

ACTIVIDAD SÍSMICA Y COMPOSICIÓN QUÍMICA FUMARÓLICA ANÓMALA DEBIDO A POSIBLE EFECTO SELLO EN EL SISTEMA VOLCÁNICO, ISLA DECEPCIÓN (ANTÁRTIDA)

A.T. CASELLI¹, G. BADI², A. L. BONATTO², C. L. BENGUA¹, M. R. AGUSTO¹, A. BIDONE² y J. IBÁÑEZ³

¹ Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. UBA, Ciudad Universitaria, Pab.2, 1428 Núñez, Buenos Aires, Argentina. Email: acaselli@gl.fcen.uba.ar;

² Departamento de Sismología e I.M., Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. UNLP, Av. Centenario s/n. Paseo del Bosque. B1900FWA La Plata. Provincia de Buenos Aires.

³ Instituto Andaluz de Geofísica y P.D.S. Universidad de Granada, Campus Universitario de Cartuja s/n. 18071 Granada, España

RESUMEN:

Se discute en la presente comunicación, la génesis de la importante actividad sísmica anómala que se registró durante el verano austral 2003/2004 en la isla Decepción, (Antártida) y que se relacionó con cambios en la composición química de las emanaciones gaseosas y precipitados en la boca de las fumarolas. Se presenta el análisis comparativo que se llevó a cabo, para intentar explicar dicha actividad y se propone un posible sellamiento parcial de las microfracturas del sistema. Efecto que habría dado lugar a un aumento de presión y posterior reapertura de las microfracturas generando una secuencia de eventos sísmicos y cambios en la composición química de la nube gaseosa.

Palabras clave: *Isla Decepción, Antártida, Gases fumarólicos, Sismología.*

ABSTRACT: *Seismic activity and an anomalous fumarolic chemical composition due to seal effect in the volcanic system of Deception Island (Antarctica).* In this communication, the genesis of great anomalous seismic activity registered during austral summer 2003/2004 on Deception Island (Antarctica) is discussed, and related with changes on the chemical composition of fumarolic gases and vent deposits. Here we present a comparative analysis performed to explain this activity. We propose a possible partial seal of the microfracture system. This effect allows an increase on pressure follow by reopening of microfractures, resulting on a sequence of seismic events and changes on the chemical composition of fumarolic emissions.

Keywords: *Deception Island, Antarctica, Fumarolic gases, Seismology.*

INTRODUCCIÓN

La isla Decepción es uno de los tres volcanes emergidos (junto a Penguin y Bridgeman) que forman parte de un complejo volcánico que se desarrolló en el eje del rift que conforma el estrecho del Bransfield. Está ubicada en el extremo sudoeste del estrecho formando parte del archipiélago de las Shetlands del Sur, Antártida (62°57'LS; 60°38'LO; Fig. 1). Es un estratovolcán que se caracteriza por su forma de herradura, donde un proceso de colapso generó una depresión en su parte central correspondiente a la bahía Puerto Foster. La actividad volcánica de la isla se desarrolló en los últimos 0,2 Ma (Keller *et al.* 1991). Actualmente constituye el foco volcánico más activo del área antes mencionada, con una historia eruptiva re-

ciente durante los años 1967, 1969 y 1970. Con posterioridad a este ciclo eruptivo, alrededor de la bahía Puerto Foster, se desarrollaron una serie de zonas geotérmicamente anómalas, de diferentes temperaturas, con emisiones gaseosas de variada composición química. Las manifestaciones gaseosas ubicadas en bahía Fumarolas constituyen uno de los mayores campos de fumarolas de la isla, con emisiones ricas en sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono (Ortiz *et al.* 1987, Martini y Giannini 1988, Villegas y Caselli 1993, Villegas *et al.* 1997a y b, Caselli *et al.* 1994a, Agosto *et al.* 2004). Una considerable actividad sísmica fue registrada durante el verano de 1999, que fue interpretada por dos Santos y Caselli (2002) e Ibáñez *et al.* (2003b) debida posiblemente a intrusiones magmáticas (diques?) cercanas

a la superficie.

Durante el verano austral 2003/2004 se registró en la isla Decepción una importante actividad sísmica y cambios en la composición química de los gases fumarólicos y con ellos, la aparición de precipitados en la boca de las mismas. En la presente comunicación se presenta el análisis comparativo que se llevó a cabo, para intentar explicar dicha actividad anómala.

METODOLOGÍAS UTILIZADAS

La localización de las fuentes de las señales sismovolcánicas y los patrones temporales de ocurrencia pueden ayudar en la identificación de los procesos magmáticos. Dichas señales muchas veces no presentan fases claramente definidas y por ello las técnicas

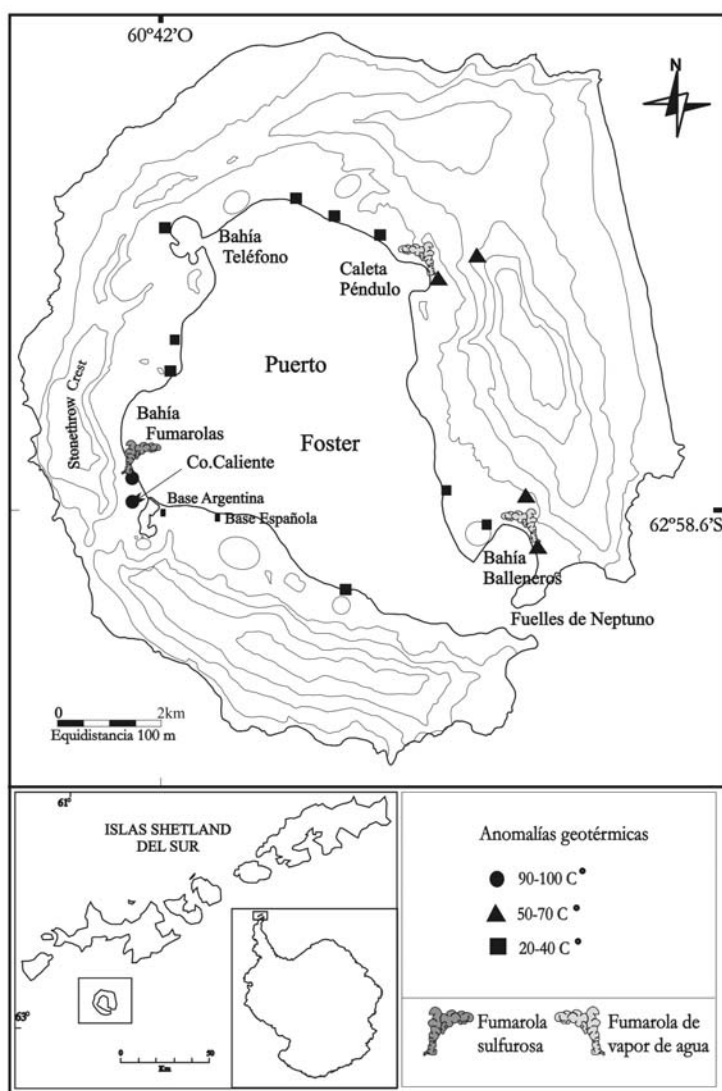


Figura 1: Mapa topográfico y de ubicación de la isla Decepción. En el mismo se señala la localización de los principales campos de fumarolas y las zonas con anomalía geotérmica, indicando sus rangos de temperatura.

