



Volcán Turrialba: Apertura de una nueva boca fumarólica en el flanco sureste del Cráter Oeste el 12 de enero del 2012 como consecuencia de una descompresión superficial



Vistas desde el mirador de la boca 2012 fotografiada el 9 de febrero 2012. Fotos insertadas tomadas el 18 de enero del 2012: 1) A la izquierda acercamiento de la boca 2012 mostrando incandescencia a partir de las 6 p.m.; 2) A la derecha segunda emisión de cenizas a través de la boca 2012. (fotos: G.Avard, OVSICORI-UNA).

Avard G., Pacheco J., Fernández E., Martínez M., Menjívar E., Brenes J., van der Laat R., Duarte E., Sáenz W.

Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica Universidad Nacional

Volcán Turrialba: Apertura de una nueva boca fumarólica en el flanco sureste del Cráter Oeste el 12 de enero del 2012 como consecuencia de una descompresión superficial

Resumen

Desde mayo de 1996 el volcán Turrialba ha venido mostrando un incremento considerable en su actividad, cuyas señales podrían ser precursores de un nuevo proceso eruptivo. La actividad sísmico-volcánica y el incremento en la desgasificación fumarólica han ido progresando notoriamente a partir del año 2007 y particularmente desde la apertura de la boca fumarólica en enero 2010 en el Cráter Oeste, sugiriendo la ocurrencia de una intrusión magmática entre los años 2005-2007 y el posible comienzo de una nueva fase eruptiva. El 12 de enero 2012 se abrió una nueva boca (Boca 2012) en la pared externa sureste del Cráter Oeste con emisión de cenizas durante algunas horas, seguida por una segunda emisión de cenizas a través de la misma boca el 18 de enero. Los registros sísmicos y las mediciones de deformación y de flujo de gases difusos a través del suelo permiten concluir que la apertura de la boca fumarólica 2012 no corresponde a una nueva actividad magmática sino a una acumulación superficial de gases que produjo un aumento en la presión por confinamiento hasta provocar la formación de la boca 2012. Apertura de bocas fumarólicas similares ocurrió en el volcán Turrialba antes de la erupción de 1864-66 y en el volcán Irazú antes de la erupción de 1963-65, por lo que podríamos esperar la formación de otras bocas en el futuro, particularmente sobre fallas y zonas de debilidad alineadas SO-NE que pasa por los tres cráteres sumitales del Turrialba.

I_Introducción

El volcán Turrialba es un estratovolcán basáltico-andesítico de 3,349 m de altitud que se localiza en el extremo oriental de la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica, a ~30 km al ENE de la capital San Jose. En la cima del volcán pueden distinguirse tres cráteres orientados noreste-suroeste (Cráter Este, Cráter Central y Cráter Oeste) dentro de una depresión abierta al noreste, bordeada por fallas normales con orientación SO-NE (Fig.1). Las erupciones explosivas ocurridas entre los años de 1864 y 1866 se reconocen como la última actividad magmática del volcán Turrialba. Estas explosiones fueron precedidas por al menos 20 años de actividad fumarólica, con apertura de bocas, culminando con la formación del Cráter Oeste, el cual concentra la mayor parte de la actividad fumarólica reciente desde 1996 hasta el presente [1,2].

II_Observaciones

II_1 Cronología

- 1996: aumento en la actividad sísmica y fumarólica (estadio hidrotermal) [1,2].
- 2001, 2003-2005 y 2007: importantes enjambres sísmicos acompañados por aumento de la actividad fumarólica y la detección de gases magmáticos (estadio hidrotermal/magmática) [1,2]. Este estadio estuvo caracterizado por la extensión del área fumarólica y marcados efectos sobre el ambiente (quemaduras en vegetación, corrosión de infraestructura metálica, y efectos sobre la salud humana y animal).
- 2007: aumento de la actividad fumarólica en el fondo del Cráter Oeste, formando una pluma de hasta 2 km de altura. Aparición de fumarolas en la Falla Ariete [2].

- 2007-2012: Aumento de la actividad fumarólica con una componente fuertemente magmática y altas temperaturas [1].
- *5-6 de enero del 2010*: explosión freática y apertura de la Boca 2010 en la pared interior oeste del Cráter Oeste con **emisión de ceniza** no juvenil [3,4].
- 14 de enero del 2011: emisión de un pequeño volumen de ceniza no juvenil [5].
- *Principios del año 2011*: primeros reconocimientos de sonidos audibles provenientes de la Boca 2011 ubicada en el fondo del Cráter Oeste al lado norte [6]. Parece que este boquete se formó a principios de la época lluviosa, en mayo del 2011, sin embargo, no es posible su confirmación.
- *12 de enero del 2012:* apertura de la boca 2012 en el flanco sureste del Cráter Oeste con **emisión de ceniza** no juvenil [7,8].
- 18 de enero del 2012: segunda emisión de ceniza no juvenil a través de la Boca 2012 [9].

