

INFORME TÉCNICO:

MONITOREO SATELITAL DEL COMPLEJO VOLCANICO PLANCHON-PETEROA CON ASTER

Silvia Castro Godoy

Noviembre 2014

RESUMEN

El volcán Peteroa ha presentado actividad reciente y por sus características puede ser monitoreado con ASTER. Este sensor es idóneo para el estudio de la actividad volcánica y presenta ventajas sobre otros sensores debido a la mayor resolución espacial, espectral y radiométrica.

Se analizaron 45 imágenes nocturnas y 24 diurnas durante el período 2000 a 2014. Los datos nocturnos permitieron realizar el cálculo de la temperatura de las lagunas ubicadas en los diversos cráteres de explosión y observar la evolución de su comportamiento térmico, mientras que las imágenes diurnas permitieron el seguimiento de los cambios morfológicos e hidrológicos en el área de cráteres y lagunas. Se realizó la corrección atmosférica y la separación de las bandas de emisividad y temperatura con el algoritmo TES Temperature and Emissivity Separation Algorithm y se compararon los resultados con los del algoritmo Emissivity Normalization de ENVI y se observó una diferencia de 5°C en promedio.

Para el período descrito se observa un cambio en el patrón de temperaturas de cráteres, lagos y fumarolas. Desde el año 2000 al 2003 las temperaturas mayores (32°C) se encontraban en las lagunas ubicadas hacia el este, dentro de la caldera, mientras que hacia el oeste se encontraron los valores más bajos (18°C); en el año 2004 las temperaturas de las lagunas se asemejan y a partir del 2005 se invierten migrando hacia el oeste los valores más elevados, sitio donde se produce la erupción en 2010. En este sector se mantiene un valor promedio de 32°C para los años 2011, 2012 y 2013; en la actualidad el patrón dominante es de bajas temperaturas en todo el sistema entre 3 y 11°C.

INTRODUCCION

Es reconocida la importancia de la teledetección en el monitoreo volcánico, debido principalmente a la ubicación remota de las áreas volcánicas, como la Cordillera de los Andes y la dificultad para acceder a ellas. ASTER (*Advance Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) fué diseñado especialmente para el estudio de los cambios ambientales entre ellos aquellos producidos por la actividad volcánica y presenta ventajas sobre otros sensores debido a la mayor resolución espacial y espectral.

El Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) a través de un convenio de 5 años con la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) y en el marco del Proyecto GEOSAT-AR seleccionó 5 volcanes, entre ellos Peteroa, para el seguimiento de la evolución de sus anomalías de calor, durante el período 2000 a 2005.

El volcán Planchón-Peteroa (35° 15' S, 70° 35' O), localizado en la provincia de Mendoza, pertenece al segmento de transición de la Zona Volcánica Sur y constituye la etapa más reciente en la evolución del Complejo Azufre-Planchón-Peteroa (ver Fig. 1). En el anfiteatro del complejo se encuentran cráteres de explosión y lagunas con fumarolas, expresión superficial de la interacción del agua de fusión con el aporte de calor de cuerpos magmáticos que infrayacen al volcán lo que produce el desarrollo de un sistema geotermal. Es muy apropiado el monitoreo satelital con ASTER debido a las características radiométricas que posee este sistema y al tamaño de las anomalías de calor.

