

Vigilancia volcánica

EMISIÓN DIFUSA DE DIÓXIDO DE CARBONO EN EL VOLCÁN IRAZÚ, COSTA RICA

Inés Galindo^{1*}, Gladys V. Melián¹, José M.L. Salazar¹, Pedro A. Hernández¹, Nemesio M. Pérez¹, Carlos Ramírez², Mario Fernández², Guillermo E. Alvarado³, Hirochika Sumino⁴ & Kenji Notsu⁴

¹ División de Medio Ambiente, Instituto Tecnológico y de Energías Renovables
38611 Granadilla de Abona, S/C de Tenerife, España

² Centro de Investigaciones Geofísicas, 2060 Universidad de Costa Rica

³ Escuela Centroamericana de Geología, 2060 Universidad de Costa Rica,

⁴ Laboratory for Earthquake Chemistry, University of Tokyo, Japón

* Autora para contacto: ines@iter.rcanaria.es

(Recibido 10/03/03; aceptado 12/07/03)

ABSTRACT: The first study of diffuse CO₂ degassing was performed at Irazú volcano in 2001, with the goal to evaluate the origin and spatial distribution of CO₂ efflux as well as the total output of CO₂ to the atmosphere. Most of the study area showed background values of CO₂ efflux, < 20 g m⁻² d⁻¹. The highest value was 316 g m⁻² d⁻¹, which is relatively lower than the observed highest values for other volcanic systems within the same volcano-tectonic framework. The relatively high CO₂ efflux values were located in the NE sector of the main crater and in the northern side of Diego de la Haya crater. Carbon isotopic signatures showed a wide range of δ¹³C-CO₂ values from -65.3 to -19.8 ‰ suggesting a strong biogenic component. The estimated total output of diffuse CO₂ degassing to the atmosphere from the study area was 44 t d⁻¹. The studied fumarolic gases showed that the ³He/⁴He ratio had a characteristic value for volcanoes related with subduction areas (6.6 R_A), and that 90% of the CO₂ emitted comes from calcareous sediments incorporated during the subduction process.

Keywords: Irazú volcano, CO₂, diffuse degassing, calcareous sediments, subduction, isotopes, fumaroles.

RESUMEN: El primer estudio sobre desgasificación difusa de CO₂ en el volcán Irazú se realizó en el 2001, con el objetivo de evaluar el origen y la distribución espacial del flujo difuso de CO₂ así como la tasa de emisión de CO₂ a la atmósfera. La mayor parte del área de estudio presentó valores de fondo para el flujo difuso de CO₂ < 20 g m⁻² d⁻¹. El mayor valor medido fue de 316 g m⁻² d⁻¹, que es relativamente inferior a los mayores valores medidos en otros sistemas volcánicos asentados en el mismo ambiente volcano-tectónico. Los mayores valores de flujo difuso de CO₂ se detectaron en el borde NE del cráter Principal y al N del cráter Diego de La Haya. La firma isotópica del carbono en el CO₂ de la atmósfera del suelo presentó un amplio rango de valores δ¹³C-CO₂, entre -65,3 y -19,8 ‰, que sugiere una importante contribución biogénica. La tasa de emisión difusa de CO₂ para el área de estudio en el Irazú se estimó en 44 t d⁻¹. El estudio de los gases fumarólicos mostró una relación ³He/⁴He característica de volcanes relacionados con zonas de subducción (6,6 R_A), y que el 90% del CO₂ emitido procede de la incorporación de sedimentos calcáreos en el proceso de subducción.

Palabras clave: Volcán Irazú, CO₂, emisión difusa, sedimentos calcáreos, subducción, isótopos, fumarolas.

INTRODUCCIÓN

El volcán Irazú forma parte del frente volcánico-estructural generado por la subducción de la Placa del Coco bajo la Placa Caribe. Con sus 3432 m de altitud, este complejo estratovolcán es el más alto del arco volcánico centroamericano en su tramo costarricense. Está situado en el sureste de la Cordillera Volcánica Central en las coordenadas 9°98' latitud norte, 83°85' longitud oeste, a una distancia de 54 km al noroeste de San José (Fig. 1). Su estructura geológica es bastante compleja, pudiendo observarse actualmente en la cima del edificio volcánico cinco cráteres: Cráter Principal, Diego de La Haya, Playa Hermosa, La Laguna y El Piroclástico, mientras que en su flanco sur se reconocen al menos diez conos adventicios.

