

---

**COMPORTAMIENTO DEL VOLCAN DE SAN MIGUEL, DURANTE 2009**  
**Demetrio Escobar, Eduardo Gutiérrez, Francisco Montalvo (15/03/010)**

**Resumen**

Durante los últimos 8 años (2002 - 2009), desde que se obstruyó el conducto central a causa del derrumbe de la planicie sur, se ha observado una serie de cambios en el comportamiento del volcán de San Miguel. De acuerdo al registro histórico reciente, los mayores niveles de actividad se han presentado en mayo de 2004, octubre de 2006, octubre de 2007, junio, julio, octubre y diciembre de 2009, principalmente cambios en la sismicidad, es decir, energía (RSAM) y microsismos.

Durante 2006, 2007 y 2009, la actividad sísmica del volcán ha sido cada vez más recurrente y energética. De hecho, lo más significativo ha sido los periódicos cambios en la energía sísmica del volcán medidos a través del tamaño de las amplitudes del temblor sísmico (Vibración del volcán). En tal sentido, la ocurrencia de periódicos microsismos relacionados con fracturamiento de rocas y numerosos microsismos asociados con dinámica de fluidos a través de grietas y conductos, son responsables de los cambios en la Línea Base Sísmica del Volcán.

## Introducción

La vigilancia realizada en el volcán de San Miguel ha sido de gran importancia para lograr avances en el conocimiento de su comportamiento. A continuación se presentan los resultados obtenidos del monitoreo realizado en 2009.

## Resultados

**Sismicidad.** La actividad sísmica del volcán de San Miguel es monitoreada con cuatro estaciones sísmicas ubicadas en sus los flancos (Figura 1).

De enero a mayo de 2009, el volcán presentó un nivel de actividad relativamente bajo. A partir del 05 de junio se observó un ligero cambio en la forma y tamaño de los sismos. Del 09 al 16 (Figuras 2, 3, y 4) se presentaron pequeños enjambres de sismos, seguidos de tremor. En los días 13,14 y 15, la amplitud del tremor superó la línea base de 50 unidades RSAM, alcanzando el día 15 un promedio máximo de energía de 100 unidades RSAM, con predominio de bandas de frecuencias entre 4 – 7 HZ (Figura 5).

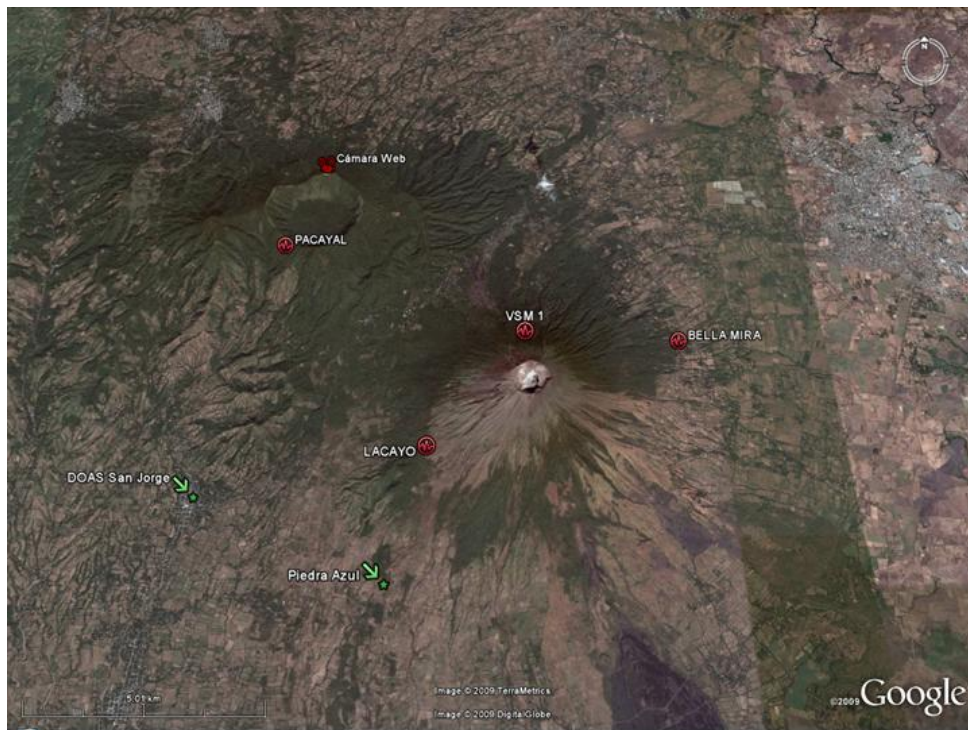


Figura 1. Ubicación de estaciones para el monitoreo del volcán de San Miguel: PACAYAL, VSM1, BELLA MIRA Y LACAYO son las estaciones sísmicas. DOAS San Jorge y Piedra azul, son estaciones para monitoreo de gases. La Cámara Web instalada al norte en el volcán Pacayal se usa para observaciones visuales en tiempo real.

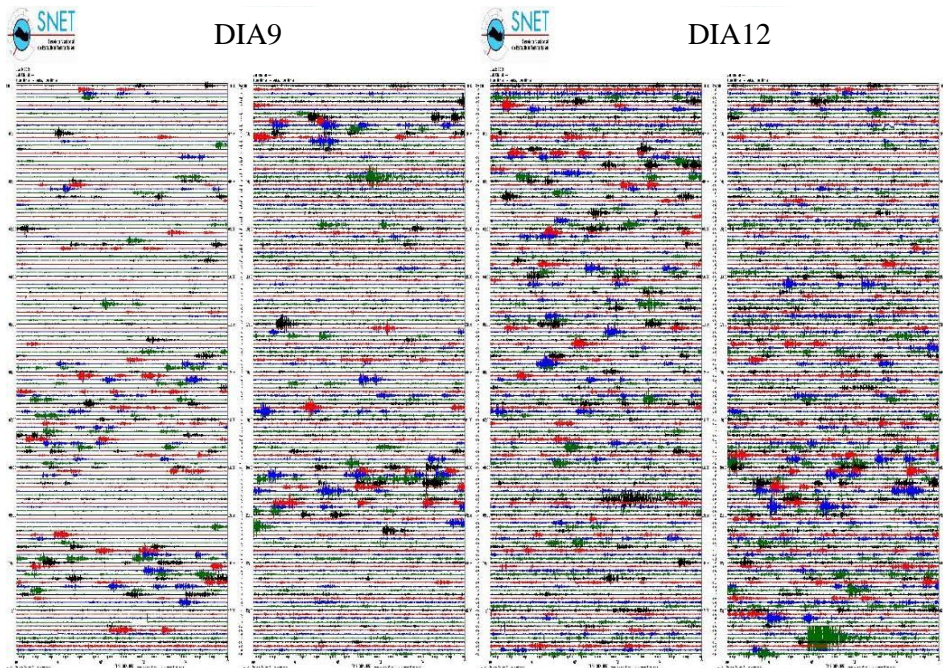


Figura 2. Sismogramas con 12 horas de registro. Se observa un aumento gradual de enjambres de microsismos volcánicos día 09 v 12 de junio 2009.

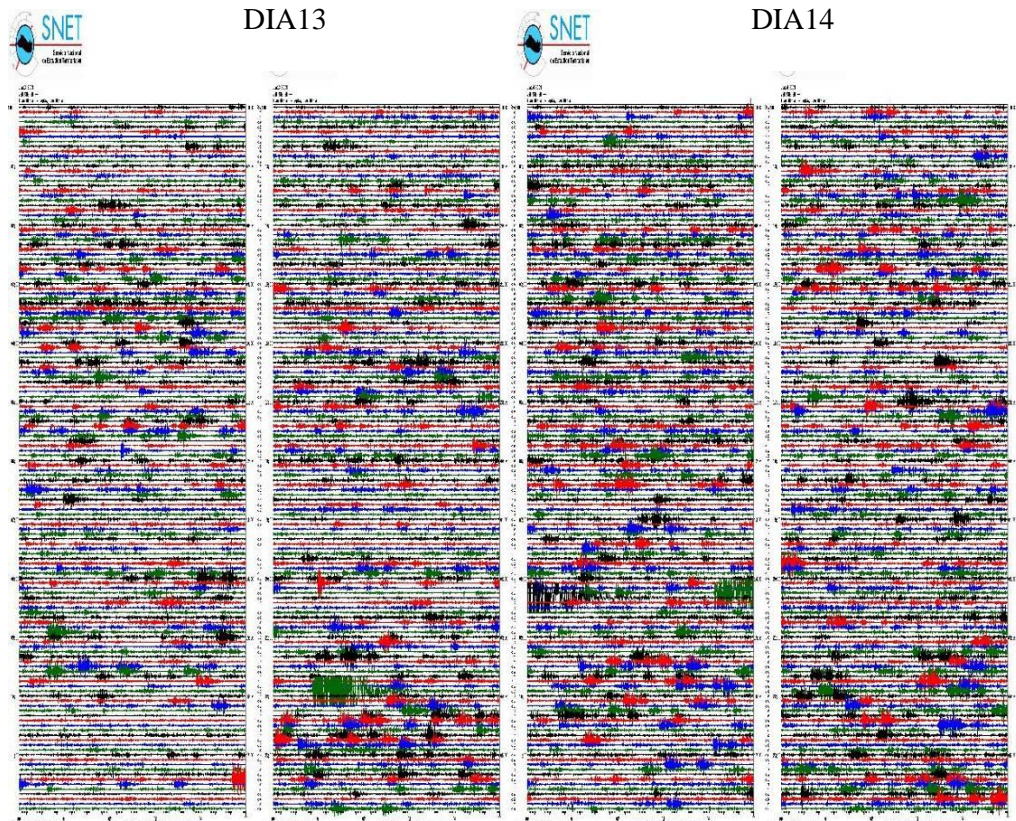


Figura 3. Sismogramas con registro a cada 12 horas de los días 13 y 14 de junio, persiste el registro de enjambres de pequeños sismos.

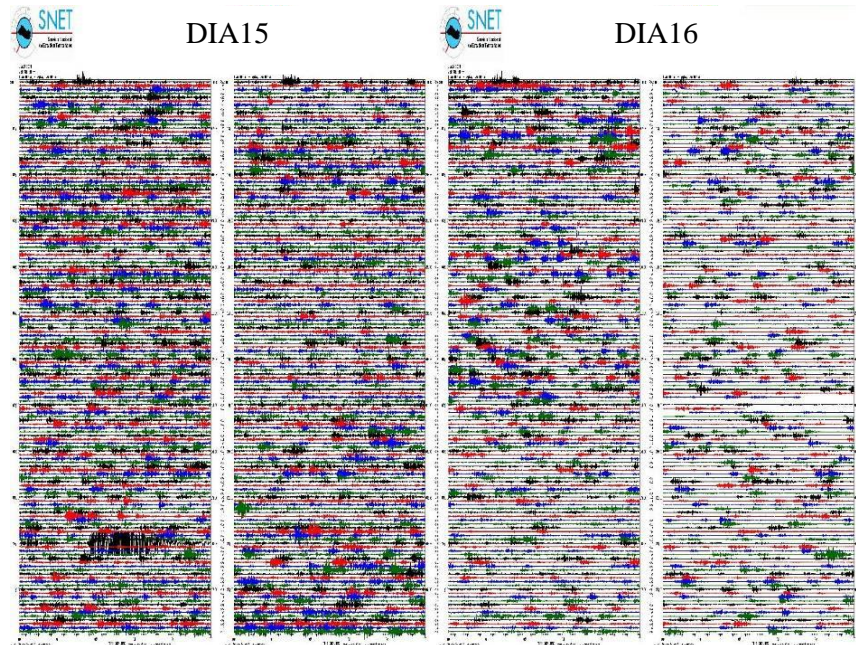


Figura 4. Sismogramas con un significativo aumento en el número de microsismos el día 15 y 16 de junio.

