000088

icelec

UEN: PROYECTOS Y SERVICIOS ASOCIADOS

Centro de Servicio Exploración Subterránea
Área de Amenaza y Auscultación Sismovolcánica

Boletín del

OSIVAM

Año 12, Nº 23-24, San José, Costa Rica

Publicado en diciembre de 2000

ISSN 1015-4396

Instituto Costarricense de Electricidad
UEN Proyectos y Servicios Asociados

Centro de Servicios Exploración Subterránea
Área de Amenazas y Auscultación Sismo-volcánica

Boletín del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles

OSIVAM

Editores:
Ivonne Arroyo H.
Luis A. Madrigal S.
Guillermo E. Alvarado I.

Año 12, Nº 23-24 **San José, Costa Rica**

Impreso en los Talleres de Publicaciones del ICE
Diciembre de 2000

ISSN 1015-4396

Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal Y Miravalles (OSIVAM)

Apdo. 10032-1000 San José, Costa Rica
Telephones: (506) 695-6522, 220-7741
Fax: (506) 220-5193, 220-8212
E-mail: gainduni@cariari.ucr.ac.cr
igarroyo@cariari.ucr.ac.cr
IBoschini@icelec.ice.go.cr

The Observatorio Sismológico y Vulcanológico Arenal y Miravalles (OSIVAM), belongs to the Área de Amenazas y Auscultación Sismo-volcánica of Instituto Costarricense de Electricidad (ICE, Costa Rica), and is member of the World Organization of Volcano Observatories (WOVO).

Formerly, in 1988 it was named Observatorio Vulcanológico del Arenal (OVA), since then dedicated mainly to Arenal Volcano observation, besides other monitoring tasks. Nevertheless, due to the installation of a new geothermal plant located at the foot of Miravalles Volcano, which started production in 1994, ICE advocated to a continuous seismological and volcanological monitoring of this volcano and the geothermal field as well. Since then, and also because of the link between these two new seismological subnetworks around Arenal and Miravalles, OVA became OSIVAM. Today, detailed research is also being carried out by OSIVAM at Rincón de la Vieja Volcano, site of a new geothermal project.

Professional staff of OSIVAM and related tasks:

Guillermo E. Alvarado	Petrology, neotectonics and volcanology
Waldo Taylor	Geology, seismology
Rafael Barquero	Seismo-tectonics
Ileana Boschini	Seismology and tectonics
Alvaro Climent	Seismic Engineering
Ivonne Arroyo	Seismology, neotectonics
José Miguel Barrantes	Electronics
Hannia Cubillo	Geodesy, topography
José F. Cerdas	Geodesy, topography
José F. Fernández	Chemistry

Tecnical and auxiliary staff

Dagoberto Boniche
Marco T. Naranjo
Guido Calvo
Francisco Arias
Luis Madrigal

Arenal, Miravalles and Rincón de la Vieja volcanoes

Arenal Volcano is located at the northern part of Costa Rica, halfway between Guanacaste and Central Volcanic ranges. The height of the volcano is 1.6 km above sea level and 1.1 km above

the surrounding area. Being at least a 7.000-year old volcano, its current volcanic activity has been continuous since July 1968 and is characterized by strombolian explosions, lava and pyroclastic flows, gas ejection, fumarolic activity and a permanent lava pool since 1974; sometimes there are small volcano-tectonic swarms. Since 1974 there has been continuous recording of seismic and visual data.

Miravalles Volcano is located at the Guanacaste Volcanic Range. The complex volcano edifice lies over a series of old stratovolcanoes built through the past 2 million years, with a height of ~2 km above sea level at the site of Guayabo Caldera, where the main ignimbrite events had taken place 1.5 and 0.6 million years ago. Even it has not been active during the last three centuries, it seems that it have had Holocene activity. A geothermal power plant is operating at the southwestern foot of the volcano since 1994 (144 MW).

Rincón de la Vieja Volcano is located at the Guanacaste Volcanic Range, with a summit height of ~1.9 km above sea level. It is a huge active complex stratovolcano whose current activity consists of sporadic phreatic and phreatomagmatic eruptions, explosions with ash plumes, laharic episodes and fumaroles. At present, geothermal potential of this volcano is being investigated by ICE.

Seismological instrumentation

ICE implemented a digital seismological network of 12 digital telemetric seismic stations and 4 strong motion devices at the northern part of Costa Rica. The network, whose configuration is sketched in fig. 1, records the seismicity around Arenal and Miravalles volcanoes.

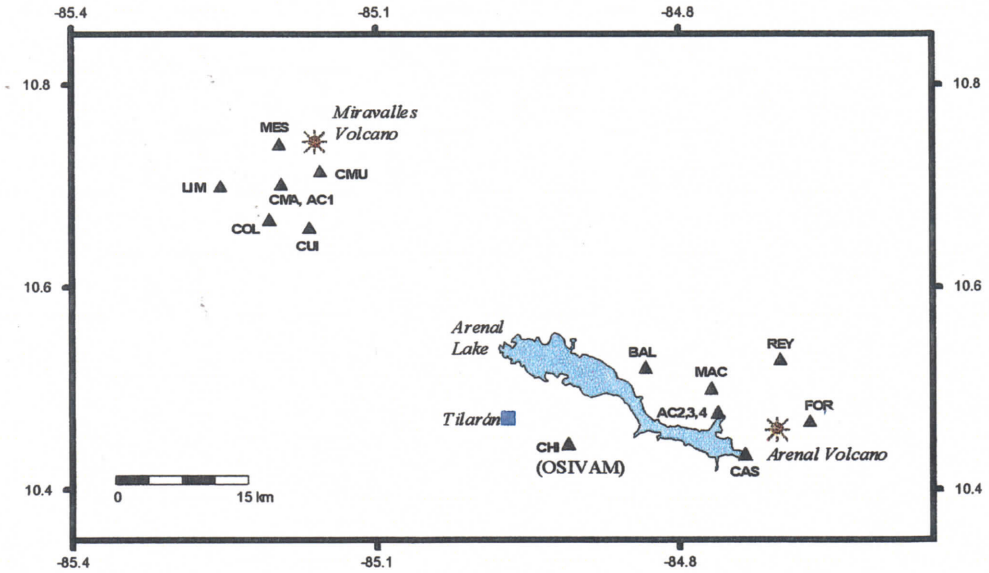


Figure 1: Arenal and Miravalles seismological networks

Around Arenal volcano, there are 4 digital seismic stations (FOR, CAS, MAC and REY) and 2 more distant stations (BAL and CHI) complement the monitoring of the volcano and the tectonic graben occupied by the Arenal Lake. Additionally, 3 strong motion instruments are located at Sangregado dam (6.5 km W of Arenal volcano). There are also 6 seismic stations and one strong motion device around Miravalles Geothermal Field. The signals are telemetered to the main recording center OSIVAM at cerro Chiripa (near the Tilarán city).

The seismic stations, developed by Lennartz Electronic GmbH, are equipped with short period (1 s) 3-component geophones, with a damping factor of 0.707, an effective sensitivity of 400 V/m/s (100 V/m/s for strong motion devices) and a dynamic range of 120 dB. The response frequency of the instruments to ground velocity is flat between 1 and 80 Hz. Each remote station consists of a MARS-88 record system with 4 MB of buffer RAM, a GPS time signal receiver, solar panels and buffer batteries. The trigger system is controlled by the ratio STA/LTA with a pre-event memory of 32 seconds and a post-event memory of 40 seconds.

Processing of data is carried out by using software provided by Lennartz Co. (Mars-88) and SEISAN program (Haskov & Ottemöller, University of Bergen, Norway). The data base is stored in optical disks (2.6 GB) and compact disks (650 MB).

From 1975 to 1978, a network of analogic seismographic stations was operating around Arenal volcano. Currently, only one station (called Fortuna:FOR) is still under operation, located 3.7 km east of the summit crater. This station has a short period vertical seismometer (1 s) and is transmitted by phone line to the OSIVAM and also to a recording center at ICE in San José. The digital station called also FOR, is located right beside this other station.

Location of the seismological stations of OSIVAM

Station	Code	Latitude (North)	Longitude (West)	Elevation (m a.s.l.)
Fortuna (analogical)	FOR	10°28.15	84°40.44	392
Fortuna (digital)	FOR	10°28.01	84°40.31	384
Castillo	CAS	10°26.10	84°44.17	559
Banca Lucia	BAL	10°31.26	84°50.04	793
Macadamia	MAC	10°30.01	84°46.16	832
Chiripa	CHI	10°26,68	84°54.59	1 029
Monterrey	REY	10°31.72	84°42.04	606
Acel. 2	AC2	10°28.56	84°45.75	552
Acel. 3	AC3	10°28.58	84°45.72	520
Acel. 4	AC4	10°28.62	84°45.61	490
Cuipilapa	CUI	10°39.54	85°09.96	528
Limonal	LIM	10°41.97	85°15.24	591
Colonia	COL	10°40.01	85°12.35	445
Cabro Muco	CMU	10°42.92	85°09.30	979
Mesas	MES	10°44.53	85°11.78	631
Casa Máquinas	CMA	10°42.12	85°11.66	615
Acel. 1	AC1	10°42.12	85°11.66	615

Other monitoring techniques

Arenal Volcano (fig. 2)

- Network of 7 dry tilt stations (C, D, F, G, I, J, K) located along radial lines around the volcano. Stations A and E were destroyed by volcanic activity and station B (1991) by strong erosion.

- Geochemical and thermal monitoring of 6 hot and cool springs (FD, QB, QF, QG, QL, RT) and 2 degassing sites (QN and FF) every three months.

- Field geological observation (observational monitoring) is carried out periodically in order to check the volcano dynamics and to detect any abnormal phenomena. There is also a

periodical mapping of new lava and pyroclastic flows and monthly collection of ash samples for grain size analysis, mass calculation and composition determination.

Miravalles Volcano

- Network of 11 dry-tilt stations (A, B, C, D, E, F, G, H, I, J and K). A series of BM for precise leveling survey and microgravity. Geochemical and thermal monitoring at one site.

Rincón de la Vieja Volcano

- A series of BM for precise leveling and geophysical surveillance.
- Geochemical and thermal monitoring at one site
- Field geological observation

Together with the routine volcanic and seismic monitoring so far described, since 1985 OSIVAM staff is also devoted to general geologic studies, tephra-stratigraphy, neotectonics, seismotectonics, photogeology, induced seismicity, seismic and volcanic hazard assessment and promotion activities.

Publications

- Boletín del Observatorio Vulcanológico del Arenal (beginning in 1988), and since late 1996 it was renamed as Boletín del Observatorio Sismológico y Vulcanológico Arenal-Miravalles. There are 24 issues from 1988 to 2000.

- Annual summaries of the seismic and volcanic activities in Miravalles, Tenorio, Rincón de la Vieja and Arenal regions.

- Special reports in case of seismic and volcanic crisis.

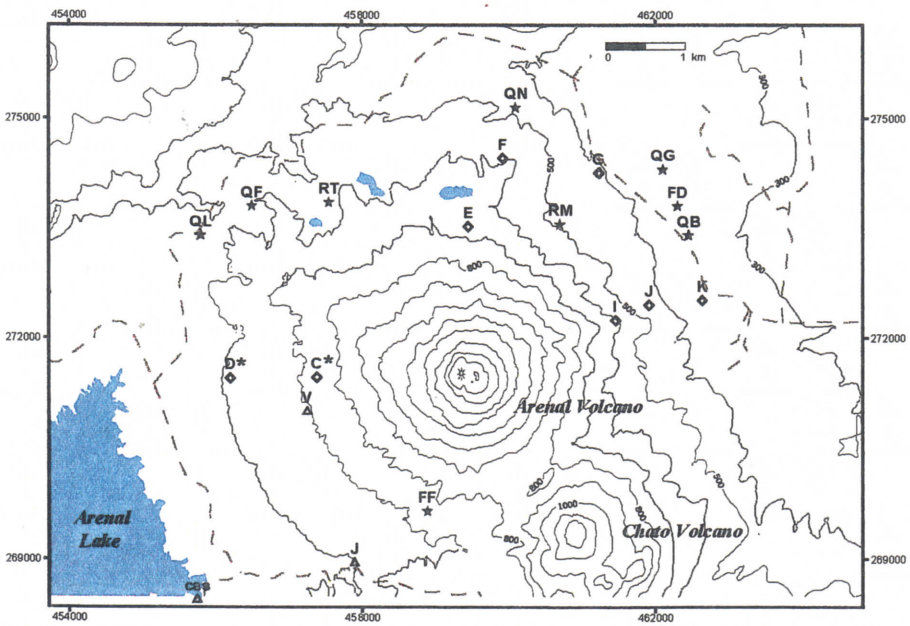
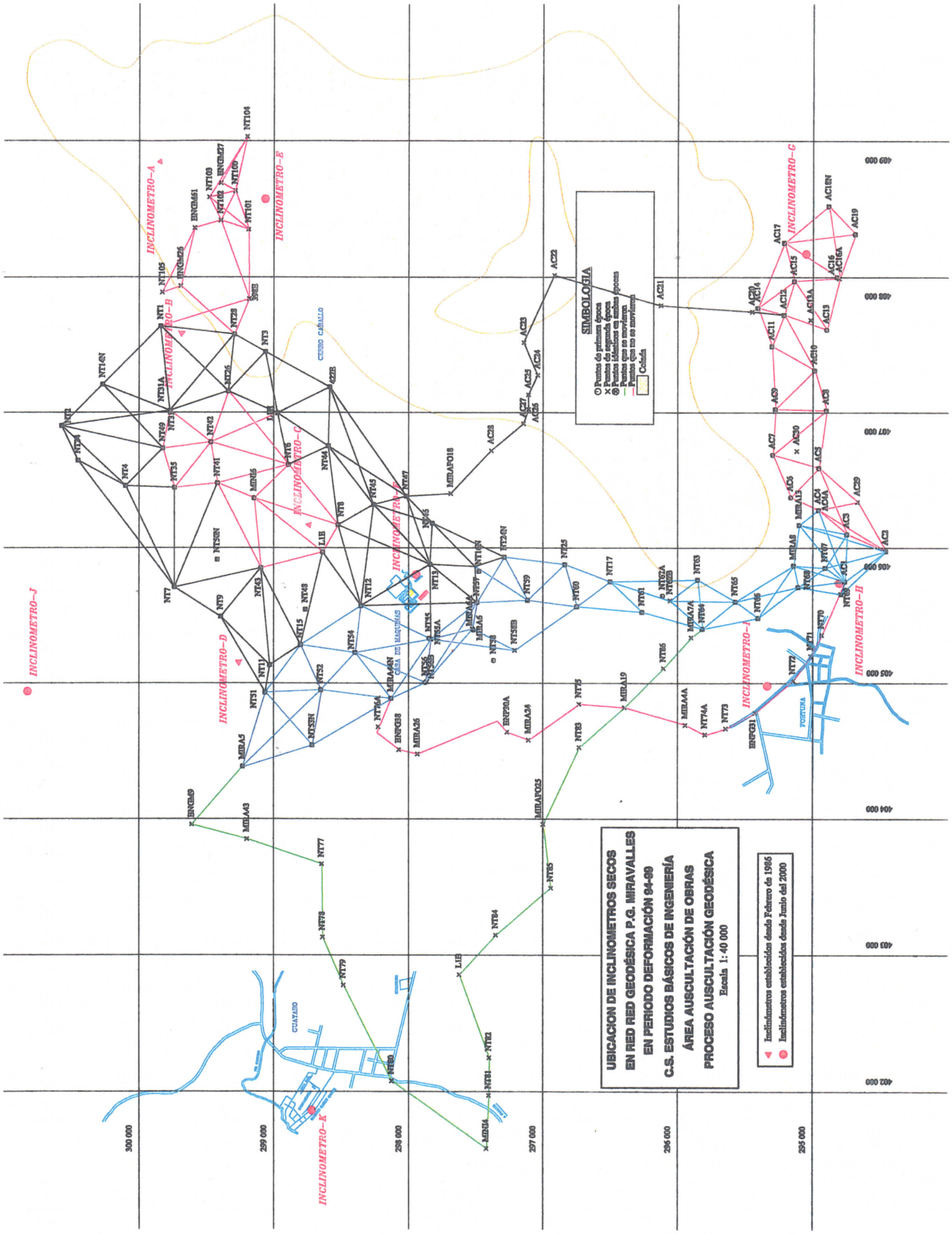


Figure 2: Arenal Volcano monitoring. The stars represent the sites for geochemical sampling, the triangles represent the location of the ash collectors and the rhombus are the dry tilt stations. C* and D* points include dry tilt station and ash collector.