tradicionales de localización, fundamentadas en la identificación de tiempos de arribo de las fases, no pueden aplicarse con éxito. Las técnicas de antenas sísmicas, desarrolladas originalmente para el monitoreo de pruebas nucleares, se han usado en las últimas décadas para la localización de fuentes naturales cuando la relación señal-ruido es baja, la magnitud del evento es pequeña o la ubicación del epicentro impide una buena distribución acimutal de estaciones.

Una antena sísmica consiste en un número elevado de sensores desplegados en un área pequeña comparada con la longitud de on-

da de la señal que se pretende registrar. La localización de la fuente se fundamenta en la búsqueda de coherencia entre las ondas registradas por los diferentes sensores que componen la antena. El resultado se expresa como los valores más probables del *back-azimuth* y la inversa de la velocidad aparente de propagación de las ondas a través de la antena. La técnica de correlación cruzada de fase cero (CCFC) que puede verse bien detallada en Almendros (1999), se ha aplicado con éxito en varios volcanes del mundo entre los que cabe destacar el Kilauea, Strómboli, Etna, Santorini, Teide, Colima, Copahue e incluso Decepción, donde co-

menzó a aplicarse en el año 1994.

En la presente campaña, se instalaron para control de la actividad sismovolcánica, dos estaciones de tres componentes y registro continuo in situ. Los sensores fueron contruidos a partir de tres geófonos Mark L15B con respuesta ampliada electrónicamente al intervalo de frecuencia 1-48 Hz y convertidores analógico/digitales de 16 bits de resolución controlados por una computadora portátil, con sistema de tiempo universal por GPS (*Global Position System*). Dichas estaciones se instalaron en las inmediaciones de la Base Gabriel de Castilla, España y en la Base Decepción, Argentina (Fig.1). Las frecuencias de muestreo fueron de 50 y 100 mps respectivamente. El monitoreo se completó con una estación telemétrica de una componente vertical situada en bahía Fumarolas, con sensor Mark L4C y sistema de adquisición similar al anterior y una antena sísmica con una apertura de aproximadamente 370 m compuesta por 12 canales verticales de 16 bits, 100 mps y tiempo controlado por GPS, instalada en la colina situada entre las dos bases. Los sensores de la antena han sido diseñados y contruidos en el Instituto Andaluz de Geofísica (IAG) mediante geófonos Mark L28 con respuesta extendida, el adquisidor y el programa de adquisición son el resultado de la experiencia del IAG con colaboración de la Universidad de Bergen, Noruega. En la figura 2 puede verse la geometría de la antena desplegada y el sitio de instalación así como la ubicación de las otras estaciones utilizadas en la presente campaña.

En lo que respecta a la geoquímica de gases fumarólicos se obtuvieron periódicamente muestras de gases ácidos (CO_2 , H_2S y SO_2) de las emanaciones fumarólicas de bahía Fumarolas. Las muestras de gases se recogieron en tubos colectores conteniendo solución de KOH y $\text{Cd}(\text{ClO}_4)_2$ siguiendo la metodología de Piccardi y Cellini Legittimo (1983). Los análisis se han llevado a cabo mediante técnicas de análisis convencionales y potenciométricas con un laboratorio portátil de gases en el Observatorio Volcanológico Decepción (Villegas *et al.* 1993, Caselli *et al.* 1994b). La determinación de CO_2 se efectuó mediante una titulación potenciométrica utilizándose un electrodo combinado de vidrio para pH, conectado

directamente a una computadora por medio de un conversor analógico digital. El sulfuro de hidrógeno y el dióxido de azufre se valoraron mediante yodometría, con $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, sobre el precipitado y el sobrenadante respectivamente. La cantidad de agua en las muestras se ha calculado por diferencias de masa antes y después del muestreo.

ACTIVIDAD SÍSMICA

Para la sismología volcánica es un objetivo importante comprender la dinámica de los sistemas magmáticos activos, determinar sus propiedades físicas, definir las zonas sismogénicas y seguir su evolución temporal y espacial. La falta de comprensión de los procesos que involucran dinámica de fluidos y elasticidad, dificulta el desarrollo de una teoría completa de la fuente sismovolcánica. En los volcanes activos existen varias clases de señales sísmicas asociadas a la interacción fluido-sólido que se diferencian por su forma de onda y contenido espectral. Dichas señales pueden dividirse en cuatro grupos respondiendo a una gradación creciente en la intervención de fluidos en la fuente: a) terremotos volcano-tectónicos (VT), b) eventos híbridos (H), c) tremores volcánicos (TV), d) eventos de largo período (LP).