La actividad eruptiva del volcán Irazú se conoce desde el año 1723. Desde entonces, varias erupciones de carácter estromboliano o estromboliano-vulcaniano han ocurrido (Murata *et al.*, 1966; Alvarado, 1993). La actividad freática y freatomagmática también ha desempeñado un papel crucial en la historia eruptiva de este volcán. La última erupción del volcán

Irazú ocurrió el 7 de diciembre de 1994, cuando una explosión freática destruyó parte del flanco noroeste del edificio volcánico, justo donde Alvarado (1993) había localizado un área propensa para la formación de un cráter. La misma erupción provocó deslizamientos y flujos de lodo que alcanzaron varios kilómetros de distancia y modificaron la morfología de la ladera (Mora *et al.*, 1996). La actividad fumarólica ha sido también una constante en el volcán, siendo este tipo de actividad la que presenta el Irazú en la actualidad.

La sismicidad registrada en el área del Irazú se caracteriza por la presencia de enjambres, descritos en dos ocasiones (1982 y 1991) y que se atribuyen a una desestabilización del sistema tectónico e hidrotermal, provocado por temblores regionales mayores (Barquero *et al.*, 1995; Fernández *et al.*, 1998).

Los productos eruptivos expulsados por el volcán Irazú son basaltos, andesitas basálticas y andesitas (Alvarado, 1993). Los magmas que originan estos productos volcánicos son ricos en CO₂, una de las primeras especies gaseosas que escapa de los magmas debido a su baja solubilidad en fundidos silicatados en condiciones de presión baja a moderada (Gerlach & Graeber, 1985; Stolper & Holloway, 1988). Estudios recientes sobre la emisión difusa de CO₂ han probado la utilidad de sus resultados para contribuir al conocimiento de los sistemas volcánicos (p.ej.: Allard *et al.*, 1991; Chiodini *et al.*, 1996; Hernández *et al.*, 2001; Rogie *et al.*, 2001; Salazar *et al.*, 2001). Cambios significativos en la tasa de emisión de CO₂ a la atmósfera en forma difusa se han relacionado con la actividad volcánica (Hernández *et al.*, 2001; Cartagena *et al.*, 2002; Galindo *et al.*, 2002) y sísmica (Salazar *et al.*, 2002) de sistemas volcánicos.

El objetivo de este trabajo sobre emisión difusa de CO₂ en el volcán Irazú, es el de evaluar su origen, conocer su modelo de distribución espacial en el momento actual de su ciclo eruptivo, e impulsar la vigilancia de la desgasificación difusa de CO₂ como una herramienta geoquímica útil para mejorar y optimizar la vigilancia volcánica del Irazú.

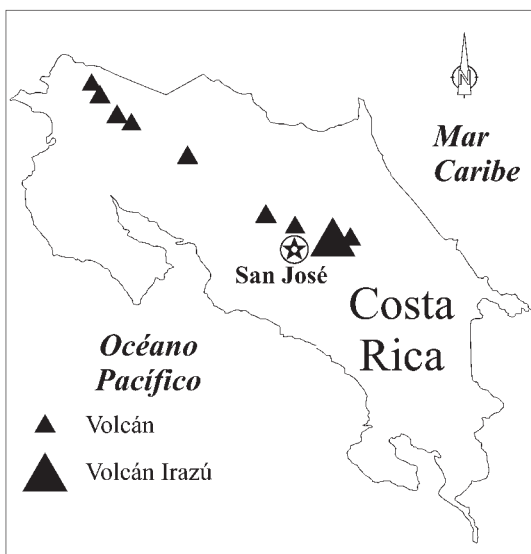


Fig. 1: Localización del volcán Irazú.

Metodología

Este primer estudio de desgasificación difusa de CO₂ en el volcán Irazú se materializó en la cima de este sistema volcánico cubriendo un área de 3,5 km², entre los días 14 de febrero y 7 de marzo del 2001. La selección de los 201 puntos de observación en los que se realizaron medidas *in situ* y tomas de muestras de gases del suelo se hizo en función de las características geológicas, estructurales y de accesibilidad del área de estudio.

Las medidas de flujo difuso de CO₂ fueron realizadas *in situ*, de acuerdo con el método de la cámara de acumulación (Chiodini *et al.*, 1996). Se empleó un espectrofotómetro infrarrojo no dispersivo portátil modelo LICOR-800 conectado a una cámara de acumulación diseñada por WEST SYSTEM y un ordenador portátil de bolsillo. La reproducibilidad de la medida de flujo difuso de CO₂ para un rango de 10-35 000 g m⁻² d⁻¹ fue estimada en ± 10 %. Los valores obtenidos fueron corregidos posteriormente teniendo en cuenta la presión y temperatura ambiente en cada punto de medida. El mapa de contorno de la distribución espacial del flujo difuso de CO₂ se realizó mediante el uso del programa SURFER 7.0 y utilizando el método de interpolación Kriging con un variograma lineal experimental (Cressie, 1990).