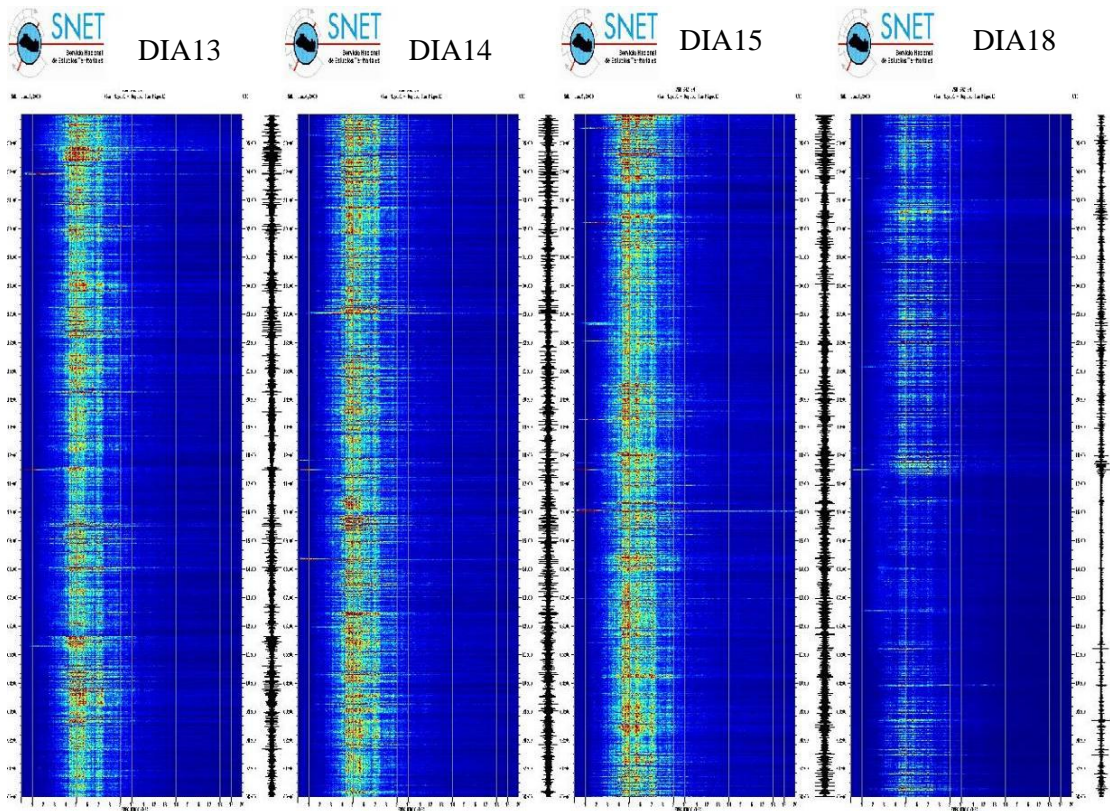


Figura 5. Espectrogramas de los días 13,14, 15 de junio. Durante los días de mayor sismicidad aparecen bandas intensas con frecuencias entre 4 y 7 Hz, para el día 18, la actividad retorna a la normalidad

A partir del día 17 de junio, desaparece el tremor y se observa la ocurrencia de esporádicos sismos discretos. Vinculado a ello, la energía interna del volcán gradualmente se redujo a niveles normales. El día 20 se observó aumento en número y tamaño de sismos discretos, con incremento en la energía volcánica. Los días 21 y 22 aparecieron enjambres de sismos seguidos de tremor y con ello la amplitud sísmica alcanzó un máximo de 137 unidades RSAM. Para el día 23 durante las primeras 12 horas persiste el enjambre de sismos y desaparece el tremor. Posteriormente se observó un descenso de la actividad. A raíz de ello, la energía volcánica se redujo a la mitad, mostrando de nuevo clara tendencia a la baja. (Figuras 6,7, 8).

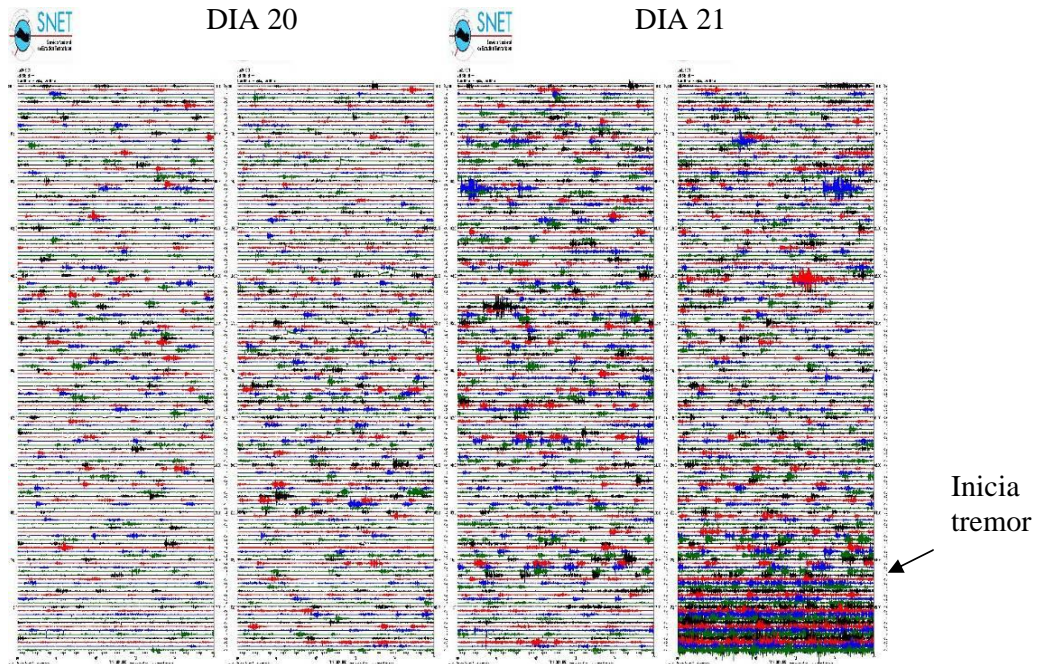


Figura 6. Sismogramas con registro de cada 12 horas de los días 20 y 21 de junio. Aparecen enjambres de microsismos, que cada vez aumentan en número. Durante las últimas horas del día 21 (Flecha), inicia tremor volcánico (Vibración), a raíz del cual se incrementa la energía del volcán.

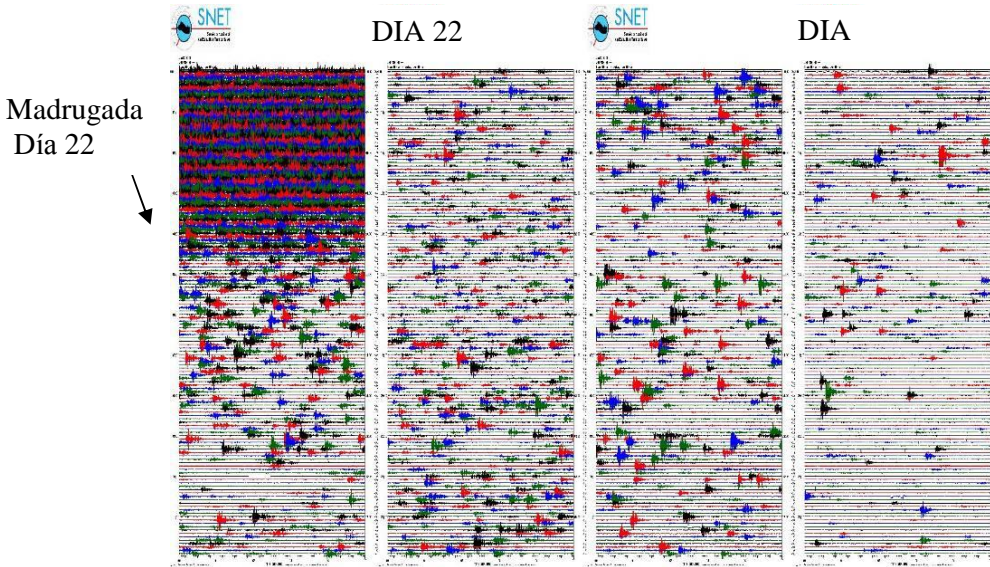


Figura 7. De acuerdo a los sismogramas de los 21 y 22, después del periodo de tremor iniciado la noche del día 21 y finalizando en la madrugada del día 22 (aproximadamente durante 6.5 horas), ocurre que a partir de las 05 AM del día 22, inicia la ocurrencia de enjambres de pequeños sismos, lo cual durante la tarde y noche del día 23 paulatinamente tiende a disminuir.