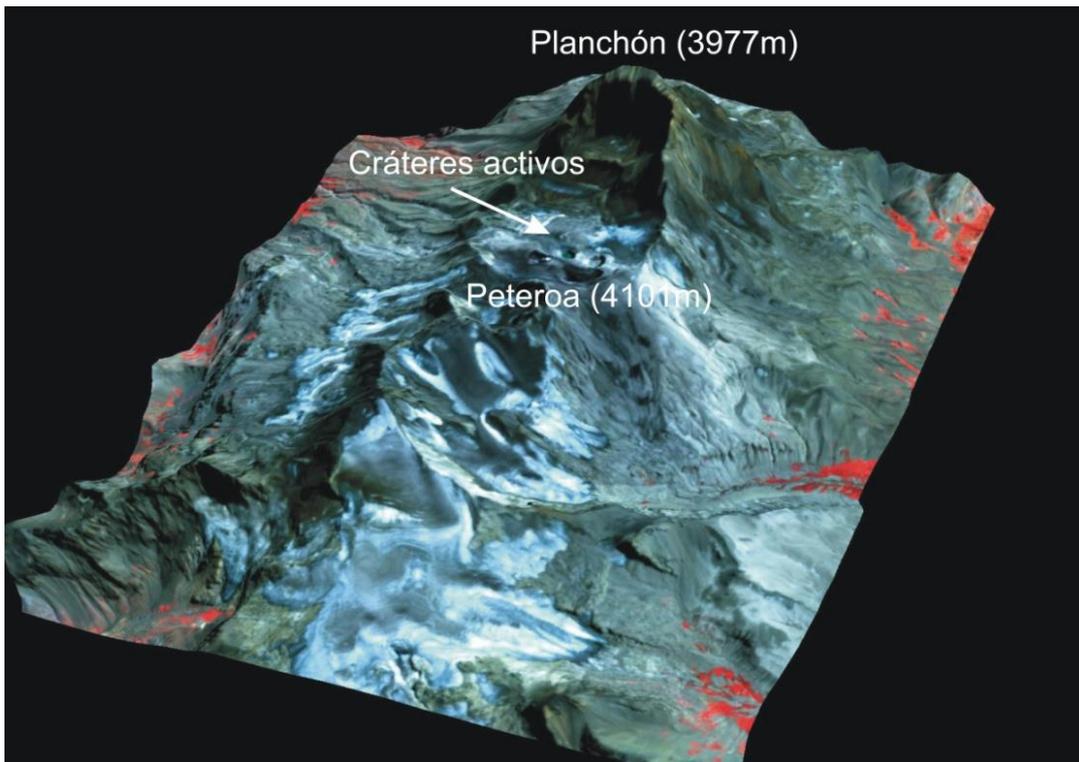


Figura 1. Imagen 3D del Complejo volcánico Planchón-Peteroa

Con posterioridad a la finalización del proyecto GEOSAT-AR y debido a la reactivación del volcán y erupción del 4 de setiembre de 2010 se retomó el seguimiento nocturno con el propósito de realizar el análisis de la nueva situación y la observación de los cambios morfológicos. El objetivo del presente trabajo es presentar los resultados del seguimiento satelital.

Características del Sensor

El sensor japonés ASTER fue diseñado especialmente para monitorear los cambios ambientales producidos en la superficie terrestre incluyendo aquellos producidos por la actividad volcánica. Se encuentra a bordo del satélite TERRA y fue lanzado al espacio en diciembre de 1999 por la NASA como parte del Sistema de Sensores de Observación Terrestre (EOS). Es considerado un sensor de última generación con alta resolución espacial, lo que significa que brinda información muy detallada (resolución espacial de 15m) y también posee alta resolución espectral es decir que capta información en muchas porciones del espectro electromagnético (14 bandas).

Está compuesto por 3 subsistemas o sensores VNIR (*Visible and Near Infrared*), SWIR (*Short Wave Infrared*) y TIR (*Thermal Infrared*). Posee 3 bandas en el VNIR en el rango 0.52-0.60 μ y posee una resolución espacial de 15m, 6 bandas en el SWIR entre los 1.6 y 2.43 μ con 30m de resolución espacial y 5 bandas en el TIR en el rango 8.12 a 11.65 μ de 90m de resolución. Cada escena o imagen ASTER cubre un área de 60 x 60 km.

Las bandas del VNIR se utilizan especialmente para la interpretación topográfica y geomorfológica debido a que posee dos telescopios, uno con visión nadir (el que realiza tomas en los rangos espectrales de las bandas 1, 2 y 3N) y otro adicional (figura 3) con vista hacia atrás (banda 3B) en la dirección orbital (*along track*), lo que permite la visión estereoscópica y la generación del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de alta precisión (Fujisada *et al.*, 2001).

En la actualidad el subsistema SWIR no realiza adquisiciones debido al sobrecalentamiento de sus detectores.

METODOLOGÍA

Para el monitoreo satelital de volcanes se utilizan imágenes nocturnas nivel 1B, radiancia al sensor, para evitar la influencia de la luz solar en la respuesta radiométrica.

Las bandas térmicas permiten captar temperaturas en el rango ambiental hasta los 100°C, temperatura a la cual se produce la saturación de los detectores de este subsistema (Urai, 2002). Debido a los valores de temperaturas de las fumarolas, inferiores a 100°C, este volcán puede ser monitoreado con las bandas térmicas cuya resolución espacial es de 90m.