En cada punto se procedió a la toma de muestras de gas en la atmósfera del suelo con la finalidad de caracterizar la composición química e isotópica de las emanaciones difusas de CO₂. La extracción del gas del ambiente superficial del suelo se realizó mediante la inserción de una sonda metálica a 30-40 cm de profundidad y el uso de una jeringuilla hipodérmica de 20 cc. Las muestras de gas extraídas del suelo se almacenaron en tubos de vidrio evacuados de 10 cc de capacidad (Hinkle & Kilburn, 1979). El análisis químico de las muestras se realizó mediante el empleo de un sistema de microcromatografía de gases, modelo VARIAN 2002P. Para determinar el contenido de CO₂ se empleó una columna de tipo Poraplot Q de 10 m a T = 40° C utilizando helio (99,999 %) como gas portador. En el caso del análisis de O₂ se empleó una columna de tipo

Molsieve 5A de alta resolución de 20 m a T = 60° C utilizando argón (99,999 %) como gas portador. El tiempo de inyección fue de 10 ms para los dos gases, manteniendo los inyectores una temperatura constante de 40° C. El análisis isotópico de carbono en el CO₂ existente en las muestras de gas del suelo se realizó mediante un espectrómetro de masas convencional (Finnigan Mat, Delta S) tras efectuar la separación del CO₂ del resto de componentes químicos. Las relaciones isotópicas ¹³C/¹⁴C obtenidas fueron calibradas con un estándar internacional de carbonato PDB. El error de las medidas se estimó en ± 0,1 ‰ (1σ).

Con la finalidad de caracterizar la composición química e isotópica de los gases emitidos por la actividad fumarólica del Irazú, se procedió a la toma de una muestra de gas mediante el uso de una botella de vidrio adulterado con plomo para reducir la difusión del helio. La relación ⁴He/²⁰Ne se determinó mediante un espectrómetro de masas cuadrupolar (QMG 112, Balzers) usando aire atmosférico como estándar. El error de la medida se estimó en ± 10 %. Las relaciones ³He/⁴He se determinaron con un espectrómetro de masas de alta precisión (VG5400, VG Isotopes) con un error R/R_A estimado en ± 1%. Los análisis isotópicos de helio se realizaron según las condiciones descritas por Sano & Wakita (1985) utilizando como estándar helio atmosférico. Todos los análisis isotópicos se realizaron en el Laboratorio para Química de Terremotos de la Universidad de Tokio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este estudio se realizó durante la estación seca y bajo condiciones de vientos suaves, con el fin de minimizar las perturbaciones en la atmósfera del suelo debidas a cambios meteorológicos que pudieran afectar a las medidas de flujo difuso de CO₂ (Reimer, 1980; Hinkle, 1994). Se realizaron un total de 201 medidas de flujo difuso y concentración de CO₂ en el ambiente superficial del Irazú. La concentración de CO₂ máxima observada en el gas del suelo del área de estudio fue aproximadamente de un 1 %, siendo el valor promedio de las medidas de un 0,1 %. Estas

concentraciones de CO_2 en el gas del suelo no son muy altas si tenemos en cuenta las observadas para otros volcanes situados en el mismo ambiente volcánico-tectónico (Cuadro 1). El máximo valor obtenido fue de $316 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, con un valor promedio de $9 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y una mediana de $3 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Este valor máximo de flujo difuso de CO_2 es de un orden de magnitud inferior a los detectados en el volcán Poás (Melián *et al.*, 2001) y dos órdenes de magnitud inferior a los observados para los sistemas volcánicos de Miravalles (Melián *et al.*, en este volumen), Masaya (Pérez *et al.*, 2000) y Cerro Negro (Salazar *et al.*, 2001). El análisis estadístico-gráfico (Sinclair, 1974) de la totalidad de los datos medidos en el volcán Irazú refleja una distribución bimodal representada por dos poblaciones geoquímicas diferenciadas: población de fondo y población anómala. La población de fondo está representada por un 93 % del total de datos y refleja una media geométrica de $3 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, mientras que a la población anómala corresponde el 7 % de los valores obtenidos y muestra una media geométrica de $28 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Si comparamos esta media geométrica de la población pico con los $70 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ del Poás, los $1158 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ del Miravalles y los $7000 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ del Masaya, observamos que existe la misma tendencia creciente que cuando comparamos los valores máximos de flujo difuso de CO_2 para dichos sistemas volcánicos. Si asumimos que la existencia de una población geoquímica anómala de flujo difuso de CO_2 sugiere que, además del CO_2 procedente de la degradación de la materia orgánica y de la respiración de las raíz-

ces en el ambiente superficial del suelo, existe algún otro proceso o fuente que contribuye a la aportación de CO_2 en forma difusa a la atmósfera, podemos concluir que este incremento no está relacionado con la mayor o menor abundancia de vegetación, ya que esta emisión biogénica estaría representada por la población de fondo.