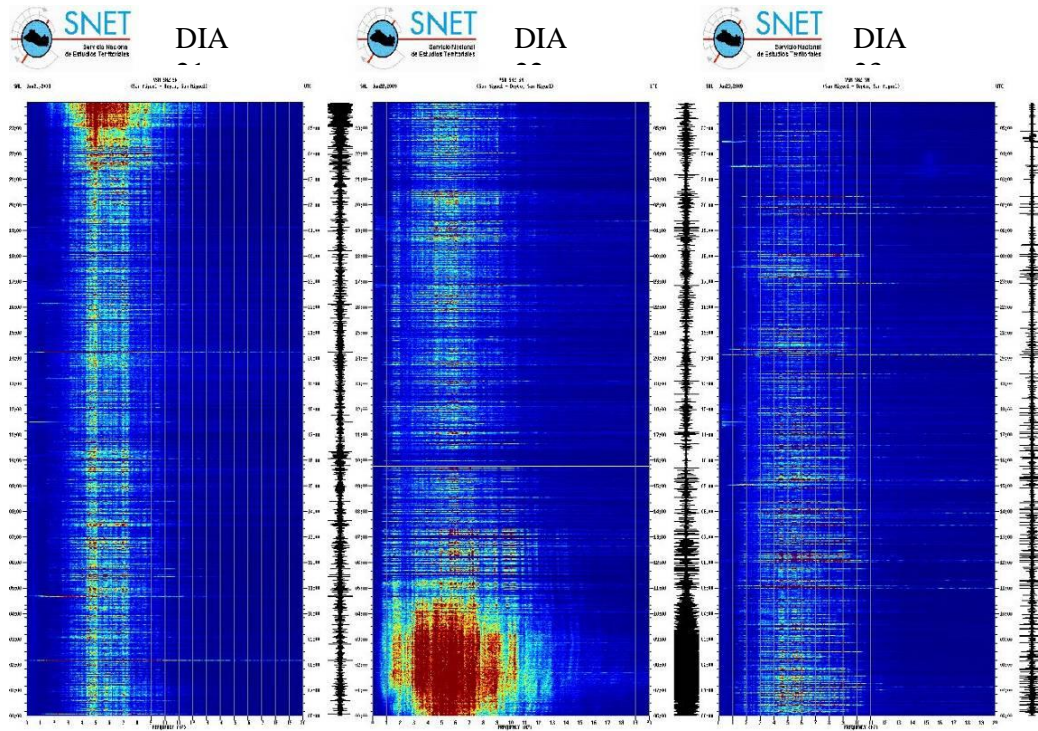


Figura 8. Espectrogramas de los días 21, 22 y 23. El registro intenso al final del día 21(Parte superior) y madrugada día 22 (Parte inferior), corresponde al período de tremor con mayor energía volcánica. Las bandas intensas corresponden a frecuencias entre 1 y 12, Hz, predominando bandas entre 4 y 7 Hz. Durante la tarde y noche del día 23 la actividad del volcán se redujo significativamente.

Desde la noche del día 23 hasta el día 03 de julio, el volcán mostró niveles normales de sismicidad. Sin embargo, partir de los días 03, 04 y 05, se observó un nuevo incremento. Del 06 al 18 de julio, las estaciones sísmicas del volcán registraron una intensa vibración, conocida como tremor sísmico proveniente de la zona alta del flanco norte del cono volcánico (área de la estación sísmica VSM). La energía sísmica del volcán, se incrementó rápidamente, alcanzando el día 06 un máximo de 660 unidades RSAM, superando en gran medida los niveles normales que básicamente fluctúan entre 15 y 50 Unidades. A pesar de que el día 07 la energía sísmica se redujo a la mitad, todavía hasta el 09 la energía interna del volcán fue considerada crítica. A partir del día 10 se observó reducción en las amplitudes del tremor, es decir, tendencia a disminuir. Para el día 18 la sismicidad del volcán se había normalizado (Figura 9, 10, 11, 12, 13, 14). Las frecuencias asociadas con el tremor volcánico de la presente crisis se presentan en los espectrogramas (Figuras, 15, 16).

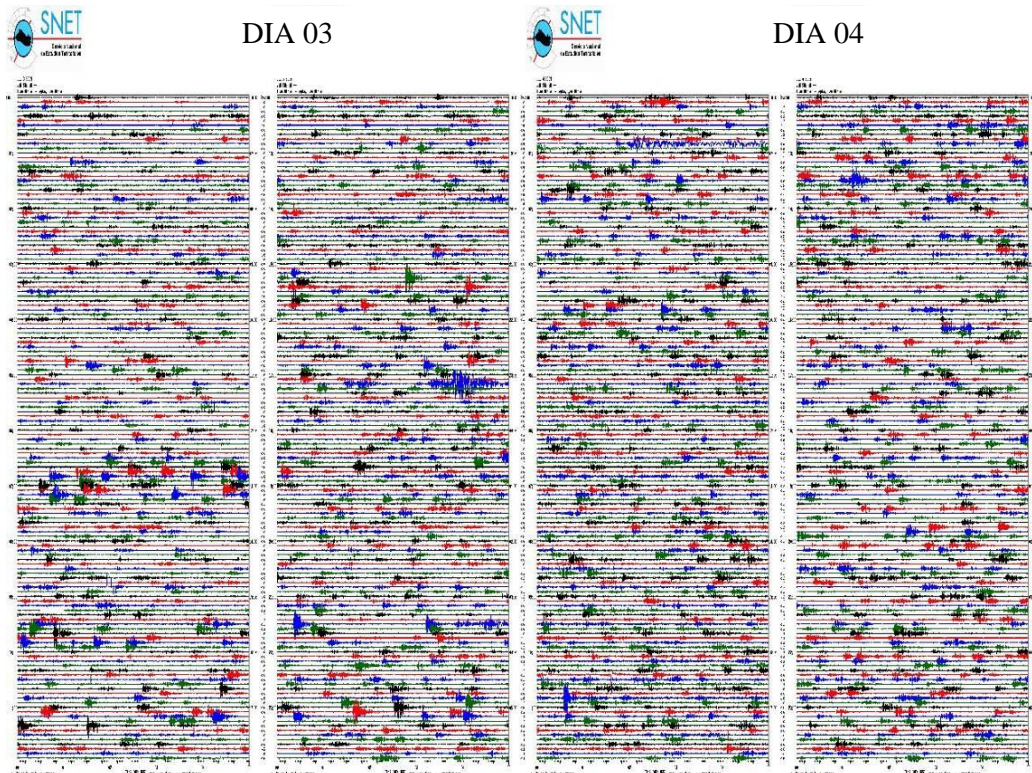


Figura 9. Sismogramas de los días 03 y 04 de Julio. Se observan numerosos enjambres de microsismos.

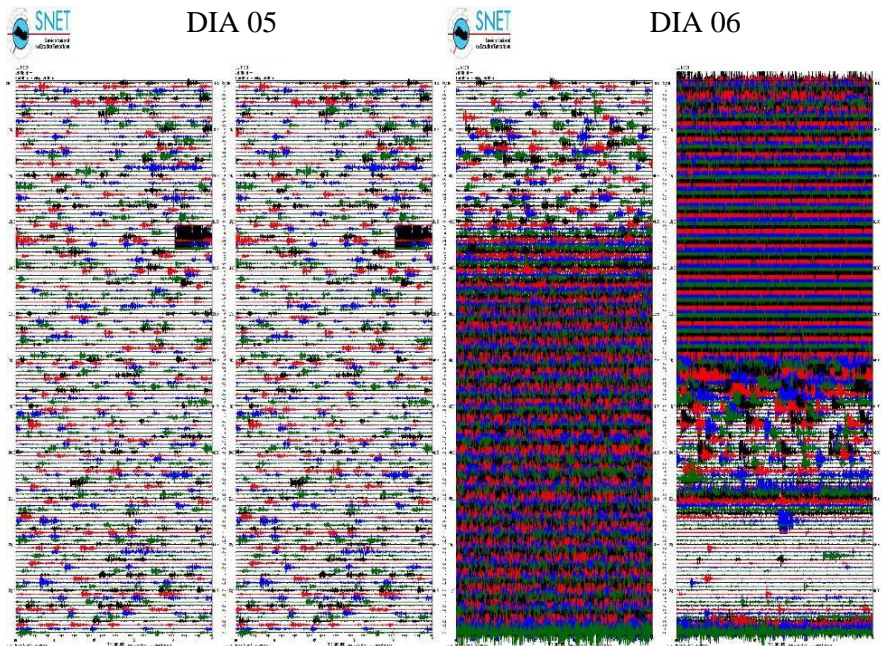


Figura 10. Sismogramas de los días 05 y 06 de Julio. Aparecen enjambres de microsismos cada vez más numerosos y energéticos, culminando en una continua vibración del volcán (tremor). Las primeras 3 horas del día 06 incrementaron los microsismos y luego inició tremor. Después de 15 horas de tremor, durante la tarde del día 06, reaparece de nuevo un periodo de dos horas de enjambres sísmicos. Luego reaparece un periodo corto de tremor, con tendencia a disminuir. Sin embargo, el tremor continúa con mayor energía.

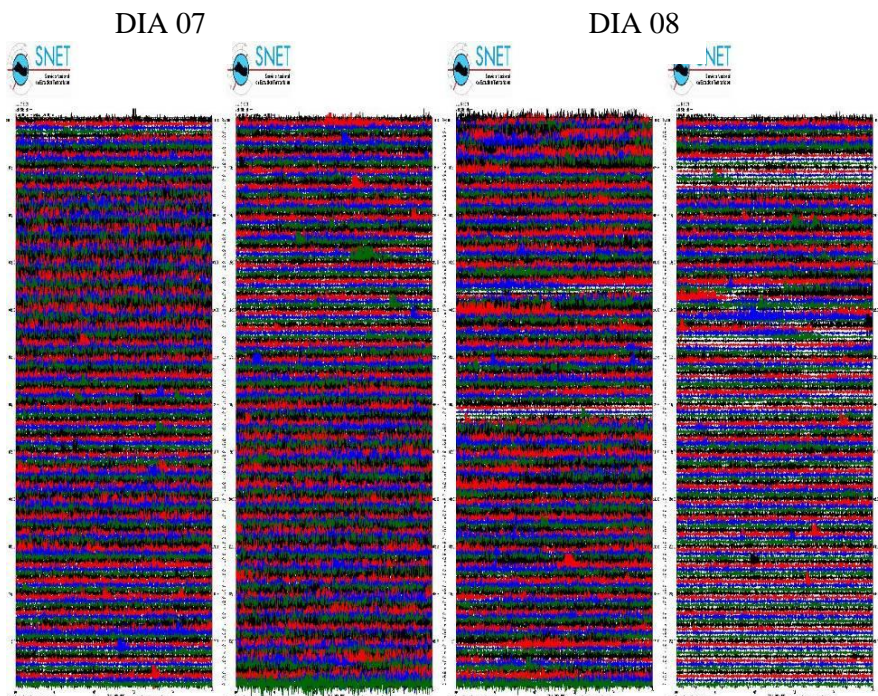


Figura 11. Sismogramas de los días 07 y 08 de Julio. Persistente la vibración del volcán (Tremor). La tarde y noche del día 08 aparecen pequeñas bandas con cierta disminución del tremor.