II_2 Observaciones visuales y físicas

La apertura de la boca 2012 ocurrida el 12 de enero del 2012, fue acompañada de emisión de cenizas por varias horas. Estas cenizas fueron transportadas por el viento principalmente en dirección O y NO. Caída de ceniza fue reportada hasta Tres Ríos (~27 km al suroeste del volcán) [8]. Al día siguiente se podía observar una boca con un área superficial de ~3x5m y en el fondo un conducto de ~1m de diámetro [10]. El 18 de enero del 2012 ocurrió una segunda emisión de un volumen moderado de cenizas. Estas cenizas fueron emitidas por unas cuantas horas y transportadas por el viento también dirección O y NO. La segunda emisión de cenizas no cambió el área de la boca pero si el diámetro del conducto en el fondo de la boca a ~3m. Posterior a las emisiones de cenizas se produjo un flujo considerable de gas con un sonido de jet audible desde el mirador (a unos 350m de distancia). Estos gases registraron temperaturas entre ~700 y 760°C produciendo calcinación de las mismas en el espectro visible rojo-amarillo, y flamas azuladas debido a la combustión de los gases volcánicos con el oxigeno de la atmósfera.

Sitios que presentan incandescencia, visibles de noche, son: 1) la Boca 2010 (se estima >600°C), 2) la Boca 2011 (>610°C), 3) la Boca 2012 (>730°C) y 4) un número de sitios en la base y en la pared sur del fondo del Cráter Oeste donde se encuentra azufre líquido con colores entre amarillo y rojo (500-730°C). La mayoría de los sitios que registran alta temperatura están sobre o cerca de una línea SO-NE donde hay actividad fumarólica notable que se extiende inclusive hacia el suroeste fuera del Cráter Oeste (Fig. 1).

El agua acumulada en forma somera en el fondo del Cráter Oeste que se observó en junio 2011 [6] desapareció entre el 13 y el 24 de enero 2012 [11].





Figura. 1: A) Vista general hacia el norte sobre la cima del volcán Turrialba desde el borde sur del Cráter Oeste.
B) Mapa de la cima del volcán Turrialba con los 3 cráteres y el "graben" al noreste. La actividad fumarólica y térmica se concentra principalmente en el Cráter Oeste y sus alrededores, especialmente a lo largo de una alineación SO-NE que atraviesa el sector sur de los cráteres Oeste y Central. Se indicadan también los sitios de medición geodésica, sísmica y de flujo de gases difusos presentados en este documento (fotos: G. Avard)

II_3 Actividad Sísmica

En 1990 el OVSICORI-UNA instaló una estación sísmica analógica de período corto y componente vertical (Ranger SS1) en la cima del volcán Turrialba. A partir de 1999, con la colaboración del Volcano Disaster Assistance Program del Servicio Geológico de Estados Unidos (VDAP-USGS) se constituyó una red con 3 estaciones sismográficas analógicas de período corto con: 1) dos sismógrafos con sensores de una componente vertical (sensores Mark L-4C) y 2) un sismógrafo con dos componentes horizontales (sensores Mark L-4D) y un sensor vertical Ranger SS1. Las estaciones se instalaron en los flancos oeste, sur y este del volcán. Los datos se transmiten modulados en frecuencias de VHF y UHF. Desde 1999 las señales son adquiridas a través del paquete libre Earthworm, desarrollado inicialmente por el USGS y mantenido por usuarios (www.isti.com/products/earthworm). A partir del año 2010 se instaló el sistema de adquisición de datos sísmicos Antelope (www.brtt.com). En ese mismo año, a partir de abril se instalaron tres estaciones digitales en la cima del volcán Turrialba, conformadas con digitalizadores de 24 bits Taurus de Nanometrics y sensores de banda ancha y tres componentes Trillium Compact de Nanometrics. La señal se transmite en tiempo real a través de radios en frecuencia libre.