Las imágenes fueron procesadas mediante el software TES *Temperature and Emissivity Separation Algorithm* (Tonooka, 2001 y 2005) el que realiza la corrección atmosférica y la separación de las bandas de emisividad y temperatura en el rango termal. Las bandas térmicas son muy sensibles a los cambios atmosféricos de manera que esta corrección es sumamente importante. El programa trabaja con modelos de atmósfera, según modelos de transferencia radiativa MODTRAN, que incorpora valores de ozono, tomados del sensor TOMS y el contenido de vapor de agua y variaciones de temperatura en el perfil atmosférico sobre el área de estudio, éstos últimos tomados de una base global GDAS, *Global Data Assimilation System*.. Posteriormente se realiza la separación de las bandas en emisividad y temperatura absoluta. Esta banda de temperatura absoluta tiene un tamaño de pixel de 90m y la precisión es de 1°C.

Estas imágenes también fueron procesadas con ENVI para obtener el dato de temperatura con las bandas térmicas utilizando el algoritmo *Emissivity Normalization* para comparar los resultados de ambos métodos y estimar las diferencias entre ambos.

Con el objeto de visualizar las características geomorfológicas del complejo volcánico se utilizaron imágenes diurnas. En primer lugar se generaron los modelos digitales de elevaciones (MDE) del área y luego se ortorrectificaron las imágenes mediante el programa SILCAST, (V1.8) desarrollado por *Sensor Information Laboratory Corporation* en lenguaje IDL. El MDE tiene una alta resolución espacial donde los datos de elevación son extraídos cada 30 m e interpolados cada 1segundo; el error de altura es inferior a los 15m (Fujisada *et.al.* op.cit.). Luego los datos interpolados cada 15 m, 30 m y 90 m se utilizan para ortorrectificar las bandas de los subsistemas VNIR, SWIR y TIR respectivamente. La imagen generada posee proyección UTM y el dato de elevación está calculado sobre la base del geoide EGM96. La alta definición del subsistema VNIR (15m) permite monitorear el área de los cráteres de explosión donde se encuentran las lagunas con el campo fumarólico.

Análisis de Datos

Se realizó el seguimiento de las temperaturas de las fumarolas de las lagunas que se encuentran en los cráteres de explosión. Se han monitoreado tres lagunas que presentan mayor definición en las anomalías térmicas y a las que denominaremos con un número según la secuencia de formación: 1, 2, 3 y 4 (ver Fig.2).



Figura 2. Ubicación de cráteres y lagunas. ASTER 7-3-2011

Imágenes nocturnas

De la comparación de los valores de temperatura obtenidos utilizando los métodos *Temperature and Emissivity Separation Algorithm* (TES) y *Emissivity Normalization* provisto por el programa de procesamiento digital de imágenes ENVI surge que los generados por TES están, en promedio para las 3 lagunas, 5 grados por encima de los valores de ENVI (ver Fig.3). Esta comparación fue realizada con los datos de las imágenes nocturnas entre 2001 y 2006 período en el que las anomalías estaban muy bien definidas y eran fácilmente identificables.

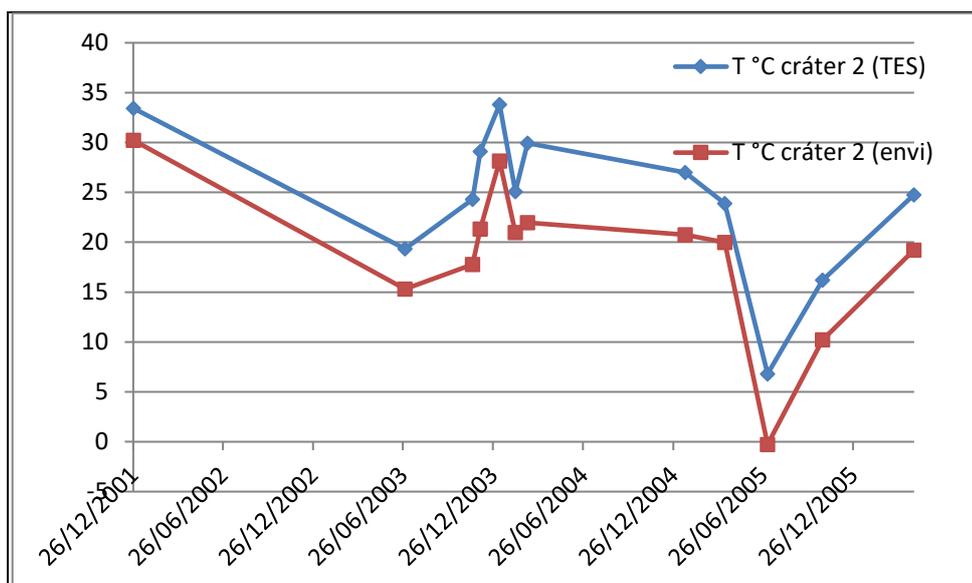


Figura 3. Comparación de los valores de temperaturas obtenidos con los algoritmos TES y *Emissivity Normalization* en la laguna ubicada en el cráter 2 (este).