La distribución espacial del flujo difuso de CO_2 en el volcán Irazú (Fig. 2) refleja que la mayor parte del área de estudio presenta valores relativamente bajos, inferiores a los $20 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (población de fondo). Los valores relativamente altos (población anómala) se encuentran localizados en el borde NE del cráter Principal y en el flanco N del cráter Diego de La Haya. Estas

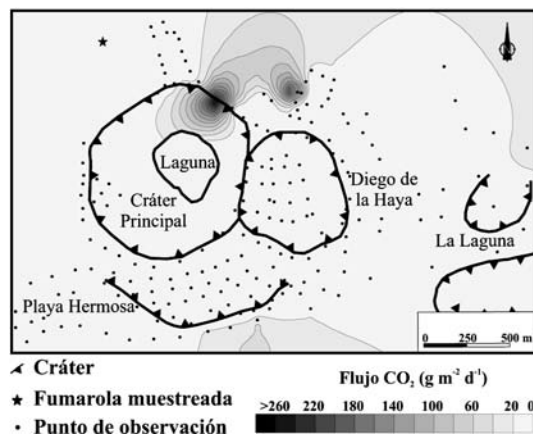


Fig. 2: Distribución espacial en superficie de las anomalías de flujo difuso de CO_2 ($\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) en el volcán Irazú, 2001.

Cuadro 1

Valores de concentración (%) y flujo difuso de CO_2 ($\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) obtenidos en diversos volcanes del Arco Volcánico Centroamericano

Volcán	CO_2 (%)			ϕCO_2 ($\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)			Referencias
	Máx.	Mín.	Med.	Máx.	Mín.	Med.	
Irazú (CR)	1,1	0,01	0,06	316	< 0,5	3	Galindo <i>et al.</i> (2001)
Poás (CR)	53,9	0,02	0,04	2247	< 0,5	7	Melián <i>et al.</i> (2001)
Miravalles (CR)	57,6	0,03	0,61	24153	< 0,5	4	Melián <i>et al.</i> (este vol.)
Masaya (NI)	20,3	0,03	0,23	94000	< 0,5	12	Pérez <i>et al.</i> (2000)
Cerro Negro (NI)	75,5	0,05	0,22	5000	< 0,5	429	Salazar <i>et al.</i> (2001)

CR = Costa Rica NI = Nicaragua

anomalías no pueden atribuirse a una emisión difusa de CO_2 de origen exclusivamente biogénico, ya que la vegetación está presente en gran parte del área de estudio, sin que exista relación directa entre los valores altos y la abundancia de vegetación. Por consiguiente, no podemos descartar completamente la contribución de origen profundo de una pequeña parte de estas emisiones difusas de CO_2 , ya que además fue en el flanco norte del volcán donde ocurrió la última explosión freática (Mora *et al.*, 1996) y donde se concentra la actividad fumarólica del sistema volcánico del Irazú. La emisión total de CO_2 a la atmósfera en forma difusa a través del área cratérica del volcán Irazú se estimó considerando el volumen positivo encerrado entre la superficie del área de estudio y la superficie definida por los valores de flujo de dióxido de carbono representados en un diagrama tridimensional, obteniéndose una estimación de 44 t d^{-1} de dióxido de carbono. Si comparamos el flujo total de CO_2 emitido por este volcán con las 139 t d^{-1} estimadas el mismo año para un área similar en el volcán Poás (Me-lián *et al.*, 2001), se observa que la emisión difusa total de CO_2 en el Irazú es inferior a la estimada para el Poás. Dado que ambos sistemas volcánicos se encuadran dentro de un ambiente volcano-tectónico similar, se podría indicar que esta diferencia pudiera estar relacionada con el distinto grado de actividad volcánica existente entre ambos edificios en el momento del estudio.

