Informe de la
ACTIVIDAD SÍSMICA Y ERUPTIVA
VOLCÁN TURRIALBA – OCTUBRE 2015

Informe de la actividad sísmica del volcán Turrialba (Costa Rica): Ciclo eruptivo del 16 al 31 octubre del 2015

Elaborado por: Dr. Mauricio M. Mora F.

Resumen: Desde 1996, el volcán Turrialba ha mostrado un incremento paulatino en su actividad, el cual se tornó más conspicuo desde el año 2007. Desde entonces se ha caracterizado por una actividad eruptiva cada vez más frecuente e intensa, la cual ha comprendido una etapa de apertura de conductos inicial entre el 2010 y 2012 y 3 ciclos eruptivos entre octubre del 2014 y octubre del 2015, separados por periodos de calma relativa de 2 a unos 3 meses. El más reciente de los ciclos eruptivos tuvo lugar entre el 16 y 31 de octubre de 2015, el cual contabilizó 232 señales sísmicas típicas de eventos eruptivos y algunas emanaciones de ceniza más exhalativas, de las cuales 116 fueron confirmadas visualmente. Esto representa casi 3 veces la suma total de erupciones registrada entre octubre del 2014 y agosto del 2015, el cual fue de unas 78. El proceso inició el 10 de octubre cuando se registró un aumento en el nivel de actividad sísmica en el volcán, caracterizado por varios tipos de eventos que en suma reflejaban un aumento en la presión interna. El proceso fue catalizado también por un aumento en las precipitaciones el cual aportó agua al sistema hidrotermal lo que aumentó la cantidad de vapor interna y favoreció la interacción de agua con el pequeño cuerpo magmático somero. El ciclo inició con una apertura inicial de conductos generada por una fuerte explosión el 16 de octubre a las 17:49 hora local. Esta fisuración habría facilitado la percolación subsiguiente de agua aportada por las lluvias que continuaron durante esos días. Las erupciones frecuentes iniciaron el día 23 de octubre hasta el 27 de octubre, con una pequeña pausa el día 28 y una reanudación de la actividad el 29 que se prolongó hasta el 31 de octubre. Las características sismológicas de las erupciones sugieren que éstas ocurrirían en una fuente muy somera, posiblemente a pocos cientos de metros del cráter activo sin embargo más análisis debe realizarse para comprobar esta hipótesis. En general las erupciones fueron de baja energía y sólo la del día 16 y las dos últimas ocurridas el 31 de octubre tuvieron órdenes de magnitud de energía comparables con las erupciones más grandes durante ciclos anteriores. Al menos 8 erupciones generaron flujos piroclásticos, de los cuales, para los más extensos se estimó una velocidad entre los 4,5 y 5,5 m/s (16 a 18 km/h). Todas las etapas de actividad observadas en el volcán Turrialba reflejan un proceso de normal de reactivación de un volcán que desde su última erupción en el siglo XIX había estado en reposo (excepto fumarolas y leve sismicidad de fondo) y es de esperar nuevos ciclos eruptivos.

1. CAMBIOS EN LA ACTIVIDAD SÍSMICA

Desde la última erupción ocurrida el 15 de agosto del 2015, la actividad sísmica decayó a niveles comparables a los que se observaban antes de octubre del 2014 (Figura 1). Sin embargo, desde el 10 de octubre de 2015, se registró un aumento en el nivel de actividad sísmica en el volcán. Este incremento observado se reflejó no solo en el aumento de la amplitud de las señales, tal y como lo muestra la figura 1, sino también en los diferentes tipos de señales sísmicas, los cuales indicaban cambios significativos en los procesos internos del volcán, principalmente aquellos que se traducen en un incremento en la presión interna.

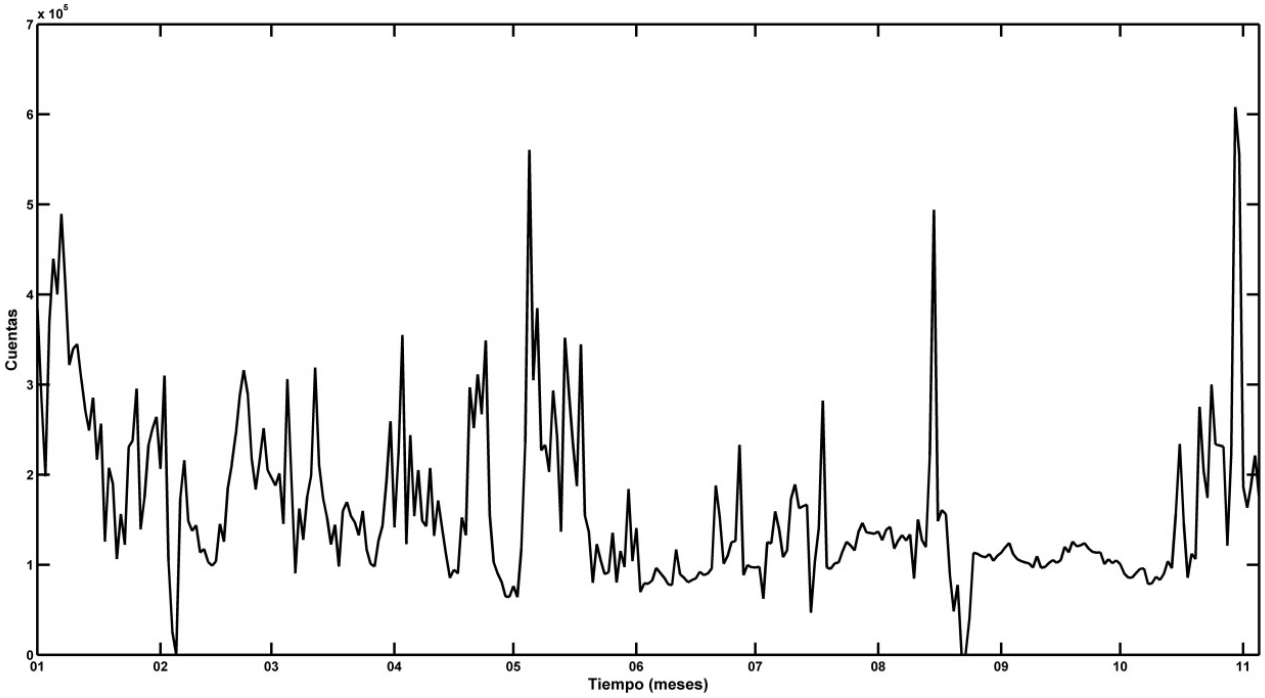

Figura 1. Nivel de actividad sísmica diario con base en el promedio de la amplitud sísmica (RSEM) durante el 2015. Obsérvese el incremento a partir de la segunda mitad del mes de octubre el cual perdura hasta finales de ese mes. Para el periodo de enero al 29 de octubre se utilizan los datos de la estación CVTR y a partir del 30 de octubre los de la estación CVTC, ésta última presenta un poco más de amplificación lo que incrementa el nivel de base de la curva. Las partes donde la curva tiene valores de cero significan que no hay datos.

