

## ANÁLISIS SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL VOLCÁN PETEROA (ARGENTINA), POR METODOS DE EMISIÓN ACÚSTICA (EA)

**J. Ruzzante**<sup>(1,2)</sup>, **M. I. Lòpez Pumarega**<sup>(1,2)</sup>, **Maria Armeite**<sup>(1,2)</sup>, **R. Piotrkowski**<sup>(1)</sup>, **G. P. Gregori**<sup>(3)</sup>, **I. Marson**<sup>(4)</sup>, **G. Paparo**<sup>(3,5)</sup>, **M. Poscolieri**<sup>(3)</sup> and **A. C. Catellani**<sup>(6)</sup>

<sup>(1)</sup> ICES, CNEA, Bs As, Comisión Nacional de Energía Atómica, UTN Regional Delta.

<sup>(2)</sup> Departamento Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Delta, Campana, Argentina.

<sup>(3)</sup> CNR, Istituto di Acustica “O. M. Corbino”, Rome, Italy.

<sup>(4)</sup> Dipartimento di Ingegneria Navale, del Mare e per l’Ambiente, Università di Trieste, Trieste, Italy; Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale (INOGS), Sgonico, Trieste, Italy.

<sup>(5)</sup> At present, Italian Embassy in Buenos Aires, Argentina. (

<sup>(6)</sup> Departamento de Recursos y prospecciones (ICES)

[carolinacatellani@icesmalargue.org](mailto:carolinacatellani@icesmalargue.org)

### RESUMEN

Se registraron varias series de datos de emisión acústica (EA) a 25 Khz (baja frecuencia BF) y 160 Khz (alta frecuencia AF), respectivamente) en el complejo volcánico Planchón-Peteroa, el cuál se encuentra situado en el limite internacional entre Argentina y Chile. Los resultados fueron comparados con estudios similares llevados a cabo en el Vesuvio y en el Stromboli. De acuerdo a los registros obtenidos para la BF y la AF, el Peteroa se presenta como un dispositivo de gran precisión en el monitoreo del espectro mareal terrestre. Cada uno de los volcanes mencionados exhiben características morfológicas particulares en su respuesta de EA y en su evolución temporal, dependiendo de su arreglo tectónico y de su espesor litosférico, de sus principales suministros de fuerza, de su disponibilidad de fluidos (agua u otros) por advección, de la reología del material que constituye su estructura edificia y de las características profundas que pueden favorecer la desgasificación. Monitoreando diferentes estructuras volcánicas ayuda en la gran variedad de los recientemente denominados “fenómenos volcánicos”, el cual es un indicador que monitorea el gradiente tiempo espacio de la liberación del calor endógeno en diferentes tectónicas y ambientes crustales.

### INTRODUCCION

El Peteroa es un volcán de aproximadamente 4100 mts s.n.m. posicionado a los 35° 15’ S y 70° 35’ O, el mismo comprende un área de unos 78 Km<sup>2</sup>. El Peteroa es el volcán mas joven del complejo caracterizado por su gran actividad en forma de fumarolas. La actividad histórica del Peteroa incluye erupciones de tipo explosivas en los años 1762 y 1889-1894, flujo de lava ocurrieron en los años 1837 y 1937. El flujo de lava más reciente ocurrió en Febrero de 1937 mientras que su última erupción fue registrada en Febrero de 1991.

La primer campaña de monitoreo de EA fue llevada a cabo entre el 2004 y el 2005 y fue reportada por Ruzzante et al. (2005, 2008) Y Gregori et al. (2007), se trabajo con alta y baja frecuencia (BF EA a 25kHz, AF EA a 160 Khz.). Los trasductores fueron colocados sobre la superficie de un afloramiento rocoso del cual se desconocen, en principio, sus características subterráneas; dicho afloramiento comúnmente se denomina “sonda natural”. Cada valor de EA es registrado cada 30 segundos e integrado evaluando el RMS de la señal acústica.

Únicamente fueron objeto de analisis los registros correspondientes a la BF de la EA. Estos

mostraron grandes picos regularmente distribuidos compuestos por algunas series temporales superpuestas de diferentes amplitudes relativas. En algunas ocasiones la amplitud absoluta tuvo abruptas discontinuidades. De acuerdo a otros estudios realizados en Cefalonia (Grecia), aun en preparación, se cree que tales discontinuidades son aparentemente originadas por cambios en la impedancia acústica de la sonda natural es decir, que depende de la cantidad de agua permeada en las fisuras, de hecho la deducción física resulto independiente de tal inconveniente, mostrando que tales discontinuidades no serian de carácter instrumental sino que, mas bien, dependerian de la naturaleza y la extensión real de la sonda natural.