En el gráfico (ver Fig. 4) se expresan los valores de temperaturas nocturnas desde el 2001 hasta el 2006. Los valores correspondientes a las fumarolas de la laguna del este (cráter 2) han sido los más elevados desde el 2001 hasta el 2004 (máximo de 30°C y media de 19°C). La laguna occidental (cráter 4) presenta, en general, los valores más bajos de temperaturas (máximo 21°C y media 11.6°C) y la laguna central (cráter 3) tiene también valores altos (máximo 29°C y media 16°C).

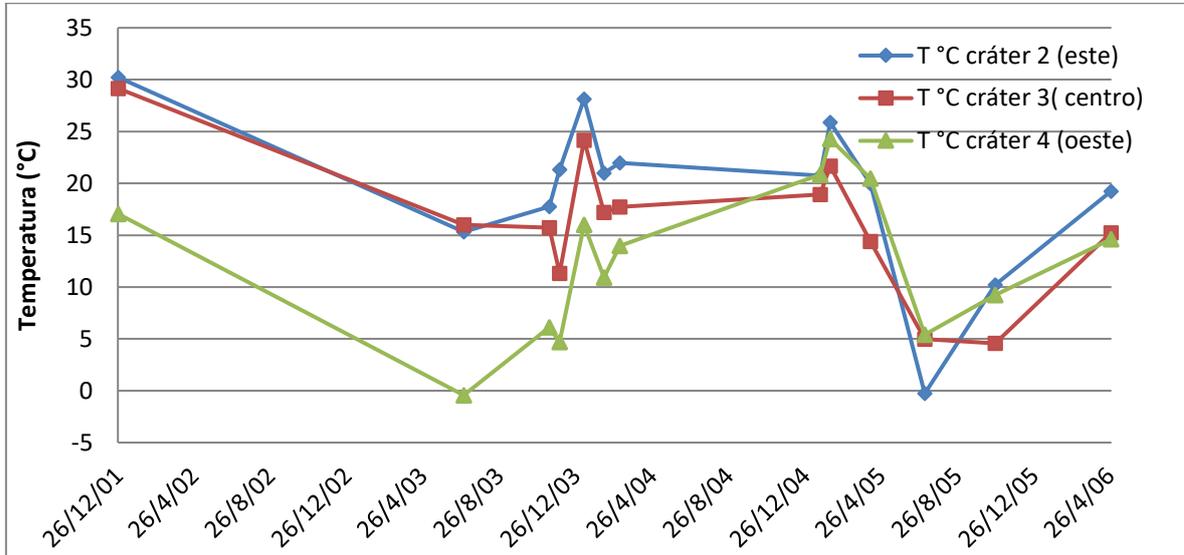


Figura 4. Historia térmica de lagunas cratéricas entre los años 2001 y 2006

Durante el verano del 2004, las lagunas presentaron un descenso de temperaturas desde el mes de enero hasta marzo (ver Fig. 5), momento en el que se produjeron explosiones y el desmoronamiento de un sector de la pared de la caldera.

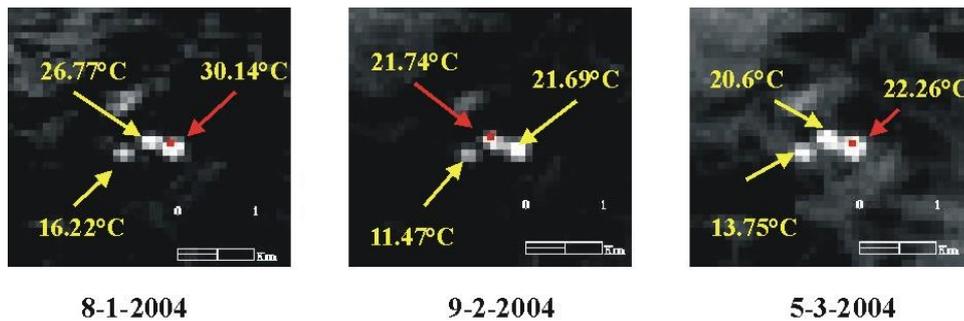


Figura 5. Variaciones de temperatura en imágenes nocturnas ASTER durante el verano del 2004

Imágenes diurnas

Al tratarse de una zona elevada con alturas entre 3300 y 3500m (ver Fig. 6) es usual la presencia de una cubierta nivo-glacial en el área de la cima con una disminución en el volumen durante los veranos e incremento en los inviernos. El perfil oeste-este, fue realizado en el área de los cráteres con las lagunas, a partir del modelo digital de elevaciones (MDE) de ASTER y muestra las características asimétricas del borde del cráter del complejo Planchón-Peteroa, con las mayores alturas hacia el este. La línea roja indica la depresión correspondiente al cráter 4 donde se produjo la última erupción.