Figure 3: Geodetic and dry tilt stations network for the monitoring of the Miravalles Geothermal Field. The circles and triangles represent the location of the dry tilt stations, and the crosses and quadrangles represent the bench marks for horizontal and vertical survey.



Índice

Rafael Barquero
Resumen de la sismicidad en las zonas de Miravalles y Arenal durante el año de 1999 ..... **1-6**

Rafael Barquero
Resumen de la sismicidad en las zonas de Miravalles, Tenorio y Arenal durante el año 2000 ..... **7-14**

Ivonne Arroyo, Guillermo E. Alvarado, Waldo Taylor, Luis A. Madrigal & Francisco Arias
La actividad del volcán Arenal durante el año 2000 ..... **15-29**

Mauricio Mora
Análisis preliminar de los efectos de sitio en las estaciones de la red sismológica del volcán Arenal, Costa Rica **30-38**

Guillermo E. Alvarado & Ivonne Arroyo
Los flujos piroclásticos del volcán Arenal (Costa Rica) entre 1975 y 2000: Origen, frecuencia, distribución y peligro asociado **39-53**

Gerardo J. Soto, Guillermo E. Alvarado & otros
Las facies proximales de la gran erupción piroclástica basáltica ET-3 del volcán Arenal **54-63**

Las opiniones vertidas por los autores de los artículos son de su propia y entera responsabilidad, y no constituyen necesariamente la posición oficial del Boletín del OSIVAM

Boletín OSIVAM	Año 12, No. 23-24	1-6	San José, Costa Rica, diciembre, 2000

Resumen de la sismicidad en las zonas de Miravalles y Arenal durante el año 1999

Annual report of the seismicity at Miravalles and Arenal regions during 1999

Rafael Barquero
Área de Amenaza y Auscultación Sismo-volcánica, ICE, Apdo. 10032-1000, San José, Costa Rica.

Barquero, R., 2000. Resumen de la sismicidad en las zonas de Miravalles y Arenal durante el año 1999. -Boletín OSIVAM, 12 (23-24): 1-6; San José.

Resumen

Durante el año 1999 la red sismológica del OSIVAM, que monitorea la actividad sísmica de las zonas de la Planta Geotérmica Miravalles y del lago y el volcán Arenal, estuvo parcialmente fuera de operación por algunos problemas técnicos y falta de repuestos. Además, se presentaron algunos problemas por vandalismo, especialmente en la zona de Miravalles.

Teniendo estas limitaciones en consideración, con los datos recabados durante el año se pudieron localizar 62 eventos sísmicos, 32 de los cuales están dentro de la zona de cobertura de la red del OSIVAM; solamente 14 pertenecen al área de Miravalles y 23 al área de Arenal-Tenorio.

Abstract

During 1999 the OSIVAM network, which records the seismic activity at the Miravalles Geothermal Plant and the Arenal Lake and volcano was partially out of service for several technical problems and the lack of spare parts. Also there were some vandalism problems, specially at the Miravalles network.

Taken into account these limitations, with the data compiled during the year it was possible to located 62 seismic events, 32 of them located within the coberture of the OSIVAM network, from them, only 14 events belong to the Miravalles Geothermal Plant area and 23 to the Arenal-Tenorio area.

Introducción

Durante el año 1999 la red sismológica digital del OSIVAM, que monitorea la actividad sísmica de las zonas de la planta geotérmica Miravalles y del lago y el volcán Arenal, tuvo algunos problemas técnicos, por lo que durante una parte del año salió de operación. Específicamente, el primer problema que se suscitó fue la avería en la computadora HP principal que recibía y procesaba la información proveniente de las estaciones sismológicas, lo que dejó todo el sistema de registro fuera de operación por aproximadamente 8 semanas (mayo y casi todo junio), ya que los no existían en el país y hubo que traerlos del exterior. Aparte de este problema, en octubre salió de operación la estación Mesas por actos de vandalismo

y en noviembre, la estación Cabro Mucho, por problemas con el dueño de la finca. Por estas situaciones, se perdieron muchos datos durante el año. En el sector de Arenal, la estación Banca Lucia ha estado fuera de operación por problemas con rayos y falta de repuestos. Otro inconveniente que se presentó, fue que después de la instalación del nuevo *software* para la computadora SUN (que vino a reemplazar la mencionada HP) por parte del consultor Thomas Zencker, los parámetros y la forma de operación variaron un poco y se debieron hacer muchos ajustes para poder poner a funcionar las redes normalmente. Hubo, por ejemplo, un periodo durante el cual la computadora se quedaba bloqueada muchas veces.

Tomando en cuenta las limitaciones anteriores, con los datos que se pudo recabar durante el año, se logró localizar un total de 62 eventos de los cuales 36 se ubican dentro del área de buena cobertura de la red (zona Arenal-Miravalles) y de ellos solamente 14 se localizaron dentro de la zona de Miravalles y 23 en la zona de Arenal-Tenorio.

Resultados

En las tablas 1 y 2 y sus respectivos gráficos, así como en las figs. 1 y 2, se muestran los datos registrados durante el año 1999, tanto para la zona de Miravalles como para Arenal.

Como se puede observar en la tabla 1, la actividad sísmica registrada fue bastante baja, con la salvedad de que la detección de sismos se viera afectada por la salida de operación de estaciones debido a las razones antes mencionadas.

La red de Arenal estuvo operando mejor durante el año, por ello fue posible registrar bastante de la actividad que se produce en el volcán Arenal (explosiones y tremores), y además se registró un pequeño enjambre sísmico de tipo tectónico entre octubre y noviembre.

Tabla 1: Sismos registrados en la red de Miravalles

Meses	Registrados	Locales ubicados	Regionales ubicados
Enero	12	02	05
Febrero	05	02	02
Marzo	09	01	02
Abril(1)	02	01	01
Mayo	n.d.	n.d.	n.d.
Junio	02	01	01
Julio	03	01	02
Agosto	12	01	05
Setiembre	13	01	14
Octubre	07	02	02
Noviembre	05	01	07
Diciembre	02	01	08

(1) la red no operó entre el 15 de abril y el 25 de junio.

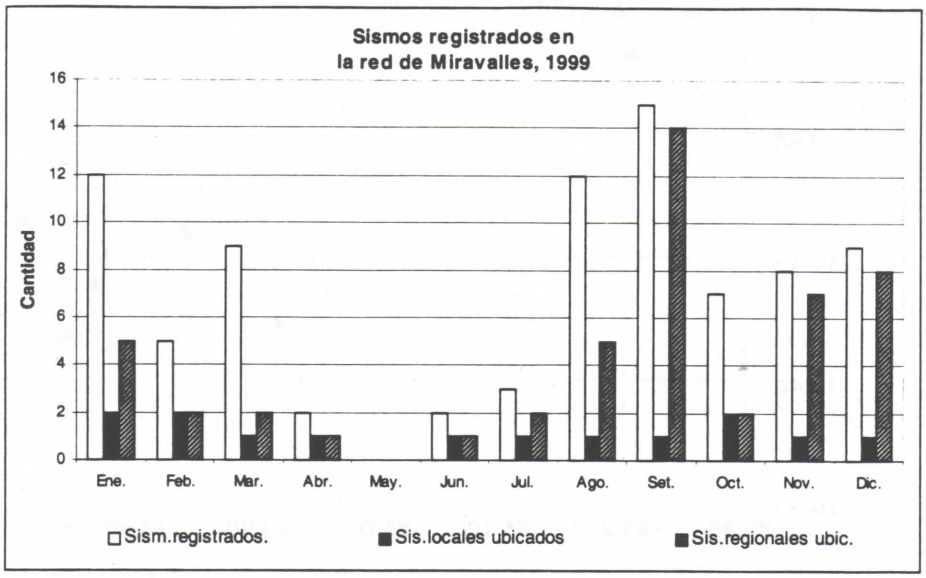
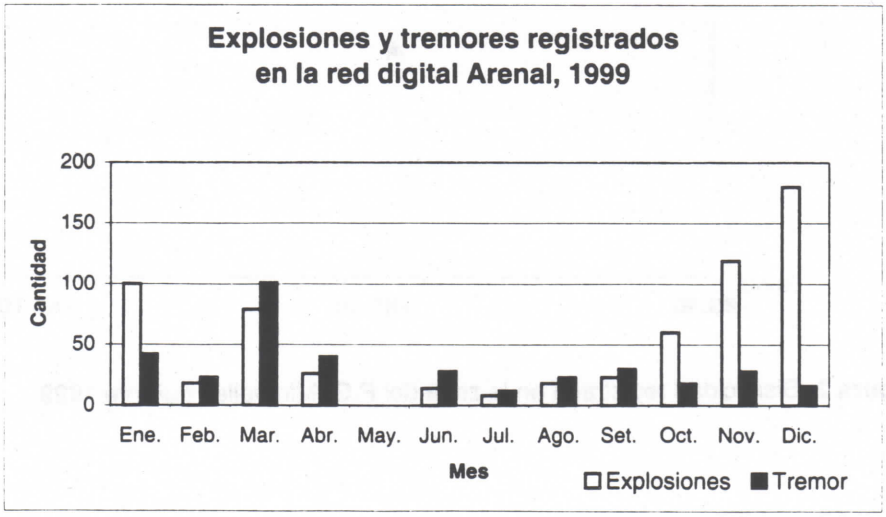


Tabla 2: Sismos registrados en la red de Arenal

Meses	Explosiones	Tremores	Total registros
Enero	100	42	142
Febrero	18	23	41
Marzo	79	101	180
Abril	26	40	66
Mayo	n.d.	n.d.	n.d.
Junio	14	28	42
Julio	08	12	20
Agosto	18	23	51
Setiembre	23	30	53
Octubre	60	18	78
Noviembre	119	28	147
Diciembre	180	16	196



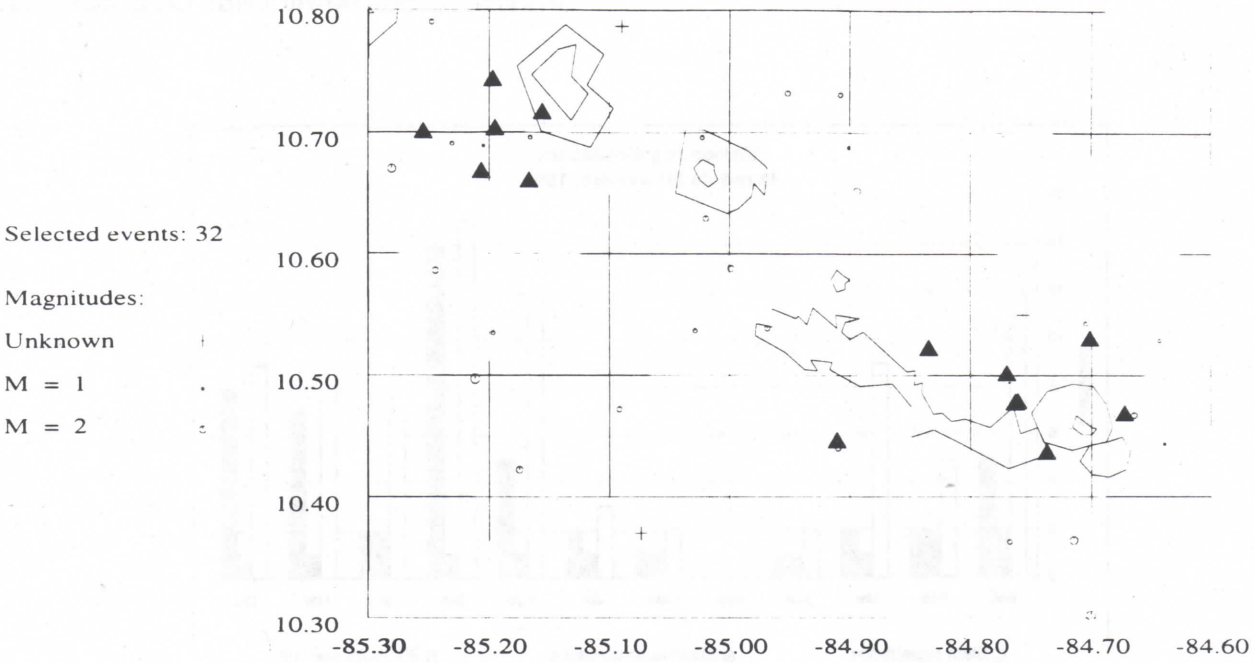


Figura 1: Sismicidad localizada dentro de la zona de cobertura de la red de OSIVAM durante 1999.