A partir del día 6 de octubre empiezan los primeros cambios, con el aumento progresivo de eventos sismo-volcánicos de tipo VLP (señales de muy baja frecuencia, ver Figura 2). Estos eventos representan movimientos en las cavidades (fracturas) internas, producto del paso de fluidos que se encuentran a muy alta presión. Al mismo tiempo se registraron otras señales sismo-volcánicas que reflejaban la intensificación de la actividad interna del volcán (Figuras 3 y 4), entre ellas: sismos tipo LP o de baja frecuencia, relacionados con la circulación de fluidos (Figura 3A), sismos de doble fase (sismos con dos fases de diferente amplitud, Figura 3B), sismos de tipo "tornillo" los cuales reflejan vibraciones armónicas de cavidades producto del paso de la combinación de la ruptura y paso de fluidos por una cavidad (Figura 3C) y tremores de alta frecuencia (vibraciones sostenidas, Figura 3D). Los sismos de doble fase y LP fueron característicos de la fase precursora entre el 10 y el 23 y se incrementaron el día 13 de octubre, cuando ocurrió un pequeño enjambre de eventos volcano-tectónicos, posiblemente consecuencia de un pequeño empuje del cuerpo magmático somero o bien de una acumulación de presión por desgasificación de ese cuerpo.

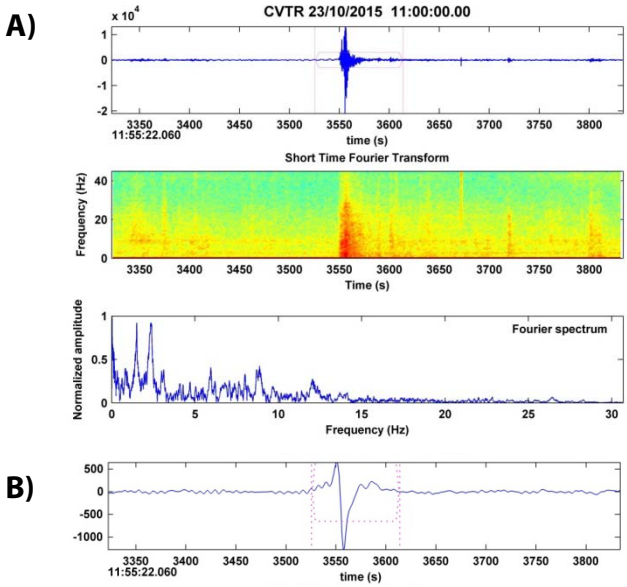

Figura 2. Eventos de tipo VLP (muy baja frecuencia o "*very low frequency*"). A) Arriba: Forma de onda; Medio: Espectrograma de frecuencia con base en el método de la Transformada de Fourier; Abajo: Espectro de Fourier. B) El mismo evento filtrado en la banda de 10-120 s. Figura elaborada a partir del programa de Lesage (2009).

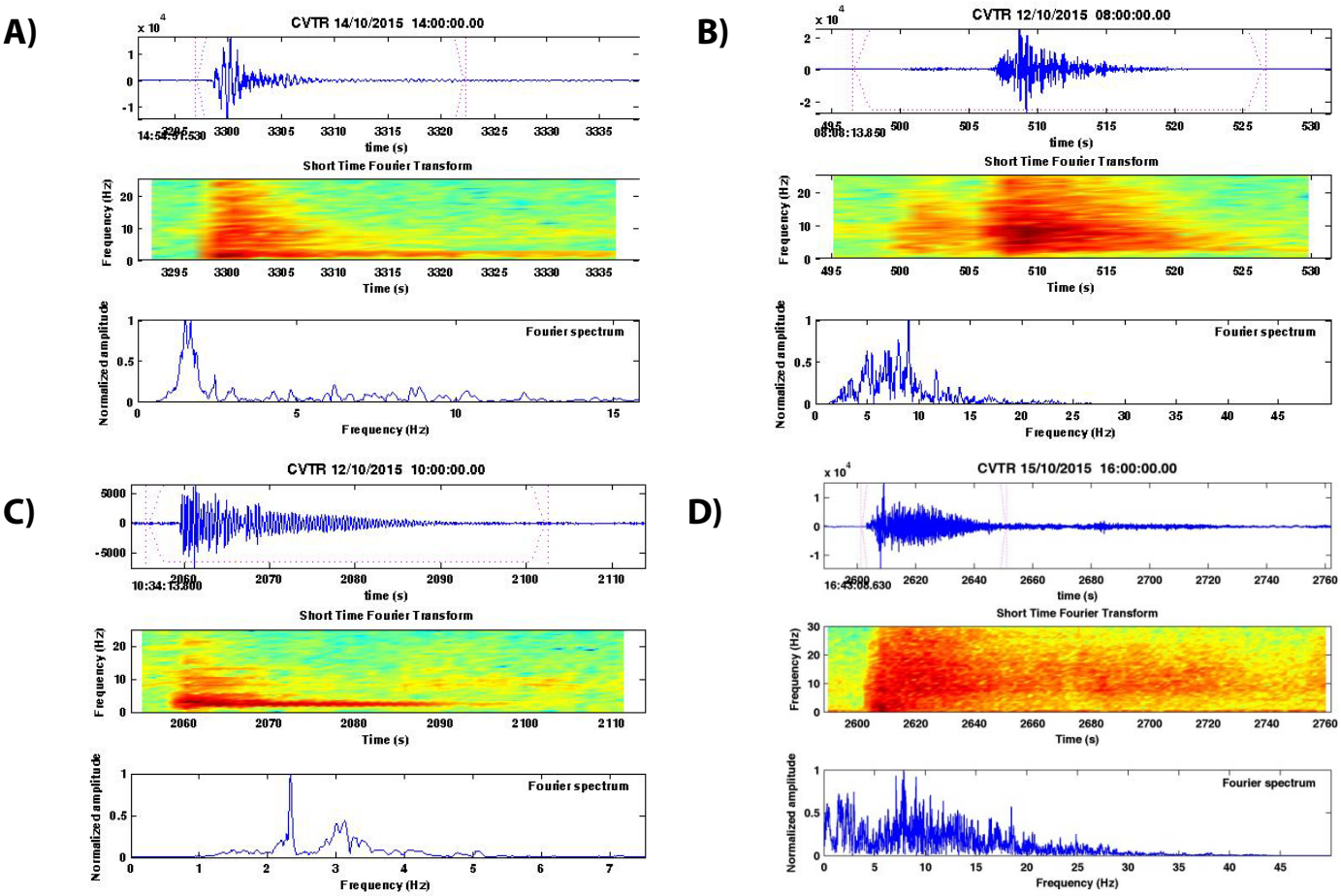

Figura 3. Algunos de los tipos principales de sismos volcánicos registrados previos a la fase eruptiva del 23 al 31 de octubre de 2015. A) Sismo LP o de baja frecuencia, B) Sismo de doble fase, C) sismo tipo "tornillo", D) tremor de alta frecuencia. En todas se muestra arriba: Forma de onda; Medio: Espectrograma de frecuencia con base en método de la Transformada de Fourier; Abajo: Espectro de Fourier. Figura elaborada a partir del programa de Lesage (2009).