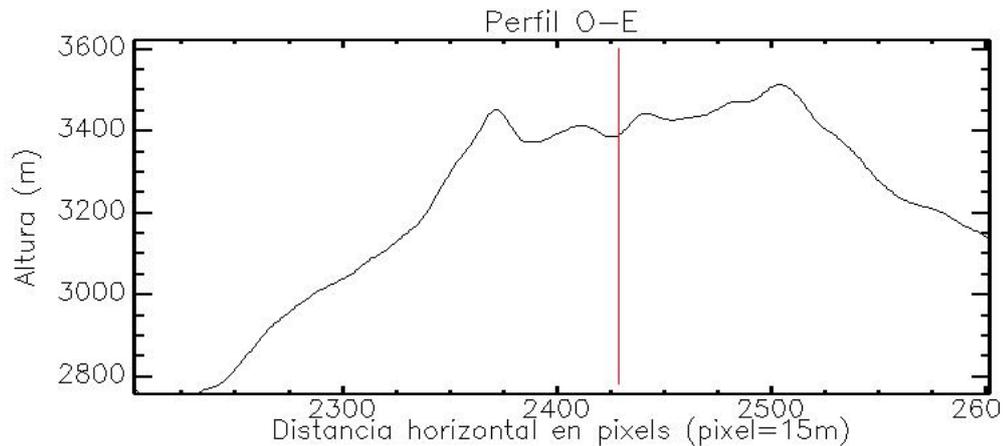


Figura 6. Perfil sobre el cráter del complejo Planchón-Peteroa, confeccionado a partir del MDE, ASTER.

En las imágenes se puede observar (ver Fig. 7) que particularmente en los veranos de los años 2008, 2010 y 2014 el área está desprovista de nieve.

En la imagen del 19 de setiembre de 2010, con posterioridad al inicio del ciclo eruptivo que comenzó el 4 de setiembre en el cráter 4, la cubierta de nieve y hielo es abundante y vemos la columna eruptiva orientada en dirección SE.

En el lapso 2006-2010 se registra un progresivo vaciamiento de las lagunas (con excepción del cráter 1) y migración de la actividad fumarólica hacia el cráter 4.

Las condiciones para el 27 de febrero del 2014 son de ausencia de cubierta nívea, nivel de agua bajo en las lagunas, sin actividad fumarólica aparente.

Lamentablemente al finalizar el proyecto GEOSAT-AR que incluía el monitoreo volcánico de varios volcanes, entre ellos el Peteroa, no se realizaron nuevas tomas nocturnas de ASTER. Por este motivo no se dispone de estas escenas para el período marzo 2006 a enero del 2011.

Al retomar el monitoreo satelital se programa la adquisición de nuevas escenas nocturnas y así se puede seguir la evolución de las temperaturas de las lagunas de los cráteres para el período 2011 a la actualidad.

En el gráfico (ver Fig. 8) se puede observar la variación térmica que sufrió el sistema de lagunas en el que la laguna del cráter 4 presenta los valores más altos para todo este período (máximo 28.3°C, media 11.2°C).

Las lagunas de los cráteres 2 (máximo 9.3°C, media 2.7°C) y 3 (máximo 12°C, media 4.3°C) tienen valores más bajos y similares. Se debe tener en cuenta que en la media influyen los valores estacionales ya que a simple vista se observa en el gráfico los valores inferiores a 0°C para las imágenes tomadas en invierno.