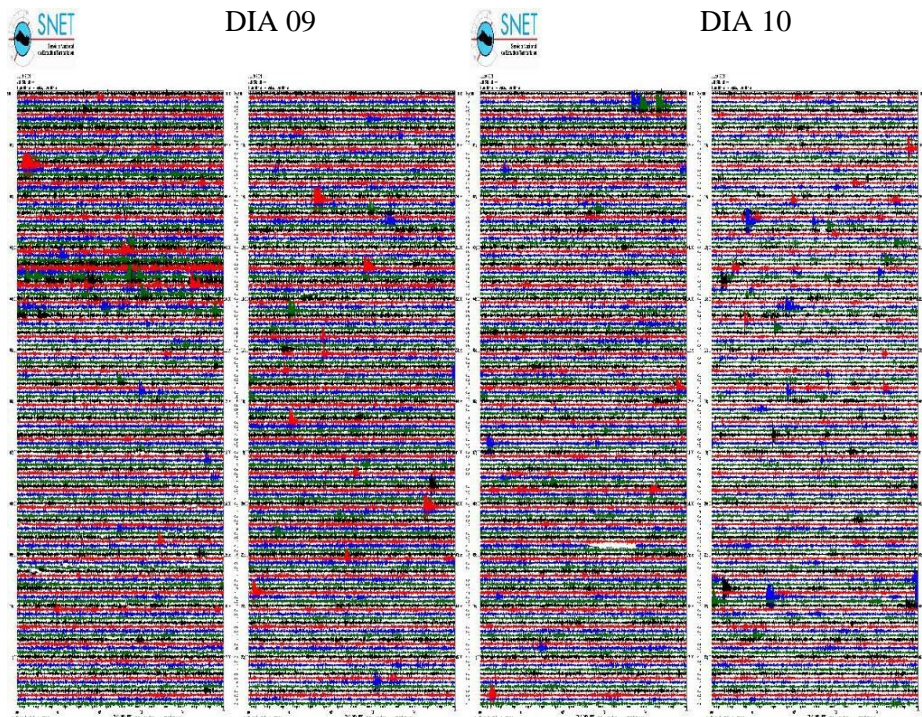


Figura 12. Sismogramas de los días 09 y 10 de Julio. Persiste la vibración del volcán (tremor), aunque con menor amplitud, lo cual permite observar esporádicos microsismos impulsivos, propios de fracturamiento de la estructura.

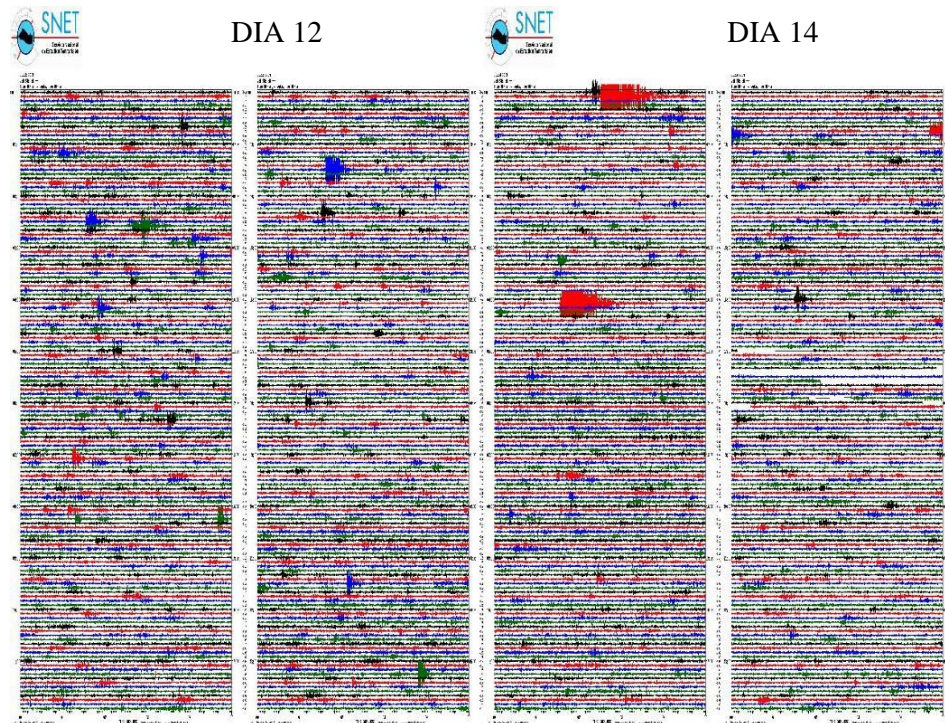


Figura 13. Sismogramas de los días 12 y 14 de Julio. El tremor muestra tendencia a disminuir, lo cual permite observar la ocurrencia de esporádicos sismos de mayor tamaño (color azul y verde). Los sismos color rojo son de subducción.

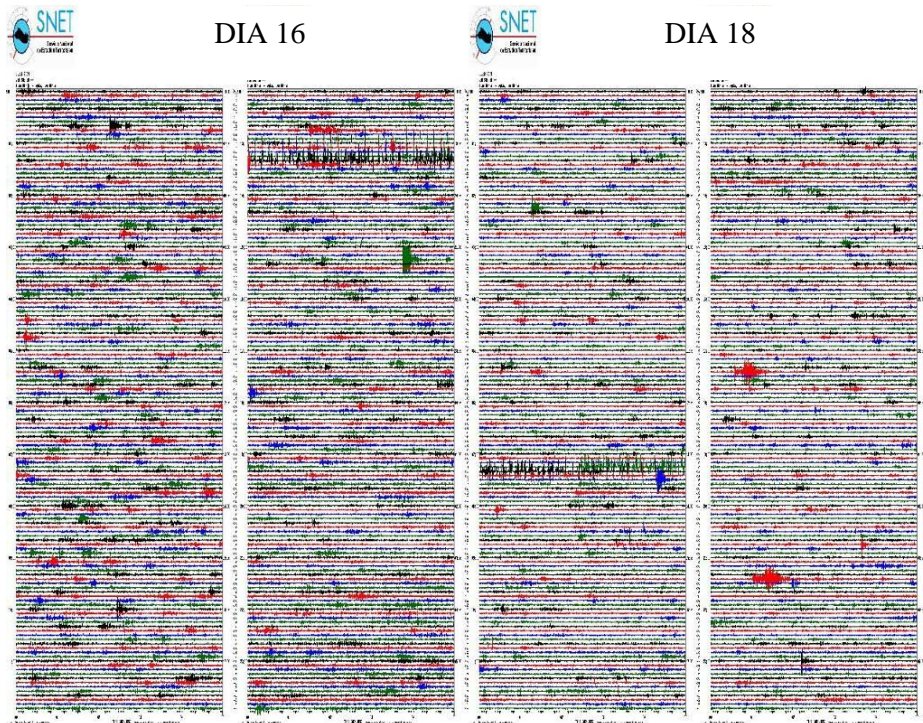


Figura 14. Sismogramas de los días 16 y 18 de Julio. Se observa una clara disminución de la actividad sísmica con tendencia a la normalidad.

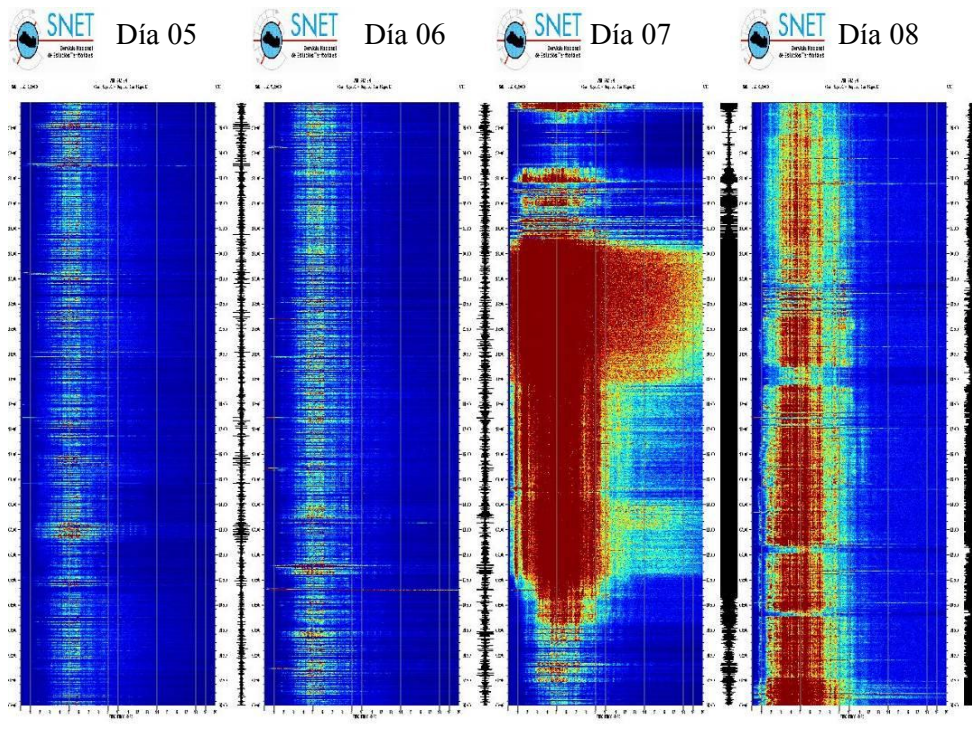


Figura 15. Espectrogramas con bandas de frecuencias dominantes. Las bandas color café de 1 - 9 HZ representan las frecuencias del temblor, predominando bandas entre 4 -7 HZ. Se trata de los días más intensos de la crisis.

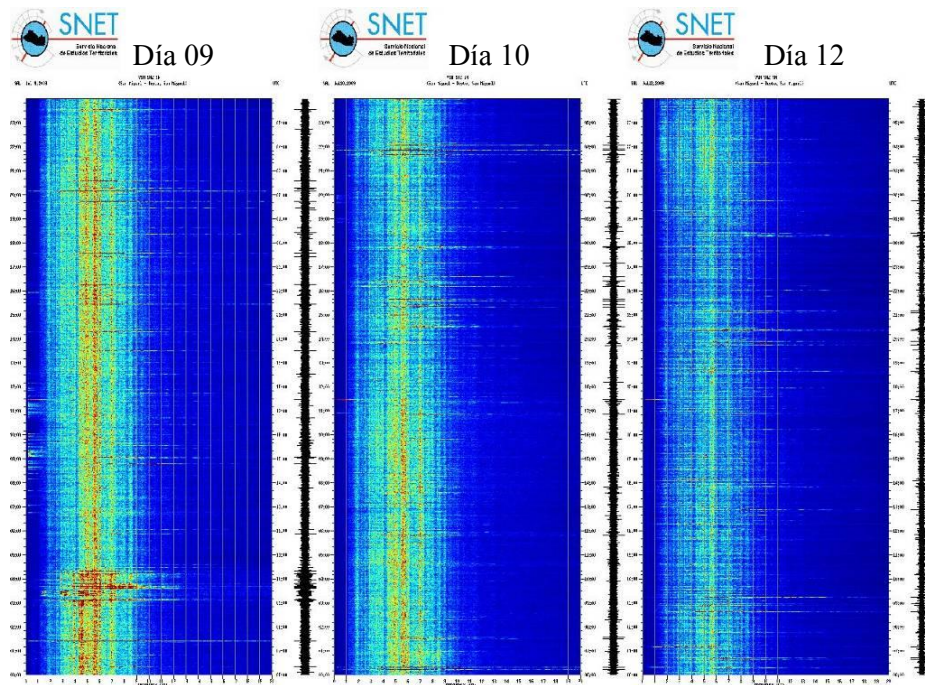


Figura 16. Espectrogramas con bandas de frecuencias entre 2 y 9 HZ, predominando bandas de 5 -7 HZ, mostrando tendencia a la baja.

Después de esta crisis que finaliza el 17 de julio, se observa que a partir del 18 de julio hasta el 12 de octubre (~ 3 meses), la energía sísmica del volcán regresa a su línea base RSAM menor a 50 unidades. Durante agosto y septiembre ocurre una disminución en la ocurrencia de sismos de fractura (VT) para incrementar de nuevo en los meses de octubre y noviembre (Fig. 18 y 19) y regresar a lo normal en diciembre.