Acerca del análisis de la serie de datos de BF de EA, Peteroa resulto operar como un dispositivo de alta precisión para monitorear en tiempo real el espectro mareal terrestre. Esto confirmo la exactitud del balance de energía calorimétrico del volcán, es decir, el peso de la estructura volcánica bloquea la presión generada por los fluidos endógenos calientes produciéndose una desgasificación cuando estos son empujados por el efecto mareal; esto es registrado por la EA debido al quiebre de las paredes de los microporos del material. (Gregori, 2002 y sus referencias).

Nuevos registros correspondientes a dos periodos del año 2008 están disponibles el primero va desde el 26 al 30 de Marzo y el segundo desde el 28 de abril al 24 de Mayo.

La BF de EA (Figura 1A) muestra diferentes amplitudes promedio durante los dos periodos, sea por la diferente amplificación de la señal o bien, por la alteración generada durante la adquisición de datos relacionada con la impedancia de la sonda natural. También se observa una modulación aproximadamente diurna. En este caso se aplico la media móvil ponderada cada 24 horas (análisis "F", con un filtro triangular, luego de la liberación de los puntos anómalos) y la variación diurna fue eliminada (siendo principalmente un efecto termoelástico, el cual es muy fuerte a tales alturas). Finalmente la modulación no resulto ser diurna, sino más bien mareal.

En la figura 1B se muestra una ampliación de la primer parte de la figura 1A correspondiente al registro de entrada de la BF, la parte oscura que en dicha figura aparecía de modo continuo resulto mas bien ser el resultado de una estructura muy densa conformada por diminutas líneas. Tales líneas están separadas por periodos de tiempo mucho más largos, los cuales parecían casi no existir en el registro de EA; dicha característica es específica del Peteroa, sin haberse observado nunca en otros sitios.

Los registros simultáneos de AF (160 Khz.), de EA (figura 2) mostraron que su amplificación fue excesivamente baja, la impedancia acústica de la sonda natural probablemente ha sido mas alta cuando la parte electrónica fue reajustada. Sin embargo el análisis de EA a AF claramente mostro que la señal mantiene información física relevante, si bien la señal se presento mucho mas dispersa y monótonamente incrementada (en un factor aproximado de 2); de todos modos es siempre necesario, para dar una adecuada interpretación de los datos, tener varios meses o algunos pocos años de registros; por ejemplo la tendencia cíclica observada en el Vesuvio altera un periodo de pocos meses de inflación y un periodo de unas pocas semanas de deflación asociado también con un cambio típico en la sismicidad local. (Paparo et al., 2004, basado en el análisis fractal).

Los datos anómalos fueron liberados para la serie de datos de AF y BF y separados de su respectiva cota de fondo. Cada serie de datos anómalos fue analizada independientemente; este proceso se realiza a través del *análisis outliers* o *análisis "O"*. Tal análisis se basa en la búsqueda de puntos anómalos, dentro de un intervalo previamente determinado, el cálculo de búsqueda se repite centrado dicho intervalo sobre cada dato, por ende, un mismo dato puede individualizarse como punto anómalo varias veces. Un archivo registra cuantas veces un

mismo dato es considerado anómalo y lo registra solo una vez. Un punto anómalo se identifica con cada registro que- comparándolo con su cota de fondo y de acuerdo a algún criterio razonable el cual depende del tipo de registro (por ejemplo sobre un tiempo de integración de 30 seg.) manifiesta caídas fuera de la distribución normal. De acuerdo a este análisis tales puntos resultaron presentarse con cierta regularidad, resultando del hecho de que la EA es liberada por un proceso de reacción en cadena (ya que un enlace cristalino tiene un gran chance de ceder justo antes de la posición en que el enlace anterior cedió, siendo esta la justificación racional de los planos de clivaje para sólidos cristalinos). (Ver Paparo y Gregori, 2003, 2004 y sus referencias).

Ambas series (BF AE y AF AE) fueron también analizadas por el operador ARP (automatic research for periodicities) el cual se basa en la relación de la superposición de criterios de época construido a partir de los datos anómalos. Tal operador se aplica, por ejemplo, a estadísticas biológicas (sinapsis, etc.), básicamente a partir de un punto de proceso, compuesto por una serie de eventos, se generara un conjunto de varias series de acontecimientos donde cada una de esas series se define por medio de otra serie original a tiempo cero.