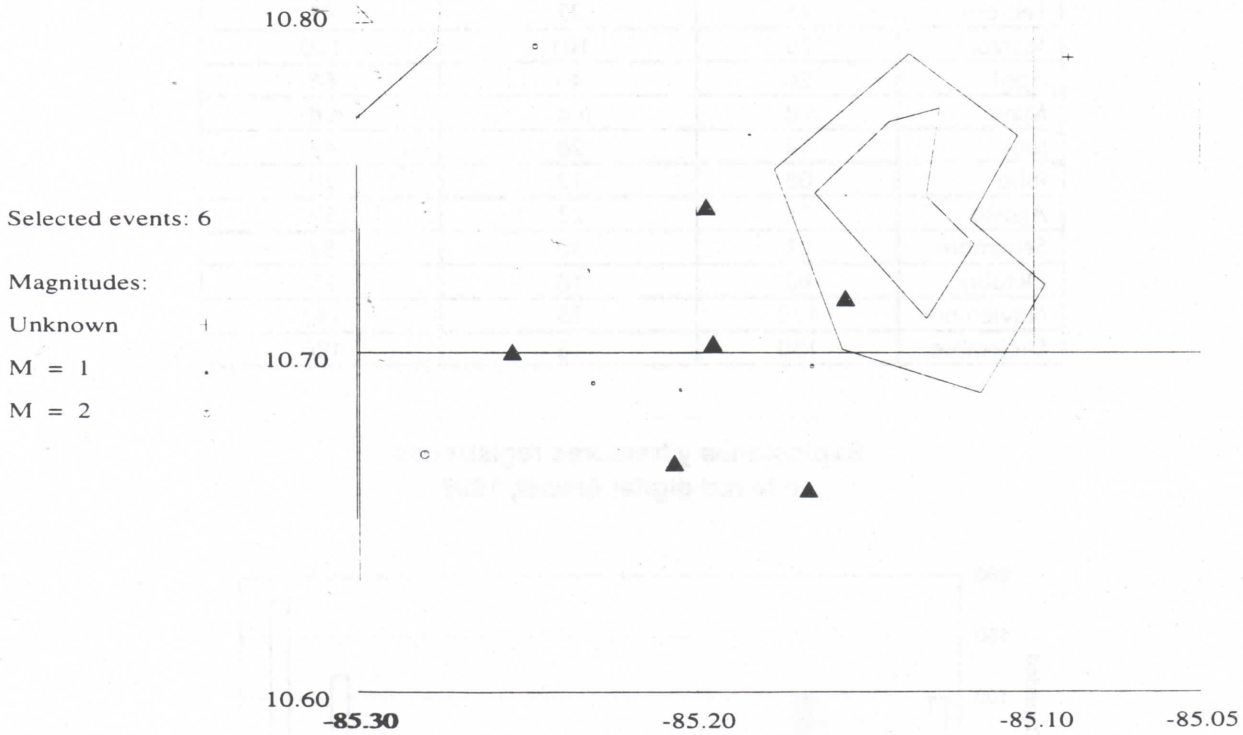


Figura 2: Sismicidad registrada en la zona del P.G. Miravalles durante 1999.

Sismicidad en la zona de Arenal

Aparte de la actividad sísmica que se genera directamente en el volcán Arenal, caracterizada por múltiples explosiones y tremores, este año se registró un pequeño enjambre de tipo tectónico. En este caso, los sismos que se pudieron localizar se distribuyen en la zona norte del lago y del volcán Arenal, sin que tengan, al parecer, relación directa con el volcán, sino con la falla Cote-Arenal por su alineamiento NW-SE (fig 1). Sin embargo, al producirse el día 26 de octubre un importante flujo piroclástico en el Arenal, dicha relación con el volcán podría sospecharse, pues en flujos piroclásticos de años anteriores se ha notado actividad sísmica tectónica precursora. También vale la pena mencionar que hubo un incremento importante en la actividad sísmica de carácter volcánico en los meses de noviembre y diciembre, con 119 y 180 eventos respectivamente, lo cual podría tener relación con el flujo piroclástico que se produjo en octubre con el ascenso de nuevo magma hacia el cráter; de ser así, se esperaría la aparición de nuevas coladas de lava en los próximos meses.

Sismicidad en la zona de Miravalles

En esta zona, tomando en consideración las limitaciones técnicas mencionadas anteriormente, la actividad sísmica fue muy baja, pudiéndose localizar solamente 14 eventos pequeños durante todo el año (fig. 2). Estos sismos se ubican casi todos en los alrededores y fuera del campo geotérmico, sin mostrar ningún patrón definido. Después del enjambre sísmico que se produjo en 1997, la actividad sísmica viene descendiendo bastante. Esto también se ha observado en un nivel regional, pues la Red Sismológica Nacional también registró pocos eventos en la región de Guanacaste durante 1999.

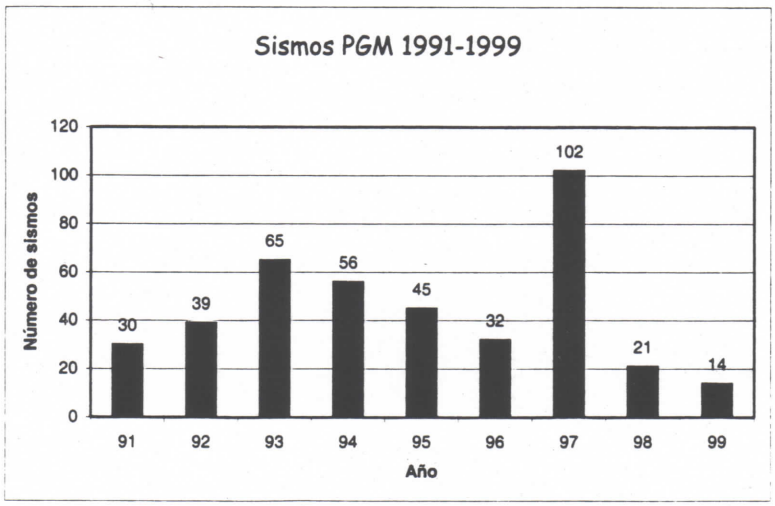


Figura 3: Sismos localizados en la zona del P.G. Miravalles periodo 91-99

Recomendaciones

Dado los múltiples problemas técnicos que se suscitaron durante el año 1999, se requiere en el futuro una mayor colaboración de parte de nuestros clientes, a saber, el Complejo Geotérmico Miravalles y el Sector de Generación, para el financiamiento de esta red de auscultación sismológica, especialmente en el rubro de repuestos, que es el de mayor importancia para poder mantenerla en operación.

Agradecimientos: Merece un especial agradecimiento la compañera Ivonne Arroyo, quien, aunque hasta el año 1999 empezó a trabajar con nosotros en la red de OSIVAM, ha sido un valioso apoyo para solucionar muchos de los múltiples problemas que hemos tenido que ir superando, especialmente luego de la venida del consultor Thomas Zencker. También se agradece la diligente labor de Marco Tulio Naranjo y de Dagoberto Boniche en el constante control del funcionamiento de la red y la asistencia en el archivo y procesamiento de datos, así como la del cuerpo técnico encargado del mantenimiento electrónico y de infraestructura (José Miguel Barrantes, Guido Calvo, Ricardo Sánchez, Raúl Rodríguez y Rigoberto Torres).

Boletín OSIVAM	Año 12, No. 23-24	7-14	San José, Costa Rica, diciembre, 2000

Resumen de la sismicidad en las zonas de Miravalles, Tenorio y Arenal durante el año 2000

Annual report of the seismicity at Miravalles, Tenorio and Arenal regions during year 2000

Rafael Barquero
Área de Amenaza y Auscultación Sismo-volcánica, ICE, Apdo. 10032-1000, San José, Costa Rica.

Barquero, R., 2000. Resumen de la sismicidad en las zonas de Miravalles, Tenorio y Arenal durante el año 2000. -Boletín OSIVAM, 12 (23-24): 7-14; San José.

Resumen

Durante el año 2000 el OSIVAM estuvo operando su red de estaciones sismológicas digitales en Miravalles y Arenal. Durante el primer semestre hubo algunos inconvenientes por la salida de operación de algunas de las estaciones (Banca Lucia, Cabro Muco, Mesas) por problemas técnicos, falta de repuestos o vandalismo. En el segundo semestre salieron de operación Chiripa y Fortuna, pero se restablecieron Cabro Muco y Mesas.

La sismicidad registrada y procesada muestra que se localizaron un total de 191 eventos tectónicos (regionales y locales), de los cuales 63 se ubicaron dentro de la zona de cobertura de la red: 29 en el área de Miravalles, 24 en Tenorio y 10 en Arenal.

En general, hubo un ligero incremento de la sismicidad con respecto del año 1999, destacándose algunos pequeños enjambres sísmicos en Miravalles y Tenorio. En el volcán Arenal continuaron registrándose las explosiones y tremores como en años anteriores y el evento más importante fue un gran flujo piroclástico que se descendió por el flanco norte del volcán el día 23 de agosto.

Abstract

During the year 2000 OSIVAM kept operating the digital seismic stations of Miravalles and Arenal networks. During the first semester there were some inconvenients due to failure at some stations (Banca Lucia, Cabro Muco, Mesas) because of technical problems, lack of spare parts or vandalism. In the second semester there were some problems with stations Chiripa and Fortuna, but stations Cabro Muco and Mesas started normal operation.

Seismicity recorded and processed during the year, showed a total of 191 localized tectonic events (regional and local), from them 63 were located within the area covered by the seismic network: 29 at Miravalles, 24 at Tenorio and 10 at Arenal.

In general there was a slight increment in the seismicity of the region with respect to 1999, specially by two small seismic swarms at Miravalles and Tenorio. At the Arenal volcano, there was the usual explosions and tremor as previous years, and the most important event was a large pyroclastic flow which descended by the north flank on August 23th.

Introducción

Durante el año 2000 la red de estaciones digitales del OSIVAM continuó presentando algunos problemas de operación por diversas causas: problemas técnicos, falta de repuestos y vandalismo. Es así como durante el primer semestre muy difícil detectar eventos sísmicos en la zona de Miravalles pues no contábamos con suficientes estaciones operando. La situación mejoró substancialmente a partir del segundo cuatrimestre del año, con lo que mejoró el procesamiento de la información. A continuación se presentan los datos procesados y sus características.

Resultados

En la tabla 1 se muestran los sismos tectónicos procesados durante el año 2000; como se puede ver, fue registrado un total de 873 eventos, de los cuales 739 fueron sismos regionales y 134 locales, es decir, dentro de la zona de cobertura de la red. De éstos se pudieron ubicar los epicentros de 63 eventos, de los cuales 29 se ubicaron dentro del área del Campo Geotérmico Miravalles, 24 en la del P. G. Tenorio y 10 en la zona del lago y volcán Arenal.

Tabla 1: Sismos tectónicos procesados en el OSIVAM durante el año 2000

Mes	Regionales	Locales	PGM - ARE	P.G. Miravalles	P.G. Tenorio
Enero	13	1	0	0	0
Febrero	28	6	3	0	0
Marzo	13	5	4	0	2
Abril	22	3	0	0	0
Mayo	38	16	10	0	7
Junio	24	18	11	3	2
Julio	355	27	24	6	8
Agosto	133	17	6	1	3
Setiembre	33	5	4	3	0
Octubre	34	15	13	8	2
Noviembre	24	13	10	5	1
Diciembre	22	8	3	2	0
Total	739	134	93	29	24

Nota: Regionales: sismos regionales registrados, Locales: sismos locales registrados, PGM.-ARE: sismos registrados y localizados dentro de las zonas PG Miravalles y Arenal juntas. PG Miravalles: sismos registrados y localizados dentro del área de Miravalles, P.G. Tenorio: sismos registrados dentro del área del P.G. Tenorio.

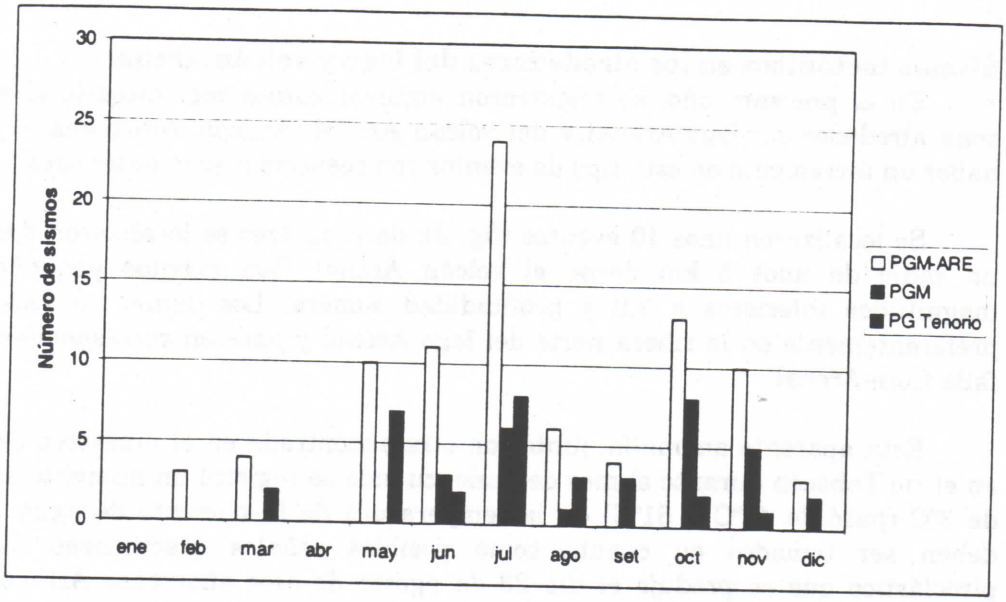


Figura 1: Gráfico de sismos localizados en OSIVAM durante el año 2000

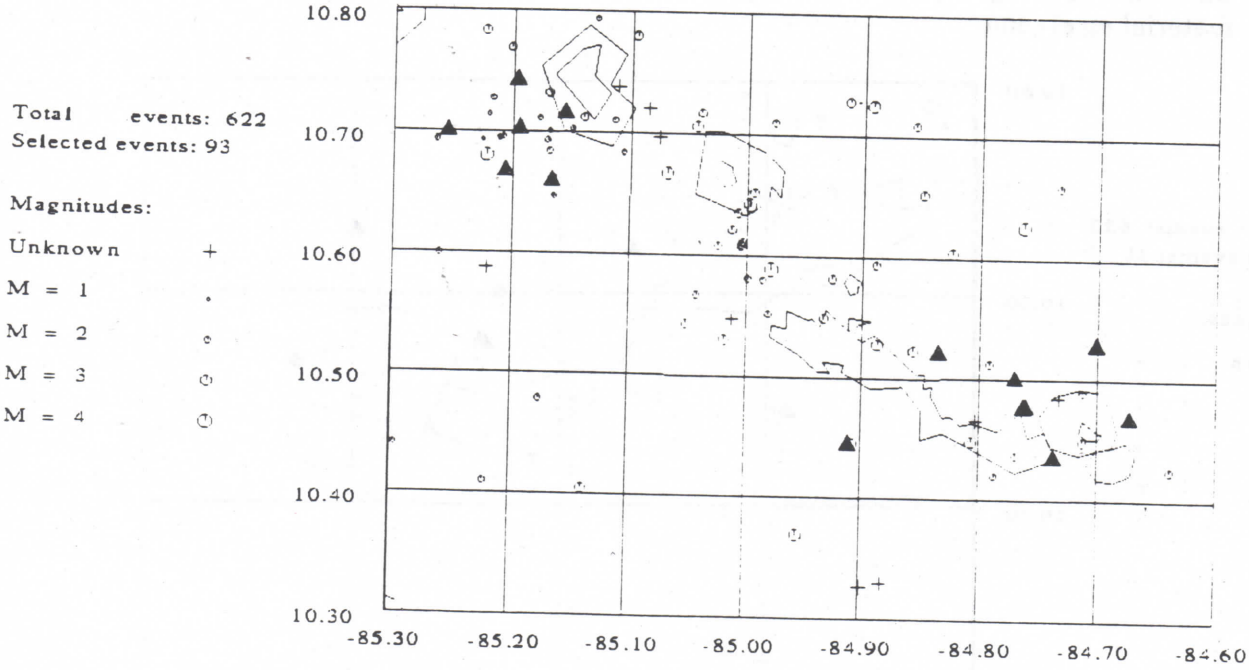


Figura 2: Sismos localizados dentro del área de cobertura del OSIVAM durante el 2000

Sismos tectónicos en los alrededores del lago y volcán Arenal

En el presente año, se registraron algunos sismos tectónicos locales en la zona alrededor del lago Arenal y del volcán Arenal. Aunque son pocos, sí parece haber un incremento en este tipo de eventos con respecto a años anteriores.