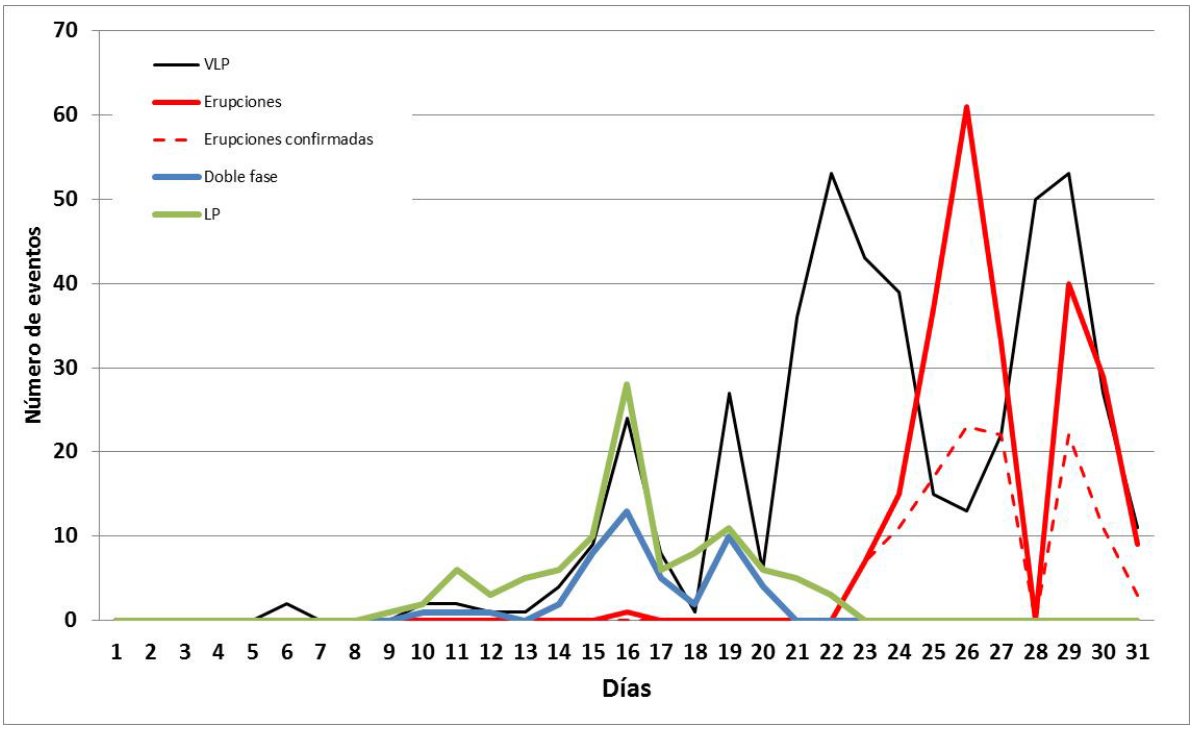

Figura 4. Gráfico con el número de sismos precursores tipo VLP, doble fase (DF) y baja frecuencia (LP) así como el número de señales sísmicas que típicamente acompañan las erupciones y el número de erupciones confirmadas visualmente. Muchas eventuales erupciones no pudieron ser confirmadas debido a que ocurrieron durante las noches o bien en momentos en los cuales la cima del volcán Turrialba se encontraba nublada. Periodo: Octubre 2015.

2. EL CICLO ERUPTIVO DE OCTUBRE DE 2015

La primera fase de actividad está comprendida por la erupción ocurrida el 16 de octubre del 2015 a las 17:49 hora local. Este proceso se caracteriza por un VLP inicial seguido de un tremor que perduró con gran amplitud por unos 300 segundos (Figura 5). Este evento habría permitido la apertura de conductos así como la percolación de agua que facilitaría luego la secuencia eruptiva subsiguiente. Luego de esta erupción se da una ligera disminución en los sismos de tipo VLP para luego volver a incrementarse los días siguientes, lo cual reflejaba una intensificación en la circulación de fluidos a presión, a través de fracturas o cavidades (Figura 5).

A partir de las 11:30 a.m. del 23 de octubre inició la secuencia de erupciones cuyo máximo se alcanzó el día 26 de octubre, lo cual coincide con una disminución de eventos VLP (Figura 4). Esta tendencia se mantiene incluso si se grafican únicamente las erupciones confirmadas visualmente. El 28 de octubre se mantiene el patrón de comportamiento inverso entre las erupciones y eventos VLP hasta que a partir del 30, la cantidad de ambos decrece.

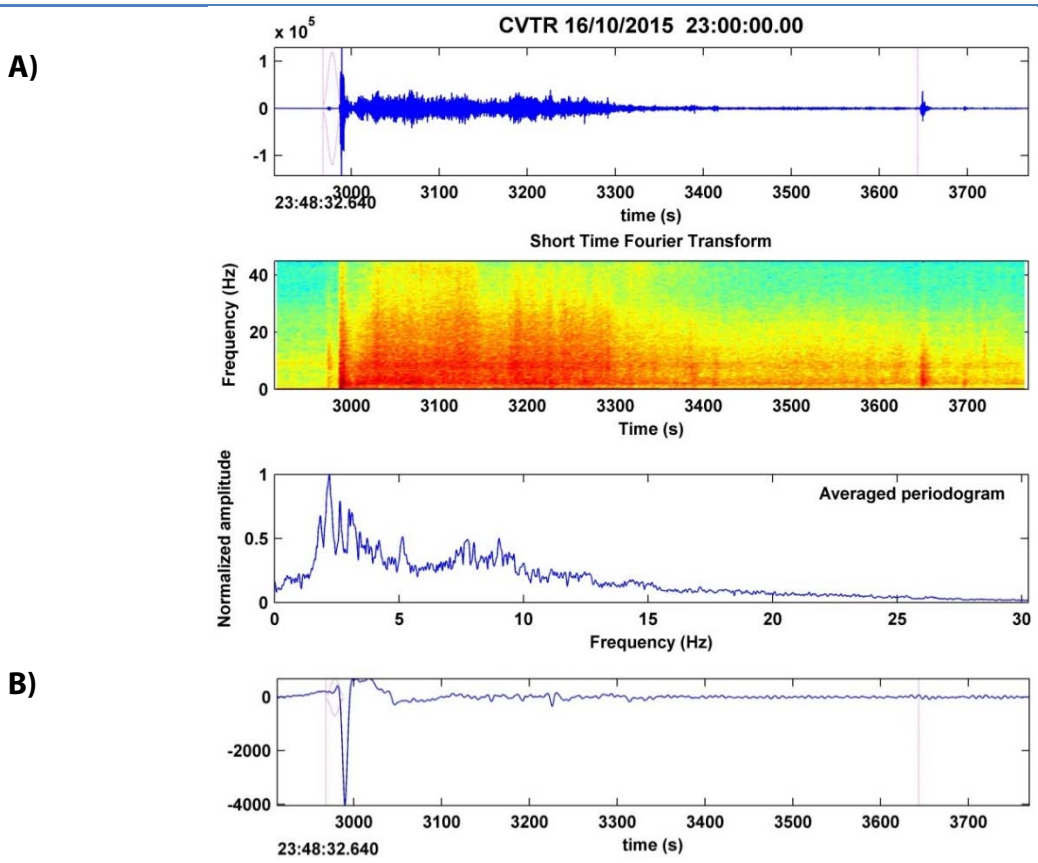

Figura 5. Explosión del 16 de octubre de 2015. A) Forma de onda (arriba); Espectrograma de frecuencia con base en el método de la Transformada de Fourier, elaborado con una ventana móvil de 5,12 s y un traslape de 2,56 s (medio); Espectro de Fourier (Abajo). B) El mismo evento filtrado en la banda de 10-120 s. Figura elaborada a partir del programa de Lesage (2009).