El resultado confirma (figuras 3 y 4) que el Peteroa es una estructura de alta precisión para monitorear mareas y oscilaciones libres de la tierra. El análisis cuantitativo requiere de la utilización de programas específicos de trabajo lo cual se encuentra actualmente en preparación.

Los datos brutos (Figuras 1 y 2) y su promedio diario ponderado (análisis “F”) muestra una modulación adicional de tipo irregular con períodos que van desde unos pocos a varios días. Hasta el momento esto resulta imposible para una serie temporal limitada de registros de EA interpretando tal periodo como un efecto pulso entre el promedio diurno y la frecuencia mareal. Una posible suposición sería pensar que esto se debe a una especie de modulación por presión atmosférica la cual causa efectos menores que los mareales, pero comparables.

El Efecto Martillo (análisis “H”), se refiere a la distribución de los registros de EA, (tratados en Gregori et. al., 2007 y Ruzzante et al., 2008) en el momento en que el sistema se recupera, de la aplicación de una tensión externa, en función del tiempo. Tal análisis “H” puede ser expresado en un instante “índice H”, siendo  $H = 1$  cuando el sistema esta tensionado, y “ $H = -1$ ” cuando este se esta recuperando de la tensión. Para H instantáneo (computado cada 30 seg.) aparecen dispersos. Su media móvil revela, para cierto rango de tiempo, una distribución temporal de EA asimétrica. Dicha asimetría es típicamente asociada a una distribución logarítmica normal o a un proceso de reacción en cadena. Para el caso en estudio, (Figuras 5 y 6), se observa un resultado siempre negativo; dado que, la longitud típica de la cola es menor a 1 hora, sin embargo cada media de H muestra cierta modulación, probablemente dependientes de la variación diurna y mareal y de los cambios en la presión de los fluidos internos.

La explicación física es la misma que para los planos de clivaje de un cristal, es decir, los fluidos endógenos causan tensión sobre la pared de los poros dentro de la estructura volcánica, así la EA es liberada como una reacción en cadena, mostrándose como una típica distribución lognormal. Es decir, una asimetría en el tiempo tendría lugar entre su fase de carga y su cola o fase de recuperación. Un resultado interesante es la observación de la fase de cola que para el Vesubio es de varios días y para el Peteroa es menor a una hora. Esto prevé que el peso de la “válvula de seguridad” es decir, el espesor de la corteza en los Andes, es mucho más grande que el de la costa Tirrenica.

Un análisis adicional (análisis “T”) se basa en el envejecimiento de las paredes de los poros

a través de los cuales penetran los fluidos calientes. Las series temporales de todos los picos superiores al umbral definen un proceso de punto (point-like), para el cual fue aplicado el análisis fractal. Cada dimensión fractal  $D_t$  fue computada cada hora, por medio de un intervalo de tiempo móvil de 24 horas. Se debe recordar que  $D_t=1$  son las rupturas medias aleatorias de las uniones cristalinas es decir, materiales muy “jóvenes”, mientras que  $D_t=0$  indica la memorización perfecta de todos los eventos es decir, todas las uniones producidas simultáneamente dentro de un material “envejecido”.

Comparando todos los casos estudiados los resultados para la BF (Figura 7) muestra una característica sin precedente, la cual no ha sido observada en el 2004-2005; Gran cantidad de oscilaciones irregulares entre  $D_t=1$  y  $D_t=0$  fueron varias veces observadas. Solo cuando ocurren perturbaciones significativas debidas a los suministros endógenos, la  $D_t$  del Peteroa puede mostrar alguna tendencia destacable de consideración. De otra manera las altas y delgadas líneas (Figura 1A) han sido matemáticamente eliminadas como puntos anómalos antes de su procesamiento. La interpretación de este peculiar comportamiento requiere de una mayor cantidad de observaciones y una mayor comprensión del mismo.

De hecho, se graficó un valor de  $D_t$  por cada hora (Figura 7), utilizando un tiempo de resolución mayor, luego se puede concluir que los dos periodos presentan un sistema físico muy diferente si se lo compara con otros periodos de tiempo. Esto se manifestaría por medio de otro tipo de características morfológicas y microscópicas actualmente no disponibles.