Se localizaron unos 10 eventos (fig. 3); de ellos, tres se localizaron dentro de un radio de unos 5 km desde el volcán Arenal. Son eventos pequeños, con magnitudes inferiores a 2,9 y profundidad somera. Los demás se localizaron preferentemente en la ribera norte del lago Arenal y parecen corresponder con la falla Cote-Arenal.

Esta aparente anomalía, junto con otra encontrada en el muestreo de aguas en el río Tabacón durante el mes de junio, cuando se registró un aumento anómalo de 3°C (pasó de 48°C a 51°C) en la temperatura de la naciente de agua termal, deben ser tomados en cuenta como posibles señales precursoras del flujo piroclástico que se produjo el día 23 de agosto de este año(véase Arroyo *et al.*, 2000), el cual fue de proporciones importantes y que tomó un nuevo camino, o también de algún otro tipo de cambio que se esté dando en los procesos internos del volcán Todos estos datos, conjuntamente con los del monitoreo sismológico de rutina, son evidencia de posibles cambios en la tectónica y en el interior del volcán, el cual desde los últimos cinco años viene mostrando un incremento en la frecuencia de flujos piroclásticos, probablemente debida a la acumulación de material en el cono.

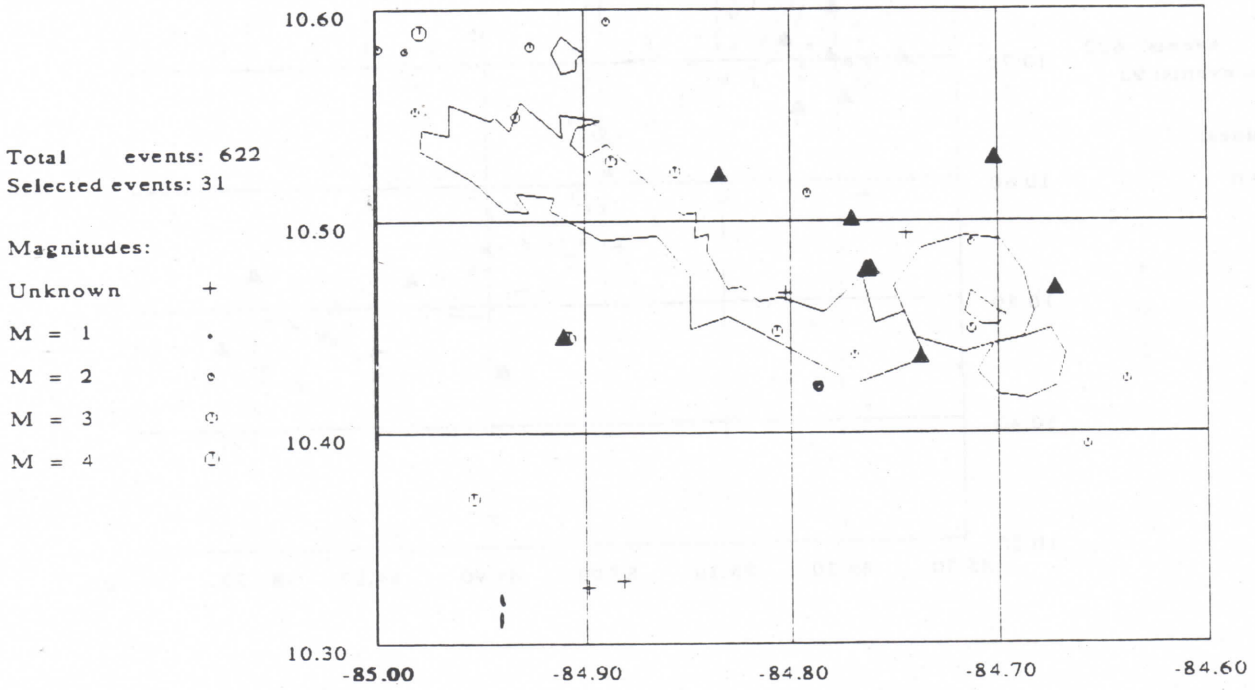


Figura 3: Sismos tectónicos localizados en los alrededores del lago y el volcán Arenal en el 2000

Sismos volcánicos del Arenal

Durante el año 2000 la actividad en el Arenal se mantuvo en forma constante, como es normal en este volcán, registrándose gran cantidad de sismos volcánicos y tremores como se muestra en la tabla 2 y fig. 4. El análisis de esta actividad sísmica se presenta en Arroyo *et al.* (2000) en este mismo boletín. En agosto se produjo la actividad más importante, que consistió en un gran flujo piroclástico que descendió por el flanco norte del aparato volcánico (véase Arroyo *et al.*, *op. cit.*).

Tabla 2: Sismos volcánicos y tremores registrados en el volcán Arenal durante el año 2000

Mes	Explosiones	Tremores
Enero	122	50
Febrero	146	40
Marzo	68	17
Abril	45	3
Mayo	101	78
Junio	100	68
Julio	149	53
Agosto	144	60
Setiembre	61	96
Octubre	113	121
Noviembre	78	54
Diciembre	35	33

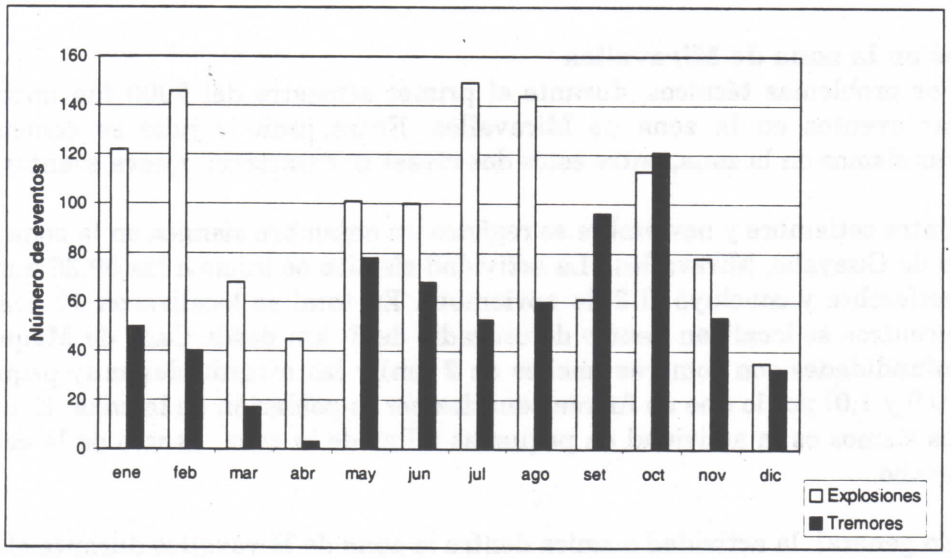


Figura 4: Gráfico de sismos volcánicos del Arenal registrados durante el año 2000

Enjambre sísmico en la zona de Tierras Morenas durante mayo, junio, julio y agosto del 2000

Durante los días 12 al 13 de mayo del 2000, las estaciones de la red sismológica del OSIVAM detectaron un pequeño enjambre sísmico en la zona de Tierras Morenas de Tilarán, registrándose alrededor de 15 eventos, de los cuales 8 fueron localizados (fig. 5). Es necesario aclarar que las estaciones de OSIVAM no cubren apropiadamente esta zona pues no se cuenta con estaciones cercanas a ese sitio.

La actividad se inició el día 10 de mayo con pocos eventos y se incrementó el día 11, que fue el día en que se produjeron mayor cantidad de sismos. En junio se volvieron a registrar dos eventos en la zona, el día 19. Luego, en julio se reactivó la zona, registrándose 8 eventos entre el 6 y el 23 de ese mes. La actividad concluye en agosto, con el registro de tres eventos. La mayoría de los sismos localizados se distribuyen hacia el NE de la población de Tierras Morenas, a unos 4 km. El único sismo sentido que se reportó fue el del día 11 de mayo a las 19:31 (GMT, 13:31 h.l.) cuya magnitud fue de 2,9. Los demás eventos por su baja magnitud, no fueron sentidos.

La zona de Tierras Morenas presenta un patrón principal de fallas de rumbo NW-SE, al cual pertenecen las fallas denominadas Cote-Arenal y Chiripa. Estas fallas, por su extensión (mayor de 15 km), son las más importantes de la zona y se sabe que han generado terremotos en el pasado: el terremoto de Guatuso de 1911, que presumiblemente se originó en la falla Cote, y el terremoto de Tilarán de 1973, que se asoció a la falla Chiripa. Además, en la zona existen otros patrones de fallas secundarios NE-SW y E-W, que son de menor extensión pero que han tenido también actividad reciente (enjambres de 1997 y 1998).

Sismos en la zona de Miravalles

Por problemas técnicos, durante el primer semestre del 2000 fue imposible localizar eventos en la zona de Miravalles. Entre junio y julio se comenzó a registrar sismos en la zona, entre estos dos meses se detectaron nueve eventos.

Entre setiembre y noviembre se registró un enjambre sísmico en la zona de la caldera de Guayabo, Miravalles. La actividad sísmica se inició a las 09:36 a.m. del 1° de setiembre y concluyó el 3 de noviembre. En total se localizaron 17 eventos. Los epicentros se localizan dentro de un radio de 5 km desde Casa de Máquinas, sus profundidades son someras (menos de 2 km) y las magnitudes muy pequeñas (entre 0,9 y 1,0) por lo que no fueron sentidos por la población de la zona. El origen de estos sismos es la actividad en pequeñas fallas de la zona, dentro de la caldera de Guayabo.

En general, la actividad sísmica dentro la zona de Miravalles durante el 2000 (fig. 6) fue relativamente moderada pero un poco mayor que la de 1999. Aunque hay que tener en cuenta que, por inconvenientes técnicos, varias estaciones estuvieron fuera de operación durante el primer semestre del 2000.

