM). (Figs. 4 y 7).

b) La coloración de la laguna: entre mayo y diciembre de 2006 verde oscuro, en febrero de 2007 verde aqua y en marzo de 2007 color gris (Henríquez *et al.*, 2009). Estos cambios previos a la erupción freática del 24 de abril de 2007.

c) Los niveles de evaporación de la laguna: entre los meses de mayo y diciembre de 2006; la laguna recuperó su nivel normal, en marzo de 2007 se observa gran evaporación hasta reducir su volumen en un 96 % el 24 de abril de 2007 (Henríquez *et al.*, 2009), (Fig. 8a). Ese mismo día se produce la erupción freática (Fig. 8b, c, d, e, f, g y h).

Para este primer periodo se puede concluir que los datos de temperatura presentan:

Incrementos previos a la erupción freática del volcán Santa Ana.

Los Incrementos de RSAM coinciden con los incrementos de la temperatura de la laguna (mediciones continuas).

Periodo II, octubre 2016 a septiembre 2017

Medidas discretas de temperatura en suelo, en el borde sur-este del cráter

En los meses de octubre y diciembre de 2016; se midieron temperaturas máximas de 31.8 °C y 33 °C (Fig. 9). Estas mediciones pueden considerarse como indicadores de la etapa previa al incremento de la actividad de la laguna, que inicio en el mes de enero de 2017. La línea base de temperatura para este sector oscila entre 26 °C y 27 °C (Fig. 2). Los valores de temperatura máxima de estos meses indican que el volcán ya presentaba anomalía térmica en este sector. Según informes del MARN (2016) la temperatura de la laguna en el mes de octubre 2016 fue de 41.1 °C, valor que supera la línea base de la temperatura de la laguna.

Las mediciones de temperatura en la laguna realizadas por el MARN, (2017), en los meses de enero y febrero de 2017 fueron: enero 46 °C (mediciones con cámara térmica) y febrero: 51 °C, (medición *in situ*). El incremento de temperatura en la laguna entre octubre del 2016 y febrero de 2017 fue de 9.9 °C.



Figura 8. Estado de la laguna del VSA el día 24 de abril de 2007 y secuencia de la erupción freática ocurrida este mismo día. El literal a muestra la reducción del nivel del agua de la laguna. Los literales: b,c,d,e,f,g,h) muestran la secuencia de la erupción freática.

Medidas realizadas en los meses de marzo y mayo de 2017 en el perfil, presentaron máximos de temperatura de: 52° y 42° C (Fig. 10).

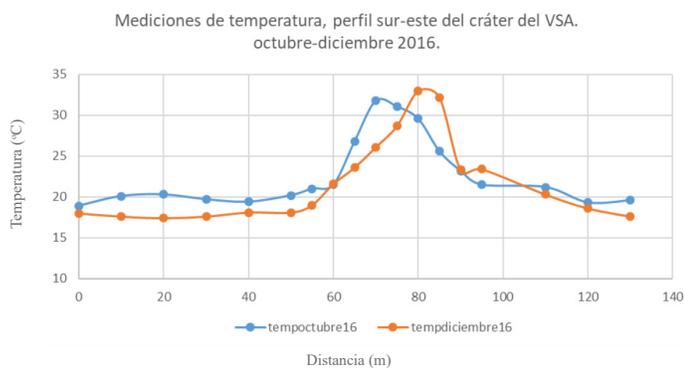


Figura 9. Mediciones de temperatura en el perfil sur-este del cráter del volcán Santa Ana, entre los meses de octubre y diciembre de 2016.

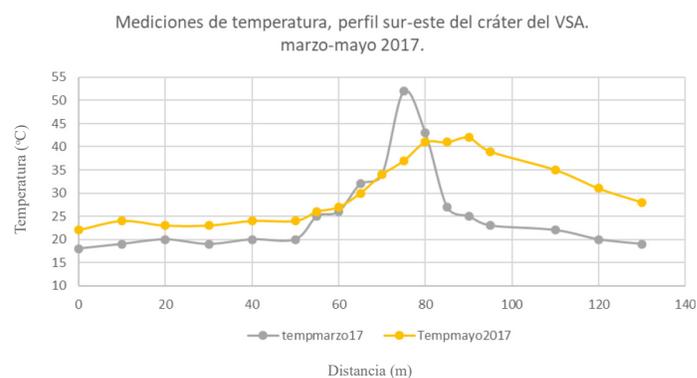


Figura 10. Mediciones de temperatura en el perfil sur-este del cráter del volcán Santa Ana, en los meses de marzo y mayo de 2017.