Los sismos volcano-tectónicos, también llamados eventos de alta frecuencia tienen su origen en un proceso bien conocido, la fractura en cizalla, y son de gran utilidad para determinar la orientación del sistema de esfuerzos en la fuente. Se han determinado en algunos casos modelos de fuente diferentes a la clásica doble cupla que incluyen también procesos de cambio de volumen en cavidades. Recientemente se han estudiado casos de efecto de disparo de terremotos volcano-tectónicos por motivo de grandes telesismos. Las causas de los terremotos volcano-tectónicos han sido atribuidas a fuerzas tectónicas regionales, carga gravitacional, efecto de presión de poros e hidrofracturas, fuerzas térmicas y volumétricas asociadas a intrusión de magma, enfriamiento o alguna combinación de ellas. En muchos casos los eventos de alta frecuencia son seguidos por eventos de largo período y tremor, pudiendo representar entonces la invasión de fluidos calientes y la reapertura

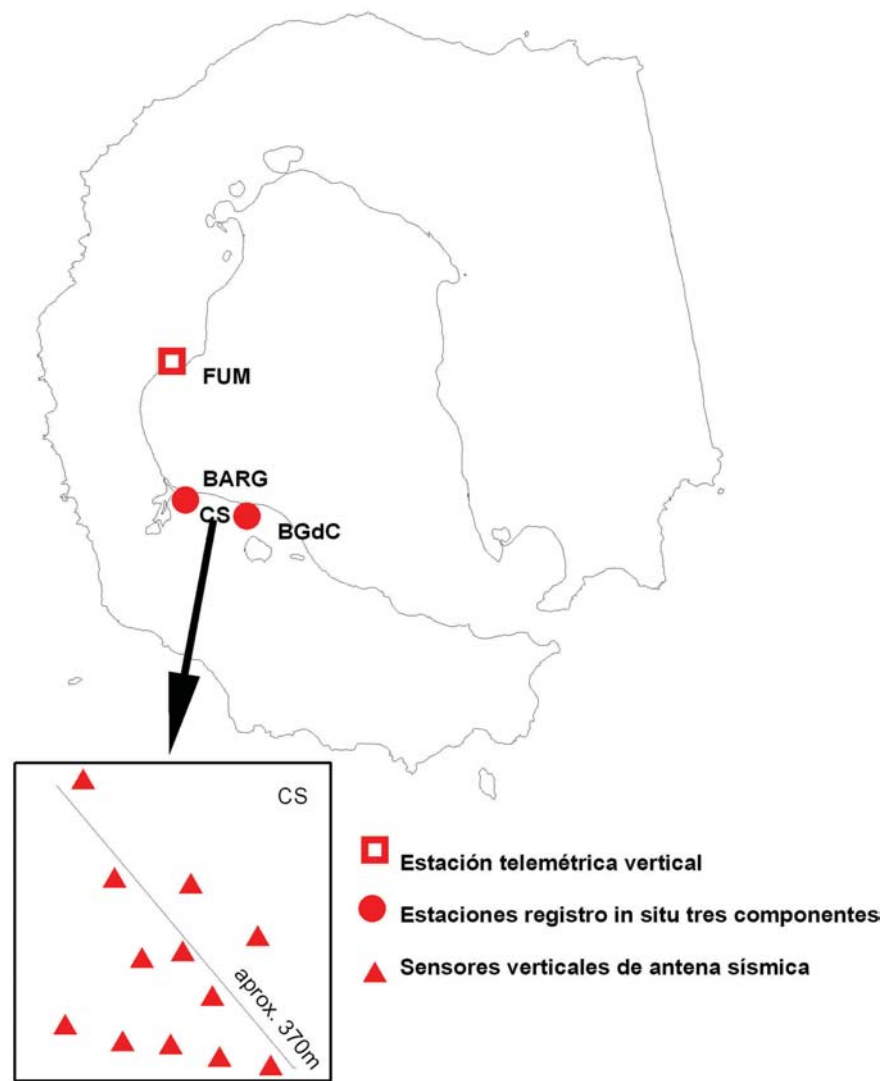


Figura 2: Ubicación de las estaciones sísmicas utilizadas durante la campaña 2003/2004 y detalle de la geometría de la antena sísmica desplegada. BARG: Base Argentina Decepción; BGdC: Base Gabriel de Castilla; CS: colina sísmica, FUM: estación Fumarolas.

de fracturas previa a la intrusión (McNutt 2005).

Los eventos de largo período, o de baja frecuencia, se caracterizan por un comienzo emergente y un suave decaimiento de oscilaciones armónicas casi monocromáticas con duración de segundos a un minuto y contenido espectral por debajo de los 4-5 Hz (Chouet 1996). Procesos en los que intervienen fluidos son los responsables de su generación. Existen varios mecanismos alternativos y modelos que involucran factores tales como la geometría de los conductos o el acoplamiento en las paredes y el origen de la radiación de energía ya sea puramente mecánico o con la participación de

fluidos. El modelo de Chouet propone la generación de una onda a la que denomina *onda de fractura*, originada en una fractura llena de fluido y que se propaga por las paredes de la misma. Este modelo admite dimensiones de la fuente mucho más realistas que aquellos que suponen la oscilación estacionaria de un conducto lleno de fluido. Algunos no descartan la posibilidad de que los eventos de largo período sean en realidad terremotos normales cuya ruptura ocurre a una escala de tiempo más lenta o bien, en los que la energía de alta frecuencia se ha perdido por atenuación en el camino sísmico o por el efecto de sitio en la estación. Sin embargo, los eventos de largo período rea-

les no tienen ondas S y sus codas son más largas que las de los terremotos normales (McNutt 2005).

Los eventos híbridos son señales caracterizadas por un comienzo de alta frecuencia y corta duración seguido por una señal monocromática similar a aquella de los eventos de largo período. En muchos casos pueden distinguirse ondas P y S en la primera parte del registro por lo que se asocian a un fenómeno compuesto por un evento volcano-tectónico seguido por un proceso con participación de fluidos como los eventos de largo período.

Los tremores volcánicos son la señal sísmica más característica registrada en volcanes. Generalmente se distinguen por su angosto rango de frecuencia o su espectro de picos agudos y su larga duración en comparación a los terremotos. Muchos investigadores agrupan tremores y los eventos de largo período debido a sus características espectrales, pero según McNutt (2005) las fuerzas que los controlan probablemente son diferentes. En muchos estudios se ha observado que la fuente del tremor parece cambiar de profundidad sugiriendo que la fuente es lineal en lugar de ser puntual. En comparaciones realizadas entre diferentes tipos de erupciones se ha encontrado que el tremor es más fuerte en erupciones fisurales, freáticas y en aquellas con alto contenido de gas. Almendros *et al.* (1997) encontraron evidencias de que los tremores en la isla Decepción son una secuencia de híbridos superpuestos en el tiempo a través de algunos aspectos comunes a ambos como: dos bandas dominantes espectrales (1-3 Hz y 4-8 Hz), numerosas fases coherentes con el mismo *back-azimuth* y lentitud aparente a lo largo de toda la señal; en las altas frecuencias la lentitud aparente es muy baja (0,17 s/km) indicando la propagación de ondas internas; en las bajas frecuencias, la lentitud es muy alta (1,6 s/km) indicando presencia de ondas superficiales y en algunos casos se observaron comienzos claros de P seguidos por un patrón complejo de ondas Rayleigh. La fuente fue asociada a la interacción de agua y materiales calientes en un acuífero superficial. Los tremores, pueden interpretarse como oscilaciones del mismo resonador que produce el evento de Largo Período pero en respuesta a una excitación

sostenida en el tiempo, lo que da lugar a una señal cuya duración puede ir de varios minutos a horas (Chouet 2003).