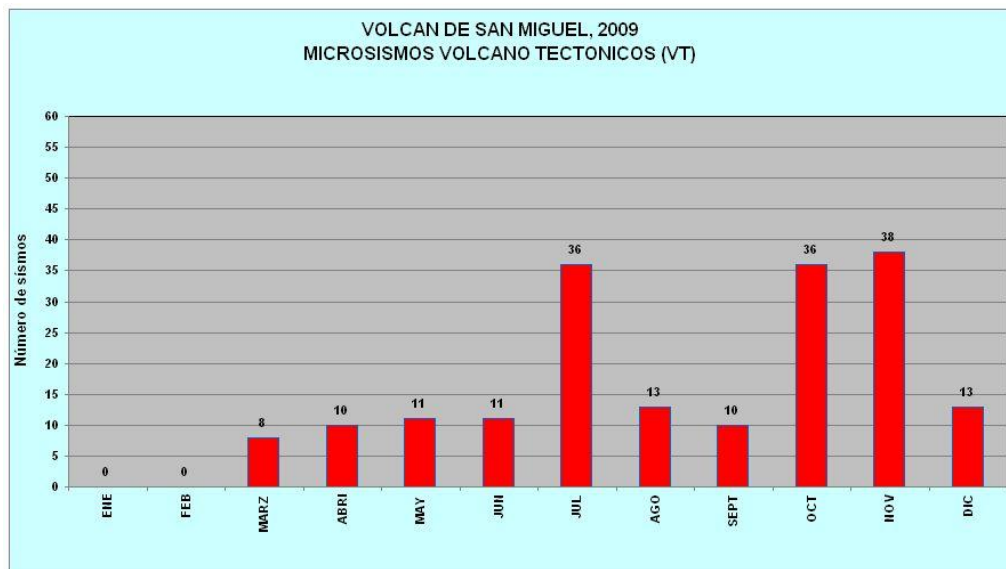


Figura 18. Sismos asociados a fracturamiento de rocas en el cono volcánico, con fase impulsiva y con frecuencias entre 4.5 a 7 Hz. Nótese que los meses de julio, octubre y noviembre son los de mayor número de este tipo de sismos (VT).

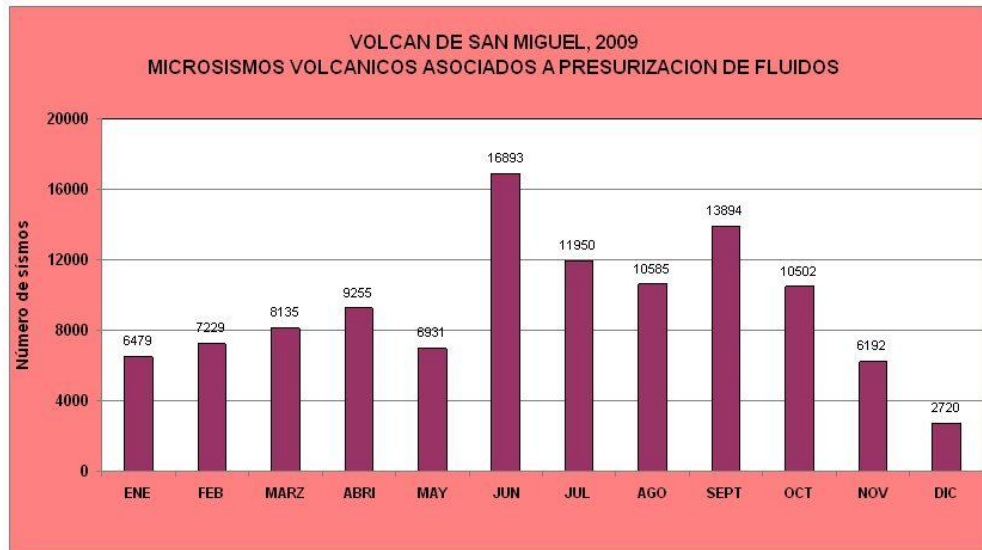


Figura 19. Sismos asociados con dinámica de fluidos a través de grietas y fracturas del volcán (Sismos volcánicos). Junio y septiembre son los meses con mayor número de este tipo de sismos (predominan frecuencias entre 4 y 7 HZ).

Luego de una aparente tranquilidad volcánica observada durante agosto y septiembre; en la segunda semana de octubre, la energía del volcán volvió a presentar cambios. Durante los días 14, 15 y 16, las amplitudes sísmicas RSAM superaron la línea base de 50 cuentas, alcanzando un máximo de 70 unidades en su promedio día. En adición a ello se incrementó significativamente el número de microsismos relacionados con fracturamiento de rocas (Figura 20, 21, 22 y 23). Vinculado a la apertura de grietas, a partir de octubre la especie cloruro de las aguas de la laguna El Jocotal regresó gradualmente a su nivel normal de 47 ppm, ya que desde enero se había reducido a 25 ppm (Gráfica 1). Al finalizar octubre la actividad del volcán retornó a la normalidad. En noviembre la energía volcánica RSAM y el número de microsismos volcánicos asociados a movimientos de fluidos se redujeron (Figura 24), pero continuó alto el número de eventos relacionados con fractura de rocas (Figura 25 y 26).

Durante diciembre, la ocurrencia de sismos discretos, ya sea los asociados a dinámica de fluidos o fractura de rocas (VT) se redujo significativamente. A pesar de ello, la energía del volcán en términos de RSAM experimentó otro incremento al superar la línea base alcanzando un máximo de 125 unidades en su promedio día. En 2009, se registró un total de 110,764 microsismos volcánicos, es decir un 16 % menos que los registrados en 2008. También se registro un total de 187 sismos VT, de los cuales 115 fueron localizados en la zona del cono volcánico con magnitudes entre 0.6 y 2.6 (Figura 27). Lo que implica un fracturamiento de rocas del 58% más que los registrados en 2008. Durante las inspecciones de campo, no se observaron cambios en otros parámetros como ruido a turbina de avión jet, temperatura de fumarolas, etc. Los elementos químicos de las aguas de la laguna el Jocotal no experimentaron cambios. Otros parámetros como pH, temperatura, relación Sulfato/Cloruros, y emisión de dióxido de azufre se mantuvieron dentro de su línea base. En la gráfica 2, se presenta la energía sísmica del volcán en RSAM. La gráfica 3, presenta la relación sulfato/cloruros, la gráfica 4 presenta la temperatura, la gráfica 5 el pH del agua de la laguna El Jocotal y la gráfica 6 presenta la relación RSAM vs SO<sub>2</sub>.

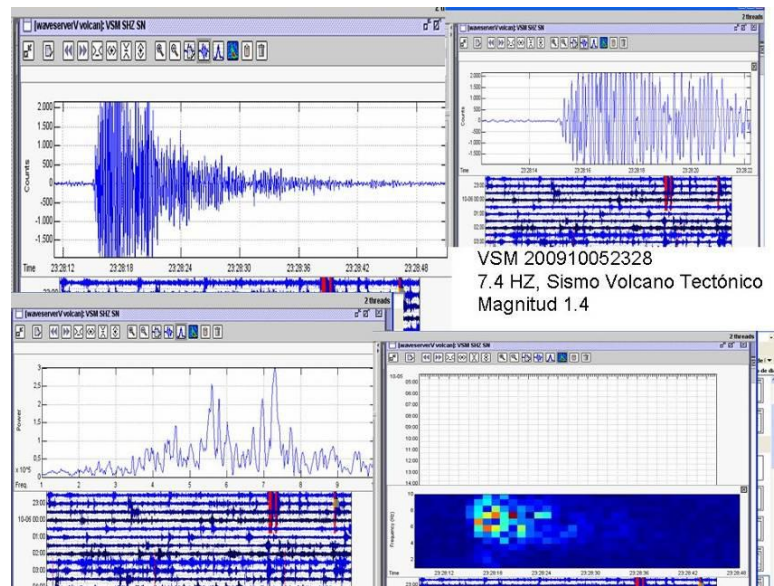


Figura 20. Sismo Volcano Tectónico (VT) del día 05 de octubre, localizado en la zona norte del cráter del volcán.

VSM200910052321  
4.3 - 7.8 HZ  
70 SEG DURACION  
1.6 MC

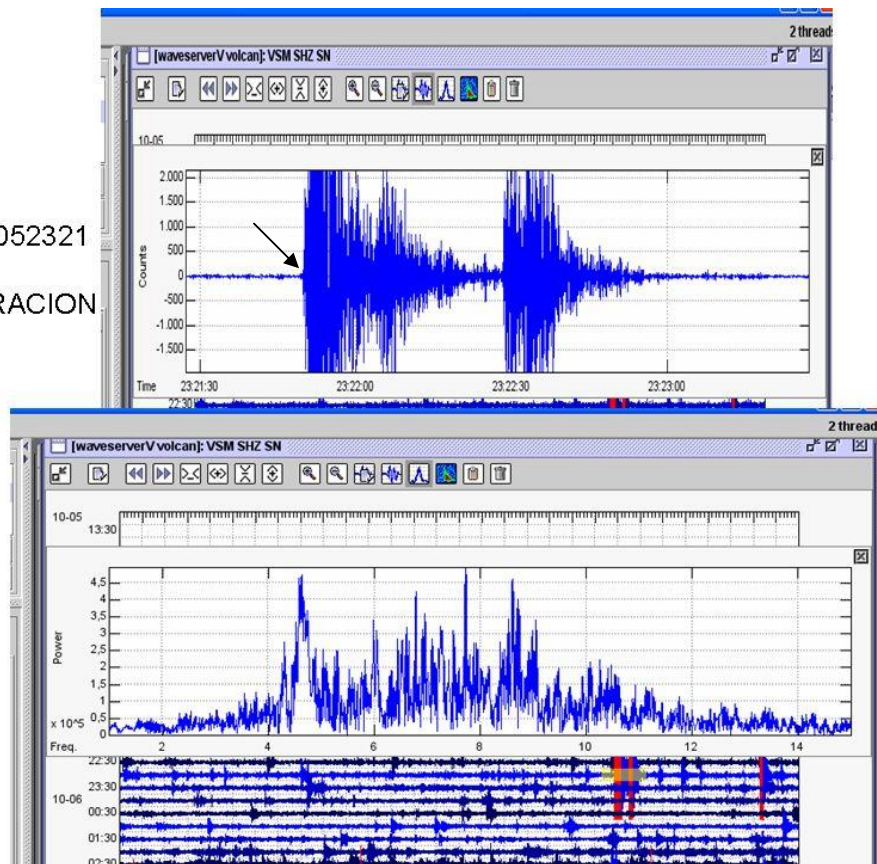


Figura 21. Sismo Volcano Tectónico (VT) del día 05 de octubre, localizado en la zona norte del cráter del volcán, después del evento principal se registraron dos réplicas.