La Figura 2 muestra el conteo de señales sísmico-volcánicas (entre noviembre, 2011 y febrero, 2012) que se lleva a cabo con la estación digital de referencia VTUN, la cual se encuentra al noreste del Cráter Central. El conteo se realiza a través de un simple algoritmo de STA/LTA [12] implementado en

el paquete para análisis de señales volcánicas en Matlab de Philippe Lessage (2009) [13]. La sísmicidad se mantuvo estable entre 40 y 80 sismos diarios entre noviembre y diciembre del 2011, con excepción del día 31 de diciembre, cuando se contabilizaron 155 sismos volcánicos. La mayoría de los sismos del 31 de diciembre se presentaron en un lapso de 1.5 horas, entre las 11:30 am y la 1:00 pm (hora local), con un promedio de 3 sismos por minuto. Debido a su pequeña magnitud y carácter no tectónico, no es posible localizar estos eventos. Otros sismos volcano-tectónicos que ocurrieron durante este mismo día indican profundidades superficiales (menores a 1km bajo la cima), por lo que podemos suponer que la sismicidad se originó cerca de la superficie y se debió a la apertura de una grieta, la descompresión y ascenso de fluidos a través de esta nueva grieta.



Figura 2. Número de sismos volcánicos diarios registrados en la estación sísmica VTUN ubicada al noreste del Cráter Central.

A partir del 1 de enero del 2012 aumenta la sismicidad y se mantiene arriba de 80 sismos diarios entre el 6 y el 13 de enero, para descender por debajo de los 20 sismos diarios a partir del 18 de enero.

El 12 de enero, 2012, no se observa actividad sísmica fuera de la usual en el volcán, la cual es dominada por sismos volcánicos de baja amplitud [14]. Además, ninguno de estos sismos es coincidente con el inicio de la actividad relacionada con la apertura de la Boca 2012, la cual ocurrió solo unos minutos antes de la 3 de la tarde del 12 de enero, ni con la emisión de ceniza y gases (Fig. 3A). Aunque se reportó la ocurrencia de actividad anormal en la cima durante la mañana del 12 de enero (retumbos), la mayoría de la información coincide en que la emisión de ceniza empezó minutos antes de las 3pm. En todo caso, en el sismograma solo se aprecian pequeños sismos volcánicos de diferentes amplitudes que no presentan algún tipo de patrón sistemático [14].



Figura 3. A) Registro sísmico del día 12 de enero, 2012. El registro empieza a las 12:00 a.m. y termina a las 6 p.m. (hora local). Los primeros reportes de la actividad se dan minutos antes de las 3 p.m. Las señales que aparecen son sismos volcánicos del tipo "híbrido". B) Registro sísmico del 18 de enero, 2012. El registro empieza a las 12:00 a.m. y termina a las 6 p.m. (hora local).

Por el contrario, los registros sísmicos del día 18 muestran un tremor sísmico coincidente con el inicio de la emisión de cenizas y bloques de roca a través de la Boca 2012 y la duración de la fase intensa de la erupción (Fig. 3B). Aunque la señal inicial es muy emergente, se puede determinar el primer arribo del tremor alrededor de 5 minutos antes de las 3pm. La fase más intensa se encuentra entre las 3:02pm y las 4:10pm. La señal de tremor se mantiene con una amplitud baja hasta el final del registro.

La Figura 4 muestra 5000 segundos del registro con la parte más intensa del tremor. Se notan variaciones en la amplitud, principalmente al inicio de la actividad, sin embargo, las frecuencias dominantes (Fig. 4B) en el registro se mantienen constantes. La señal es de alta frecuencia, con las mayores amplitudes entre 5 y 15 Hz (Fig. 4C). Aún después de la fase intensa, las mismas frecuencias se mantienen hasta el final del registro.



Figura 4. A) Registro sísmico con la fase más intensa del tremor. B) Espectrograma del registro mostrado en A. C) Espectro de frecuencias del registro sísmico (colores rojos representan mayor amplitud y verdes menor amplitud). (foto: emisión de cenizas del 18 de enero 2012, GAvard)

II_4 Deformación del edificio volcánico

Técnica de Medición Electrónica de Distancia (EDM)

Para el monitoreo geodésico del volcán Turrialba, se cuenta con una red o arreglo de EDM (Mediciones Electrónicas de Distancia) sobre la cima, donde están colocados cinco prismas en los alrededores de los cráteres Este, Central y Oeste desde un punto ubicado en el mirador (Fig. 1). Desde marzo de 2009 se han medido estos puntos regularmente utilizando una estación total robótica Trimble que al momento de medición corrige las distancias por temperatura y presión atmosférica lo que permite una medición con errores de \pm 2-4mm. Este error generalmente se debe a las condiciones propias del aire y variaciones locales en la trayectoria de la línea observada, como son la temperatura, la presión atmosférica y la humedad relativa.