El nivel de actividad sísmica en isla Decepción, desde 1989, ha sido muy variable. En el verano 1991-1992 se produjo una crisis de actividad sísmica sentida con magnitudes de hasta 3,4 (Ortiz *et al.* 1997). Al año siguiente la actividad sísmica disminuyó notoriamente. En los años siguientes la sismicidad registrada estaba compuesta básicamente por señales de origen puramente volcánico (eventos de largo período, tremores e híbridos) con pocos o escasos terremotos (Badi *et al.* 1999, Plasencia *et al.* 1999). La cantidad de sismos volcanotectónicos y tectónicos de alta frecuencia registrada puede variar de uno hasta una centena por día. Parte de esta variabilidad puede ser atribuida a cambios en el emplazamiento del instrumental de una campaña a otra, dado que la distancia fuente-receptor disminuye sen-

siblemente la capacidad de registro de los eventos de baja energía y la heterogeneidad de la estructura volcánica causa una fuerte atenuación de la señal. Sin embargo, estos fenómenos no llegan a explicar toda la variabilidad, dado que con la misma configuración de la red, se detectaron muchos menos eventos en la campaña 1996-1997 que en las campañas 1994-1995 y 1995-1996 (Ibáñez *et al.* 2000) y en la campaña 1998-1999 se comenzó con dos sismos por día en diciembre de 1998 incrementándose hasta cerca de ochenta por día en enero de 1999 (Ibáñez *et al.* 2003a, 2003b). En la campaña 1999-2000 los niveles de sismicidad tectónica fueron altamente variables excediendo a veces los treinta eventos por día. La comparación de las estadísticas de sismicidad y las fuentes localizadas por técnicas de antenas sísmicas (*arrays*) muestran un cambio evidente en la actividad sísmica de la isla en número, tipo y ubicación que podría aso-

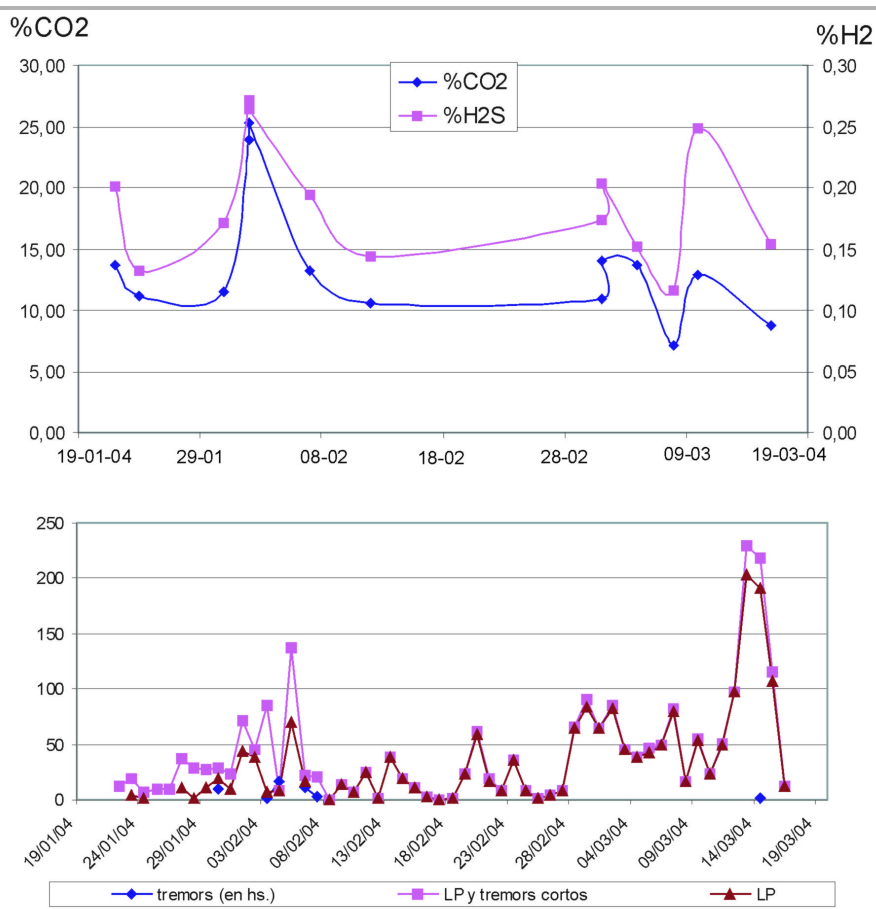


Figura 3: Gráfico de variación del porcentaje, expresado en moles por moles totales, de los principales gases ácidos con el tiempo (arriba) y de cantidad y tipo de eventos sísmicos durante el mismo período de tiempo (abajo).

ciarse, desde el punto de vista volcánico, tectónico o ambos, a una modificación del estado de la isla (Ibáñez y Del Pezzo 1999). La actividad sísmica registrada durante el verano austral 2003-2004, presenta intervalos de diferente actividad, sumando más de 3000 eventos ocurridos en los tres meses de medición. Analizando el período coincidente con el muestreo geoquímico (19/01/04 al 19/03/04), podemos destacar días caracterizados por un aumento repentino de la actividad con hasta una centena de eventos de largo período o bien, por varios sismos volcanotectónicos de pequeña magnitud junto a una decena de eventos híbridos (Fig. 3). Hacia mediados de enero un aumento de la actividad de largo período durante un día, finaliza con la ocurrencia de un sismo volcanotectónico (Md 2,0) a partir del cual la actividad cesa casi por completo (Fig. 4). Febrero comienza con eventos de largo período seguidos de un sismo volcanotectónico (Md 1,7) luego del cual se observa un aumento en la duración y una disminución en la frecuencia de los eventos de largo período. En los días subsiguientes se registran intervalos de 19 y 14 horas de tremor continuo. La actividad luego disminuye para volver a aumentar en la forma de eventos de largo período hacia fines de febrero y principios de marzo.