Cuando  $D_t$  no es parcial (para los registros BF de EA) debida a la inestabilidad matemática, durante todo el registro de AF (Figura 8) y similarmente para el registro del 2004-2005,  $D_t$  muestra la variación diurna y también algunos días de modulación irregular. Esta última evidencia sería mejor si se la comparara con otros parámetros, como se observó en el caso de Stromboli. (Ver Gregori y Paparo, 2006)

## CONCLUSIONES

Un volcán y, en general, cualquier estación de registro de EA, localizada en un determinado arreglo tectónico, parece ser una estructura de monitoreo de alta precisión para mareas y oscilaciones libre de la tierra.

Diferencias sustanciales fueron encontradas cuando comparamos el caso histórico del Peteroa, Vesuvio y Stromboli. El arreglo tectónico local juega un rol fundamental. Stromboli está localizado sobre el fondo del Tirreno el cual está compuesto por una litosfera mucho más fina (unos 10 Km.). El Stromboli y el Vesuvio están compuestos por materiales muy porosos, además el Stromboli, distinto del Vesuvio, está casi por completo inmerso en el mar conteniendo mucha agua por advección termal. El Vesuvio se encuentra sobre la península al oeste de los Apeninos sobre una región de fuertes gradientes de gruesa litosfera, el cual brinda gran espesor (unos 100 Kms.) en la península de Los Balcanes. El Peteroa está localizado en la cima de la litosfera continental sudamericana, en una región de gran orogénesis, con un grueso y presumiblemente muy compactos basamentos. Además el Peteroa parece responder mucho más regularmente a las mareas ya que, el Vesuvio y el Stromboli, compuestos por materiales más porosos, son más sensibles a las variaciones temporales de los suministros de fluidos endógenos mucho más que a las mareas. Todos los volcanes son “válvulas de seguridad” para el control de los fluidos endógenos calientes, pero la relación señal-ruido es muy diferente debido a la dureza de sus basamentos.

## REFERENCIAS

- Ruzzante, José, Gabriele Paparo, Rosa Piotrkowski, Maria Armeite, Giovanni P. Gregori, and Isabel Lopez, 2005. Proyecto Peteroa, primera estación de emisión acústica en un volcán de los Andes, *Revista de la Unión Iberoamericana de Sociedades de Física*, **1**, (1), 12-18.
- Ruzzante, José, Maria Isabel Lòpez Pumarega, Giovanni P. Gregori, Gabriele Paparo, Rosa Piotrkowski, Maurizio Poscolieri, and Alessandro Zanini, 2008. Acoustic emission (AE), tides and degassing on the Peteroa volcano (Argentina). In Ruzzante, José, and Maria Isabel Lòpez Pumarega, (eds), 2008. *Acoustic emission*, Vol. **1**, *Microseismic, learning how to listen to the Earth...*, 68 pp., CNEA, Buenos Aires. ISBN 978-987-05-4116-5. p. 37-68.
- Ruzzante, José, Maria Isabel Lòpez Pumarega, Giovanni P. Gregori, Gabriele Paparo, Maurizio Poscolieri, and Alessandro Zanini, 2007. Acoustic emission (AE), tides and degassing on the Peteroa volcano (Argentina).
- Gregori, Giovanni P., Matteo Lupieri, Gabriele Paparo, Maurizio Poscolieri, Giuliano Ventrice, and Alessandro Zanini, 2007. Fatigue, ageing, and catastrophe of solid structures. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **7**, 723-731, 2007.
- Gregori, Giovanni P., 2002. Galaxy – Sun – Earth relations. The origin of the magnetic field and of the endogenous energy of the Earth, with implications for volcanism, geodynamics and climate control, and related items of concern for stars, planets, satellites, and other planetary objects. A discussion in a prologue and two parts. *Beiträge zur Geschichte der Geophysik und Kosmischen Physik*, Band **3**, Heft **3**, 471 pp.
- Paparo, G., G. P. Gregori, A. Taloni, and U. Coppa, 2004. Acoustic emissions (AE) and the energy supply to Vesuvius – ‘Inflation’ and ‘deflation’ times. *Acta Geod. Geophys. Hung.*, **40**, (4), 471-480.
- Paparo, G., G. P. Gregori, 2003. Multifrequency acoustic emissions (AE) for monitoring the time evolution of microprocesses within solids. *Reviews of Quantitative Nondestructive Evaluation*, **22**, (AIP Conference Proceedings ed. by D. O. Thompson and D. E. Chimenti), 1423-1430.
- Gregori, Giovanni P., and Gabriele Paparo, 2004. Acoustic emission (AE). A diagnostic tool for environmental sciences and for non destructive tests (with a potential application to gravitational antennas), in Schröder, Wilfried, (ed.), 2004. Meteorological and geophysical fluid dynamics (A book to commemorate the centenary of the birth of Hans Ertel), *Arbeitskreis Geschichte der Geophysik und Kosmische Physik*, Bremen, p. 166-204.
- Gregori, Giovanni P., and Gabriele Paparo 2006. The Stromboli crisis of 28÷30 December 2002. *Acta Geod. Geophys. Hung.*, **41**, (2), 273-287.