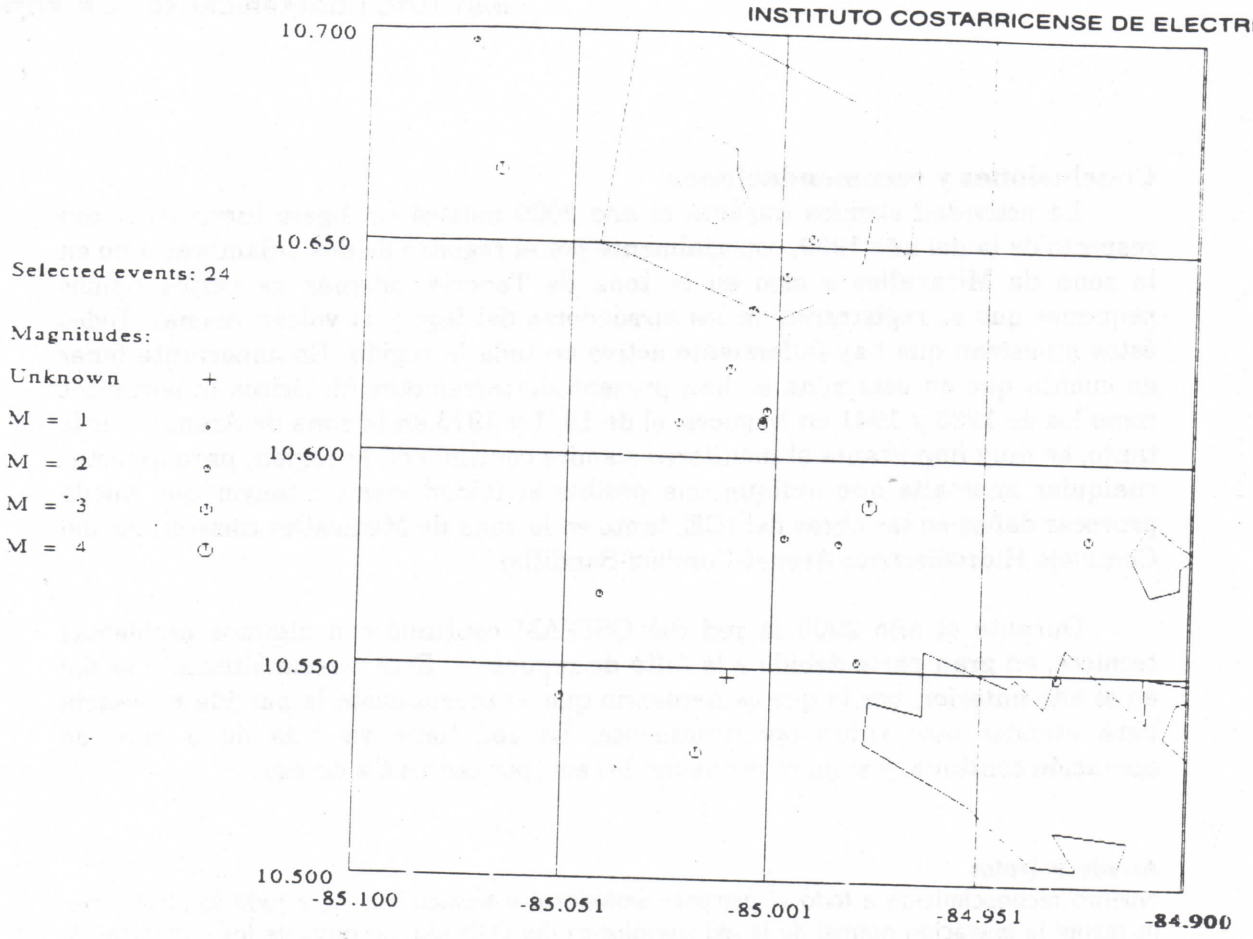


Figura 5: Enjambre sísmico en la zona de Tierras Morenas

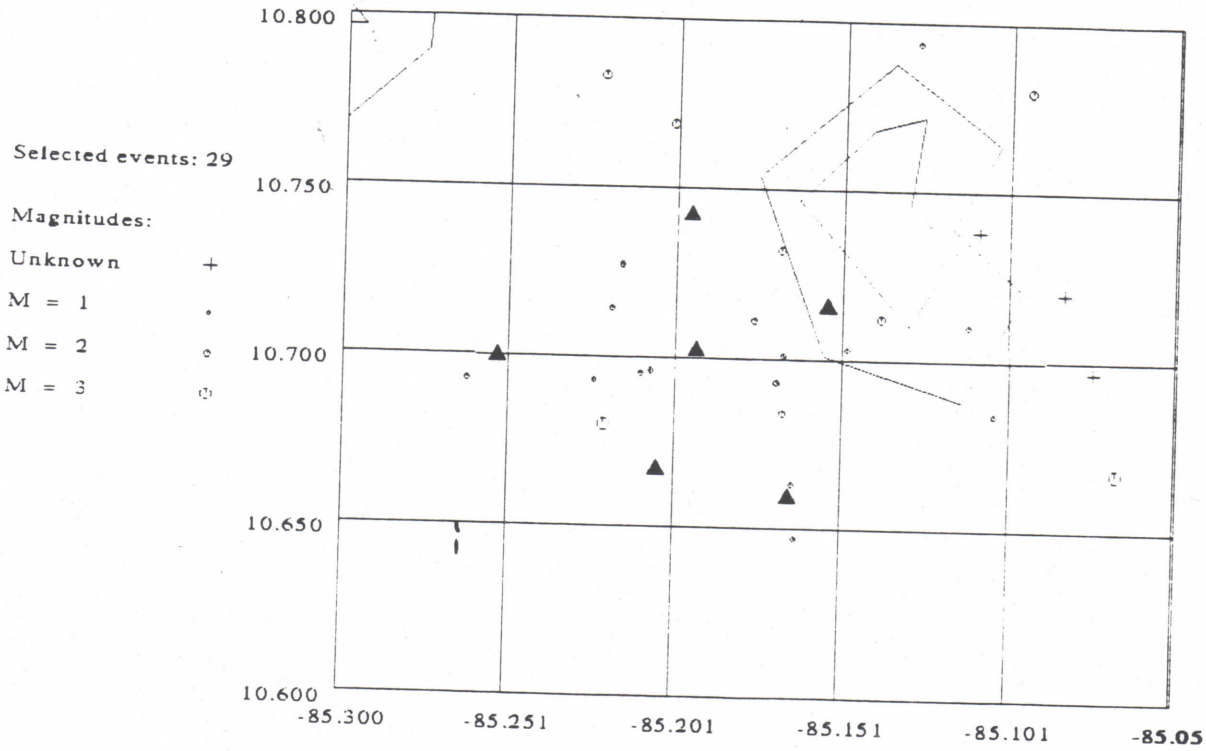


Figura 6: Sismos en la zona de P.G. Miravalles durante el 2000

Conclusiones y recomendaciones

La actividad sísmica durante el año 2000 mostró un ligero incremento con respecto de la del año 1999, especialmente por el registro de dos enjambres, uno en la zona de Miravalles y otro en la zona de Tenorio, además de varios sismos pequeños que se registraron en los alrededores del lago y el volcán Arenal. Todos éstos muestran que hay fallamiento activo en toda la región. Es importante tener en cuenta que en esta zona se han presentado terremotos históricos importantes como los de 1935 y 1941 en Bagaces, el de 1911 y 1973 en la zona de Arenal. Por lo tanto, es muy importante el monitoreo sísmico continuo de la región, para detectar cualquier anomalía que indique una posible actividad sísmica mayor que pueda provocar daños en las obras del ICE, tanto en la zona de Miravalles como en las del Complejo Hidroeléctrico Arenal-Corobicí-Sandillal.

Durante el año 2000 la red del OSIVAM continuó con algunos problemas técnicos, en gran parte debido a la falta de repuestos. Esta misma situación se dio en el año anterior, por lo que es necesario que se presupueste la partida necesaria para atender este rubro oportunamente. La red tiene ya más de 6 años de operación continua, y si no se renuevan los equipos tenderá a decaer.

Agradecimientos

Nuestro reconocimiento a todo el personal profesional y técnico que hace todo lo posible por mantener la operación normal de la red sismológica del OSIVAM, no obstante los problemas de recortes presupuestarios que limitan la adquisición de los repuestos tan necesarios.

Boletín OSIVAM	Año 12, No. 23-24	15-29	San José, Costa Rica, diciembre, 2000

La actividad del volcán Arenal durante el año 2000

The activity of the Arenal Volcano throughout the year 2000

Ivonne Arroyo, Guillermo E. Alvarado, Waldo Taylor, Luis A. Madrigal & Francisco Arias
Área de Amenaza y Auscultación Sismo-volcánica, ICE, Apdo. 10032-1000, San José, Costa Rica.

Arroyo, I., Alvarado, G.E., Taylor, W., Madrigal, L.A. & Arias, F, 2000. La actividad del volcán Arenal durante el año 2000. Boletín OSIVAM, 12 (23-24): 15-29; San José.

Resumen

Durante el año 2000 la actividad del volcán Arenal ha sido similar a la que mantiene desde 1984, de tipo estromboliano. Consistió de explosiones (eventos tipo E), coladas de lava, columnas de vapor y de gases, emisión de gases audible (soplidos y sonidos tipo *jet*) y visible, lanzamiento de piroclastos balísticos y eólicos y flujos piroclásticos.

La actividad más importante del año ocurrió el 23 de agosto, cuando tuvo lugar un episodio de flujos piroclásticos con al menos 27 pulsos entre las 09:45 a.m. y las 03:16 p.m. (horas locales), que descendieron hasta los 600 m s.n.m. en dirección NNE. Dos personas fallecieron durante este evento y una tercera resultó con quemaduras graves.

Se describe, además, la sismicidad volcánica durante el año, tanto registrada analógicamente como digitalmente.

Abstract

Throughout the year 2000, the activity of the Arenal volcano has been the same it presents since 1984, that is strombolian type. Such activity consists of explosions (E-type events), lava flows, gas and steam columns, audible and visible gas ejections, ballistic and eolian expulsion of pyroclasts and pyroclastic flows.

The most important activity of the year took place on August 23th, when a pyroclastic flow event with at least 27 pulses between 09:45 a.m. y las 03:16 p.m. (local time) descended by the NNE flank down to the elevation of 600 m above sea level. Two people were killed during this event and another one was seriously injured.

The volcanic seismicity recorded during 2000 in analogical and digital format is also described here.

Introducción

De manera rutinaria, el Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM) mantiene y actualiza una base de datos de las amplitudes y frecuencias de los tremores volcánicos y de las amplitudes de los eventos de tipo

E registrados que han cumplido el criterio para ser guardados permanentemente. Debido a las limitaciones físicas en relación con el importante grado de actividad sísmica del volcán, se archivan los eventos explosivos detectados por al menos tres estaciones y los tremores de mejor calidad. Además, se mantiene un registro continuo de la actividad volcánica en papel termosensible mediante el equipo analógico de la estación FOR.

Durante el año 2000 se archivó las formas de onda digitales de 884,8 horas de tremor (en 676 archivos) y 1162 eventos explosivos (tipo E) registrados por la red digital del OSIVAM. Asimismo, esa red detectó 10 posibles sismos volcanotectónicos a lo largo del año (Barquero, 2000). En la estación FOR se registraron 1 206 horas de tremor y 17 302 eventos de tipo E y se mantuvo operando durante 177 días del año.

Actividad volcánica observada en el campo

A lo largo del año en cuestión, las observaciones de campo han sido relativamente escasas debido principalmente al clima desfavorable que ha prevalecido durante los días dedicados a ellas. A continuación se presenta una síntesis de la actividad del volcán Arenal durante el año 2000, recopilada a partir de reportes publicados en el boletín de la *Global Volcanism Network* (GVN) y en observaciones hechas por el personal del OSIVAM y del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (Ovsicori).

En enero se observó el descenso de lava por los flancos NNE, SE y este. Las faldas NE y SE fueron continuamente afectadas por lluvia ácida y material piroclástico de caída, lo que dañó la vegetación, causando una mayor erosión que originó pequeñas avalanchas en las quebradas Calle de Arenas, Manolo, Guillermina y Agua Caliente.

Durante los primeros días de marzo se observó el descenso de gases azulados con dirección NW, hasta la casetilla C del equipo de inclinometría del ICE. Asimismo, se avistó una colada de lava en movimiento, con dirección a la laguna Cedeño (NNE), a una altura de 900 m s.n.m. A mediados del mismo mes se escuchó soplidos y sonidos tipo *jet* y se verificó que continuaba el descenso de los gases azulados y gran cantidad de ceniza después del movimiento de la colada. Esta visita incluyó la inspección de un sitio en la margen derecha de la quebrada Guillermina, en la falda NE del volcán, donde en 1965 se reportó el hallazgo de animales muertos por emanaciones gaseosas. Justamente, al pie de un paredón de lava en dicho lugar fueron encontrados pequeños animales muertos.

A principios de abril se observó que el frente de la colada que descendía hacia el NNE, hacia la laguna Cedeño, se mantenía estacionario aunque la lava continuaba emanando del cráter. Esto originó una nueva colada que empezó a descender por el flanco SW. También se detectó restos de una colada de lava al borde del cráter, por lo que, al parecer, hubo un ascenso de lava desde mediados de marzo y hasta finales de ese mes.

En la primera semana de mayo se corroboró que la colada que había estado descendiendo hacia la laguna Cedeño desde marzo, se mantenía estática y que la colada orientada al SW había descendido hasta la cota de 700 m s.n.m. Esta colada del flanco NNE sería posteriormente arrastrada por los flujos piroclásticos del 23 de agosto.

La actividad más importante del año tuvo lugar el día 23 de agosto, cuando al menos 27 flujos piroclásticos sucesivos descendieron por el flanco NNE del volcán, hacia la laguna Cedeño (fig.4, más adelante), ocasionando la muerte de dos personas (un guía costarricense y una niña turista estadounidense) e hiriendo gravemente a una tercera. El descenso de los flujos, que estuvo acompañado por numerosas explosiones (eventos tipo E), fue observado directamente mientras ocurría por G. Alvarado, F. Arias y L. Madrigal. Una descripción detallada se incluye más adelante. Tres días después, una avioneta turística que se desvió de su ruta habitual para observar la zona de depositación de los flujos, se estrelló en el flanco norte del macizo, dejando como saldo 11 personas fallecidas.

El 26 de agosto fue vista una nueva colada de lava descendiendo por el flanco NNE del volcán, a la altura de la cota de 1 400 m s.n.m. En una fotografía tomada unos tres días después de los flujos piroclásticos se observa una grieta en el flanco izquierdo de esta colada. Al inicio de setiembre, el frente de la colada alcanzaba la cota de 1 000 m s.n.m. aproximadamente, mientras que algunos bloques rodaban hasta la cota de 400 m s.n.m. Para el 9 de setiembre la colada había descendido a una altura de 700 m s.n.m.

El 12 setiembre se registró una actividad de tremores muy amplios en la estación analógica FOR durante 4 horas. Se mantenía la colada NNE en la cota de 700 m s.n.m. pero se observó acumulación de material en el frente, y simultáneamente una nueva colada comenzaba a descender sobre la parte superior de aquélla. También fue vista una columna de vapor en el cráter activo. El 13 setiembre se presentaron nuevamente los tremores amplios durante casi todo el día. Para finales de setiembre el frente de la nueva colada del flanco NNE se encontraba a 1 200 m s.n.m.

A mediados de octubre se observó el descenso de una colada de lava con dos frentes por el flanco NNE: uno a 1200 m.s.n.m. y otro a 700-800 m.s.n.m., ambos bajando por el mismo canal.

Registros de la estación analógica FOR

La estación FOR (Fortuna) se localiza 3,7 km al ENE del volcán. En ese sitio se mantiene equipo tanto digital como analógico. Este año, el equipo digital dejó de operar a finales de julio debido a problemas técnicos.

En la tabla 1 y la fig. 1 se muestran los datos registrados por la estación analógica de enero a diciembre de 2000: 1 206 horas de tremor y 17 032

explosiones en 177 días de registro. La tabla 1 incluye el porcentaje de efectividad mensual de la estación (número de horas de registro durante el mes, dividido por el total de horas que tiene el mes en cuestión). En la fig. 1 se ha incluido, para efectos de continuidad, los resultados correspondientes a 1998 y 1999, presentados por Arroyo *et al.* (1999).

Tabla 1: Totales mensuales de registro de tremores y explosiones en la estación analógica FOR durante el año 2000

Mes	Horas tremor	Número eventos E	Horas de registro	Porcentaje efectividad(1)
Enero	228	1900	436,5	58,7
Febrero	112	2717	462,5	66,4
Marzo	66	990	294,0	39,5
Abril	14	151	39,0	05,4
Mayo	66	917	212,5	28,6
Junio	126	2062	419,0	58,2
Julio	119	1519	379,0	50,9
Agosto	69	867	254,0	34,1
Setiembre	92	1557	449,8	62,5
Octubre	117	1657	470,0	63,2
Noviembre	90	1696	421,5	58,5
Diciembre	107	1269	414,1	55,7
Total	**1206**	**17 302**	**4 251,8**	**48,5**

(1) número de horas de registro durante el mes dividido por el total de horas que tiene el mes en cuestión.

De acuerdo con los datos presentados en la fig. 1, en el 2000 la mayor actividad sismovolcánica se dio durante los dos primeros meses del año, aunque en promedio se ha mantenido similar a la de 1998 y 1999. En enero y febrero se alcanzó los mayores promedios de horas de tremor por hora de registro (0,52) y de número de explosiones por hora de registro (5,9), respectivamente, en estos tres años. De 1998 a 2000, el promedio total por hora de registro ha sido de **15,6 minutos** de tremor y **2,97** explosiones. Nótese el valor tan alto de número de explosiones.

El día 13 de febrero se llegó a registrar casi 18 explosiones por hora de registro, constituyéndose en el máximo anual. Este comportamiento se mantuvo hasta el 18 de febrero, con un promedio de unas 10 explosiones por hora. Por su parte, los altos valores de horas de tremor de enero se mantuvieron todo el mes. Otro repunte en la actividad explosiva se detectó durante los primeros días de junio, cuando se alcanzaron entre 6 y 12 explosiones por hora.