Aplicando la técnica de correlación cruzada de fase cero a la secuencia sísmica de los días 4 y 5 de febrero coincidente con el aumento de actividad fumarólica, se han obtenido las soluciones que se presentan en las figuras 5 a y b. Para localizar señales sin un comienzo definido, se analiza la totalidad del registro filtrado en tres bandas de frecuencia características de los distintos tipos de señales sismovolcánicas encontradas. Entre 1 y 3 Hz (bajas frecuencias), se espera hallar la localización de las fuentes de eventos de largo período, entre 3 y 6 Hz (frecuencias medias), las fuentes de los temores y entre 6 y 12 Hz (altas frecuencias) las fuentes volcanotectónicas. Las figuras 5a y b corresponden a diagramas de barras polares que reúnen la suma de soluciones obtenidas que superan un cierto umbral de correlación elegido como aceptable para las altas, medias y bajas frecuencias para cada día analizado. El origen del diagrama indica la posición en el mapa del sensor 1 de la antena al que se referencian las soluciones y las barras se orientan en la dirección y sentido de donde proviene la onda sísmica identificada. Puede verse que el origen de las altas frecuencias, o sea la fuente de los volcano-tectónicos, se halla hacia la bahía Fumarolas, mientras que las bajas frecuencias, o sea los eventos de largo período, tie-

nen su origen principalmente hacia Punta de la Descubierta (ver Fig. 1). La banda de frecuencias medias no presenta una solución única y consistente, tanto en dirección como en velocidad de propagación. En el caso de las altas frecuencias, la velocidad aparente coincide con las esperadas para ondas internas ya que se encuentra alrededor de 4,16 km/s, mientras que para las ondas de largo período, la velocidad varía entre 0,9 y 2 km/s como se espera para ondas superficiales en un suelo muy heterogéneo. Estos resultados concuerdan con aquellos obtenidos en campañas anteriores donde la fuente de las bajas y altas frecuencias no coinciden (Ibáñez *et al.* 2000, Ibáñez *et al.* 2003a). Utilizando la diferencia de tiempo de arribo entre las ondas S y P ($t_s - t_p = 2,08$ s), observada en el registro del evento volcanotectónico del día 05/02 en la estación de tres componentes y una relación $v_p/v_s = 1,7$, que en promedio es válida para la zona (Ibáñez *et al.* 2000), podríamos estimar una distancia hipocentral de aproximadamente 12 kilómetros. La escasa energía del evento y la baja relación señal ruido impiden estudios más detallados.

ACTIVIDAD FUMARÓLICA

El sistema fumarólico de isla Decepción está constituido principalmente por tres zonas anómalas dispuestas alrededor de bahía Puerto Foster (Fig. 1). De todos los campos de fumarolas de la isla, el de bahía Fumarolas, es el que presenta una actividad más intensa (con emanaciones sulfurosas), mientras que los de bahía Balleneros y celda Péndulo son principalmente de vapor de agua. El sistema de bahía Fumarolas está constituido por tres fumarolas localizadas sobre la playa y un conjunto de emisiones sumergidas en el mar que provocan un fuerte burbujeo a unos 30 m de la orilla (véase Fig. 2 en Caselli *et al.* 2004). Si bien las tres fumarolas mencionadas se encuentran alineadas con un rumbo de 330° , si tomamos en cuenta las surgencias submarinas podríamos agruparlas a cada una de ellas en tres diferentes sistemas paralelos, de rumbo 295° , coincidentes estas con la dirección de las emanaciones de cerro Caliente. Las fumarolas que se observan en la playa fueron denominadas F1, F2 y F3. La fumarola

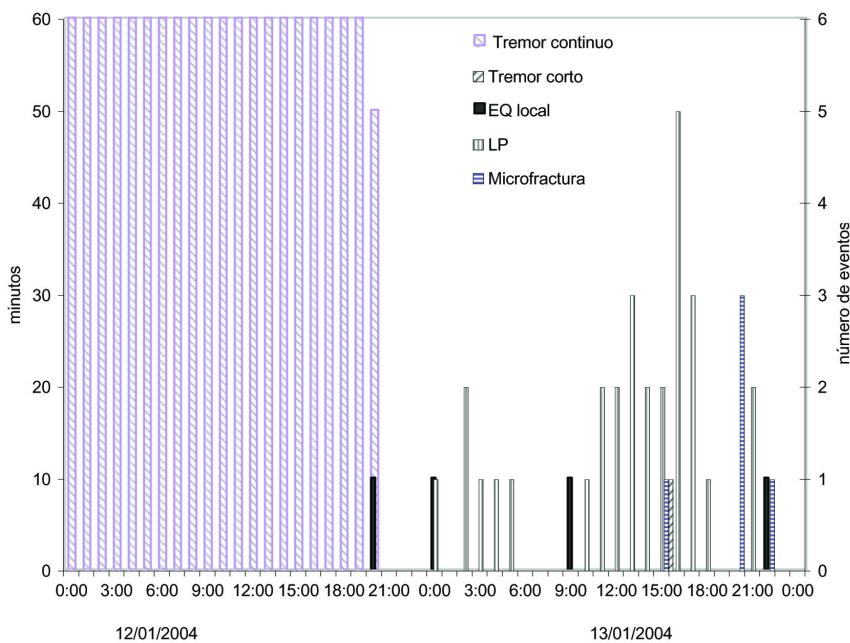


Figura 4: Gráfico que muestra la evolución temporal de eventos sísmicos a lo largo de cincuenta horas de registros, al promediar el mes de enero.

F1 sólo queda expuesta durante las mareas bajas extraordinarias. La fumarola F2 solo es cubierta por el mar durante las mareas altas normales y la F3 permanece siempre fuera del agua. Esta última fumarola, está ubicada prácticamente en la planicie del chorrillo Fumarolas, que trae aguas de deshielo del glaciar situado en la cumbre de monte Stonethrow, cuya agua se insume metros antes de la boca de la fumarola, por obstrucción con las barras costeras.

Una característica a tener en cuenta es la presencia de numerosos acuíferos superficiales y capas saturadas de agua. La alimentación de estos acuíferos ocurre por el ingreso de agua marina y por la fusión de nieve y consecuente percolación de agua dulce a través de los depósitos piroclásticos, estando este último efecto fuertemente influenciado por las condiciones meteorológicas. En particular, para la región de bahía Fumarolas, Inbar (1992) concluyó, al estudiar el régimen hidrológico de las aguas superficiales, que existe una fuerte dependencia de la tasa de fusión del glaciar del monte Stonethrow con la temperatura registrada y especialmente por la fuerte influencia de la radiación solar.