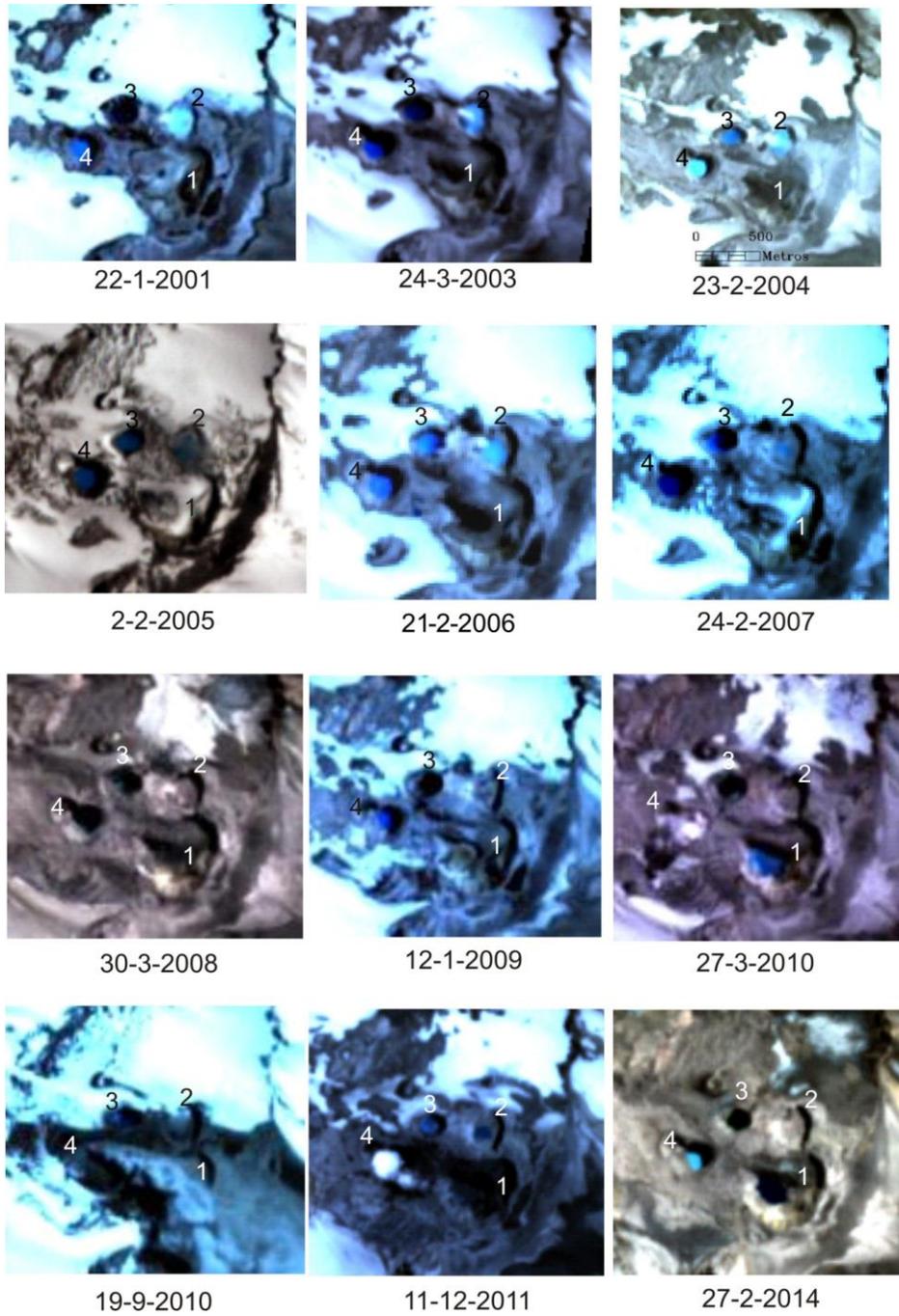


Figura 7. Área de cráteres con lagunas, fumarolas y columna eruptiva en imágenes ASTER diurnas.