Con la finalidad de evaluar el origen del CO_2 en las emanaciones difusas del volcán Irazú, se procedió a la construcción de un diagrama binario entre las concentraciones de CO_2 y O_2 en la atmósfera del suelo (Fig. 3). Sobre el mismo se representaron tres reservorios geoquímicos caracterizados por la siguiente composición química: gas magmático ($\text{CO}_2 = 100 \%$ y $\text{O}_2 = 0 \%$), aire atmosférico ($\text{CO}_2 = 0,03 \%$ y $\text{O}_2 = 20,95 \%$) y gas biogénico. Los límites de este último reservorio se seleccionaron teniendo en cuenta el rango de concentraciones de CO_2 correspondiente al 16 y 84 percentil de la población de fondo ($354 < \text{CO}_2 < 472 \text{ ppmV}$). El diagrama geoquímico resultante refleja que el CO_2 en la atmósfera del suelo del volcán Irazú se debe a un proceso de mezcla entre los reservorios geoquímicos superficiales de

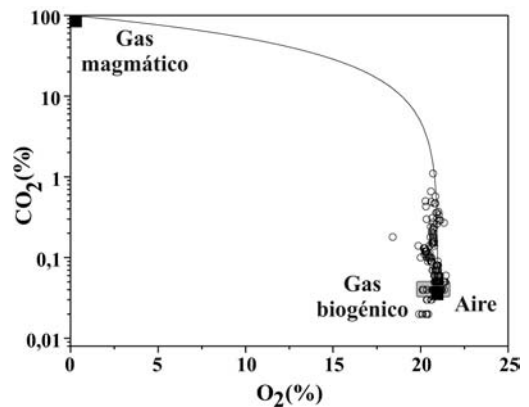


Fig. 3: Diagrama de correlación entre las concentraciones de CO_2 (%) y O_2 (%). La línea representa la línea de mezcla entre los reservorios de gas volcánico y aire.

CO_2 , aire y gas biogénico, y un CO_2 de origen profundo, magmático, aun cuando este último se encuentra en una pequeña proporción.

Los análisis isotópicos de carbono en el CO_2 de la atmósfera del suelo se realizaron con el fin de obtener información más detallada acerca del origen del CO_2 . Los valores obtenidos de $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ varían entre $-65,3$ y $-19,8 \%$ (Cuadro 2). Estos datos son mucho más negativos que los valores de $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ definidos para los gases volcánicos y que se encuentran entre -4 y -8% (Craig, 1953), mostrando una firma isotópica de carbono muy ligera, que sugiere un origen principalmente biogénico para el CO_2 . La construcción del diagrama de correlación entre el contenido de CO_2 (ppmV) en la atmósfera del suelo y sus valores de $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ (‰), proporciona la posibilidad de separar gráficamente los tres reservorios geoquímicos anteriormente descritos, permitiéndonos realizar una mejor discusión sobre el origen del CO_2 en las emanaciones difusas del Irazú (Fig. 4). En este nuevo diagrama se representan los tres reservorios geoquímicos caracterizados por una composición química e isotópica diferente: aire atmosférico ($\text{CO}_2 = 355 \text{ ppmV}$, $\delta^{13}\text{C-CO}_2 = -8 \%$), gas magmático ($\text{CO}_2 = 100 \%$, $\delta^{13}\text{C-CO}_2 = -6 \%$) y gas biogénico ($354 < \text{CO}_2 < 472 \text{ ppmV}$ y $-34 < \delta^{13}\text{C-CO}_2 < -27 \%$), así como la caracterización geoquímica de los gases fumarólicos del volcán Irazú. Según este diagrama de correlación, la mayor parte de las

Cuadro 2

Valores observados de $\delta^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$ y valores de flujo difuso de CO_2 , y concentración de CO_2 y O_2 de las muestras seleccionadas para análisis isotópicos de carbono procedentes del gas del suelo del volcán Irazú

Muestra	$\phi \text{ CO}_2$ ($\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	$\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ (‰ vs. PDB)	CO_2 (ppmV)	O_2 (%)
1	3	-27,0	379,6	19,9
13	2	-31,2	450,9	21,1
18	1	-30,5	499,1	21,5
23	4	-44,4	415,3	21,3
27	2	-30,5	425,2	21,3
31	5	-30,2	552,6	21,5
36	42	-19,8	472,6	21,5
39	20	-29,7	10961,5	21,7
48	18	-22,7	575,3	21,8
52	17	-31,4	612,3	21,9
57	4	-20,6	404,7	22,4
69	1	-31,6	448,7	22,1
76	4	-33,0	345,5	22,2
79	2	-27,4	419,7	22,3
83	2	-32,2	472,2	22,2
87	4	-30,7	364,6	22,5
93	5	-34,3	372,9	22,3
97	4	-29,9	3654,5	22,6
103	6	-22,6	239,3	22,4
111	1	-29,2	1773,5	22,8
117	2	-31,0	1115,5	23,0
125	1	-33,4	379,0	23,0
129	4	-31,5	1636,3	22,5
133	1	-25,8	223,8	22,7
138	1	-31,5	4928,9	22,5
143	6	-22,8	1785,3	22,6
148	5	-27,9	815,2	22,6
155	7	-65,3	2667,0	23,1
160	10	-38,2	1626,4	23,3
167	25	-26,3	2424,2	23,4
169	19	-26,0	940,0	23,4
174	3	-33,3	851,2	20,8
179	36	-23,8	423,9	21,3
183	17	-32,7	755,6	20,9
188	6	-30,5	3104,4	20,3
193	9	-21,3	1513,4	20,6
196	6	-23,8	815,8	20,7
200	13	-28,7	379,6	19,9