Los cambios de temperatura observados en el perfil y la laguna en los meses de marzo y mayo de 2017, correlacionan con el incremento del burbujeo en la laguna, sonido a jet de las fumarolas, mayor evaporación y descenso del nivel de la laguna (sin lograr reducir su volumen como en el 2007) y olor a azufre en la zona del cráter y en la ruta de ascenso.

En la figura 11, se muestran fotografías del monitoreo de la laguna entre octubre de 2016 a marzo 2017 (MARN, 2016-17). El recuadro (rojo) indica la zona de observación para determinar los cambios en el nivel de la laguna.

La zona del recuadro muestra que el nivel de la laguna se ha reducido significativamente para febrero y marzo de 2017, con respecto a octubre de 2016 (nivel normal en invierno). La tonalidad del color verde de la laguna

presenta un ligero cambio en este periodo. En el recuadro rojo de las fotografías (Fig. 11) de febrero y marzo 2017, se observa el afloramiento de rocas que en octubre de 2016 estaban cubiertas por agua (reducción del nivel de la laguna).

Mediciones realizadas en el perfil de temperatura en los meses de junio y septiembre de 2017 muestran un descenso de la temperatura máxima (Fig. 12), para el mes de septiembre la temperatura ha alcanzado la línea base (28 °C), en junio la temperatura máxima fue de 30 °C. La actividad dentro de la laguna se mantiene (evaporación y sonido a jet de las fumarolas) y percepción de azufre en el borde del cráter.