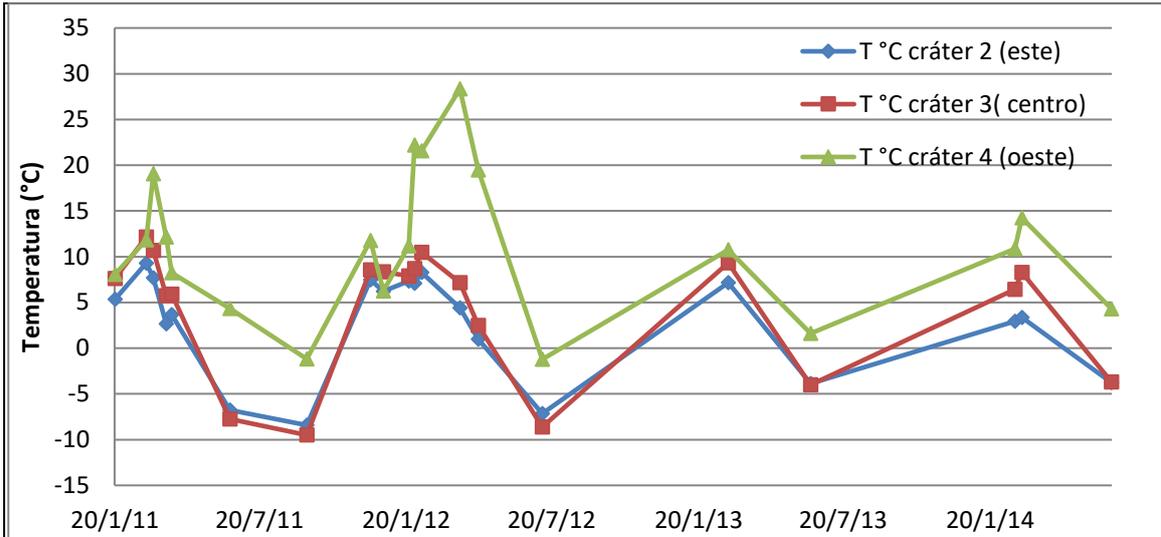


Figura 8. Historia térmica de las lagunas cratéricas entre los años 2011 y 2014

Al observar las imágenes nocturnas (ver Fig.9) se advierte que las conspicuas anomalías térmicas para el período 2001 a 2006 han perdido identidad en el año 2011, con posterioridad a las erupciones del 2010.

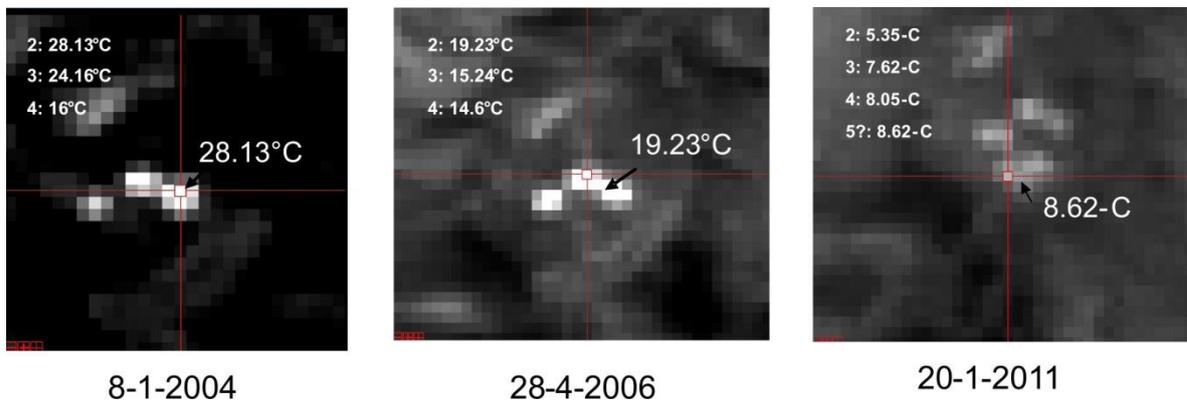


Figura 9. Evolución de temperaturas en imágenes nocturnas. Se indican las áreas con valores máximos.

Llama la atención hacia el SE del cráter 4 una nueva zona de anomalía calórica (ver Fig.10) que podría corresponder al área que Tromboto y otros, 2012 hacen referencia como posible cráter 6. En este recorte de una imagen nocturna del 6 de diciembre del 2011 se utilizó una paleta de colores llamada "rainbow" en la cual en color rojo se presentan los valores más altos de temperaturas y en azul los más bajos. La escena fue remuestreada a 10m para poder superimponerle curvas isotérmicas.

Hacia el norte también se puede apreciar un área más caliente que su contexto con dirección NE-SO, la cual ya fue advertida en las primeras imágenes procesadas del 2001.