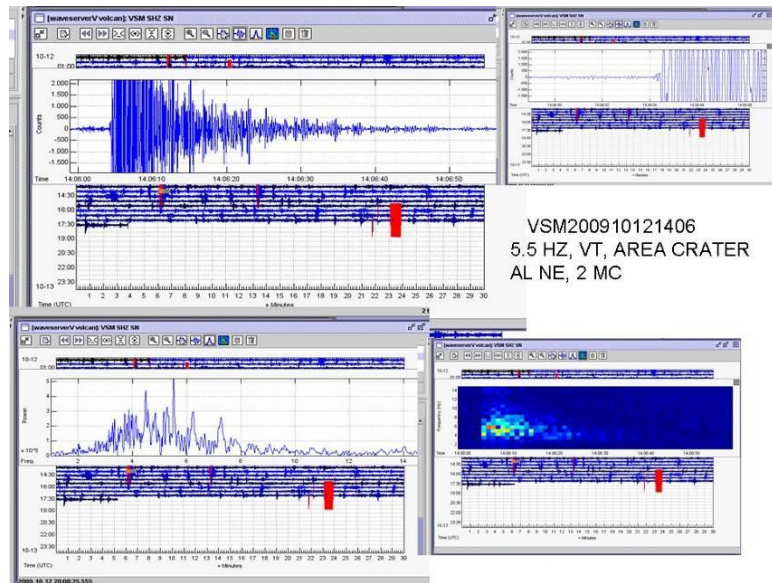


Figura 22. Sismo Volcano Tectónico (VT) del día 12 de octubre, localizado al NE del cráter del volcán.

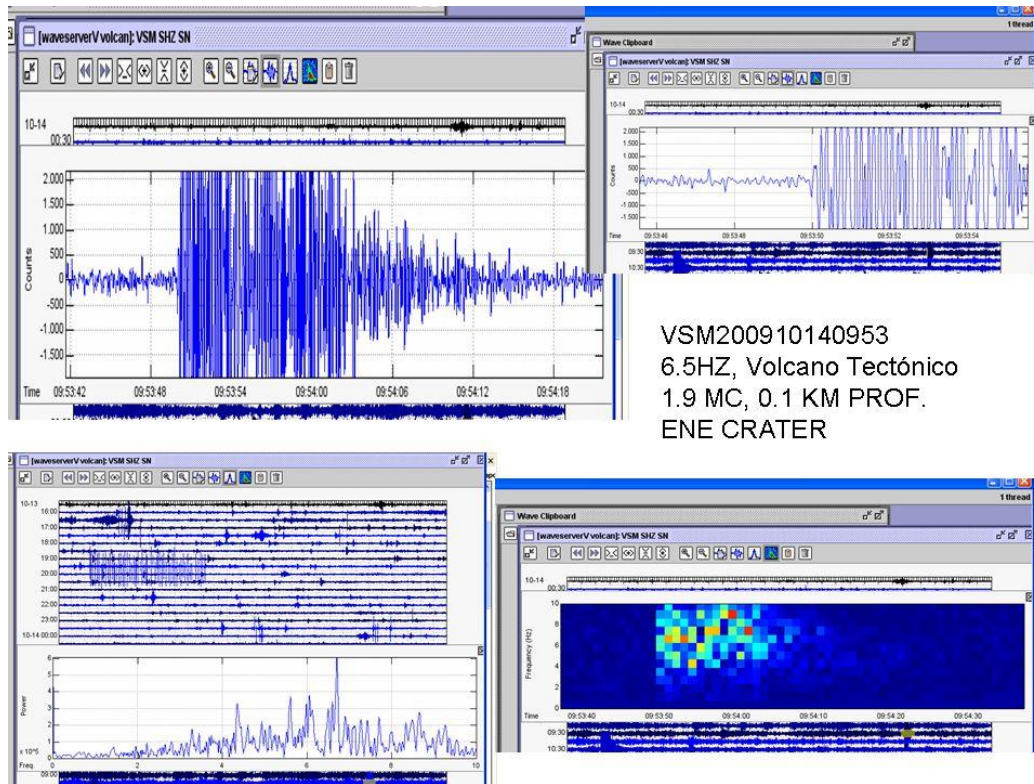


Figura 23. Sismo Volcano Tectónico (VT) del día 14 de octubre, localizado en la zona ENE del cráter del volcán.

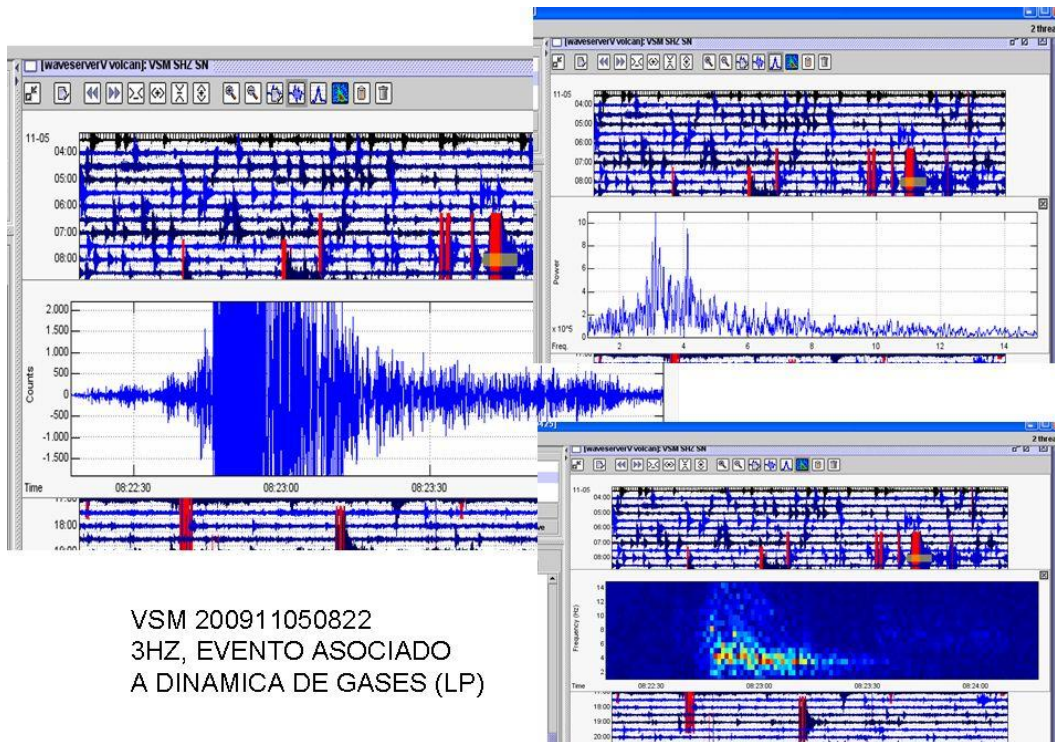


Figura 24. Sismo volcánico de período largo (LP) del día 05 de noviembre. Por su fase emergente y baja frecuencia (3 HZ) se relaciona con dinámica de gases dentro de grietas y conductos del sistema volcánico.

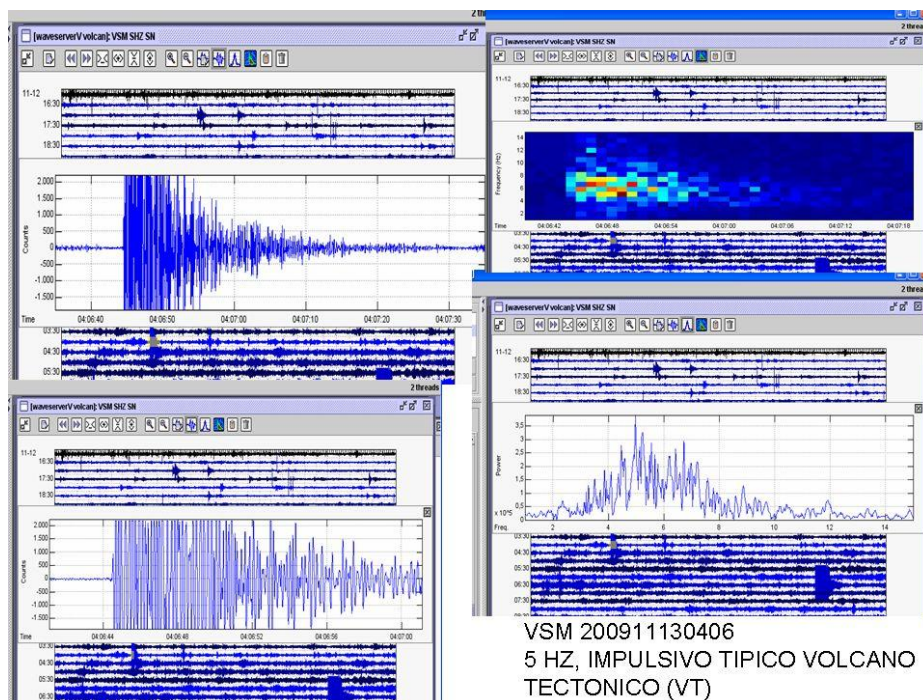


Figura 25. Sismo Volcano Tectónico (VT) del día 13 de noviembre, localizado en la zona norte del cráter del volcán.