Figura 5: Mediciones de distancias por modo electrónico entre el mirador y varios prismas (Fig.1) desde el inicio de 2009

Estas líneas (Fig. 5) muestran cambios desde 95 mm (punto N) a 35 mm (punto NE) en la distancia inclinada desde el pilar de medición durante el periodo 2009-2012. Tratamiento vectorial, campañas de GPS (Fig.1) y técnica de inclinación seca en el Cráter Central están en proceso para complementar la red de EDM y determinar si estos cambios tienien relación con la actividad volcánica, o si pueden ser movimientos locales del sitio, ya que durante la actividad de emisión de cenizas del 2010 y 2012, no se han determinado cambios realmente significativos en la longitud de la distancia (Fig. 5). Aun así, si se ve la tendencia general de las líneas, se pueden determinar 3 épocas mayores: 1) antes de mayo de 2009 con un aumento extrapolado de hasta 95 mm por año en la dirección norte, 2) entre mayo de 2009 y marzo de 2011 no se aprecian cambios significativos, y 3) después de marzo de 2011 con una reducción de hasta 76.9 mm por año en la dirección norte. Durante este último período las restantes líneas no muestran cambios significativos, por lo cual se podría interpretar que, asumiendo ese movimiento como causado por un efecto local todavía no determinado claramente y considerando que las deformaciones son muy bajas en el resto del arreglo EDM, se descarta una fuente superficial o profunda de deformaciones o que esa fuente se encuentra ejerciendo esfuerzos todavía no detectables por esta técnica y la configuración de la red o arreglo EDM de la cima.

Geodesia mediante Sistema de Ubicación Global (GPS)

En los flancos noreste y suroeste, se encuentran dos estaciones GPS permanentes de tipo Trimble NetRS que registran la posición cada 30 segundos. Están instaladas desde el mes de abril de 2010, una de ellas sobre un edificio abandonado (antigua capilla de La Central), punto CAPI, el otro punto, GIBE, se localiza sobre una roca en el sector de Bajos de Bonilla. Un problema en el horizonte satelital de la estación GIBE es la cantidad de árboles que impide un procesamiento adecuado para la interpretación vectorial PPP (Precise Point Positioning) [15], por lo tanto se procesa la distancia entre ambas estaciones (más de 5 837 m), para monitorear deformaciones profundas o de larga escala a lo largo de esta línea.



Figura 6. Serie de tiempo de distancia entre las 2 estaciones de GPS permanente CAPI (al suroeste del volcán) y GIBE (al noreste del volcán)

La figura 6 muestra que la distancia entre las estaciones de GPS disminuyó gradualmente un total aprox. de 5 mm entre abril 2010 y julio 2011 lo cual no es significativo, ya que la desviación estándar del grupo total de datos es de \pm 5 mm. Al final de cada año (noviembre-diciembre de 2010 y octubre-diciembre 2011) se observa una mayor dispersión de los datos debido probablemente a las condiciones climáticas de la región, que parecen afectar la recarga de las baterías con energía solar, impidiendo un registro continuo de la señal, especialmente en la estación GIBE. Esta dispersión no permite asegurar la ocurrencia de cambios pequeños en la distancia entre los dos sensores de GPS en los meses de enero-febrero del 2012. Sin embargo, es de esperarse la observación de cambios significativos si se diera una deformación del edificio volcánico debido a la influencia de una fuente ubicada a niveles suficientemente profundos. La disminución continua pero ínfima de la distancia entre las dos estaciones que sugiere el perfil de la figura 5 indica que al menos durante el periodo de observaciones no ha habido acumulación o ascenso de un volumen apreciable de magma en el interior del edificio volcánico. Sin embargo, esta información constituye una base de referencia importante para futuros cambios de actividad volcánica.