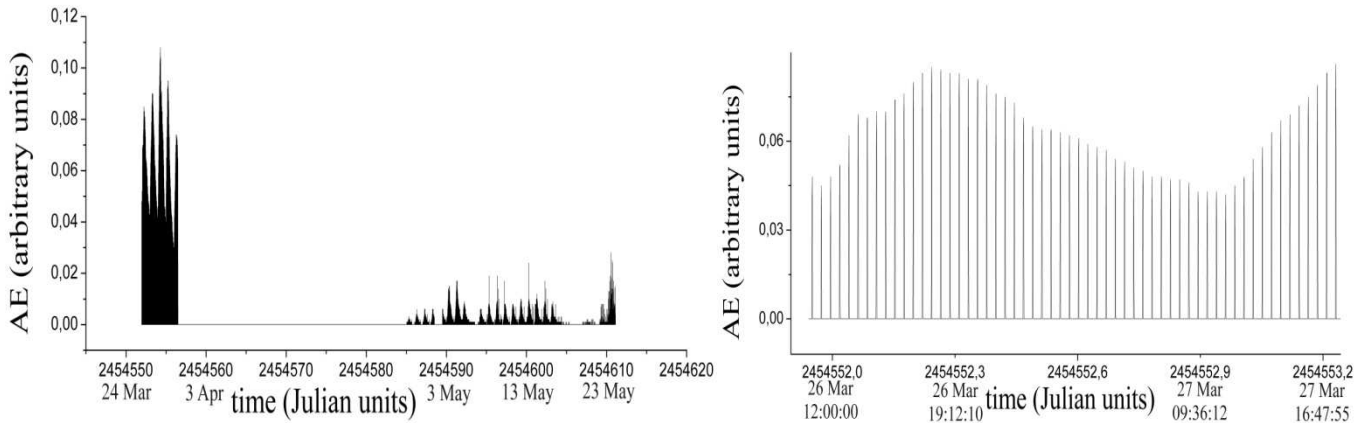


Figura 1(A) – Registro de entrada BF EA. Tiempo en unidades Julianas. Cada marca corresponde a 12 00 00 UT. (B) – Detalle de la figura 1.

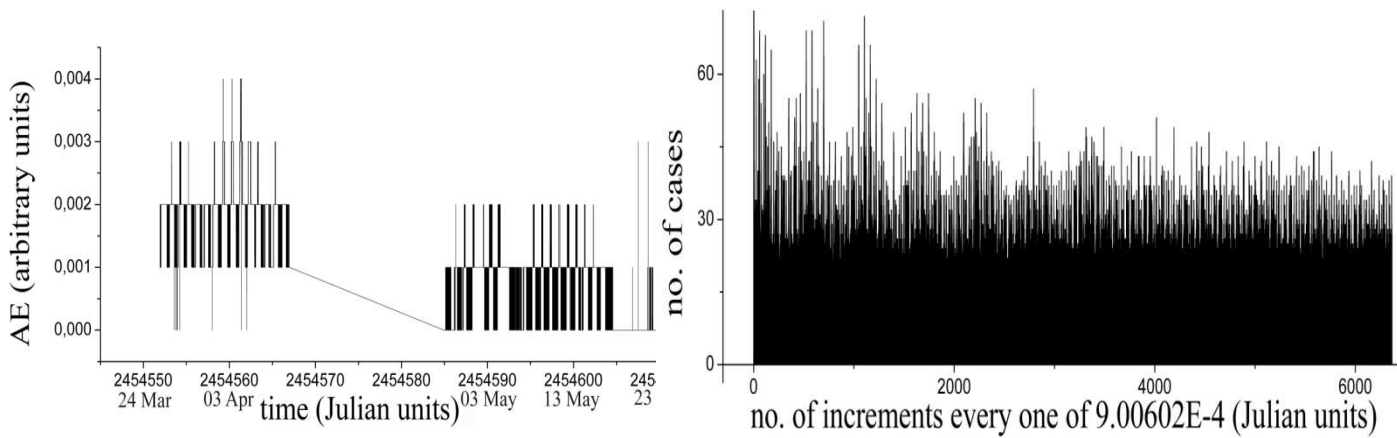


Figura 3 – Registro de entrada AF EA.