Durante todo el período no se han detectado variaciones apreciables en la temperatura, manteniéndose los habituales 99°C en la boca de salida F3. La composición química de los gases ácidos (CO₂ y H₂S) y el vapor de agua de las emanaciones gaseosas de la fumarola F3, obtenidos durante la campaña de verano 2003-2004, se presentan en el cuadro 1. A partir de estos datos se desprende que después del vapor de agua, el dióxido de carbono es el constituyente más importante, con concentraciones menores de sulfuro de hidrógeno y dióxido de azufre. Del análisis temporal de los gases se observan importantes variaciones en los primeros días del mes de febrero y marzo, coincidentes con el aumento de la actividad sísmica registrada (Fig. 3). Por otro lado, hubo importantes cambios en los depósitos minerales que se generaron en las bocas de las fumarolas (cloruros, azufre y sulfuros de hierro), los cuales estarían vinculados a dicha actividad.

Otro rasgo importante a destacar es la presencia en algunos días (indicados en el cuadro 1) de delgados depósitos de azufre ele-

CUADRO 1: Composición química y temperatura de la fumarola F3 (bahía Fumarolas) durante el período analizado.

Fecha	Temperatura (°C)	%CO ₂	%H ₂ S	%SO ₂	%H ₂ O	S/C	Observaciones
22-01-04	99,00	13,72	0,20	0,00	86,08	0,015	S, piritas
24-01-04	98,50	11,10	0,13	0,00	88,77	0,012	S, piritas
31-01-04	99,50	11,46	0,17	0,00	88,37	0,015	S, piritas
02-02-04	99,20	23,91	0,27	-0,01	75,83	0,011	NaCl, piritas, S
02-02-04	99,20	25,25	0,26	-0,01	74,50	0,010	NaCl, piritas, S
07-02-04	99,90	13,26	0,19	0,01	86,53	0,016	
12-02-04	100,20	10,60	0,14	0,01	89,24	0,015	NaCl, S
02-03-04	99,00	10,94	0,17	0,02	88,86	0,018	
02-03-04	99,00	14,00	0,20	0,03	85,77	0,017	NaCl, piritas, S
05-03-04	99,90	13,69	0,15	0,03	86,13	0,013	
08-03-04	99,10	7,15	0,12	0,04	92,69	0,021	
10-03-04	101,00	12,83	0,25	0,04	86,88	0,023	
16-03-04	100,00	8,76	0,15	0,01	91,08	0,018	

Se indican además los precipitados observados en la boca de la fumarola.

mental, de color amarillo y de cloruro de sodio (NaCl), de color blanco, en un área de hasta 1 m de radio alrededor de la boca de salida de la fumarola F3. El azufre depositado alrededor de la fumarola F3 se observó generalmente a sotavento de los clastos y de las pequeñas ondulaciones alledañas. También en algunos días indicados en la cuadro 1, se hallaron piroclastos recubiertos por una pátina de sulfuro de hierro posiblemente pirita. La presencia de azufre y sulfuro de hierro es coincidente con un aumento de SO₂ en la fase gaseosa, y es interpretado como producto de la reacción entre las especies gaseosas de azufre (Agusto *et al.* 2004). La formación de estos depósitos, disminuyen la proporción de dichos gases (SO₂ y H₂S) en la nube gaseosa medida, por lo cual la anomalía sería más marcada.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las fumarolas de la isla Decepción tienen un fuerte carácter hidrotermal, es decir, son sistemas a bajas presiones y con contenidos mayoritarios de vapor de agua. Como muchos sistemas volcánicos, existe un alto fracturamiento, con significativa anomalía geotérmica localizada a lo largo de dichas fracturas, y que a su vez fueron las que controlaron la intrusión de magma profundo. Martini y Giannini (1988) y Marti y Baraldo (1990) destacaron la continua infiltración de agua marina y dulce, que alimentan acuíferos confinados, además de chorrillos superficiales. Mediante el uso de geotermóme-

tros y utilizando ecuaciones de equilibrio termodinámico de los componentes gaseosos, a partir del estudio en las fumarolas, Martini y Giannini (1988) indicaron que puede ser alcanzada a profundidades de unos pocos kilómetros una temperatura de 600°C. A pesar de que a medida que percola el agua la temperatura aumenta, el agua se mantiene en estado líquido debido también al aumento de la presión. Es razonable asumir que a profundidades de 2 km, la temperatura y presión no serán mayores que la del punto crítico (374°C y 220 bar). En consecuencia, en algunos lugares del acuífero la temperatura y presión estarán cercanas a las de la curva de saturación, y bajo estas condiciones, puede tener lugar una descompresión repentina (súbita?) a temperatura constante. Esto puede dar a lugar a eventos sísmicos de baja frecuencia en épocas o días de mayor deshielo, o sea mayor ingreso de agua al sistema hidrológico.

Del análisis de los gases fumarólicos del período en cuestión, se desprende que existen importantes variaciones en los primeros días del mes de febrero y en los primeros días de marzo (fig. 3). Esta variación en la composición química de las emanaciones gaseosas se correlaciona con el aumento de la actividad sísmica registrada (Fig. 3). Además, hubo importantes cambios en las bocas de las fumarolas, observándose algunos depósitos minerales (cloruros, azufre y sulfuros de hierro), los cuales estarían vinculados a cambios en la composición química de los gases y aumento de la actividad sísmica. Esta relación entre eventos sísmicos y cam-