Las erupciones fueron menos frecuentes al inicio y al final del ciclo, en tanto que la fase más intensa se dio entre el 26 y 27 de octubre (Figura 6B y B). Las erupciones generalmente eran precedidas por un sismo tipo VLP (apertura súbita de la fisura) y la consecuente salida de gases y material fragmentado a alta presión reflejado en la señal de tremor de alta frecuencia registrado posteriormente. Los VLP presentaron mayores amplitudes el día 25 y a partir del 29 y hacia el final del ciclo eruptivo (Figura 6D). Los tremores, por su parte, tuvieron en general duraciones menores a los cinco minutos, alternativamente también algunos episodios tuvieron duraciones entre los 5 y 15 minutos y con algunas excepciones fueron superiores (Figura 6E).

La diferencia entre los tiempos de inicio del VLP y del tremor de la erupción osciló entre 1 y 3 minutos y en algunos casos alcanzó hasta los 4 minutos (Figura 6C). Esta diferencia de tiempo relativamente pequeña sugiere que la fuente de las erupciones no sería tan profunda. De la inspección de las tomas obtenidas por la cámara WEB de la RSN en el volcán Turrialba se estima una velocidad de elevación de las columnas eruptivas entre los 2 y los 11 m/s. Si se toma esta velocidad de referencia, de forma muy grosera y preliminar, el recorrido del gas en el interior se estimaría entre los 120 y 1980 m, lo cual sería una hipótesis plausible. Esto, si se asume que el VLP se genera por expansión de una fisura o cavidad y no la expansión del volumen de un medio poroso (ya sea fisurado o granular). Una investigación más profunda y detallada debe ser llevada a cabo para comprobar esta hipótesis y generar estimaciones más precisas. Otros eventos no presentaron un VLP al inicio o era muy pequeño lo cual denota que el mecanismo sería diferente, de poca presión y más superficial ya que el tiempo de inicio del tremor es casi el mismo de la emanación de ceniza. Estos eventos se acercan más a exhalaciones que a erupciones propiamente dichas y se presentaron principalmente los días 25 y 26 de octubre.

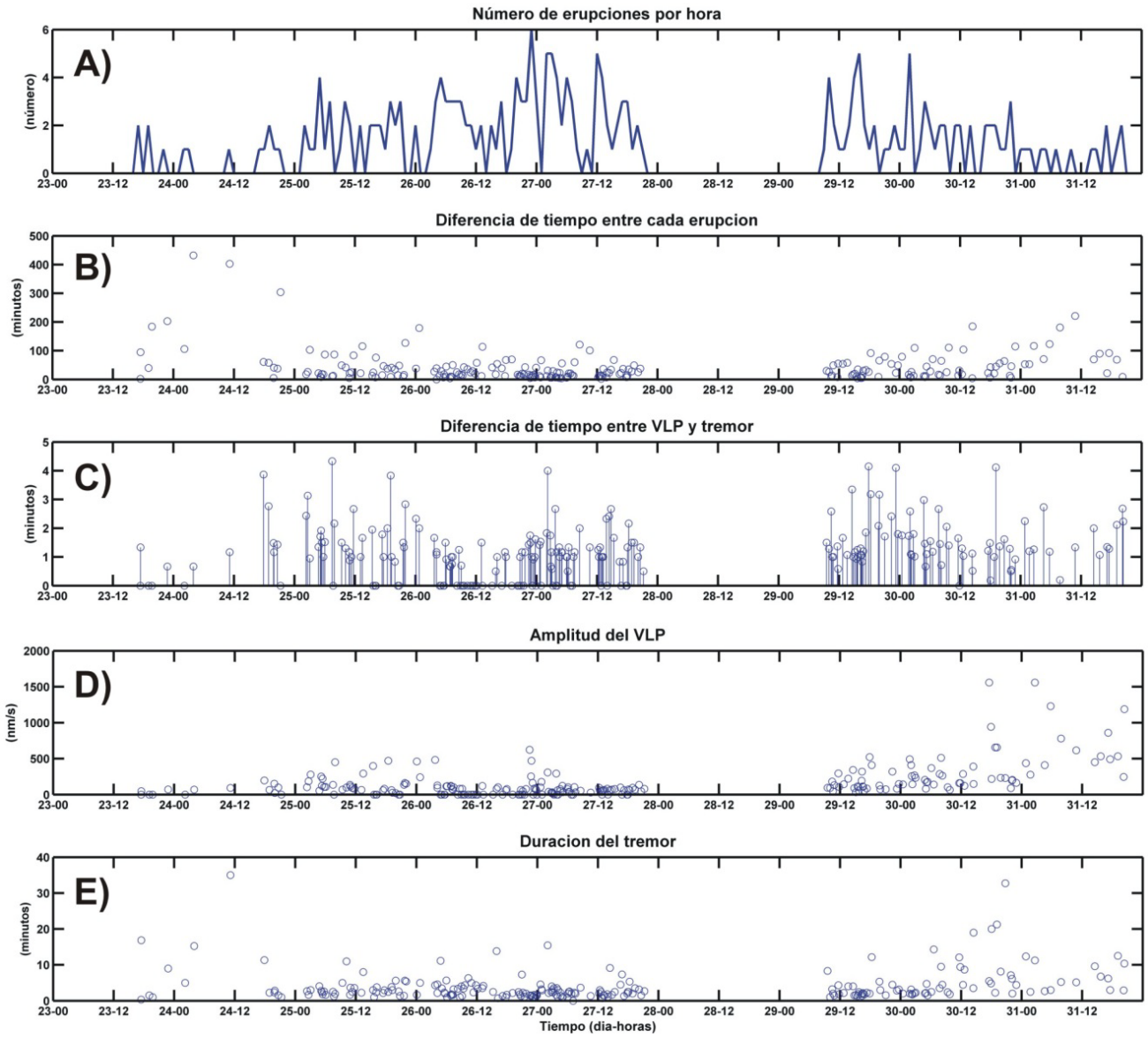

Figura 6. A) Número de erupciones por hora. B) Diferencia de los tiempos de inicio de cada erupción en minutos. C) Diferencia de tiempo, en minutos, entre el tiempo de inicio del VLP y el tiempo de inicio del tremor. D) Amplitud máxima, en velocidad, del evento VLP. E) Duración, en minutos, del tremor asociado a la erupción. A partir del 30 de octubre fue necesario el cambio de estación sísmica de CVTR a CVTC.

Por otra parte, a partir del análisis de sismos VLP se puede ver en general que durante el periodo más intenso de la actividad eruptiva estos eventos disminuyeron en cantidad (Figura 7). La amplitud, por otra parte se mantiene en el mismo rango hasta la segunda mitad del 30 de octubre de 2015. A partir del 31 de octubre se observa que la amplitud aumenta. Esto, en parte podría ser generado por el cambio de estación sísmica a CVTC, debido a los problemas técnicos de la estación CVTR que es la estación de referencia. Sin embargo, el cambio se hizo desde el 30 de octubre y se ve que las amplitudes eran comparables a las medidas con la estación CVTR en días anteriores, por lo que el aumento es significativo desde el punto de vista físico. La misma tendencia se observa en los VLP asociados con las erupciones lo que sugieren una fuente más profunda que podría estar interviniendo o un mayor grado de presurización del sistema hacia el final del ciclo.