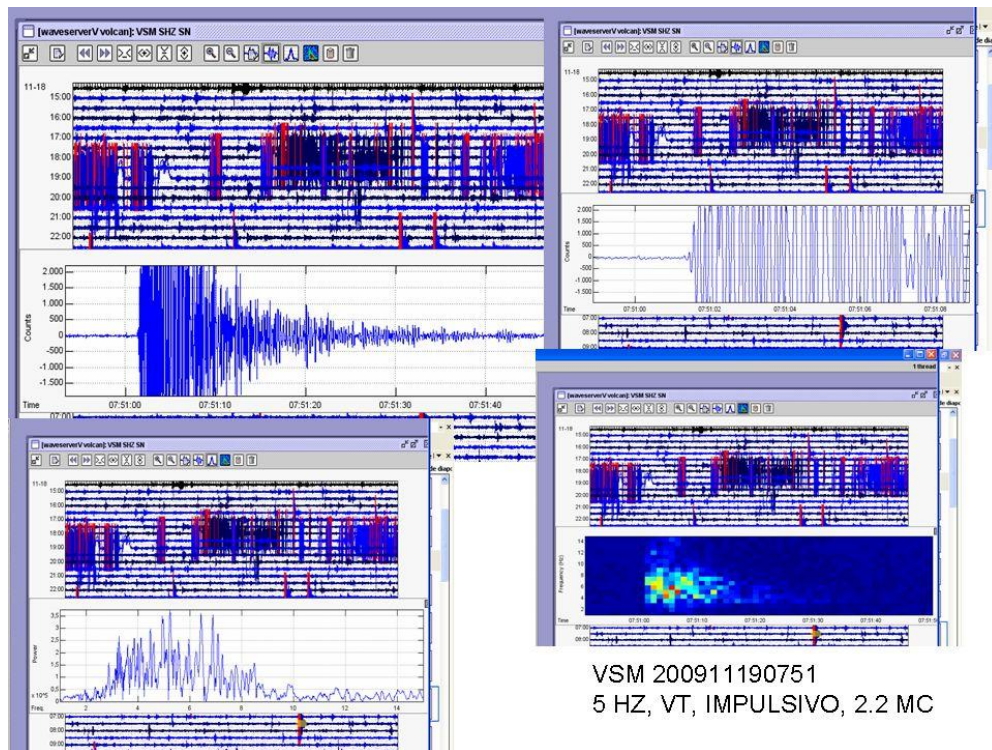
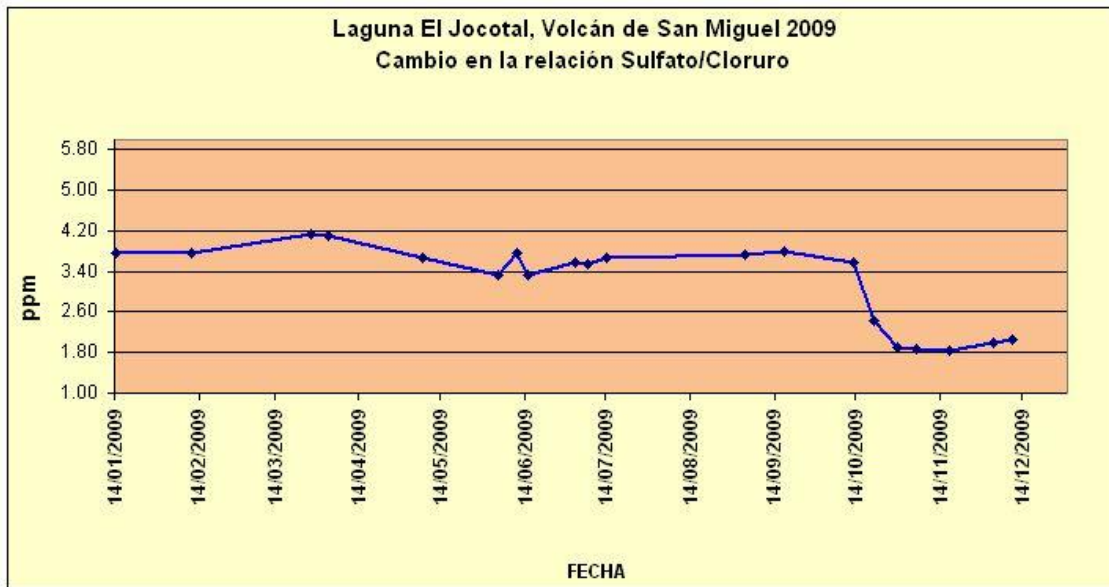


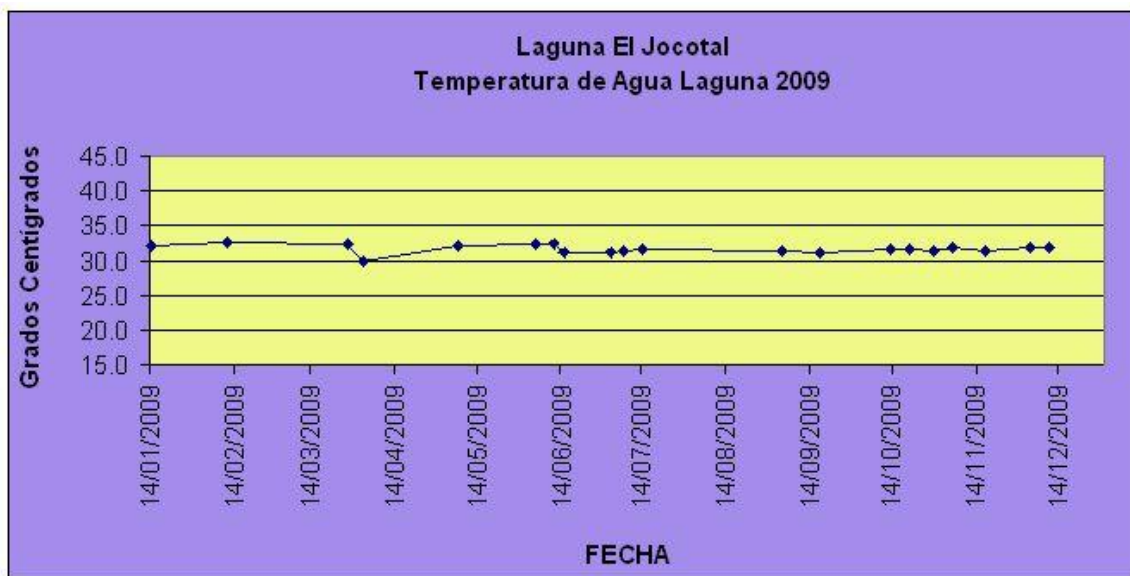
Figura 26. Sismo Volcano Tectónico (VT) del día 19 de noviembre, localizado en la zona del cráter del volcán



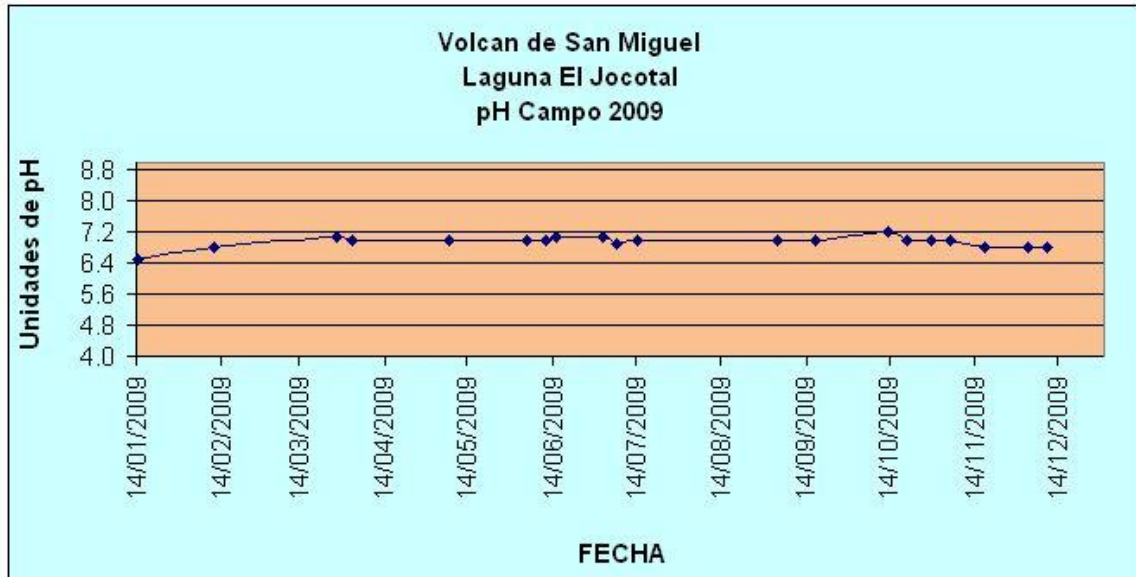
Grafica 1. Cambio en la concentración de la especie Cloruro (Cl). Después de mantenerse durante 8 meses relativamente estable en 25 PPM, se observa que a partir de octubre la especie se incrementa, alcanzando de nuevo su Línea Base de entre 45 y 48 PPM conocida desde 2007 y 2008. Lo anterior se relaciona con obstrucción y apertura de grietas y conductos.



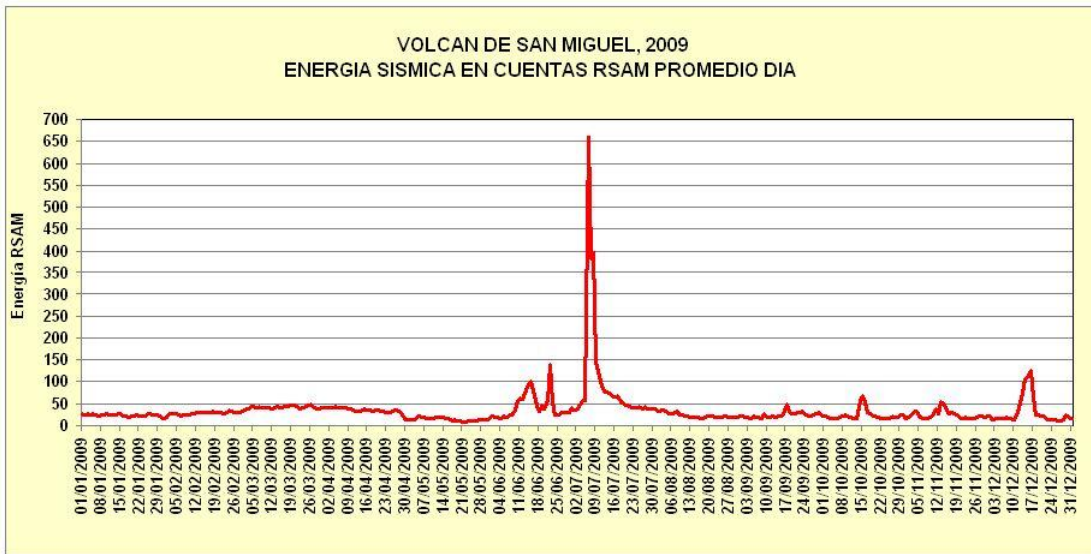
Gráfica 2. Cambio en la relación Sulfato/Cloruro. Durante los últimos tres meses del año, ante el aumento de la especie Cloruro, la relación Sulfatos vs Cloruros, retorna también a su Línea Base de 1.8 ppm obtenida durante 2007 y 2008.



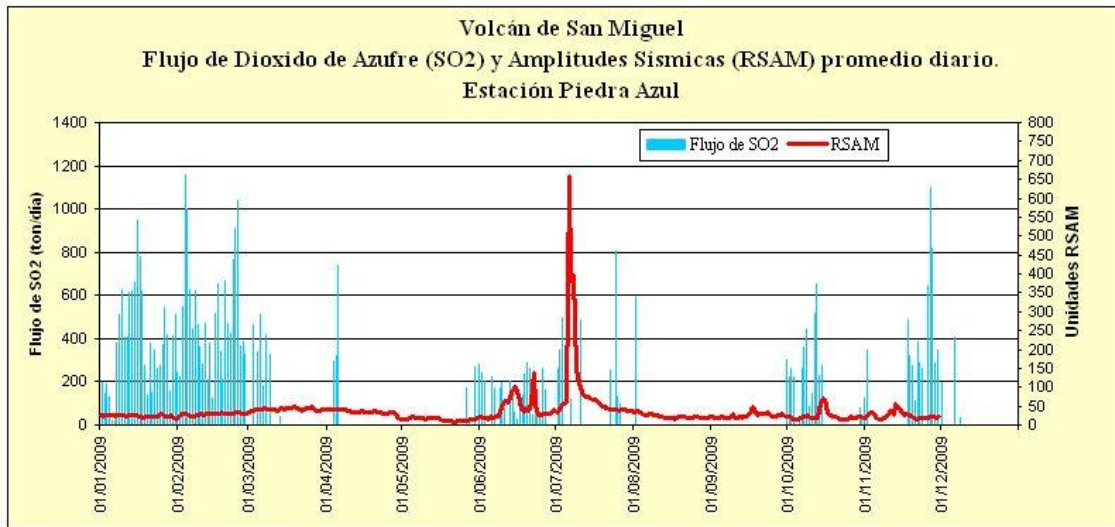
Gráfica 3. Se observa un comportamiento relativamente estable de la temperatura del agua de la laguna El Jocotal.