II_5 Perfiles de parámetros geoquímicos

\blacktriangleright Variación de los Flujos de gases CO₂ y H₂S que difunden a través del suelo

Desde setiembre 2011 se vienen repitiendo periódicamente perfiles de mediciones del flujo de gases CO_2 y H_2S que se difunden en forma pasiva a través del suelo, así como de temperatura del suelo medida a 10cm de profundidad con la ayuda de un flujómetro portátil West Systems y un termómetro de termocupla. Los perfiles geoquímicos, que inician sobre el borde este del Cráter Oeste y terminan en el borde sureste del Cráter Central, fueron determinados basandose en 2 mapas previos de flujo de CO_2 difuso medido en toda la región sumital del volcán generados en los años 2008 y 2011 por científicos del INGV de Italia [T. Ricci com. personal]. A pesar de que las condiciones climáticas en los dos meses

previos a la apertura de la boca 2012 no eran las más favorables como para repetir las mediciones a lo largo del perfil, se realizó una campaña el 11 de enero del 2012. Los resultados de esta campaña (Fig. 7) mostraron valores muy altos para el flujo difuso de CO_2 y H₂S a través del suelo de toda la pared superior este externa del Cráter Oeste (sitio #3) y en el sector oeste y sur del Cráter Central (sitio #9). Para la temperatura del suelo se obtuvieron valores alrededor de 90°C, lo que corresponde a la temperatura de ebullición del agua a esta altura (~3300m). Estas mediciones son consistentes con otras observaciones notables realizadas ese mismo día tal como la presencia de fumarolas en toda la pared este externa superior del Cráter Oeste, y una colada de azufre líquido de ca. 115m de longitud escurriendo entre la cárcava La Quemada (en la pared este del Cráter Oeste) y el borde oeste del Cráter Central. Además, un incremento en la actividad fumarólica fue notado en esta pared a fines de diciembre 2011, lo que sugiere un aumento progresivo de la salida de gases en la zona previo a la apertura de la nueva boca fumarólica el 12 de enero 2012.



Figura 7: Mediciones de los flujos de CO2 y H2S que difunden a través del suelo en forma pasiva y de la temperatura del suelo a 10cm de profundidad en los sitios 3 y 9 (Fig.1) del perfil.

El evento de apertura de la boca el 12 de enero 2012 estuvo acompañado por emisión de cenizas. Posterior al evento, entre el 11 y el 13 de enero, se observó una disminución máxima de un orden de magnitud en el flujo de CO_2 y de varios órdenes de magnitud para el flujo de H_2S en la pared sureste del Cráter Oeste y sobre el borde oeste del Cráter Central. Sin embargo, no se observa un patrón similar asociado a la segunda emisión de ceniza del 18 de enero. Desde entonces, el flujo de gases difundiendo a través del suelo se mantiene a un nivel similar al de noviembre 2011, mientras que la temperatura del suelo muestra una tendencia a disminuir (Fig. 7).

Condensados de fumarolas de los cráteres Oeste y Central

Posterior al último periodo de actividad magmática del volcán Turrialba de los años 1864-1866 y hasta los años 90's, dos pequeños campos fumarólicos, uno en la pared SW interior del Cráter Central y otro en la pared interior norte del Cráter Oeste, se mantuvieron con una permanente pero baja tasa de emisión de vapores con temperaturas relacionadas con el punto de ebullición del agua en un acuífero (i.e. 90°C) [1,16], y una composición química dominada por H₂O, CO₂, y H₂S correspondiente a la composición típica de fluidos que resultan del proceso de interacción entre agua-gas-roca en un sistema hidrotermal desarrollado y estable [17,18].



Cráter Central Volcán Turrialba (Condensados fumarólicos)



Figura 8: Cambio temporal de valores de pH de condensados fumarólicos recolectados 1) en el Cráter Oeste y 2) en el Cráter Central del volán Turrialba en el periodo enero 1992 – enero 2012. Fuente de datos: Laboratorio de Geoquímica Volcánica "Dr. Eduardo Malavassi Rojas" del OVSICORI-UNA.

A partir de marzo de 1999 se observa un cambio significativo en el nivel de acidez de los condensados muestreados en varias de las fumarolas de los cráteres Oeste y Central. Desde entonces hasta el presente se observa una disminución gradual y sistemática del pH de los condensados fumarólicos recolectados en ambos cráteres (Fig. 8). El patrón temporal de los valores de pH medidos en los condensados de ambos cráteres, muestra una tendencia decreciente y sistemática, siendo la disminución en el pH más pronunciada desde el año 2006 hasta el presente. Estos cambios señalan el inicio de una nueva fase de actividad fumarólica del volcán, la cual ha evolucionado tanto en términos de la composición química como en la tasa de emisión de gases de acuerdo a 3 fases distintivas establecidas de acuerdo a la evolución geoquímica de los gases del volcán Turrialba observada por Vaselli *et al.* [1]: 1) Una fase hidrotermal entre 1992–2001 de condensados con pH's relativamente altos, 2) Un incremento progresivo de la acidez de los condensados señalando la presencia de fluidos con una componente magmática entre el 2002-2005, 3) Un incremento más marcado en la acidez de los condensados por componentes de origen magmático entre los años 2006 y 2012.