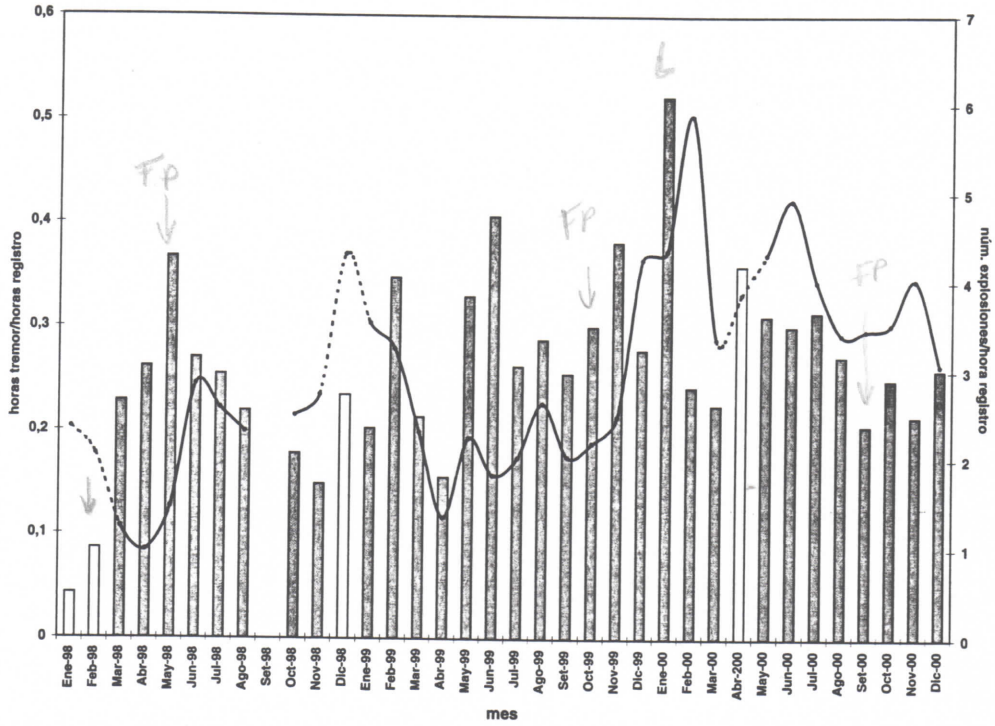


Figura 1: Registros de la estación analógica FOR entre 1998 y 2000. Las barras corresponden con las horas de tremor por hora de registro. Las líneas de puntos y las barras sin relleno indican los meses en que la estación trabajó un 20 del mes o menos.

En la fig. 1 se puede apreciar que el flujo piroclástico del 23 de agosto tuvo lugar durante un periodo en que el promedio mensual del número de explosiones por hora de registro iba en aumento hacia un máximo, tal como ya se había observado para otros dos flujos ocurridos en 1998 y 1999 (Arroyo *et al.*, 1999). Este pico sucede entre uno y dos meses después del flujo piroclástico; en este caso, ocurrió a finales de setiembre, al registrarse entre 5 y 7 explosiones por hora.

Después del flujo piroclástico del 23 de agosto ocurrió un incremento en el número de horas de tremor por hora de registro a partir del 28 de agosto y alcanzando un máximo de alrededor de 28 minutos el 13 de setiembre.

Valga acotar que durante el presente año el registro de la estación analógica presentó una leve mejoría en cuanto a efectividad (48,5%) en relación con 1998 (33,3%) y 1999 (45,4%), con excepción del mes de abril. No obstante, se presentan problemas de ruido en las horas diurnas en el sitio de la estación debido a un cambio en el uso de la tierra en sus cercanías. Esto podría estar provocando una subestimación de las lecturas de horas de tremor y de explosiones, puesto que la amplitud del ruido suele ser similar o mayor. Actualmente, se está tratando de solucionar este problema.

Registros de la red digital

Los gráficos de los registros digitales se presentan normalizados. Es decir, que al promedio mensual (de amplitudes y/o frecuencias) se le resta el promedio

anual. Esto permite una mejor visualización de las fluctuaciones ocurridas en determinado periodo. Como en el caso de los registros analógicos, en algunas figuras se incluyen los registros desde el año 1994 para efectos de continuidad.

Tremores

Durante el año 2000, la amplitud promedio de los tremores registrados fue de $3{,}03 \times 10^{-5}$ m/s y la frecuencia promedio 2,0 Hz, lo que constituye un incremento importante con respecto de 1998 y 1999. Para la totalidad del periodo de registro de la red digital (1994-2000), la amplitud promedio de los tremores es de $2{,}73 \times 10^{-5}$ m/s y la frecuencia promedio, 1,93 Hz. Estos promedios resultan ligeramente mayores que los reportados por Arroyo *et al.* (1999) para el periodo 1994-1999.

En el informe de Arroyo *et al.* (1999) se había comentado que a partir de la primera mitad del año 1997 las amplitudes promedio de los tremores habían venido disminuyendo de manera notable. No obstante, el gráfico normalizado con respecto del promedio total del periodo de registro (fig. 2) revela que en realidad las amplitudes fueron bajas durante 1994 y que ocurrió un incremento importante entre 1995 y 1997, para bajar notoriamente en 1998 y 1999; finalmente, sucedió un repunte en el 2000.

Como se advierte en la fig. 2, las frecuencias presentaron una fluctuación mensual muy alta entre 1994 y 1997 con respecto de la frecuencia promedio para el periodo total de funcionamiento de las redes del Observatorio (1994-2000).

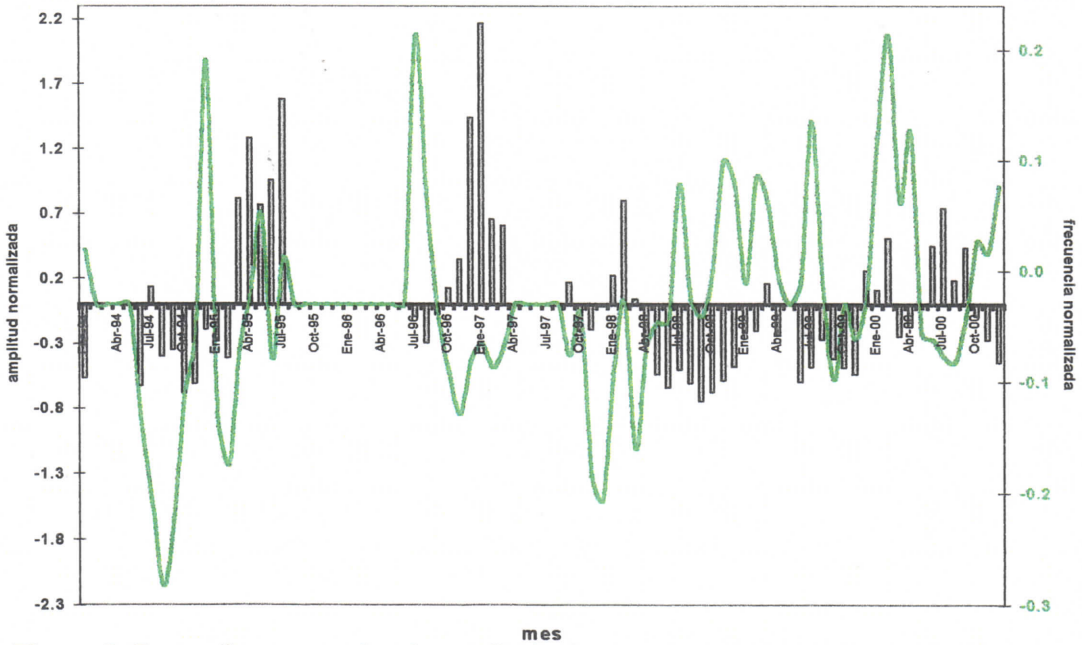


Figura 2: Promedios mensuales de amplitud y frecuencia de tremores, normalizados con respecto de los promedios totales para el periodo 1994-2000, registrados y archivados por la red sismológica digital del OSIVAM.

Explosiones

Las estadísticas de los eventos tipo E (explosivos) se realizan solamente para la estación Castillo (CAS), que se localiza a 5,7 km al SW del volcán. Se hace así debido a que la calidad de los registros en ese sitio es superior a la de la estación Fortuna (FOR), aunque ésta es más cercana al edificio volcánico. En el 2000, se registraron 964 explosiones que incluyeron a la estación CAS (de un total de 1162 explosiones detectadas digitalmente por al menos tres estaciones).

En la fig. 3 se muestra las amplitudes promedio mensuales normalizadas con respecto del promedio total para el periodo 1994-2000. Como se aprecia en dicha figura, las amplitudes de las explosiones siguen la misma tendencia ya señalada para la amplitud de los tremores, con la diferencia de que en el 2000 no hubo incremento con respecto de 1998 y 1999. El promedio total de amplitudes de explosiones registradas entre 1994 y 2000 es de 6,41 x10^{-5} m/s, en tanto que solo en el 2000 fue de 5,02 x10^{-5} m/s. Entre 1995 y la primera mitad de 1997 la amplitud promedio de las explosiones alcanzó los 1,04 x10^{-4} m/s.

De las figs. 2 y 3 se extrae que los flujos piroclásticos del 23 de agosto ocurrieron durante mínimos mensuales de frecuencia y amplitud de tremores y en un periodo de bajas amplitudes de explosiones. Más adelante (figs. 5 y 6) se contemplan esos parámetros en un nivel de promedios diarios, antes y después de los flujos.

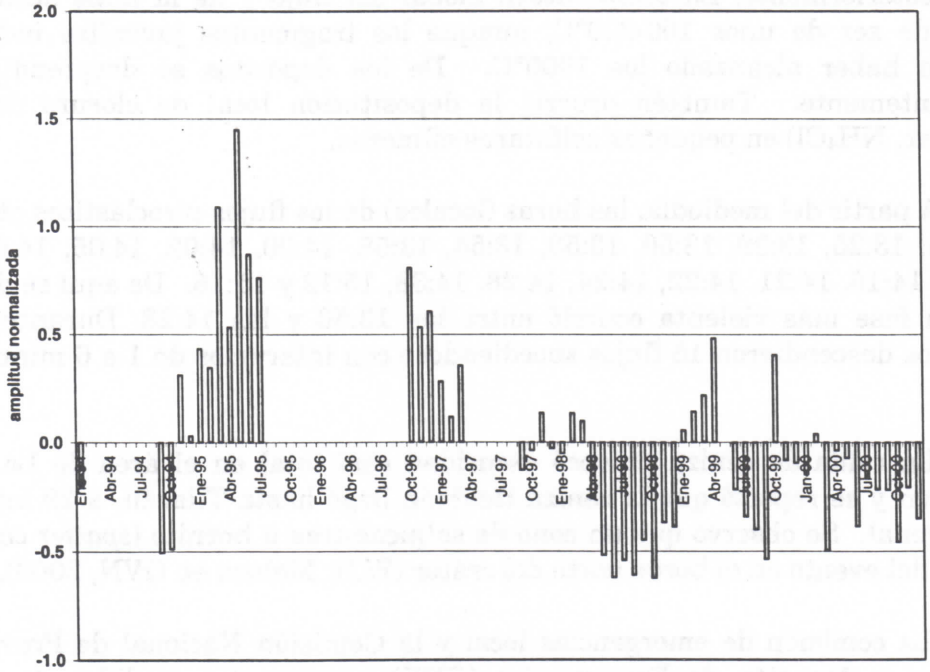


Figura 3: Promedios mensuales de amplitud de los eventos de tipo E (explosiones), normalizados con respecto del promedio total para el periodo 1994-2000, registrados y archivados por la red sismológica digital del OSIVAM. Los valores corresponden con los de la estación CAS.

El flujo piroclástico del 23 de agosto de 2000

El día 23 de agosto, alrededor de las 09:45 (hora local), se inició el descenso de varios flujos piroclásticos por el costado NNE del volcán. Otros pulsos ocurrieron a las 09:55, 09:56 y 09:58; el más importante tuvo lugar a las 10:01 y se prolongó por 6 minutos. Dos flujos más descendieron a las 10:08 y 10:12. Hubo un periodo de calma, después del cual, a partir de las 13:25 se dio una actividad volcánica constante hasta las 15:16. En total, la actividad se extendió por lo menos durante 5:31 horas desde su inicio. Ésta consistió de emisiones de flujos piroclásticos (fotografía 1), además de explosiones acompañadas de columnas de ceniza y gases que alcanzaron más de un kilómetro de altura sobre el nivel del terreno.

Los flujos piroclásticos partieron de la cúspide del volcán y descendieron aproximadamente hasta la cota de 600 m s.n.m., en las cercanías del Centro Turístico Lagos y Senderos, donde tres personas resultaron afectadas por esta actividad: dos turistas norteamericanas y un guía local; el guía y una niña fallecieron poco después. También destruyó la casetilla E de inclinometría del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

Los flujos avanzaron a una velocidad de unos 120 km/h, deshidratando y quemando parcialmente la vegetación (fotografía 2) hasta algunos metros antes del borde de la laguna Cedeño (Los Patos). El movimiento se inició siguiendo un cañón de erosión pre-existente, en dirección norte, para desviarse ligeramente hacia el este posteriormente. La temperatura global del flujo y de la nube acompañante debió de ser de unos 100-200°C, aunque los fragmentos juveniles individuales pueden haber alcanzado los 1000°C. De los depósitos se desprendían gases constantemente. También ocurrió la depositación local de cloruro de amonio (salmiac, NH_4Cl) en pequeñas solfataras efímeras.

A partir del mediodía, las horas (locales) de los flujos piroclásticos observados fueron: 13:25, 13:39, 13:50, 13:53, 13:54, 13:58, 14:00, 14:02, 14:05, 14:07, 14:13, 14:15, 14:16, 14:21, 14:22, 14:24, 14:28, 14:38, 15:12 y 15:16. De aquí se desprende que la fase más violenta ocurrió entre las 13:50 y las 14:28. Durante estos 38 minutos descendieron 15 flujos sucediéndose con intervalos de 1 a 6 minutos entre sí.

La caída de ceniza provocó oscuridad casi total en el área de La Palma y Tabacón y se reportó que la ceniza también llegó hasta Tilarán, a 29 km al oeste del Arenal. Se observó que un cono de salpicaduras u hornito (*spatter cone*) creció antes del evento en el borde norte del cráter (W.G. Melson en GVN, 2000).

La comisión de emergencias local y la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) tomaron las medidas de seguridad necesarias, especialmente el cierre de accesos a las cercanías del volcán y del balneario Tabacón, hasta que se retornó a la normalidad, el día siguiente. La zona por donde descienden este tipo de flujos volcánicos se encuentra dentro del sector que ha sido calificado de alto riesgo en el mapa de peligro volcánico del Arenal, elaborado por el ICE y la compañía Geotérmica Italiana (Alvarado *et al.*, 1988,

1997), y por la resolución vinculante publicada en el diario La Gaceta el 11 de enero de 2001.

Descripción del depósito

El flujo piroclástico fue del tipo flujo de bloques, bombas y cenizas (fotografía 3), constituido por fragmentos juveniles basáltico-andesíticos vesiculados a masivos, junto con bloques pre-existentes de lavas históricas incorporados por erosión de coladas previas, en una matriz lítico-cristalina de cenizas y lapilli (20-50%). Entre los fragmentos juveniles se encuentran algunas bombas del tipo "corteza de pan", ya sea esferoidales u oblongas, con evidencia de estado pastoso, la mayor de las cuales tiene unas dimensiones de 3 m x 1 m x 1,8 m (5,4 m^3); el bloque de lava angular de mayores dimensiones observado mide 9,5 m x 4,4 m x 2,8 m (117 m^3). También se presentan fragmentos juveniles subredondeados a angulares, con fracturas de enfriamiento y un carácter escoriáceo local o total (fotografía 4).