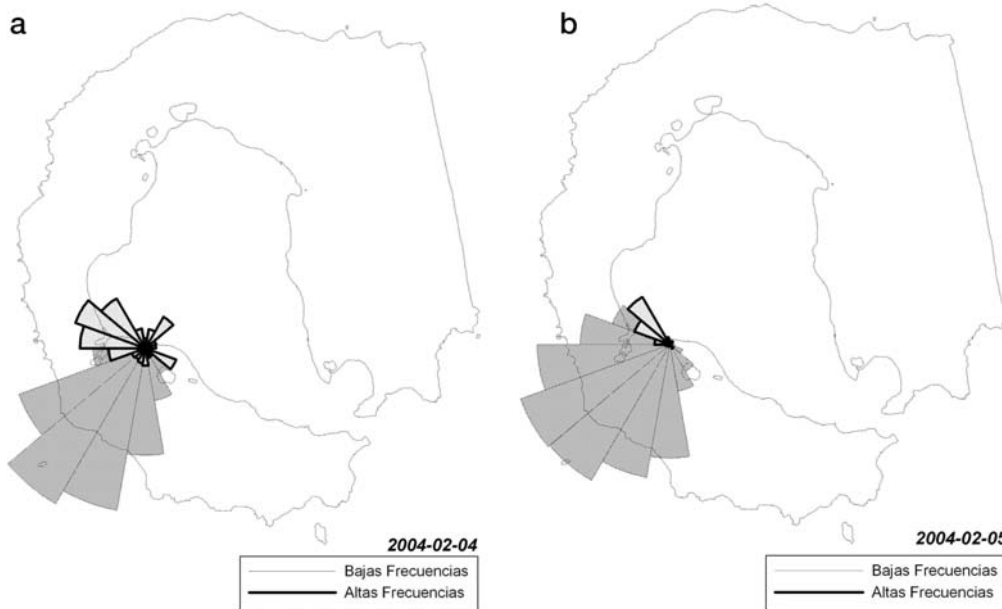


Figura 5: Diagramas de barras polares con las soluciones obtenidas para las altas y bajas frecuencias para los eventos del 4/2/04 (a) y 5/2/04 (b). Las barras se orientan en la dirección y sentido de donde proviene la onda sísmica identificada (*backazimuth*).

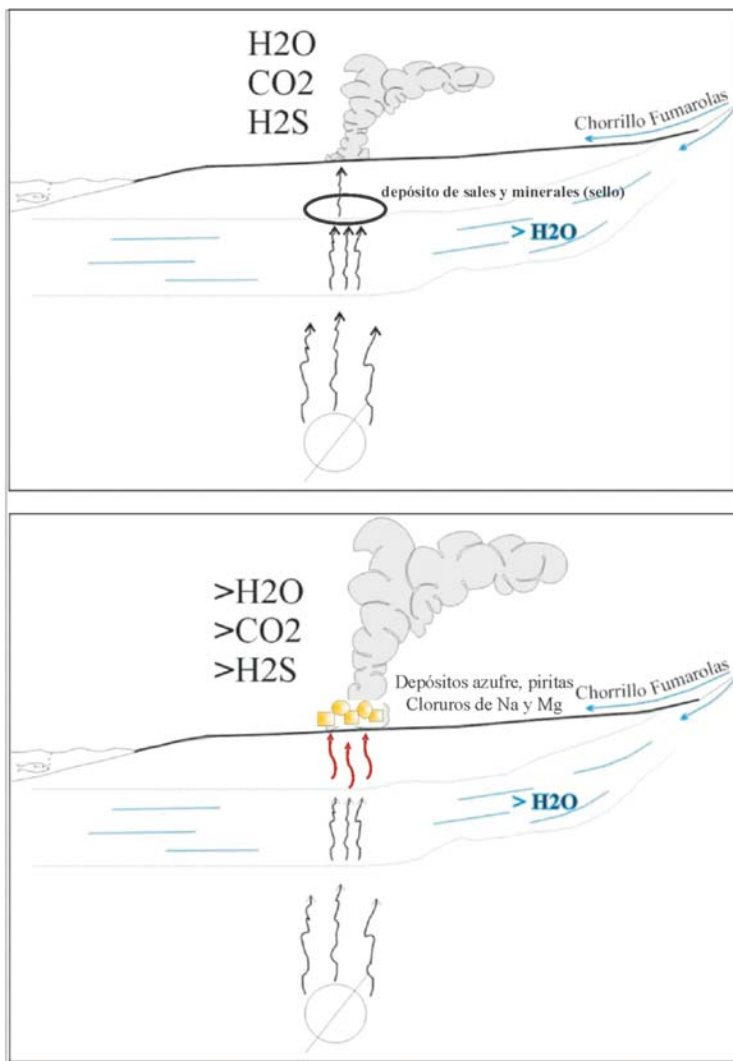


Figura 6: Diagrama esquemático del sistema hidrológico en el campo de fumarolas, indicando zona de sellado.