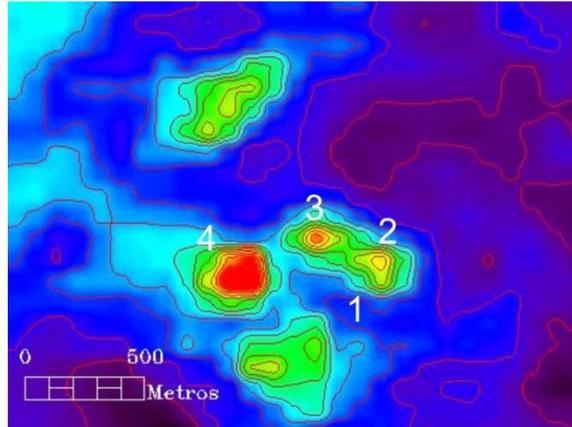


Figura 10. Imagen nocturna del 6-12-2011 remuestreada a 10m y curvas isotérmicas

RESULTADOS

Se procesaron 24 imágenes diurnas disponibles para el período mencionado y se generaron modelos de elevaciones para todas las escenas diurnas del volcán Peteroa lo que permitió la ortorrectificación de imágenes logrando una alta precisión espacial. Estas imágenes fueron utilizadas para la observación de las características geomorfológicas y del sistema térmico superficial que incluye lagunas, fumarolas y la pluma eruptiva del año 2010.

Utilizando imágenes nocturnas se realizó el seguimiento de las temperaturas de las fumarolas de las lagunas que se encuentran en los cráteres de explosión.

Se procesaron 45 imágenes nocturnas captadas durante el período 2000–2014 y se monitorearon tres de las lagunas que presentan mayor definición en las anomalías térmicas. Se presentan los valores de temperaturas nocturnas desde el 2000 hasta el 2014 en 2 gráficos.

Situación 1: Período 2000-2006

Los valores correspondientes a las fumarolas de la laguna del cráter 2 (este) han sido los más elevados desde el 2000 hasta el 2004. Desde el 2005 el patrón de temperaturas cambia y las temperaturas se asemejan progresivamente.

La laguna del cráter 4 (oeste) presenta en general los valores más bajos de temperaturas para este período mientras que la laguna central presenta valores intermedios a altos.

Situación 2: Período 2011-2014

En la figura 8 se observa claramente la inversión de temperaturas entre las lagunas de los cráteres 2 y 4 poniendo de manifiesto cambios en el sistema.

La laguna del cráter 4 presenta los valores superiores a las otras 2 lagunas hasta la actualidad, aunque las 3 han perdido identidad. Desde principios del año 2011 se observa una nueva zona de anomalía calórica ubicada al SE del cráter 4 que se mantiene hasta la actualidad.

DISCUSIÓN

El cálculo satelital de temperatura superficial de lagos cratéricos está influenciado por múltiples variables como la presencia y cercanía de nubes, precisión de los modelos de atmósfera, variables climáticas estacionales como velocidad del viento, radiación solar, temperatura del aire, la presencia de glaciares y nieve en el contexto. Sin embargo utilizando el método TES como *Emissivity Normalization* las tendencias en las temperaturas se mantienen y son coincidentes, lo que implica que a pesar de las diferencias de hasta 5 grados entre los dos métodos, ambos permiten advertir el cambio e inversión en el patrón de temperaturas de las lagunas.

CONCLUSIONES

- ASTER es una herramienta útil para el seguimiento de anomalías de calor de lagos cratéricos en zonas de difícil acceso como es el caso del Complejo Planchón-Peteroa.
- El sistema de lagunas del Peteroa sufrió cambios en la distribución de temperaturas desde el año 2005, con incremento de los valores en la laguna del cráter 4 (oeste) coincidente con el cráter donde se produjo la erupción del 4 de setiembre de 2010.
- Asimismo se produjo el descenso de los valores de temperaturas en el cráter 2 (este).
- Esto podría sugerir la movilización de la fuente de calor interna desde el este hacia el oeste.
- Sería muy importante la validación de campo de los datos de temperatura así como la complementación con otras técnicas de monitoreo volcánico como el seguimiento de la actividad sísmica y química de gases para una interpretación integral del sistema volcánico.

REFERENCIAS

Fujisada, H., Iwasaki A. y Hara S. 2001. ASTER stereo system performance. International Society for Optical Engineering SPIE Proc. 4540: 39-49.

Tonooka H., 2001. An atmospheric correction algorithm for thermal infrared multispectral data over land. A water vapor scaling method, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, No. 3, 682-692.

Tonooka H., 2005. Accurate atmospheric correction of ASTER thermal infrared imagery using the Water Vapor Scaling method, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.43, No.12, 2778-2792.

Trombotto Liaudat D., Penas P. Blöthe J. y Hernández J., 2012. Monitoreo termo-geomorfológico de la cumbre del Complejo Volcánico Peteroa, Mendoza, Argentina. Cuadernos ICES 6, Comisión Nacional de Energía Atómica.70p.

Urai M. 2002. Global volcano Observation Plan and a Volcano Image Database with ASTER. ASTER Science Team Meeting. ASTER Workshop. Aoyama TEPIA, Tokyo, Japan.