Flujo de SO₂ total estimado mediante imágenes OMI/ASTER y efecto ambiental

Figura 9: Masa de SO₂ en la pluma del volcán Turrialba inferida del análisis de imágenes satelitales del AURA/OMI de la NASA entre octubre 2008 y febrero 2012. Los datos de masa de SO₂ corresponden al total de SO₂ detectado por el instrumento OMI del satélite AURA en la región de América Central de modo que la información no está corregida respecto al nivel "de fondo" de SO₂. Esta es la masa de SO₂ detectada cuando el satélite sobrevuela sobre el istmo centroamericano entre las 18:00-19:00 UTC. Fuente: http://so2.gsfc.nasa.

La comparación de datos de los instrumentos satelitales OMI/ASTER para el periodo diciembre 2011febrero 2012 no muestra cambios significativos en la masa de SO₂ emitida por el volcán hacia la atmósfera (Fig. 9). Por otra parte, el nivel de pH de la depositación total ácida que se muestrea en la estación La Central, 2.1km al SO del Cráter Oeste del volcán Turrialba, indica que la apertura de la Boca 2012 no incrementó mayormente los niveles de acidificación del ambiente que se venían observando previamente (Fig. 10). Sin embargo, a largo plazo, desde el año 2007, la precipitación total en La Central muestra un perfil de pH que corresponde a una acidificación extrema pero gradual de la atmósfera en los alrededores del volcán Turrialba, lo cual genera lluvias ácidas con valores de pH muy bajo. En La Central, en los meses de enero-febrero de los años 2010, 2011, y 2012, los pH promedios son 4.11, 3.98 y 3.12 respectivamente.



Figura 10: Serie de tiempo del pH de la depositación total ácida recolectada desde 1984 en las cercanías de la Escuela de La Central a 2.3km al suroeste del Cráter Oeste.

El perfil de pH de la deposición total ácida recolectada en La Central (Fig. 10) muestra una tendencia similar a los perfiles del pH de los condensados fumarólicos (Fig. 8).

III_Interpretaciones

En diciembre, 2011, se observaron algunos cambios sutiles que pueden considerarse como precursores a la actividad de enero, 2012. Entre ellos se notó un incremento en las fumarolas en la pared oeste del Cráter Oeste y las fumarolas en el Cráter Central. Además se observó una actividad sísmica inusual el 31 de diciembre, con la presencia de una gran cantidad de sismos volcánicos muy superficiales en un corto período de tiempo.

La ausencia de una señal sísmica de tremor o explosión el 12 de enero del 2012, durante la apertura de la boca fumarólica, indica que la formación de esta boca no estuvo asociada a un proceso de explosión por contacto de un cuerpo de agua con un cuerpo caliente (erupción freática). Tampoco se registraron señales sísmicas relacionadas con fracturación de roca o vibraciones, debido al movimiento de un fluido a alta presión en el edificio ni se encontró material juvenil en los depósitos de cenizas. Por lo tanto, no hay evidencia de nueva actividad magmática asociada con la apertura de la boca fumarólica 2012. El cambio rápido en la tasa de emisión de CO_2 y H₂S difundiendo a través del suelo observado entre el 11 y el 13 de enero muestra que probablemente hubo una acumulación de gases cerca de la superficie que produjo un aumento en la presión interna debido a su confinamiento. La apertura de un orificio provocó la descompresión y salida súbita de los gases confinados, arrastrando material rocoso de distintos tamaños, y dejando como resultado la boca fumarólica 2012. La ausencia de señales sísmicas particulares y de deformación del suelo indica que la acumulación de gases se dio a un nivel superficial.

En cambio, la segunda emisión de ceniza ocurrida el 18 de enero en la boca que se abrió el 12 de enero si presenta señales sísmicas asociadas a la emisión de cenizas y gases. La coincidencia del inicio de la actividad en el boquete y la generación del tremor volcánico, además de las altas frecuencias del mismo, indican que el origen de la señal sísmica es el paso de fluidos a alta presión (en este caso los gases y vapor de agua escapando por el boquete) por un conducto estrecho muy superficial. Por lo

tanto, el tremor fue originado por la despresurización súbita debido a la salida de gases y vapor a través de un conducto estrecho [14]. Sin embargo, no se notó un aumento del flujo de gases difusos como el 11 de enero lo que sugiere que la acumulación de gas que salió el 18 fue un poco más profundo que la del 12 de enero. Al igual que el día 12, no se logró medir ninguna deformación debido a un presión profunda. Así, la salida de ceniza, lapilli, fragmentos de roca y gases a través del nuevo boquete no se debe a una explosión o fracturamiento en el interior del volcán sino a un evento superficial [14].