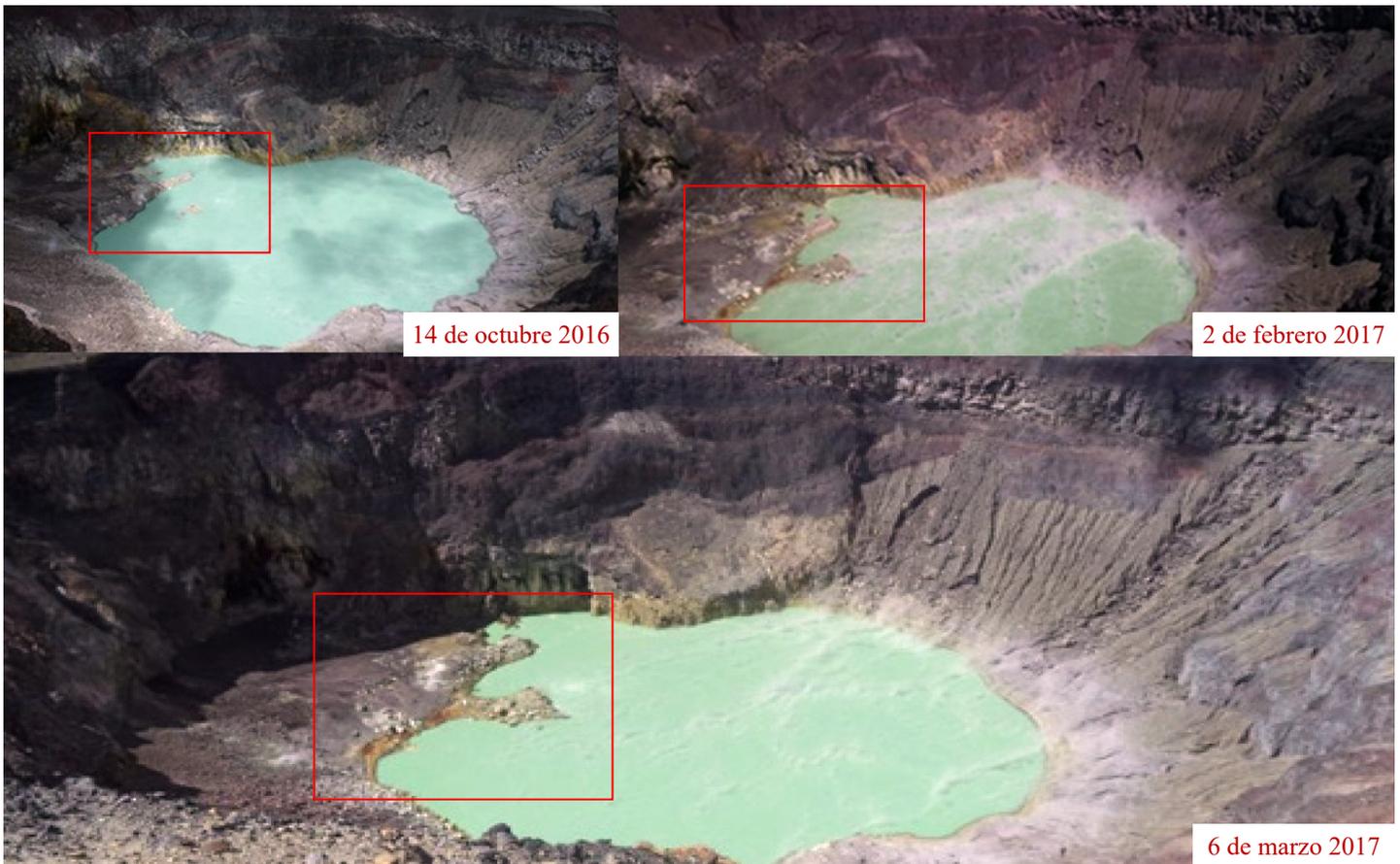


Figura 11. Fotografías de la laguna del VSA mes de enero y febrero de 2017. El nivel de la laguna se ha reducido y la evaporación es mayor en el mes de febrero 2017.

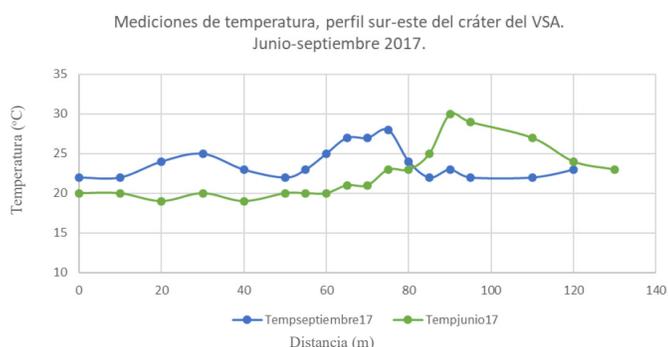


Figura 12. Periodo de mediciones de temperatura de los meses de junio y septiembre de 2017, con valores máximos de 30 y 28 °C respectivamente.

Los perfiles de temperatura realizados en este periodo (octubre 2016 – septiembre 2017) son presentados en la figura 13 con el objeto de observar el cambio significativo que tuvo la temperatura en el mes de marzo de 2017 con respecto a las demás mediciones.

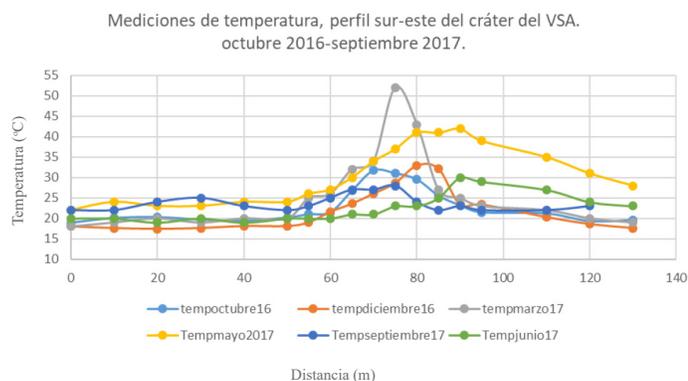


Figura 13. Muestra las mediciones de temperatura realizadas en el perfil al sur-este del cráter del volcán Santa Ana durante el periodo octubre 2016 – septiembre 2017.

Mediciones continuas de RSAM y sismos asociados a movimiento de fluidos

Según informes del MARN (2016-17) este evento del volcán no generó un incremento significativo de Energía Sísmica del volcán (RSAM): crisis sísmica. El RSAM presentó el siguiente comportamiento en sus promedios diarios:

a) septiembre de 2016 fluctuaciones dentro de los umbrales normales, entre 32 y 63 unidades, b) enero de 2017 leve incremento, alcanza valores entre 24 y 81 unidades, c) marzo 2017, valores considerados normales, oscilando entre 46 y 85 unidades, d) junio 2017; los valores se han reducido entre 31 y 38 unidades. Se puede decir que en este periodo el volcán mantuvo la línea base del RSAM, a pesar de los cambios observados en otros parámetros.