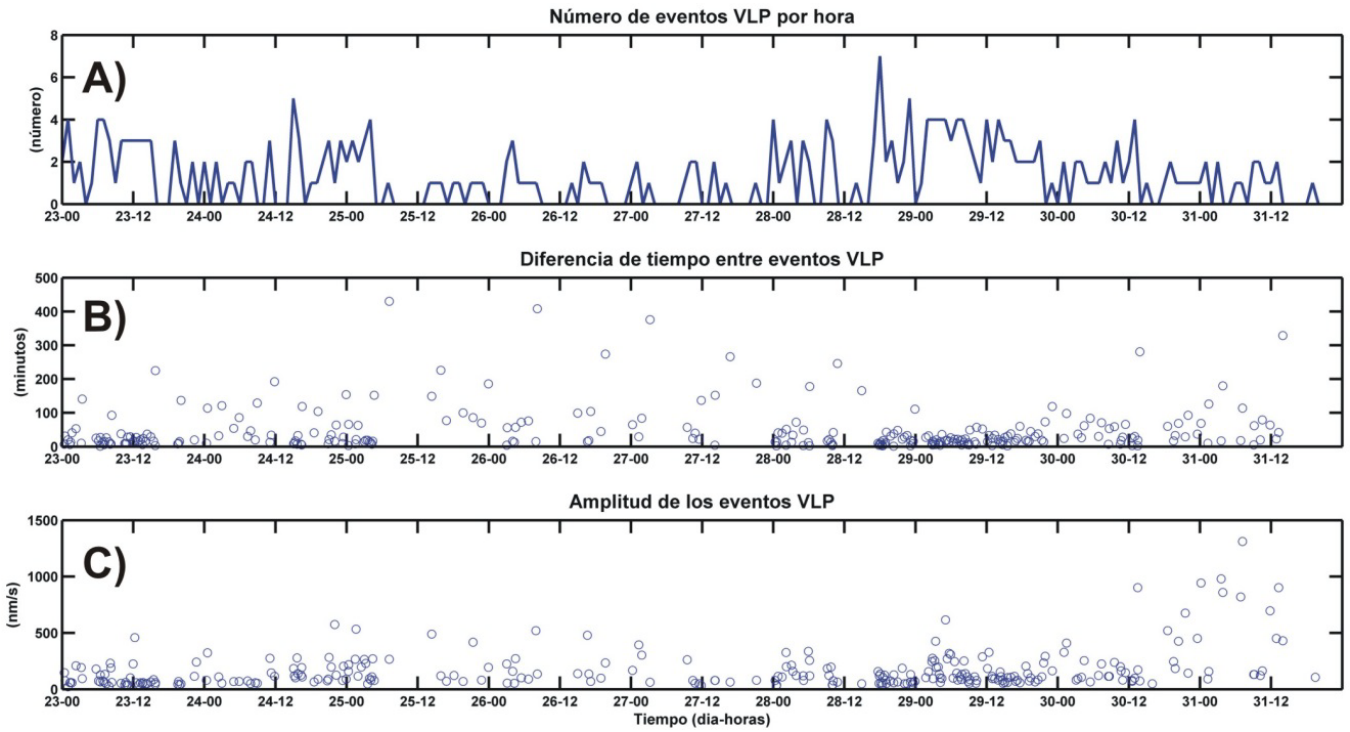

Figura 7. A) Número de erupciones por hora. B) Diferencia de tiempo entre el tiempo, en minutos, de inicio de cada erupción. C) Diferencia de tiempo, en minutos entre el tiempo de inicio del VLP y el tiempo de inicio del tremor. D) Amplitud máxima, en cuentas, del evento VLP. D) Duración, en minutos, del tremor asociado a la erupción. A partir del 30 de octubre fue necesario el cambio de estación sísmica de CVTR a CVTC.

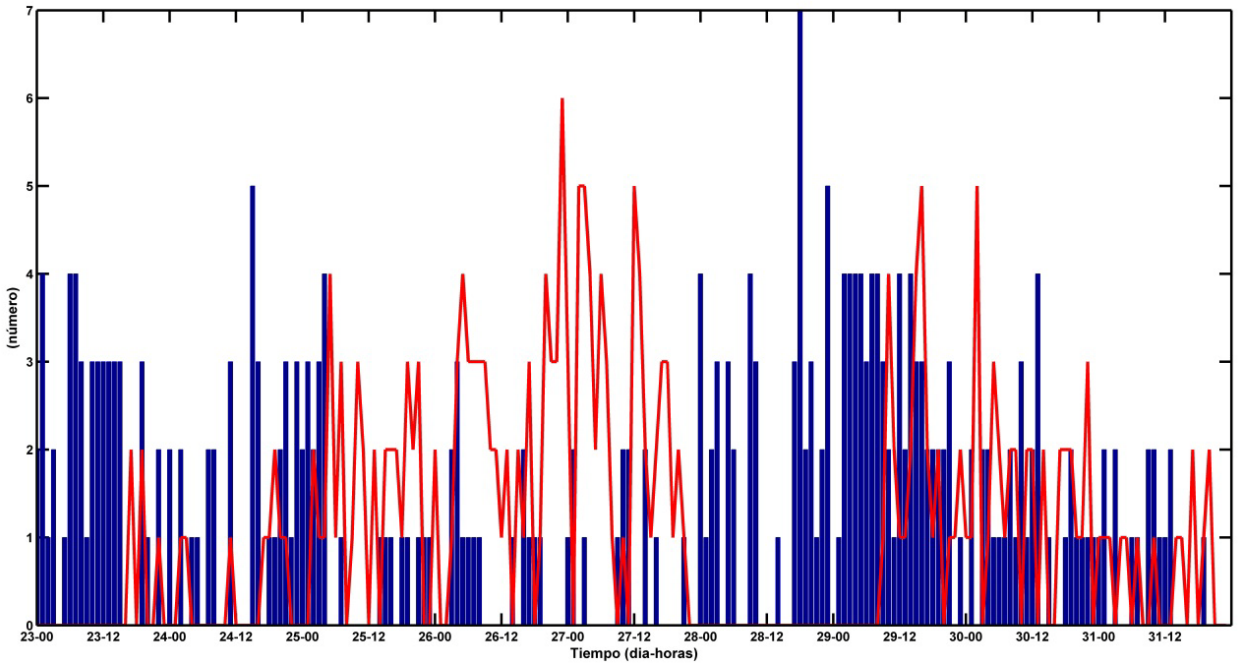

Figura 8. Número de erupciones (línea roja) y número de eventos VLP (barras azules) por hora.

Asimismo, si se compara en detalle el número de eventos VLP y de erupciones por hora, se observa que los primeros mantienen la tendencia de ser más frecuentes en los periodos de calma o menos erupciones lo que sugiere procesos de presurización y/o circulación de fluidos más intensa previa a las erupciones (Figura 8).

El breve periodo de calma eruptiva entre la noche del 27 a la madrugada del 29 de octubre estuvo caracterizado no sólo por el aumento en el número de eventos VLP sino también por eventos de tremores armónicos y de alta frecuencia (Figura 9). Estos en parte podrían haber sido propiciados por las fuertes precipitaciones ocurridas en ese intervalo de tiempo, de manera similar a los tremores registrados luego de la erupción del 16 de octubre.