muestras de gas de la atmósfera del suelo del volcán Irazú se localizan en torno al reservorio del gas biogénico, aunque existe una pequeña dispersión hacia la línea de mezcla entre el gas biogénico y el magmático. Este análisis geoquímico-gráfico refleja que las emanaciones difusas de CO_2 en la cima del volcán Irazú son principalmente de origen biogénico pero

responden en menor medida a un proceso de mezcla con CO_2 de origen profundo.

Con la finalidad de caracterizar el origen del CO_2 emitido por la actividad fumarólica, se determinó la relación isotópica de helio y carbono para una de las fumarolas del flanco noroeste del cráter principal, situada en el área donde ocurrió la explosión freática el 7 de diciembre de

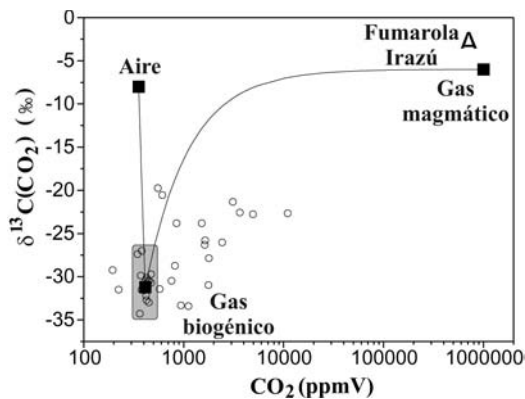


Fig. 4: Diagrama de correlación entre los valores de $\delta^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$ (‰) y de concentración de CO_2 (ppmV). Las líneas representan la mezcla entre los reservorios de gas atmosférico y gas del suelo y entre el reservorio de gas del suelo y el de gas magmático.

1994 (Fig. 2). Los resultados reflejaron una relación isotópica $^3\text{He}/^4\text{He}$ de $6,6 R_A$, siendo R_A la relación $^3\text{He}/^4\text{He}$ en el aire atmosférico estimada en $1,4 \times 10^{-6}$. Estos niveles de emisión de helio-3 son similares a los observados para otros volcanes asociados a procesos de subducción (p.ej.: Torgersen *et al.*, 1982; Sano *et al.*, 1984; Sano & Wakita, 1985; Poreda & Craig, 1989; Snyder, 2001). La concentración de CO_2 en el gas emitido por la fumarola fue de un 75% y se caracterizó por una relación isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ con un valor de $-2,16$ ‰ para el $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ y una relación molar $\text{CO}_2/^3\text{He}$ de $4,1 \times 10^{10}$. Combinando la sistemática de los isótopos de helio y carbono según describen Sano *et al.* (1985) se puede estimar que un 90% del CO_2 emitido por la actividad fumarólica del Irazú procede de los sedimentos calcáreos que se incorporan en el proceso de subducción, un 6% tiene un origen orgánico y el 4% restante tiene origen mantélico.

CONCLUSIONES

La distribución espacial en superficie de la emisión difusa de CO_2 en el volcán Irazú muestra que más del 90% de la zona de estudio está dominada por valores de flujo difuso de CO_2 inferiores a los $20 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, mientras que las