Aunque el RSAM no presentó variaciones significativas en este periodo, si se observaron cambios en la sismicidad asociada al movimiento de fluidos. Para visualizar el comportamiento de este tipo de sismicidad se graficaron los números de sismos versus tiempo, entre agosto 2015 a junio 2017 (Fig. 14).

La línea base de estos datos se consideran valores alrededor de 100 sismos por mes. Estos datos reflejan que entre los meses de diciembre de 2015 y abril de 2016 se dio un incremento significativo en este tipo de sismicidad. En los meses de mayo y junio 2016 desciende a valores de la línea base. A partir del mes de julio de 2016 el número de sismos de este tipo (microsismos) se incrementaron progresivamente hasta el mes de enero de 2017 de 160 a 625.

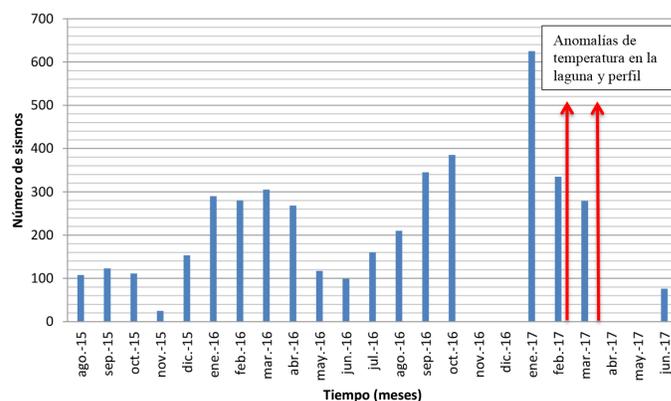


Figura 14. Sismicidad asociada al movimiento de fluidos para del VSA. Agosto 2015–junio 2017. Comparadas con las anomalías de temperatura en la laguna y en perfil del borde del cráter.



Este incremento del movimiento de fluidos es el causante del transporte de energía térmica hacia la laguna y la zona del perfil, donde los valores de temperatura se vieron incrementados. Esto se manifestó con el incremento del burbujeo en la laguna, sonido a jet de las fumarolas, mayor evaporación y descenso del nivel de la laguna y olor a azufre en la zona del cráter y en la ruta de ascenso.

Para los meses de febrero y marzo de 2017, el número de sismos de este tipo todavía superan la línea base. En estos meses se midieron las temperaturas máximas en la laguna (51 °C) y el perfil de monitoreo (52 °C), para el mes de julio de 2017 esta sismicidad retorna a la línea base.

Conclusiones

La variable temperatura en el sector sur del volcán (perfil de medición) y la laguna es sensible a los cambios (incrementos de energía RSAM, sismos asociados al movimiento de fluidos y flujo de calor) que presenta el volcán.

El incremento de la actividad del volcán en el año 2007 concluyó con una erupción freática y la reducción considerable del volumen de la laguna.

Para el caso del 2017, la actividad del volcán se manifestó en los siguientes aspectos: incremento del burbujeo en la laguna, sonido a jet de las fumarolas, aumento de temperatura en la laguna y campo fumarólico próximo a la laguna, mayor evaporación sin lograr reducir su volumen de manera considerable y olor a azufre en la zona del cráter y en la ruta de ascenso.

Los valores de RSAM no presentaron cambios significativos en este periodo (2017), solamente los sismos asociados al movimiento de fluidos.

La anomalía térmica máxima medida en el perfil de monitoreo fue de 52 °C en 2017 y de 38 °C en 2016. Para la laguna 61 °C en 2007 y 51 °C en el 2017.

Agradecimientos

Al área de vulcanología del MARN por su apoyo y trabajo en equipo, a los guarda parques del área protegida del complejo volcánico Izalco- Santa Ana, a los estudiantes de geofísica de la FMOcc, al Consejo

de Investigaciones Científicas de la UES (CICUES), la Secretaria de Investigación Científica de la UES, grupo de investigación vulcanológica de la UES, FMOcc.