Podemos asumir que la descompresión de gas que ocurrió el 12 de enero con la apertura de la boca 2012 generó condiciones favorables para que ocurriera una descompresión más profunda el 18 de enero pero no suficientemente profunda para desestabilizar el equilibro isostático del magma en la cámara magmática (profundidad desconocida). Hasta hoy no se ha observado ninguna señal de movimiento magmático asociado con estas dos descompresiones que pudiera sugerir una intrusión y/o a una erupción del volcán. Esta nueva salida de gas no aumentó significativamente el flujo de gas de la pluma lo que sugiere que el volumen de magma en desgasificación no cambió y tampoco la cinética de liberación de los gases. Entonces la apertura de la boca 2012 es parte de la actividad de desgasificación permanente del magma profundo, el cual pasa por las zonas más débiles del edificio. La aparición de esta nueva boca en la pared sureste del Cráter Oeste muestra que la zona de debilidad del volcán se propaga en dirección del Cráter Central.

La acumulación de agua somera en el fondo del Cráter Oeste desapareció entre el 13 y el 24 de enero lo que se puede explicar simplemente por un déficit en agua en el equilibro lluvia-evaporación al inicio de la época seca (enero). No hay evidencia que permita suponer que la presencia de esta acumulación de agua, notada por la primera vez en junio 2011 [6] a 10m de una zona a 500-730°C (mediciones de temperaturas a la fin de enero 2012) haya participado en la actividad notable de enero 2012.

IV_Conclusiones

La apertura de la boca fumarólica 2012 corresponde a un proceso de desgasificación espectacular pero normal del volcán Turrialba, en el cual no hubo interacción, movimiento o desestabilización magmática. El 5 de enero 2010, la boca 2010 inició este tipo de actividad con una explosión freática y una emisión moderada de ceniza [3]. Esta boca tiene ahora una dimensión de ~70x25m con un conducto de ~4x2m por el que se canaliza la mayor parte del flujo de gas magmático que constituye la pluma del volcán. En el 2011 se abrió la boca 2011 sin observación directa o instrumental; su tamaño es de ~1m de diámetro. A modo de comparación, numerosas bocas fumarólicas similares aparecieron en la cima del volcán Turrialba antes de la fase eruptiva freatomagmática del período 1864-66 [19]. Un patrón similar se observó en el volcán Irazú con la apertura de varias decenas de bocas con salida de gases a alta presión anterior a la erupción de 1963. Por lo tanto, es de esperarse la apertura de otras bocas fumarólicas con o sin explosión en el futuro, posiblemente a lo largo de fallas o zonas de debilidad con anomalías térmicas que se encuentran alineadas atravesando los cráteres de la cima en dirección oeste-este.

Reconocimientos

Con gratitud damos las gracias a los funcionarios del Parque Nacional Volcán Turrialba por su valiosa y auténtica colaboración y por facilitarnos el trabajo de campo en el volcán Turrialba. De igual manera, a las autoridades universitarias y gubernamentales por apoyar el trabajo científico del OVSICORI-UNA. Se agradece a los técnicos Hairo Villalobos Villalobos, Daniel Rojas Sobaja, y Antonio Mata Marín por el mantenimiento de las redes sísmicas y equipos de comunicación.

Referencias

- [1] Vaselli O., Tassi F., Duarte E., Fernández E., Poreda R.J., Delgado-Huertas A. (2010). Evolution of fluid geochemistry at the Turrialba volcano (Costa Rica) from 1998 to 2008. *Bull. Volcanol.*, 72:397-410.
- [2] Martíni F., Tassi F., Vaselli O., Del Potro R., Martínez M., Van der Laat R., Fernández E. (2010), Geophysical, geochemical and geodetical signals of reawakening at Turrialba volcano (Costa Rica) alter almost 150 years of quiescence. J.Volc. Geotherm. Res., 198:416-432.
- [3] Pacheco J., Protti M., Brenes J., Martínez M., Gonzáles V. (8 de enero 2010), *Informe de Prensa:* Actividad del volcán Turrialba entre el 4 y el 8 de enero del 2010.