bios químicos del flujo gaseoso ya fue observado por Fischer *et al.* (1997) en estudios realizados en el volcán Galeras, Colombia, y fue atribuido a un efecto sello de los conductos formados por microfracturas. Es sabido que en estos sistemas, con fuerte carácter hidrotermal, predominan el CO₂ y H₂S. Cuando el sistema es permeable y abierto el flujo de gas magmático es alto y la concentración de gases magmáticos, tales como SO₂ y HCl son elevados. Cuando el sistema es parcialmente sellado y cerrado el flujo declina y se torna más importante en componentes de gas hidrotermal, con proporciones mayores de CO₂ y H₂S liberados. En el sistema fumarólico de la isla Decepción, una posible envoltura en la parte superior del acuífero, con sellamiento parcial de las microfracturas, habría generado los temores volcánicos registrados, por acumulación de presión de fluidos en espacios porales. Al alcanzar cierto umbral de presión, se reabrirían las microfracturas dando lugar a pequeños sismos volcanotectónicos locales. Tras la reapertura de los conductos, disminuiría o cesaría la actividad sísmica, para volver a aumentar en la forma de eventos de largo período, posiblemente producto de la liberación repentina de los gases a superficie. Esta nube gaseosa, cargada de gases magmáticos, en especial HCl y SO₂, en relación a los hidrotermales" (H₂S), dan lugar a los depósitos de azufre, sulfuros de hierro y cloruros de Na y Mg (Fig. 6).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Antártico Argentino por el apoyo brindado para acceder a la zona de trabajo y llevar a cabo las investigaciones. El presente trabajo se realizó mediante el proyecto BID 1728/OC-AR PICT-O 11557 de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Agusto M.R., Caselli A.T. y dos Santos Afonso M. 2004. Manifestaciones de piritas framboidales en fumarolas de Isla Decepción (Shetland Del Sur, Antártida): Implicancias genéticas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59 (1): 152-157.
- Almendros, J., Ibáñez, J.M., Alguacil, G., Del Pezzo E. y Ortiz R., 1997. Array tracking of the volcanic tremor source at Deception Island, Antarctica. *Geophysical Research Letters* 24(23): 3069-3072.
- Almendros, J. 1999. Análisis de señales sismovolcánicas mediante técnicas de array. Tesis doctoral. Instituto Andaluz de Geofísica, Universidad de Granada, 301 p.
- Badi G., Plasencia, M. y Sabbione, N. 1999. Caracterización de la actividad sísmica en Isla Decepción, Shetland del Sur CAV 94/95 y CAV 96/97. Dirección Nacional del Antártico, IAA, Cuartas Jornadas de comunicaciones sobre Investigaciones Antárticas, Actas 2: 428-434, Buenos Aires.
- Caselli, A., Cohen, M. y Villegas, M.T. 1994a. Geoquímica de gases fumarólicos de la isla Decepción. Su evolución e implicancias volcanológicas. Terceras Jornadas de Comunicaciones sobre Investigaciones Científicas Antárticas, Acta 171-174, Buenos Aires.
- Caselli A.T., dos Santos Afonso M. y Agosto M.R. 2004. Gases Fumarólicos de Isla Decepción (Shetland Del Sur, Antártida): Variaciones químicas y depósitos vinculados a la crisis sísmica de 1999. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59(2): 291-302.
- Caselli, A., Risso, C. y Cohen, M. 1994b. Análisis químicos de gases fumarólicos. Metodología empleada en el Observatorio Volcanológico Decepción. Terceras Jornadas de Comunicaciones sobre Investigaciones Científicas Antárticas, Actas 167-170, Buenos Aires.
- Chouet, B. 1996. Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting. *Nature* 380, 309-316.
- Chouet, B. 2003. *Volcano Seismology*. Pure and Applied Geophysics 160: 739-788.
- dos Santos Afonso, M. y Caselli, A.T. 2002. Variaciones en la geoquímica de gases fumarólicos de Isla Decepción (Antártida) vinculadas a intrusiones ígneas someras. 15° Congreso Geológico Argentino (El Calafate), Actas 1: 450-455.
- Fischer T.P., Sturchio, N.C., Stix, J., Arehart, G., Counce D. y Williams, S.N. 1997. The chemical and isotopic composition of fumarolic gases and spring discharges from Galeras Volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 77: 229-253.
- Ibáñez J. M. y Del Pezzo, E. 1999. Seismic Survey of Deception Island December 1999-March 2000. Vesuvius Observatory, Open File Report 4.
- Ibáñez, J.M., Del Pezzo, E., Almendros, J., La Rocca, M., Alguacil, G., Ortiz, R. y García, A. 2000. Seismovolcanic signals at Deception Island volcano, Antarctica: Wave field analysis and source modeling. *Journal Geophysical Research* 105 B(6): 13905-13931.
- Ibáñez, J.M., Almendros, J., Carmona, E., Martínez-Arévalo, C. y Abril, M. 2003a. The recent seismo-volcanic activity at Deception Island volcano. *Deep-Sea Research II*, 50: 1611-1629.
- Ibáñez, J. M., Carmona, E., Almendros, J., Saccorotti, G., Del Pezzo, E., Abril, M. y Ortiz, R. 2003b. The 1998-1999 seismic series at Deception Island volcano, Antarctica. *Journal Volcanology and Geothermal Research* 128: 65-88.
- Inbar, M. 1992. Hydrology and hydraulic geometry in volcanic lithology and antarctic climate. Morphological quantitative study at Deception Island, South Shetland Islands. En López-Martínez, J. (ed.) Simposio de Geología de la Antártida Occidental, Comité Interministerial de Ciencia y Tecnología, 337-346.
- Kéller, R.A., Fisk, M.R., White, W.M. y Birkenmajer, K. 1991. Isotopic and trace element constraints on mixing and melting models of marginal basin formation, Bransfield Strait, Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters* 111: 287-303.
- Marti J. y Baraldo, A. 1990. Precaldera pyroclastic deposits of Deception Island (South Shetland Islands). *Antarctic Science* 2(4): 345-352.
- Martini, M. y Giannini, L. 1988. Deception Island (South Shetlands): an area of active volcanism in Antarctica. *Memoria Sociedad Geológica Italiana* 43: 117-122.
- McNutt, S. R. 2005. *Volcanic Seismology*. *Annual Reviews Earth Planetary Sciences* 32: 461-91. doi: 10.1146/annurev.earth.33.0922.03.122459.
- Ortiz, R., García, A., Aparicio, A., Blanco, I., Felpeo, A., Del Rey, R., Villegas, M.T., Ibáñez, J.M., Morales, J., Del Pezzo, E., Olmedillas, J.C., Astiz, M., Vila, J., Ramos, M., Viramonte, J.G., Risso, C. y Caselli, A. 1997. Monitoring of the Volcanic Activity of Deception Island, South Shetland Islands, Antarctica (1986-1995). *The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes*, 1071-1076.
- Ortiz, R., Valentín, A. y Grimalt, J., 1987. Actividad fumaroliana en Decepción. Estudio preliminar. 2° Simposio Español de Estudios Antárticos, Acta 229-237, Madrid.
- Piccardi, G. y Cellini-Legittimo, P. 1983. A sampling and chemical analysis procedure for fumarolic gases. *Mikrochimica Acta* 2: 159-167.
- Plasencia, M., Badi, G. y Sabbione, N. 1999. Evolución temporal de la actividad sísmica en Isla Decepción, Shetland del Sur CAV 92/93, 94/95 y CAV 96/97. Dirección Nacional del Antártico, IAA, Cuartas Jornadas de comunicaciones sobre Investigaciones Antárticas, Actas 2: 435-440.
- Villegas, M.T. y Caselli, A.T. 1993. Fumarolas de Decepción: evolución a lo largo del verano austral. Modelo de despresurización del acuífero. 5° Simposio de Estudios Antárticos, Actas 1-15, Barcelona.
- Villegas, M.T., Caselli, A.T. y García, A. 1997a. Nuevas aportaciones en el estudio de las variaciones estacionales de los gases volcánicos de la Isla Decepción (Islas Shetland del Sur, Antártida). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural* 93(1-4): 145-153, Madrid.
- Villegas, M.T., Olmedillas, J.C. y Ortiz, R. 1993. Laboratorio portátil de gases volcánicos. 5° Simposio de Estudios Antárticos, Actas 15-28, Barcelona.
- Villegas, M.T., Ortiz, R., Caselli, A. y Cohen, M. 1997b. Chemical variations of fumarolic gases in Deception Island, South Shetland I., Antarctica. En Ricci, C.A. (ed.) *The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes*. Terra Antarctica Publication 1077-1082.

Recibido: 4 de enero, 2007
 Aceptado: 17 de julio, 2007