Bibliografía

- Chiodini, G., Vilardo, G., Augusti, V., Granieri, D., Caliro, S., Minopoli, C., Terranova, C., 2007. Thermal monitoring of hydrothermal activity by permanent infrared automatic stations: results obtained at Solfatara di Pozzuoli, Campi Flegrei (Italy). *J. Geophys. Res.* 112 (B12). <http://dx.doi.org/10.1029/2007JB005140>.
- Colvin, A., Rose, W.I., Varekamp, J.C., Palma, J.L., Escobar, D., Gutierrez, E., Montalvo, F.,
- Maclean, A., 2013. Crater lake evolution at Santa Ana Volcano (El Salvador) following the 2005 eruption. In: Rose, W.I., Palma, J.L., Delgado Granados, H., Varley, N. (Eds.), *Understanding Open-Vent Volcanism and Related Hazards: Geol. Soc. Amer. Sp. Paper vol. 498:pp. 23–43*. [http://dx.doi.org/10.1130/2013.2498\(02\)](http://dx.doi.org/10.1130/2013.2498(02)).
- Fischer, T.P., Ramírez, C., Mora-Amador, R.A., Hilton, D.R., Barnes, J.D., Sharp, Z.D., Le Brun, M., de Moor, J.M., Barry, P.H., Füre, E., Shaw, A.M., 2015. Temporal variations in fumarole gas chemistry at Poás volcano, Costa Rica. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 294:56–70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.02.002>.
- Henríquez, B., Escobar, D., López, D., Olmos, R., Barahona, F., Hernández, A., Funes, R., Benítez, E., 2006. Thermal Monitoring of Santa Ana Volcano. El Salvador. C.A. American Geophysical Union, Fall Meeting 2006, abstract #V51A-1660.
- Henríquez, B., López, D., Barahona, F., Olmos, R., Cartagena, R., Hernández, A., Funes, R., Conde, V., Escobar, D., 2009. Post – Eruptive Changes os Santa Ana Volcano Crater Lake: November 2005 – November 2008. 43 rd Annual Meeting (2-3 April 2009) Session No. 32 Both 25. Central American Vulcanism – A tribute to Bill Rose (Poster).

- Hernández, P.A., Pérez, N.M., Varekamp, J.C., Henriquez, B., Hernández, A., Barrancos, J., Padrón, E., Calvo, D., Melián, G., 2007. Crater lake temperature changes of the 2005 eruption of Santa Ana volcano, El Salvador, Central America. *Pure Appl. Geophys.* 164 (12):2507–2522. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7643-8720-4_9.
- Laiolo, M., Coppola, D., F. Barahona c, J.E. Benítez, C. Cigolini b,d, D. Escobar e, R. Funes c, E. Gutierrez e, B. Henriquez c, A. Hernandez c, F. Montalvoe, R. Olmos c, M. Ripepe a, A. Finizola. Evidences of volcanic unrest on high-temperature fumaroles by satellite thermal monitoring: The case of Santa Ana volcano, El Salvador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 340 (2017) 170–179.p. 175.
- Ricci, T., Finizola, A., Barde-Cabusson, S., Delcher, E., Alparone, S., Gambino, S., Miluzzo, V., 2015. Hydrothermal fluid flow disruptions evidenced by subsurface changes in heat transfer modality: the La Fossa cone of Vulcano (Italy) case study. *Geology* 43 (11): 959–962. <http://dx.doi.org/10.1130/G37015.1>.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), 2006. Informe Mensual de Monitoreo Volcánico, Enero - diciembre, 2006, El Salvador. http://www.snet.gob.sv/Geologia/Vulcanologia/monitoreob.php?id_volcan=6
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), 2007. Informe Mensual de Monitoreo Volcánico, Enero - septiembre, 2007, El Salvador. http://www.snet.gob.sv/Geologia/Vulcanologia/monitoreob.php?id_volcan=6
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), 2016. Informe Mensual de Monitoreo Volcánico, Enero - diciembre, 2016, El Salvador. http://www.snet.gob.sv/Geologia/Vulcanologia/monitoreob.php?id_volcan=6
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), 2017. Informe Mensual de Monitoreo Volcánico, Enero - junio, 2017, El Salvador. http://www.snet.gob.sv/Geologia/Vulcanologia/monitoreob.php?id_volcan=6