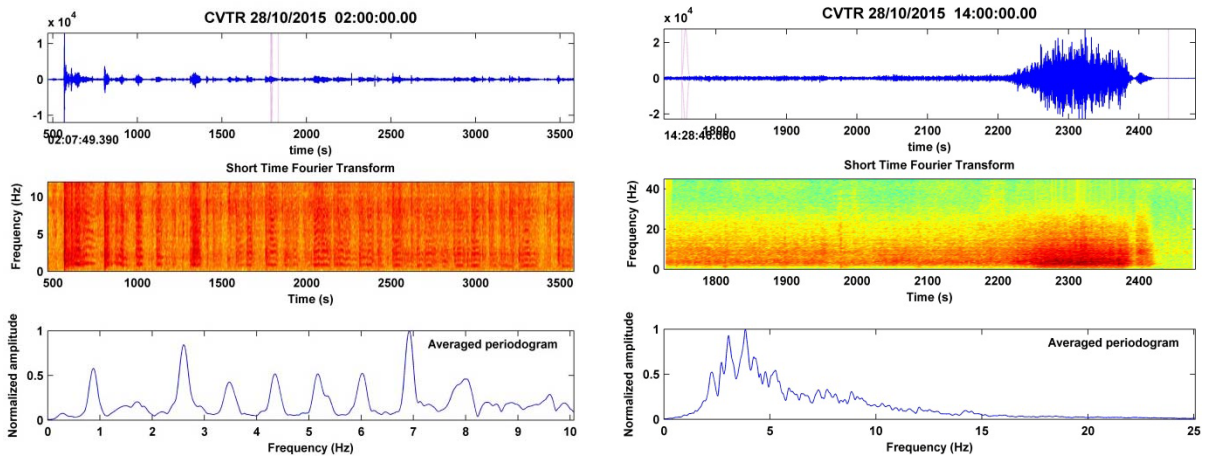

Figura 9. Episodios de tremor armónico (izquierda) y de alta frecuencia (derecha) registrados el 27 de octubre de 2018 a las 20:00 hora local y 28 de octubre a las 8:00 hora local, respectivamente. En ambos se muestra: La forma de onda (arriba); Espectrograma de frecuencia con base en la Transformada de Fourier elaborado con una ventana móvil de 5,12 s y un traslape de 2,56 s (medio); Periodograma promediado de Fourier (abajo). Figura elaborada a partir del programa de Lesage (2009).

En total se registraron 232 señales típicas eruptivas aunque solamente 116 fueron confirmadas. Esto representa casi 3 veces el número total de erupciones registrado desde octubre de 2014 y agosto de 2015, el cual fue de 78 (Figura 10).

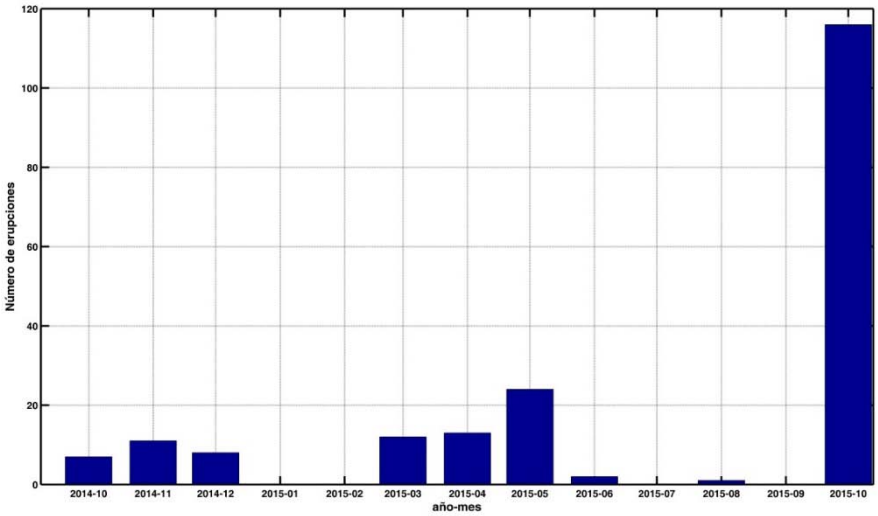

Figura 10. Número mensual de erupciones confirmadas desde octubre del 2014 hasta octubre del 2015.

Por otra parte, la energía de las erupciones fue menor a los $3x10^4$ J (Figura 11). Solamente la erupción inicial el 16 de octubre y las dos últimas ocurridas el día 31 de octubre tuvieron valores de energía comparables con las erupciones más grandes durante ciclos anteriores, que superan los valores de $1x10^5$ J. Los ciclos eruptivos empiezan con una erupción de mucha energía debido a la fisuración inicial consecuencia de la presión acumulada en el sistema. Los intervalos entre los ciclos eruptivos están en el rango de los 2 a 3 meses.