anomalías son muy puntuales y están localizadas en el flanco norte del volcán, donde se llegaron a medir flujos superiores a los $300 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. El estudio de varios parámetros geoquímicos ha permitido estimar el origen del CO_2 emitido en forma difusa a través del suelo del volcán Irazú, concluyendo que este CO_2 procede principalmente de un reservorio biogénico, existiendo un bajo porcentaje de mezcla con gas de origen profundo. El análisis del gas fumarólico muestra un origen profundo, y el CO_2 provendría principalmente del proceso de asimilación magmática de carbonatos marinos que tiene lugar en la zona de subducción. La emisión difusa total de CO_2 estimada para el área de estudio en el Irazú fue de 44 toneladas diarias, estimación que puede utilizarse como referencia para la vigilancia volcánica de este volcán. Este estudio contribuye al desarrollo del monitoreo geoquímico del volcán Irazú, siendo necesarios nuevos estudios para mejorar esta primera aproximación al conocimiento de la emisión difusa de CO_2 en este sistema volcánico.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a los guardaparques del Parque Nacional Volcán Irazú su hospitalidad, colaboración y apoyo logístico, especialmente a Katherine, Mauricio y a los integrantes de la asociación "Amigos del Volcán Irazú" por su asistencia en el trabajo de campo. Agradecemos también la colaboración de los integrantes del Laboratorio de Química de Terremotos de la Universidad de Tokio por su asistencia en el análisis isotópico de las muestras. Este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración del Cabildo Insular de Tenerife y Caja Canarias.

REFERENCIAS

- ALLARD, P., CARBONELLE, J., DAJLEVIC, D., LE BRONEC, J., MOREL, P., ROBE, M.C., MAURENAS, J.M., FAIVRE-PIERRET, R., MARTÍN, D., SABBROUX, J.C. & ZETTWOOG, P., 1991: Eruptive and diffuse emissions of CO_2 from Mount Etna. - *Nature*, 351: 387-391.

- ALVARADO, G.E., 1993: Volcanology and Petrology of Irazú Volcano. - 261 págs.. Christian-Alberchts-Universität zu Kiel [Tesis doctoral].
- BARQUERO, R., LESAGE, P., METAXIAN, J.P., CREUSOT, A. & FERNÁNDEZ, M., 1995: La crisis sísmica en el volcán Irazú en 1991 (Costa Rica). - *Rev. Geol. Amér. Central*, 18: 5-18.
- CARTAGENA, R., PÉREZ, N., SALAZAR, J.M.L., OLMOS, R., BARAHONA, F., SORIANO, T., PADRÓN, E., LIMA, R.N., MELIÁN, G., HERNÁNDEZ, P.A. & LÓPEZ, D., 2002: Precursory diffuse CO₂ emission signature of the January 2002 short-term unrest at San Miguel volcano, El Salvador, Central America. - [res.] AGU Fall Meeting, San Francisco. EOS, Transactions, AGU, 83 (47): F1490.
- CHIODINI, G., FRONDI, F. & RACO, B., 1996: Diffuse emission of CO₂ from the Fossa crater, Vulcano Island (Italy). - *Bull. Volcanol.* 58: 41-50.
- CRAIG, H., 1953: The geochemistry of the stable carbon isotopes. - *Geochem. J.* 27: 229-240.
- CRESSIE, N.A.C., 1990: The origins of Krigging. - *Math. Geol.* 22: 23.
- FERNÁNDEZ, M., MORA, M. & BARQUERO, R., 1998: Los procesos sísmicos en el volcán Irazú (Costa Rica). - *Rev. Geol. Amér. Central*, 21: 47-59.
- GALINDO, I., MELIÁN, G., SALAZAR, J., HERNÁNDEZ, P., PÉREZ, N., & STRAUCH, W., 2002: Spatial and temporal variations of diffuse carbon dioxide emission from Cerro Negro volcano, Nicaragua, Central America. - [res.] AGU Fall Meeting, San Francisco. EOS, Transactions, AGU, 81 (48): F1318.
- GERLACH, T.M.J., & GRAEBER, E.J., 1985: Volatile budget of Kilauea volcano. - *Nature*, 313: 273-277.
- HERNÁNDEZ, P.A., NOTSU, K., SALAZAR, J.M., MORI, T., NATALE, G., OKADA, H., VIRGILI, G., SHIMOIKE, Y., SATO, M. & PÉREZ, N. M., 2001: Carbon dioxide degassing by advective flow from Usu volcano, Japan. - *Science*, 292: 83-86.
- HINKLE, M.E. & KILBURN, J.E., 1979: The use of vacutainers tubes for collection of soil gas samples for helium analysis. - *U. S. Geol. Surv. Open-File Rep.* 79: 1441.
- HINKLE, M.E., 1994: Environmental conditions affecting concentrations of He, CO₂, O₂ and N₂ in soil gases. - *Appl. Geochem.* 9: 53-63.
- MELIÁN, G., GALINDO, I., SALAZAR, J.M.L., HERNÁNDEZ, P.A., PÉREZ, N.M., RAMÍREZ, C., FERNÁNDEZ, M., & NOTSU, K., 2001: Spatial and secular variations of diffuse CO₂ degassing from Poás volcano, Costa Rica, Central America. - [res.] AGU Fall Meeting, San Francisco. EOS, Transactions, AGU, 82 (47): F1332.
- MELIÁN, G., PÉREZ, N.M., HERNÁNDEZ, P.A., SALAZAR, J.M.L., YOCK, A., SÁNCHEZ, E., ALVARADO, G.E., SUMINO, H. & NOTSU, K., 2004: Emisión difusa de dióxido de carbono y vapor de mercurio en el volcán Miravalles, Costa Rica. *Rev. Geol. Amér. Central* (este volumen).
- MORA, M., ASH, C., OCONITRILLO, G. & SALAZAR, L. G., 1996: Amenaza y vulnerabilidad en el flanco norte del volcán Irazú: Explosión diciembre de 1994, un caso específico. - [res.] IV Simposio Latinoamericano sobre riesgos geológicos en áreas urbanas, San José, Costa Rica, pág. 58.
- MURATA, K.J., DÓNDOLI, C. & SÁENZ, R., 1966: The 1963-1965 Eruption of Irazú Volcano, Costa Rica (The period of March 1963 to October 1964). - *Bull. Volcanol.* 29: 765-796.
- PÉREZ, N.M., MELIÁN, G., SALAZAR, J.M.L., SABELLOS, A., ÁLVAREZ, J., SEGURA, F., HERNÁNDEZ, P.A. & NOTSU, K., 2000: Diffuse degassing of CO₂ from Masaya caldera, Nicaragua, Central America. - [res.] AGU Fall Meeting, San Francisco. EOS, Transactions, AGU, 81 (48): F1318.
- POREDA, R. & CRAIG, H., 1989: Helium isotope ratios in Circum-Pacific volcanic arcs. - *Nature*, 338: 473-478.
- REIMER, G. M. (1980). Use of soil-gas helium concentrations for earthquake prediction: limitations imposed by diurnal variations. - *J. Geophys. Res.* 85B: 3107-3114.
- ROGIE, J., KERRICK, D., SOREY, M., CHIODINI, G. & GALLOWAY, D., 2001: Dynamics of carbon dioxide emission at Mammoth Mountain, California. - *Earth Planet. Sci. Lett.* 188: 535-541.
- SALAZAR, J.M.L., HERNÁNDEZ, P.A., PÉREZ, N.M., MELIÁN, G., ÁLVAREZ, J., SEGURA, F., & NOTSU, K., 2001: Diffuse emission of carbon dioxide from Cerro Negro volcano, Nicaragua, Central America. - *Geophys. Res. Lett.* 28(22): 4275-4278.
- SALAZAR, J.M.L., PÉREZ, N.M., HERNÁNDEZ, P.A., SORIANO, T., BARAHONA, F., OLMOS, R., CARTAGENA, R., LÓPEZ, D.L., LIMA, R.N., MELIÁN, G., GALINDO, I., PADRÓN, E.,