Grafica 4. Comportamiento de la acidez del agua de la laguna el Jocotal (pH). Básicamente fluctúa entre 6.4 y 7.2.



Grafica 5. Cambios experimentados en la energía sísmica RSAM del volcán. Los picos arriba de 50 unidades representan variaciones en la línea base. En los días 06 y 07 de julio la presión del sistema volcánico alcanzó 660 unidades RSAM. Es decir, el mayor valor del que se tiene registro.



Gráfica 6. Relación entre de las emisiones de Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) y la Energía Sísmica en RSAM durante 2009. De acuerdo a la gráfica, cuando los valores de RSAM son inferiores a 100 unidades, se presentan picos en las emisiones de dióxido de azufre. El pico en RSAM correspondiente a los días 06,07, 08, 09 y 10 de julio, ocurre después de cuatro meses del descenso en la emisión de gases. Los picos en las emisiones de gases registrados al final del año ocurren después de 5 meses de la caída del RSAM.

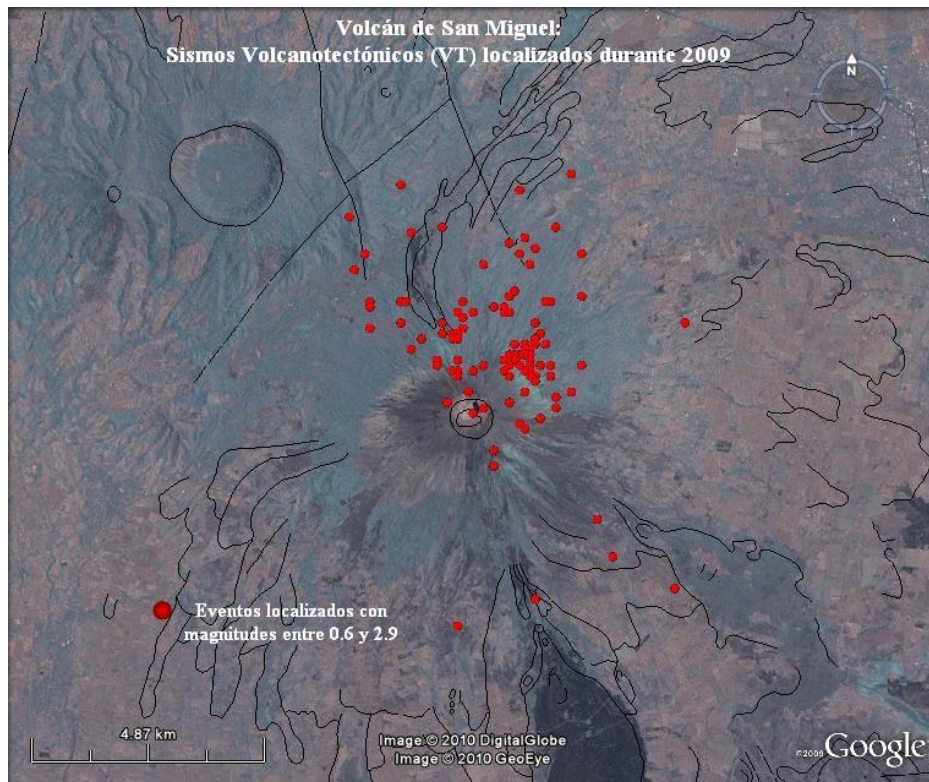


Figura 27. Zona epicentral de microsismos asociados con fracturamiento de medios sólidos. La magnitud de ellos fluctúa entre 0.6 y 2.6 con profundidades menores a 1 Km. ninguno de los eventos fue reportado como sentido por la población cercana al volcán. Se observa que la mayor concentración de sismos ocurre en el flanco norte y área NE del cráter. Nótese que pocos eventos se localizaron al sur. La figura presenta líneas de fallas y trazos de flujos de lava laterales a lo largo de los cuatro flancos. Al noroeste aparece la caldera del volcán Pacayal en Chinameca.

## **Discusión.**

Durante los meses de enero a mayo de 2009, los parámetros sísmicos, térmico e hidrogeoquímicos del volcán se mantuvieron en sus rangos normales de actividad. Sin embargo, los datos de gases de dióxido de azufre presentaron un mayor valor durante los primeros tres meses del año, pero no se observaron cambios en la zona cratérica.

A partir del 09 de junio la sismicidad del volcán experimentó cambios. Se incrementó significativamente el número de sismos relacionados con procesos de dinámica de gases del volcán (Sismos volcánicos). Pero, el número de microsismos relacionados con fractura de rocas (VT) se mantuvo similar a meses anteriores.

El incremento de sismos volcánicos fue señal de cambio en la presión dentro del sistema volcánico, ya que se generó temblor, cuya amplitud sísmica RSAM superó en dos ocasiones la Línea Base conocida de 50 unidades, alcanzando valores entre 100 y 140 cuentas en promedio día. Al finalizar junio, gradualmente la sismicidad del volcán mostró tendencia a la normalidad.

Durante los primeros días de Julio se observó de nuevo un incremento paulatino en el número de sismos, incluyendo volcánicos y volcanotectónicos, produciendo un aumento gradual en la actividad sísmica del volcán. El día 05 de julio, la energía volcánica alcanzó 58 unidades RSAM, pero súbitamente el día 06, después de tres horas de un pequeño enjambre sísmico, pasó de 58 a un valor de 660 unidades, el mayor nivel de energía registrado durante los últimos siete años.

Vinculado a ello, los sismos asociados a fracturamiento de rocas se incrementó de 11 a 36 eventos, y los eventos volcánicos asociados a dinámica de gases se redujeron de 16,893 a 11,950 sismos, respecto al mes de junio. Lo anterior permite plantear la hipótesis de que probablemente la crisis sísmica del volcán tuvo su origen a partir de la generación de vapor de agua y acumulación de presión, causando rompimiento del medio sólido y consiguiente despresurización del sistema.

Importante es mencionar que a partir del 18 de julio y durante agosto y septiembre, hasta el 12 de octubre (~ 3 meses), la energía sísmica del volcán regresa a su línea base RSAM menor a 50 unidades. La ocurrencia de sismos de fractura retorna a valores registrados en los meses de marzo a junio, es decir, entre 8 -11 eventos. Aunque el número de sismos volcánicos se mantuvo relativamente alto, estaba dentro de lo normal. Indicando generación de vapor dentro del sistema. Razón por lo que durante octubre y noviembre se incrementó de nuevo la energía sísmica RSAM del volcán, sin llegar a alcanzar las 100 unidades. También se incrementó de nuevo el número de sismos VT, y con ello, se redujo el número de eventos volcánicos asociados con dinámica de fluidos. Del 19 de noviembre al 12 de diciembre, se observa que la actividad sísmica del volcán retorna gradualmente a la normalidad. Sin embargo del 13 al 17 de diciembre se presenta otro aumento en la energía volcánica, lo cual alcanza el día 14, un máximo de 125 unidades RSAM. Después de todo lo anterior, de acuerdo a las gráficas de datos, al finalizar diciembre la actividad sísmica del volcán alcanza valores relativamente bajos.

Al comparar la sismicidad del volcán en 2009 con la de 2008, resulta que en lo relativo a eventos VT, 2009 supera a 2008 en un 58 %, y en lo relativo a sismos volcánicos 2008, supera a 2009 en un 16 %. Los niveles de energía RSAM del año 2009, superan en gran medida a los de los años anteriores. Es importante mencionar que la mayoría de los eventos de fractura poseen frecuencias altas, es decir, entre 4.3 y 7.8 HZ.

Los epicentros de los sismos registrados en tres o cuatro estaciones, en su mayoría se localizaron en el flanco norte y sur del volcán, pero también al noreste del cráter, con magnitudes pequeñas entre 0.6 y 2.6, razón por lo que no fueron reportados sentidos por la población. Relativo a los eventos volcánicos la mayoría son de alta frecuencia (5 – 7 HZ), con fases difíciles de identificar y emergentes, razón por lo que son asociados a burbujeo por vaporización de agua, algunos pocos son de Periodo Largo (LP) y presentan frecuencias de 3 HZ.

Por otro lado, y en lo relativo al monitoreo de aguas se tiene que los valores de pH y temperatura del agua de la laguna El Jocotal se mantuvieron estables durante todo 2009. Sin embargo, a partir de octubre, hasta diciembre la especie Cloruro regresa a su línea base conocida desde 2007. El descenso en Cloruros observado desde enero a septiembre de 2009 probablemente haya ocurrido por obstrucción de grietas y conductos. Con el paso del tiempo y por la presión de gas o vapor se abren las mismas u otras estructuras para dar paso de nuevo al aumento de la especie.

## **Conclusión**

Integrando lo anterior, e incluyendo ideas de las observaciones visuales hechas pernotando en la zona del cráter, se concluye que el sistema volcánico Volcán de San Miguel a menudo experimenta cambios en su estructura interna, reflejados en presurización y despresurización relacionados ya sea con presión de vapor generado cuando agua meteórica subterránea entra en contacto con la roca caliente y por el otro lado, pequeñas inyecciones de magma que inducen inflaciones y deflaciones, que en forma de diques presionan los flanco del volcán, presurizando y despresurizando el sistema. Sin embargo, hasta el momento no se ha observado un cambio que indique inyección de magma en la zona del cráter. Parece ser que las evidencias anteriores más bien apuntan a un almacenamiento gradual de magma ubicado someramente en el flanco norte, cerca del área de la estación sísmica ubicada en la parte alta del volcán.

Habla en favor de ello, los recurrentes periodos de tremor después de periodos de niveles bajos de sismicidad. Estos periodos de tremor siempre son precedidos por aumento en el número y tamaño de microsismos, sean estos volcánicos o volcanotectónicos, los cuales ocurren en enjambres. Su primer arribo de fase es registrado por la estación VSM ubicada en lo alto del flanco norte. De hecho, también el peso propio del volcán y la sismicidad regional deben inducir reacomodo o subsidencia de estratos o rocas y con ello, ocasionar sellamiento de conductos dentro de la estructura volcánica. Hasta el momento, la acumulación de esfuerzos y presiones internas no ha sido suficiente para superar la carga litostática, razón por lo que no se ha dado la erupción. Sin embargo, el nivel energía sísmica RSAM y la ocurrencia de numerosos eventos de fractura indica que la generación de presiones dentro del volcán con el tiempo tiende a ser mayor.