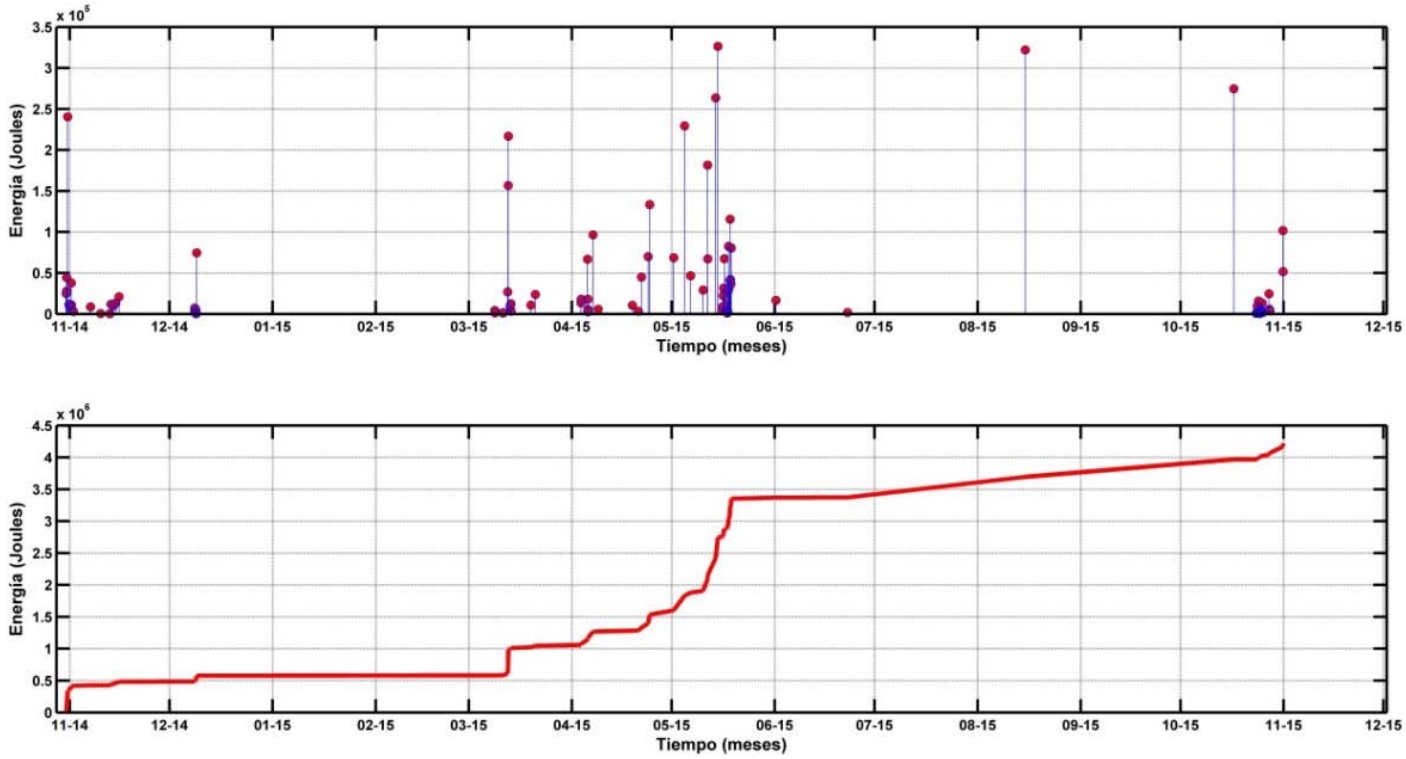

Figura 11. Energía (arriba) y energía acumulada (abajo) de las erupciones del volcán Turrialba Noviembre 2014– Octubre 2015. Se excluyó la erupción del 31 de octubre de 2014 por presentar un valor muy elevado. En el caso del ciclo eruptivo de octubre de 2015 se incluyen solamente, de manera preliminar, las erupciones más importantes registradas.

3. Corrientes de densidad (flujos piroclásticos) observadas durante la actividad eruptiva del 23-31 de octubre de 2015

Durante el presente ciclo se observaron flujos piroclásticos producto del colapso de la columna eruptiva durante los procesos indicados la tabla N°1. Es probable que al menos otros dos eventos hayan generado flujos importantes, sin embargo no es posible comprobarlo por las condiciones nubladas en la cima.

Tabla N°1. Erupciones de octubre 2015 en las que se observaron flujos piroclásticos

AÑO	MES	DIA	HORA (UTC)
2015	10	24	19:51
2015	10	25	13:29
2015	10	25	15:25
2015	10	25	17:25
2015	10	27	12:23
2015	10	27	20:10
2015	10	31	19:04
2015	10	31	20:22

A partir de las tomas de la cámara de la RSN en la cima del volcán se estimó una velocidad entre los 4,5 y 5,5 m/s para los flujos más extensos (que cubrieron el cráter Central) ocurridos el 25 (Figura 12) y 27 de octubre a las 07:29 y14:22 hora local respectivamente. La distancia entre el borde del cráter activo en marzo de 2015 y el borde más nor-oriental del cráter Central es de unos 250 m.

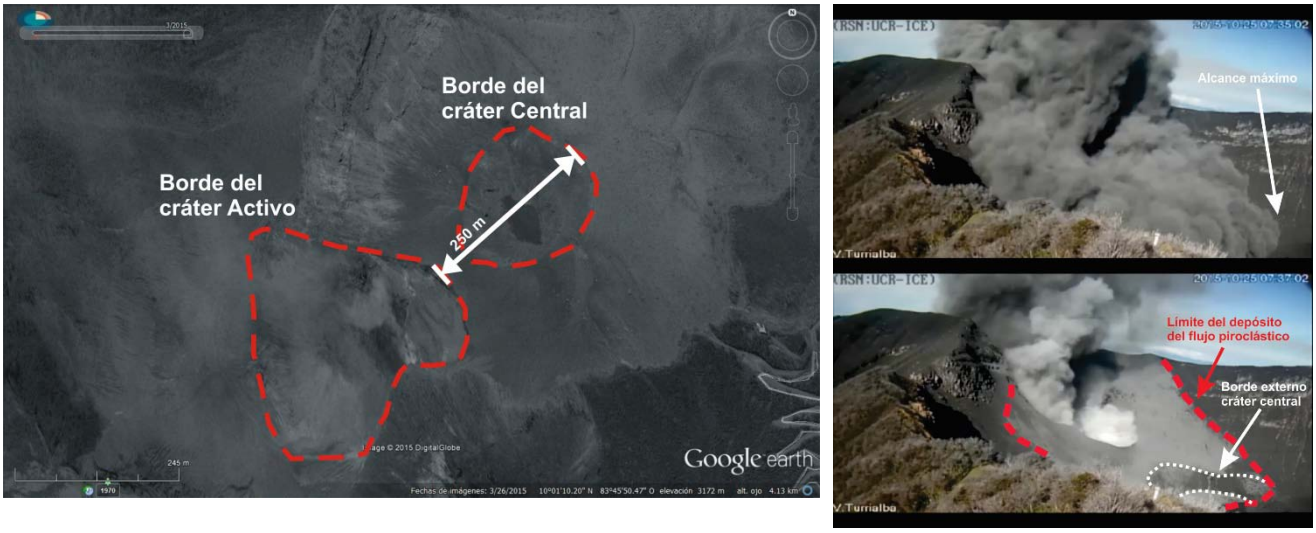

Figura 12. Erupción del 25 de octubre a las 07:30 a.m. y que a su vez generó un flujo piroclástico que se extendió hasta el cráter Central. A la izquierda la imagen de Google Earth de la cima del volcán Turrialba con fecha de marzo de 2015. A la derecha las imágenes del flujo piroclástico tomadas por medio de la cámara de la RSN (UCR-ICE) ubicada en la cima del volcán Turrialba.

4. Consideraciones finales: breve retrospectiva e interpretación de la sismicidad y actividad de octubre de 2015

Desde 1996, el Turrialba ha mostrado un incremento paulatino en su actividad, el cual se tornó más conspicuo desde el año 2007 y alcanzó un clímax en enero de 2010, cuando ocurre una crisis freática-fumarólica con erupción de ceniza no magmática a través de una nueva boca fumarólica abierta. A partir de esa crisis, el volcán inicia un periodo de actividad hidrotermal intenso, caracterizado por una actividad fumarólica profusa y cambios morfológicos frecuentes producto de la presión del sistema y la fuerte alteración hidrotermal, lo cual propició la erosión y el fracturamiento interno. Lo anterior generó que el sistema se inestabilizara y produjera las subsiguientes crisis freático-fumarólicas entre los años 2011 y 2012. Esta inestabilidad fue generada por el ascenso de nuevo magma, con una continua e intensa desgasificación, por lo que estas crisis conformaron entonces, la primera etapa del lento despertar del volcán Turrialba, en donde se abrió parcialmente el sistema. Se especula que un reservorio magmático se encuentra a profundidades de 4-6 km bajo el volcán.

Los años subsiguientes comprenden la continuación de la desgasificación y parcial ascenso de parte del cuerpo magmático hasta emplazarse a profundidades más someras. Este ascenso hasta la superficie es complejo y puede ocurrir a través de pequeños cuerpos que poco a poco logran abrirse paso, lo que genera una profusa actividad volcano-tectónica y otros tipos de señales, que se ha venido presentando durante los últimos años. Entre la etapa eruptiva del 2014 y la etapa del 2015 se pudo constatar que el pequeño cuerpo de magma habría alcanzado un nivel relativamente somero, lo que propicia dos cosas: 1. Su desgasificación final y explosión, 2. Su interacción con el complejo sistema de acuíferos superficiales (sistema hidrotermal). Lo segundo habría propiciado la alta explosividad de las erupciones generadas principalmente entre marzo y junio del 2015.