Figura 4 – ARP de outliers para la BA de EA. Figura 5 – ARP de outliers para AF de EA.

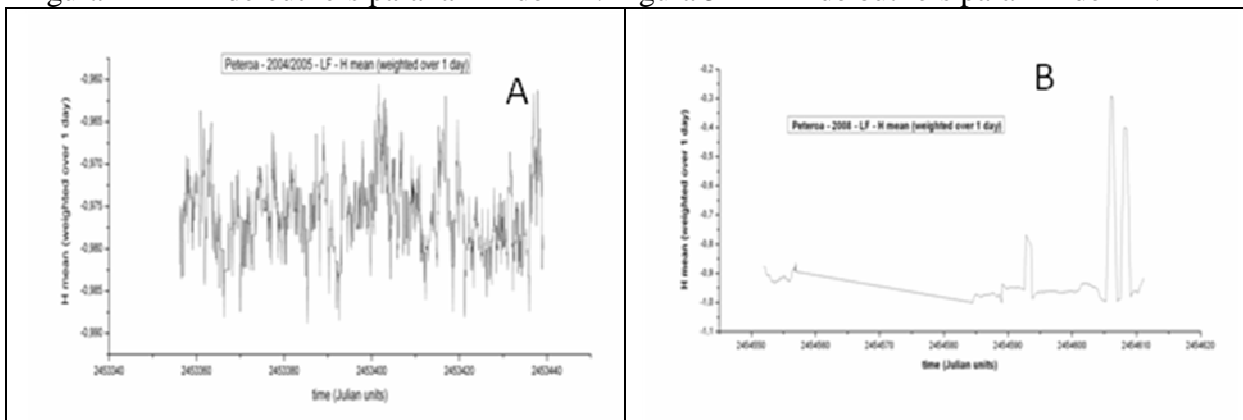


Figura 5 – media de H(A) 2004-2005 BF de EA, y (B) 2008 BF de EA. Notar los diferentes comportamientos entre los dos periodos de tiempo.

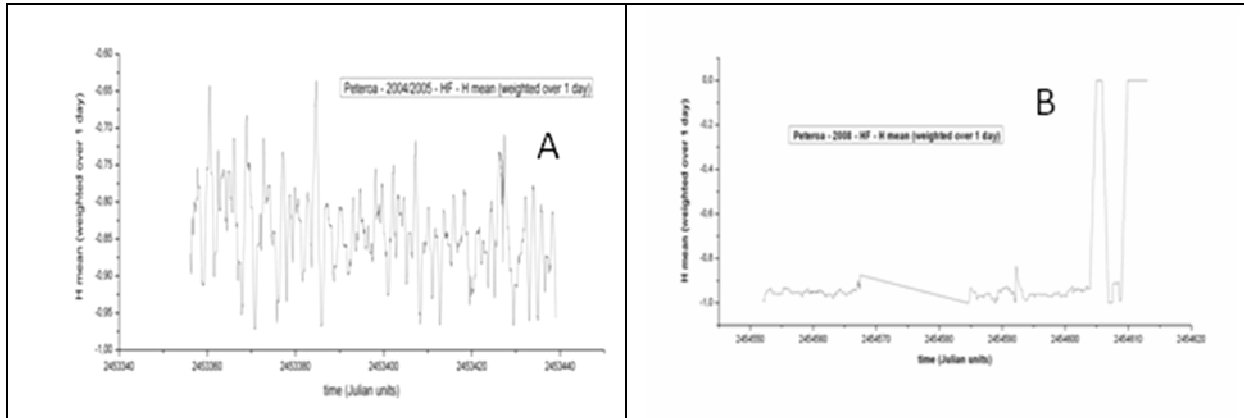


Figura 5 – media de H(A) 2004-2005 AF de EA, y (B) 2008 AF de EA. Notar los diferentes comportamientos entre los dos periodos de tiempo.