A lo largo del cuerpo principal de los flujos, la vegetación quedó alineada en su misma dirección, mientras que en la parte terminal algunos árboles yacían caóticamente (fotografía 2). Asimismo, como se aprecia parcialmente en la fotografía 3, en los alrededores del depósito, hubo árboles que quedaron en pie aunque sufrieron daños menores, como pérdida de corteza debido a la abrasión de la ceniza (GVN, 2000).

La extensión del depósito es de 2,4 km y tiene unas decenas a centenas de metros de ancho. Su espesor varía entre 3 y 6 m, y el depósito cubre un área aproximada de 0,25 km^2. El volumen de los depósitos de los flujos ($1,0 \pm 0,1 \times 10^6$ m^3) es mayor que el de los ocurridos el 5 de mayo de 1998 (5×10^5 m^3). Se reconocen tres lóbulos: dos terminaron a unas decenas de metros del borde del lago citado (cerca del área de acampado y la capilla del centro turístico) y el tercero se desprendió del canal y se dirigió hacia el NW durante unos 400 m. Otros lóbulos y frentes de flujos quedaron preservados. También fueron observadas estructuras de malecones o levées laterales.

El día 26 de agosto, en el sitio localizado en las coordenadas 10°28,83′ norte - 84°41,99′ oeste, a unos 400 m al SE de la laguna Cedeño, un grupo de geólogos e ingenieros del ICE (L. Rojas, G. Alvarado, A. Cerdas, C. Madrigal, J.F. Morera, A. Molina, L.F. Barrantes, J. Barrantes, J. Chávez), bajo la guía del geofísico M. Arias de la UCR, llevó a cabo una tomografía eléctrica con un arreglo polo-polo sobre el depósito de los flujos piroclásticos. La prospección fue realizada a lo largo de un perfil este-oeste de 90 m de longitud, con una penetración máxima de 45 m bajo el centro del mismo. En la fig. 4 se muestran las curvas de isorresistividad (obtenidas mediante una interpolación de tipo triangulación-lineal con el programa de cómputo Surfer de la compañía Golden Software) y su interpretación.

Los depósitos piroclásticos del 23 de agosto presentan resistividades iguales o inferiores a 2000 ohm-m. Se emplazaron sobre depósitos arenáceos y blocosos productos de la erosión de coladas de lava con un espesor no observable, pero que

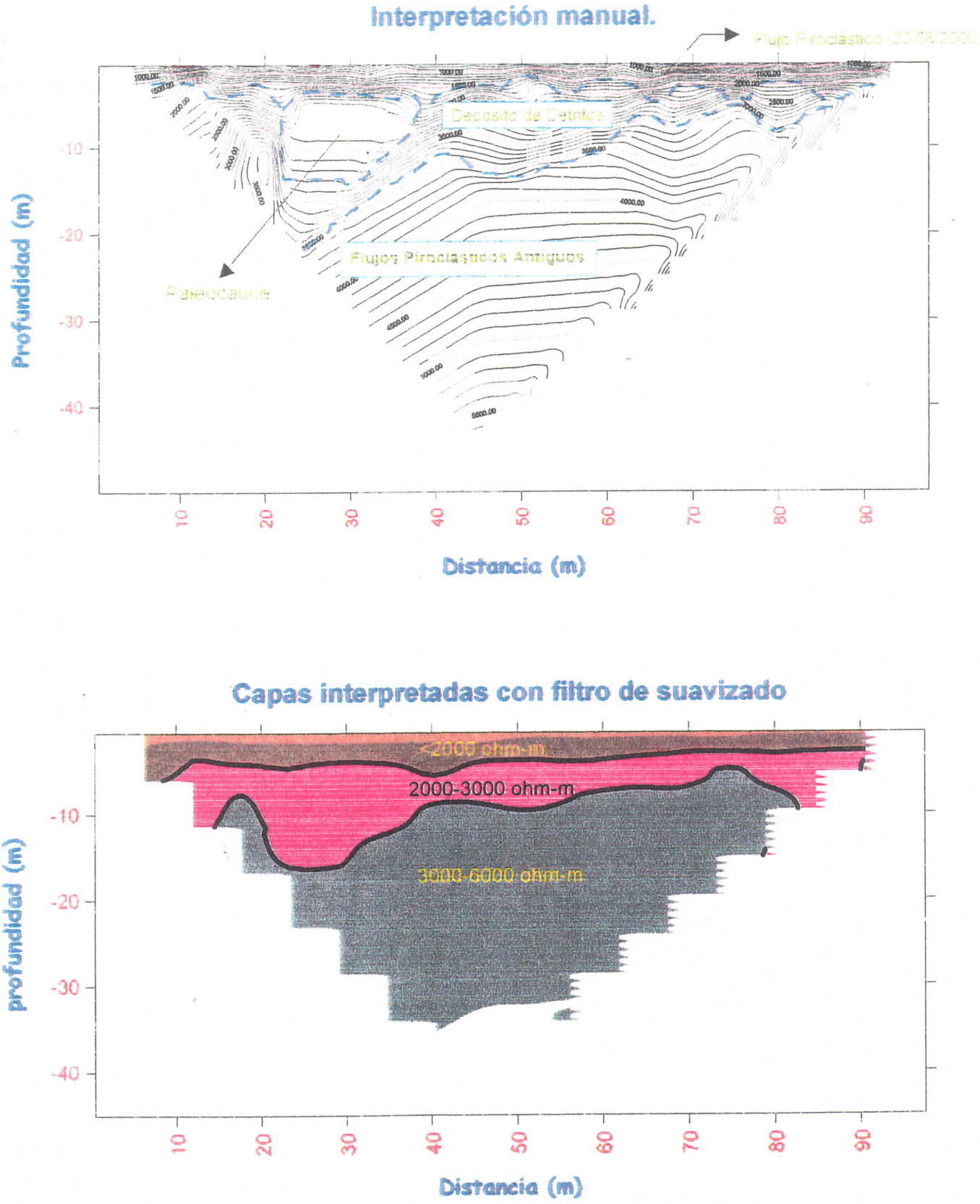


Figura 4: Perfil eléctrico realizado con un arreglo polo – polo sobre el depósito del flujo piroclástico del 23 de agosto.

puede superar los 5 a 10 m (nótese el paleocauce en el sector este) con base en el mencionado perfil geofísico y en observaciones hechas en otros depósitos similares del área. Éstos, a su vez, deben de yacer localmente sobre coladas de lava blocosas, observables cerca del área estudiada, y sobre depósitos epiclásticos (lahares) y piroclásticos antiguos, parcialmente meteorizados y masivos (arcillas entre 3000 y 6000 ohm-m en la fig. 4).

Discusión

En las figs. 5 y 6 se presentan los promedios normalizados diarios de amplitud y frecuencia de tremores y de amplitud de explosiones registrados digitalmente durante los meses de julio, agosto y setiembre de 2000. La normalización se hizo con respecto de los promedios anuales del 2000. Se observa lo siguiente:

- los flujos piroclásticos ocurrieron durante un lapso de amplitudes de tremores más elevadas que el promedio que venía dándose durante ese mes. Estas amplitudes mayores comenzaron aproximadamente el 15 de agosto, pero en los últimos 10 días de julio había ocurrido otro lapso de tremores y explosiones de mayor amplitud. El día 20 de agosto las amplitudes de tremores llegan a ser 1,5 veces superiores al promedio anual; otro pico tuvo lugar un día después del descenso de los flujos, llegando a alcanzar el doble de la amplitud promedio anual. El mismo 23 de agosto, en cambio, las amplitudes fueron las más bajas del mes.

- en cuanto a las frecuencias de los tremores, el promedio durante agosto se había mantenido inferior al promedio anual. Sin embargo, ocurrió un incremento desde el 21 de agosto (promedio del 21 de agosto al 2 de setiembre: 2 Hz; promedio del periodo previo del mes de agosto: 1,7 Hz). El 23 de agosto se registró un dramático descenso en la frecuencia de los tremores.

- las amplitudes de las explosiones, aunque están arriba de los valores promedio, no fueron notables (ninguna alcanza el 0,5). El día 23 de agosto, sin embargo, las erupciones alcanzaron valores superiores al normal en 0,3, es decir, un 30% más fuertes. Como ya se ha mencionado, junto con los flujos piroclásticos (a partir de las 9:40 horas) ocurrieron numerosas explosiones que fueron aumentando en amplitud hasta alcanzar máximos entre las 14:18 y 14:45 (hora local). Esta explosividad se mantuvo hasta las 23:00 horas (hora local) del día 23; luego continuó más moderadamente.

- después del repunte en la amplitud y la frecuencia de tremores el día 24 de agosto, la actividad, tanto de tremores como de explosiones, disminuyó considerablemente durante unos 4 días, para reiniciarse moderadamente alta a partir del día 29 de agosto y mantenerse así hasta mediado setiembre.

Así, desde mediados de julio de 2000 se dio una actividad con aumento de explosiones y tremores. Dicha actividad se caracterizó por un contenido de baja frecuencia de los tremores y poca amplitud de las erupciones, lo que podría indicar

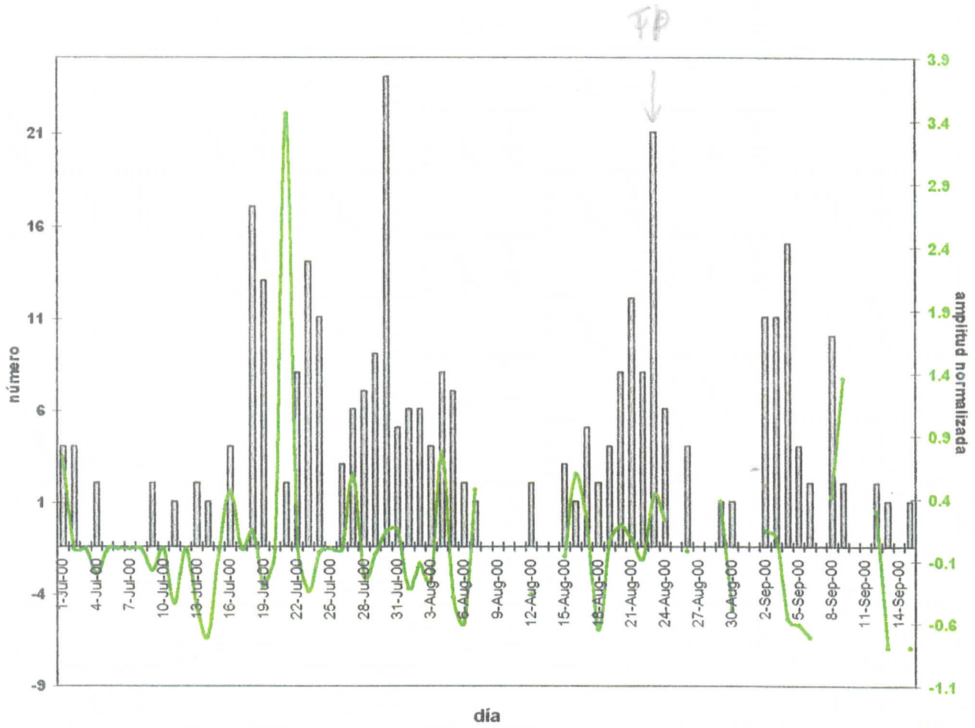


Figura 5: Promedios diarios de amplitud y frecuencia de los tremores registrados en julio, agosto y setiembre de 2000, normalizados con respecto de los promedios totales del año, registrados y archivados por la red sismológica digital del OSIVAM.

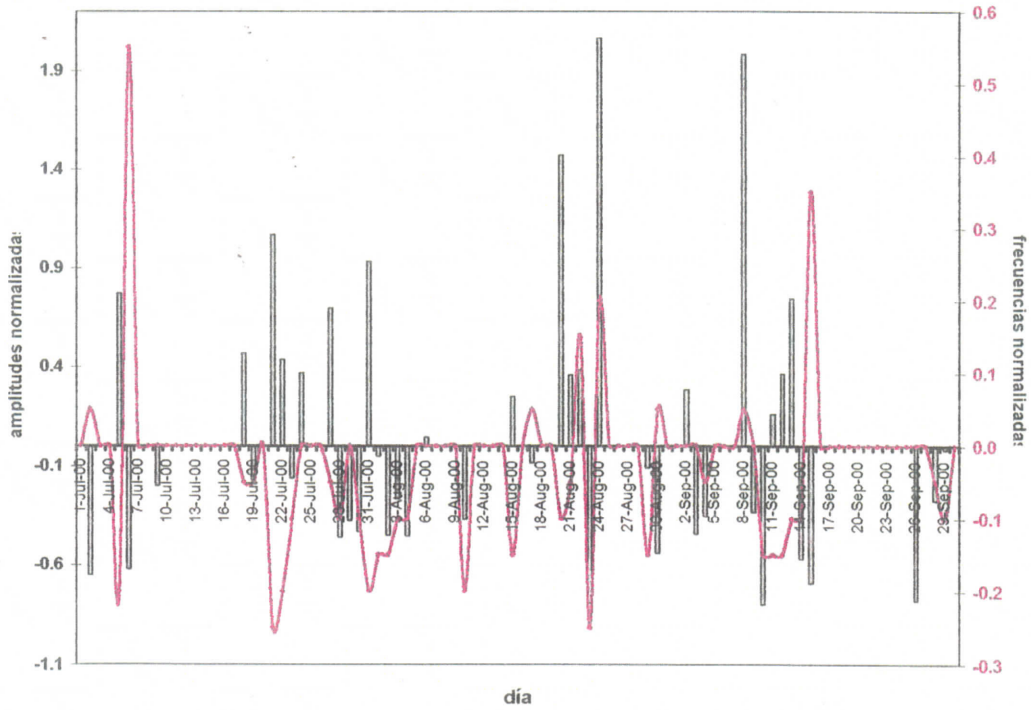


Figura 6: Promedios diarios de amplitud de los eventos de tipo E (explosiones) de julio, agosto y setiembre de 2000, normalizados con respecto del promedio total anual, registrados y archivados por la red sismológica digital del OSIVAM. Los valores corresponden con los de la estación CAS.

que el conducto volcánico estaba relativamente limpio o libre de asperezas y la lava podía salir con relativa facilidad. Esto se manifestó en un mayor aporte de material, que finalizó con el flujo piroclástico debido al desprendimiento de una de las paredes del cráter que cedió por el peso de la acumulación de lava y que fue disparado por un aumento de la actividad volcánica a partir del 15 de agosto.

La señal de tremor de gran amplitud registrada los días 12 y 13 de setiembre, pudo deberse a la disminución abrupta de la presión como consecuencia del derrumbe, lo que prestó libertad al conducto para vibrar más energéticamente.