(http://www.ovsicori.una.ac.cr/informes_prensa/2010/VturrialbaActividad04-08-Enero2010.pdf)

- [4] Duarte E., Jiménez W. (20 de enero 2010), *Reporte de Campo*: Documentación aérea de erupción de gas, vapor y partículas. (http://www.ovsicori.una.ac.cr/vulcanologia/informeDeCampo/2010/Infcampo200110.pdf)
- [5] Martínez M. y Pacheco J. (17 de enero 2011), *Informe de Prensa*: Informe sobre reporte de caída de ceniza en las inmediaciones del poblado La Central Volcán Turrialba.

(http://www.ovsicori.una.ac.cr/informes_prensa/2011/turrialba_boletin_ceniza_17ene2011.pdf)

[6] Duarte E., Fernández E., (9 de junio de 2011), Reporte de Campo: Formación de lago e inestabilidad de Cráter Oeste, Volcán Turrialba.

(http://www.ovsicori.una.ac.cr/vulcanologia/informeDeCampo/2011/InfturrilagoW9jun11.pdf)

- [7] Martínez M., Brenes J. (12 de enero 2012), *Informe de Prensa*: Volcán Turrialba registró nueva erupción de cenizas. (http://www.ovsicori.una.ac.cr/pdf/2012/turrialba_erupcion_12jan2012_bp.pdf)
- [8] Avard G., Brenes J., Fernández E., Martínez M., Menjivar E., Pacheco J., Sáenz W. y Van der Laat R. (2012) *Informe de Prensa*: Volcán Turrialba: Apertura de una nueva boca fumarólica en el flanco sureste del Cráter Oeste el 12 de enero 2012. (http://www.ovsicori.una.ac.cr/pdf/2012/Turrialba_eruption-report_2012-01.pdf)
- [9] Martínez M., Brenes J., Segura J. (18 de enero 2012), *Informe de Prensa*: Turrialba registra fuerte emanación de cenizas. (http://www.ovsicori.una.ac.cr/pdf/2012/turrialba18012012.pdf)
- [10] Avard G. (2012) Video: Volcán Turrialba, nueva emisión de cenizas el 18/01/2012 (http://www.ovsicori.una.ac.cr/videos/Turrialba-2012-01-18_ash.mp4).
- [11] Duarte E. (24 de enero 2012), *Reporte de Campo*: Desaparición de lago y otros cambios en el Volcán Turrialba (http://www.ovsicori.una.ac.cr/vulcanologia/informeDeCampo/2012/InfcampoTurri24112.pdf)
- [12] Haskov Jens y Gerardo Alguacial (2004), Modern Approaches in Geophysics, Volume 22: Instrumentation in Earthquake Seismology, *Springer Netherlands*, pp 358, 128-132.
- [13] Philippe Lesage (2009), Interactive Matlab software for the analysis of seismic volcanic signals. *Computers and Geosciences*, 35, 2137-2144.
- [14] Pacheco J. y Brenes J. (20 de enero 2012), *Informe de Prensa*: Informe Volcán Turrialba, Relación entre la sísmicidad y la descompresión.

(http://www.ovsicori.una.ac.cr/pdf/2012/turrialba_boletin_prensa_sismicidad_20ene2012.pdf)

- [15] Dach R., Hugentobler U., Fridez P., y Meindl M. (2007) Bernese GPS Software, Version 5.0. Berna, Suiza Astronomical Institute, University of Bern.
- [16] Tassi F., Vaselli O., Barboza V., Fernández E., Duarte E. (2004) Fluid geochemistry and seismic activity in the period 1998-2002 at Turrialba volcano (Costa Rica). Annals of Geophysics, 47(4):1501-1511.
- [17] Giggenbach W.F. (1987) Redox processes governing in the chemistry of fumarolic gas discharges from White Island, New Zealand. *Applied Geochemistry*, 2:143-161.
- [18] Giggenbach W.F. (1996) Chemical composition of volcanic gases. In:T.R.I., Scarpa, R. (Eds.), Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards. Springer Verlag, Berlin, 222-256.
- [19] Peraldo G. y Mora M. (2008) Enseñanzas de la actividad histórica de los volcanes Irazú y Turrialba, Costa Rica, América Central, en Historia y desastres en América Latina, Volumen III, ed.Virginia García Acosta, *Publicaciones Casa Chata*.

Video de ilustración:

http://www.ovsicori.una.ac.cr/videos/Turrialba_2012_apertura-boca2012-crisis.mp4