En la actual etapa eruptiva habrían podido converger dos procesos: 1. En primera instancia el ascenso magmático que ha sido constatado por los diferentes datos (gases, deformación y sismicidad volcano-tectónica dados a conocer por el OVSICORI-UNA), el cual se daría a través de pequeños cuerpos, tipo diques; 2. Las precipitaciones ocurridas durante el mes de octubre. El agua que se infiltra y alimenta sistema hidrotermal, fue calentada y vaporizada, lo cual presurizó el sistema y generó la primera erupción del día 16 de octubre. Esto limpiaría algunos conductos y abriría otros que permiten el ingreso de más agua durante las lluvias subsiguientes, lo cual se refleja en tremores de larga duración que se registraron el día 21, así como el tremor de fondo que prevaleció hasta el inicio de la actividad eruptiva. La rápida vaporización del agua permitiría su salida a presión, pero, al haber conductos abiertos, puede salir de forma pasiva, lo que propicia la vibración de las cavidades y el consecuente tremor volcánico de alta frecuencia. Esto también genera un mayor intercambio térmico entre el cuerpo magmático y el sistema hidrotermal y por ende, le aporta más calor, y explota de manera freatomagmática.

En el contexto anterior, la actividad eruptiva podría ser explicada por medio de dos procesos: 1. La percolación de agua, rápida vaporización, presurización y expansión de volumen del medio fracturado por la interacción directa con una pequeña parte del cuerpo magmático somero (Figura 12, columna izquierda), 2. La percolación de agua y rápida vaporización debido a la alta temperatura y genera presión en el extremo inferior de la cavidad que conecta con la superficie, la posterior apertura súbita y finalmente la salida a presión del gas y arrastre del material sólido fragmentado en el extremo superior de la cavidad (Figura 13 columna derecha). Aunque las erupciones en general fueron de baja energía, sí mostraron cierta explosividad por lo que la interacción del agua del sistema hidrotermal con el pequeño cuerpo de magma somero es plausible, lo que favorece el mecanismo freatomagmático para el origen de la mayoría de las erupciones generadas en el presente ciclo. La ceniza oscura vista en las columnas eruptivas y la generación de los pequeños flujos piroclásticos apuntan hacia dicha intepretación. La energía de las últimas dos erupciones que marcaron el fin del ciclo eruptivo sugieren una evacuación definitiva de la presión y, posiblemente, la fragmentación de una buena parte del pequeño cuerpo magmático. Todas las etapas de actividad observadas en el volcán Turrialba reflejan un proceso de normal de reactivación de un volcán que desde su última erupción en el siglo XIX había estado en reposo (excepto fumarolas y leve sismicidad de fondo) y es de esperar nuevos ciclos eruptivos.

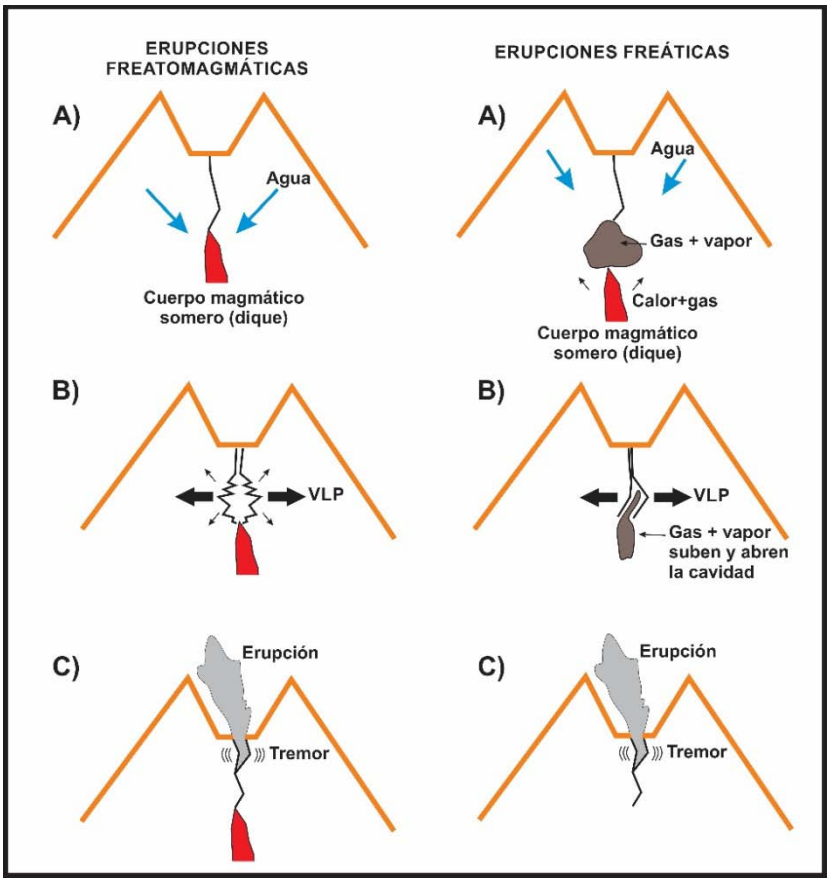

Figura 13. Esquemas que muestran hipótesis de mecanismos de origen de las erupciones del 23 al 27 de octubre de 2015 en el volcán Turrialba y su relación con la sismicidad observada. En ambos escenarios se muestra: A) Incorporación de agua al sistema hidrotermal somero. B) La presurización y expansión del medio o cavidad que genera el sismo tipo VLP. C) La liberación de la presión que genera la consecuente erupción con el arrastre del material fragmentado. Este material, en el caso freatomagmático, contiene magma fragmentado o juvenil y en el caso freático, contiene sólo material pre-existente y alterado por la acción hidrotermal.

Agradecimientos

Se agradece al Geol. Gerardo J. Soto las sugerencias, comentarios y discusiones que, de forma desinteresada, ha compartido y aportado sobre este, y anteriores informes así, como de la actividad eruptiva. De igual manera, se agradece las discusiones y numerosos intercambios de información y experiencias con el Dr. Javier Pacheco, Dra. María Martínez y el Dr. Cyril Müller del OVSICORI-UNA. Estas discusiones han propiciado un crecimiento científico importante. Sin duda alguna el aporte del Ing. Luis Fernando Brenes y Geól. Wilfredo Rojas Q. para el mantenimiento de la instrumentación, adquisición de datos y conectividad es fundamental, así como el trabajo de la Geol. María Cristina Araya en el mantenimiento de los sistemas de adquisición de la RSN. Este trabajo está soportado por los proyectos de investigación: Patrones sísmicos: una ventana a la compresión de la dinámica interna de los volcanes activos de Costa Rica (N°113-B4-082) and Geofísica y geodinámica interna del arco volcánico en Costa Rica (N° 113-B5-A00), inscritos en la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica. El mantenimiento de la red sísmica a nivel nacional de la cual las estaciones volcánicas son parte también es soportado por el proyecto Vigilancia sísmica de Costa Rica (N°113-B5-704) también de la Universidad de Costa Rica.

Sección de Sismología, Vulcanología y Exploración Geofísica de la Escuela Centroamericana de Geología,
Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, San José,
Apdo. 214-2060, teléfono 2511-4226.
E-mail: redsismologica.ecg@ucr.ac.cr.
Sitio web: http://www.rsn.ucr.ac.cr/