- SUMINO, H., & NOTSU, K., 2002: Precursory diffuse carbon dioxide degassing signature related to a 5.1 magnitude earthquake in El Salvador, Central America. - *Earth Planet. Sci. Lett.* 205: 81-89.
- SANO, Y., NAKAMURA, Y., WAKITA, H., URABE, A. & TOMINAGA, T., 1984: Helium-3 emission related to volcanic activity. - *Science*, 224: 150-151.
- SANO, Y., URABE, A., WAKITA, H., CHIBA, H. & SAKAI, H., 1985: Chemical and isotopic compositions of gases in geothermal fluids in Iceland. - *Geochem. J.* 19: 135-148.
- SANO, Y. & WAKITA, H., 1985: Geographical distribution of $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in Japan: implications for arc tectonics and incipient magmatism. - *J. Geophys. Res.* 90: 8724-8741.
- SINCLAIR, A.J., 1974: Selection of thresholds in geochemical data using probability graphs. - *J. Geochem. Exploration*, 3: 129-149.
- SNYDER, G., POREDA, R., HUNT, A. & FEHN, U., 2001: Regional variations in volatile composition: isotopic evidence for carbonate recycling in the Central American Volcanic Arc. - *Geochem. Geophys. Geosystems*, 2, paper 2001GC000163.
- STOLPER, E. & HOLLOWAY, J.R., 1988: Experimental determination of the solubility of carbon dioxide in molten basalt at low pressure. - *Earth Planet. Sci. Lett.* 8: 397-408.
- TORGERSEN, T., LUPTON, J.E., SHEPPARD, D.S. & GIGGENBACH, W.F., 1982: Helium isotope variations in the thermal areas of New Zealand, - *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 12: 283-298.