Los sismos tectónicos registrados en el volcán durante los meses anteriores a agosto del 2000 (Barquero, 2000) podrían asociarse con el descenso de los flujos piroclásticos, tal y como ha sido sugerido por varios autores (p.ej. Barquero & Alvarado, 1989).

Referencias

Alvarado, G.E., Matumoto, T., Borgia, A. & Barquero, R., 1988. **Síntesis geovulcanológica del Arenal (Costa Rica): 20 años de continua actividad eruptiva (1968-1988)**. -Bol. Obs. Vulc. Arenal,1 (1): 1-55; San José.

Alvarado, G.E., Soto, G.J., Ghigliotti, M. & Frullani, A., 1997. **Peligro volcánico del Arenal**. -Boletín OSIVAM, 8 (15-16): 62-82, 1995; San José.

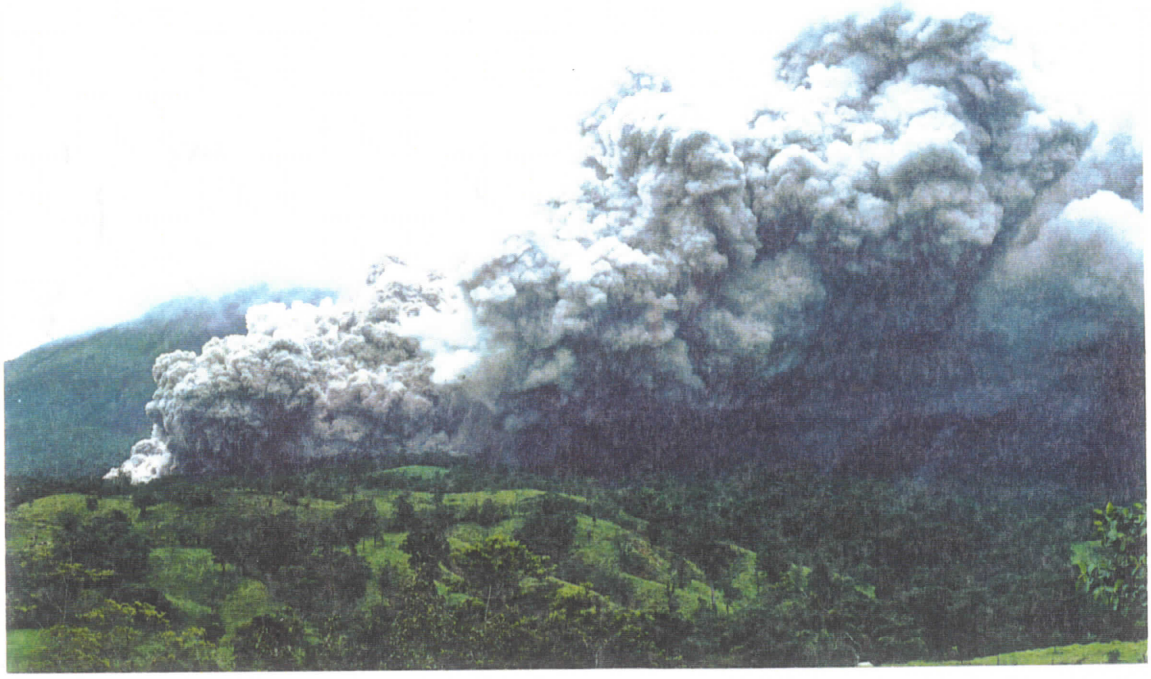
Arroyo, I., Barquero, R., Madrigal, L. & Arias, F., 1999. **Sinopsis de la actividad del volcán Arenal durante los años 1998 y 1999**. -Boletín OSIVAM, 11 (21-22): 22-31; 1998; San José.

Barquero, R., 2000. **Resumen de la sismicidad en las zonas de Miravalles, Tenorio y Arenal durante el año 2000**. -Boletín OSIVAM, este número.

Barquero, R. & Alvarado, G.E., 1989. **Los enjambres de temblores en el arco volcánico de Costa Rica**. -Boletín OSIVAM, 2 (4): 18-39; 1998; San José.

Soto, G.J., Taylor, W.D. & Naranjo, M.T., 1998. **Los registros de tremores del volcán Arenal entre 1994 y 1997: Su estadística y el comportamiento dinámico del volcán**. -Boletín OSIVAM, 10 (19-20): 35-42, 1997; San José.

GVN, 2000. **Bulletin of the Global Volcanism Network**: 25 (7, 8), 2000; Washington D.C.



Fotografía 1: Se observa el avance hacia la laguna Cedeño de uno de los pulsos del episodio de flujos piroclásticos del 23 de agosto de 2000, y su nube acompañante. La vista fue tomada desde el Hotel Montaña de Fuego, al NW del volcán.

Fotografía 2: Vegetación afectada por los flujos piroclásticos del 23 de agosto de 2000, en el sector frontal del depósito. Perspectiva tomada el mismo día desde el camino de acceso al Centro Turístico Los Lagos y Senderos.

Fotografía 3: Depósito de los flujos piroclásticos del 23 de agosto de 2000, del tipo flujo de bloques, bombas y cenizas. Se observa el frente de uno de los lóbulos. En segundo plano, nótese cómo algunos árboles quedaron en pie en los costados del depósito.

Fotografía 4: Un fragmento juvenil de importantes dimensiones en el depósito de los flujos piroclásticos del 23 de agosto de 2000. Se observan grietas de enfriamiento y partes escoriáceas internas.

Boletín OSIVAM	Año 12, No. 23-24	30-38	San José, Costa Rica, diciembre, 2000

Análisis preliminar de los efectos de sitio en las estaciones de la red sismológica del volcán Arenal, Costa Rica

Preliminary site effect analysis of the seismic network stations at Arenal Volcano, Costa Rica

Mauricio Mora
Universidad de Costa Rica, Facultad de Ciencias Básicas, Escuela Centroamericana de Geología (**Dirección Actual:** Laboratoire de Geophysique Interne et Tectonophysique, Université de Savoie, 73376 Le Bourget du Lac, FRANCIA).

Mora, M., 2000. Análisis preliminar de los efectos de sitio en las estaciones de la red sismológica del volcán Arenal, Costa Rica. -Boletín OSIVAM, 12 (23-24): 30-38, 1999; San José.

Resumen

La complejidad de la geología en un área volcánica dificulta la instalación de estaciones sismológicas debido generalmente a la pobre calidad de los depósitos volcánicos. Por lo tanto, para realizar investigaciones sismológicas o bien, establecer una red de monitoreo sísmico en un volcán activo, es necesario conocer detalladamente los efectos producidos por la estructura geológica en las señales sísmicas, con el propósito de evitar interpretaciones incorrectas de los datos. Este trabajo presenta los resultados preliminares del estudio de los efectos de sitio en una de las redes sísmicas del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM), instalada en el volcán Arenal. En este estudio se utilizó el método de Nakamura (1989), que consiste en dividir el espectro de las componentes horizontales por el espectro de la componente vertical. De acuerdo con Nakamura, este cociente permite identificar la frecuencia fundamental de la estructura geológica superficial de un sitio determinado. Fueron calculadas las razones espectrales de una serie de segmentos de tremor armónico que estuvieran registrados en la mayor parte de las estaciones de la red. Como resultado, los picos de frecuencia fundamental y los correspondientes armónicos fueron removidos exitosamente, quedando así la función de transferencia de cada uno de los sitios. Se observó que los sitios generan amplificación de las señal aún en bajas frecuencias (< 5 Hz), que representan el ámbito de interés en el estudio de la evolución de la actividad sismo-volcánica del Arenal. Actualmente, se prepara un estudio más riguroso sobre los efectos de sitio en los alrededores del volcán Arenal, el cual será presentado en publicaciones ulteriores.

Abstract

The complexity of the geological structure in volcanic areas makes a difficult task to set up seismological stations generally because of the poor quality of volcanic deposits. Thus, to carry out seismological investigations or to set up a seismic network for volcanic monitoring at active volcanoes, is necessary to know in detail the effects of the structure on seismic signals to avoid misinterpretations. This work presents the preliminary results of the study of site effects at one of the seismic networks of the Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM), installed at Arenal volcano. The method proposed by Nakamura (1989), which consist on computing the spectral ratio of the of the horizontal components by the vertical component was used. According to him, this ratio allows to identify the fundamental frequency of the shallow structure. Several spectral ratios of harmonic tremor slices recorded at most of the network stations

were computed. As a result, the peak of the fundamental frequencies and corresponding harmonics were successfully removed, leaving the transfer function of each site. Important amplifications at low frequencies (< 5 Hz), representing an important range to study the source evolution of volcanic activity at Arenal volcano, were detected. A more rigorous study of site effects is now being carried out and will be presented in further publications.

Introducción

Los volcanes activos son muy complejos geológicamente debido no solo a la variedad de tipos de roca generados por la actividad eruptiva (lavas, rocas piroclásticas, epiclastos, entre otros) y la forma caótica en la que se depositan, sino también por la existencia de numerosas estructuras tales como fracturas y fallas. Esto dificulta la selección de sitios idóneos para instalar equipo sismográfico y hace que la mayor parte del tiempo se trabaje con señales profundamente alteradas por los sitios de registro y la estructura que atraviesan las ondas. Una de las alteraciones más importantes es la amplificación de la señal dentro de una o varias bandas de frecuencia, lo cual puede generar confusiones en el momento de interpretar. Por esto, es indispensable conocer cuáles son esas bandas que tanto están afectando la señal.

Objetivo

Identificar las frecuencias en las cuales puede haber amplificación de las ondas sísmicas en los sitios de registro de la red sismológica del OSIVAM en el volcán Arenal.

Datos

Esta red sismólogica está conformada por seis estaciones (fig. 1), entre ellas cinco localizadas alrededor del volcán y una en las cercanías de las instalaciones del OSIVAM, localizado en el cerro Chiripa en Tilarán. Los aspectos técnicos sobre la red y los equipos son explicados por Alvarado *et al.* (1997) y Mora (1998).

De la base de datos se extrajo una muestra de 24 tremores registrados en más de 4 estaciones. Con base en este criterio solo se obtuvieron 3 tremores registrados en las 6 estaciones, debido a que las estaciones CHI y BAL tienen un funcionamiento muy irregular debido a problemas técnicos.

Método

El método utilizado en este trabajo fue propuesto por Nakamura (1989) y permite reconocer los ámbitos de frecuencia en los cuales existe amplificación de la señal sísmica.

De acuerdo con Nakamura, la *Función de Transferencia* de las capas superficiales está definida por la razón entre los espectros de frecuencias de las componentes horizontal y vertical en superficie (Coutel & Mora, 1998):

$$S = HS/VS \qquad (1)$$

Esta razón parte de la hipótesis de que:

$$HB / VB \approx 1 \qquad (2)$$

Donde HB y VB son los espectros de frecuencia de las componentes horizontal y vertical respectivamente, medidas en la base de la capa de sedimentos. Esto quiere decir que la magnificación del valor máximo horizontal debida a las capas superficiales, puede ser estimada a partir de la razón entre los valores máximos horizontales y verticales obtenidos en la superficie.

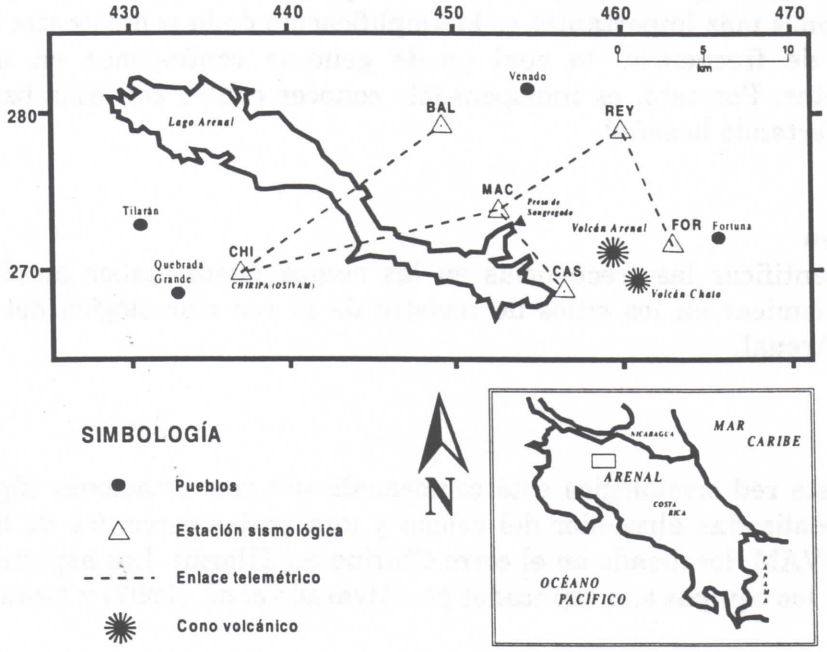


Figura 1: Mapa de ubicación del volcán Arenal y las estaciones de la red sismológica del OSIVAM.

Aunque sus bases teóricas aún son discutidas, el método ha probado ser bastante confiable para estimar la frecuencia fundamental de resonancia de la estructura superficial, a pesar de que también existen dudas sobre la exactitud del nivel de amplificación correspondiente. No obstante, tiene la ventaja de que puede ser llevado a cabo teniendo solamente una estación sismológica digital de tres componentes. Esto facilita estudiar muchos sitios en poco tiempo y con un costo bastante bajo.

Procesamiento de datos

Se seleccionaron segmentos de tremor con una longitud de 1,2 minutos que equivalen, a partir de una frecuencia de muestreo de 62 Hz, a 4096 puntos aproximadamente. Posteriormente, se obtuvieron los espectros de potencia normalizados para cada componente y las respectivas razones espectrales. Al final, se aplicó un suavizado para observar los picos más claramente.

Resultados

Para evaluar los resultados obtenidos por las razones espectrales, primero se identificaron las frecuencias de los tremores que podían ser debidas a la fuente comparando los espectros de cada estación entre sí. De este modo, los picos que tuvieran en común serían independientes del sitio de registro y del efecto de propagación y, por lo tanto, generados por la fuente sísmica. Un ejemplo de este análisis se muestra en la fig. 2, donde se comparan los espectros de potencia de un tremor armónico registrado en todas las componentes de las 6 estaciones de la red sismológica. Claramente, se puede observar una frecuencia dominante alrededor de los 1,8 Hz.

Luego de aplicar el procedimiento anterior para todos los segmentos de tremor, se calcularon las razones espectrales. La fig. 3 muestra un ejemplo de los espectros de potencia de las tres componentes y las correspondientes razones espectrales para cada una de las 6 estaciones.

Como se esperaba, las frecuencias fundamentales y sus armónicos fueron eliminados después de realizar el cociente espectral, quedando únicamente las frecuencias que pueden atribuirse a la estructura geológica de los sitios de registro. Asimismo, se observa que la principal amplificación ocurre a menos de 5 Hz, en general, para todas las estaciones. Similares resultados se obtuvieron para el resto de los segmentos estudiados.

Desde el punto de vista geológico, las estaciones MAC, CAS, FOR y REY se encuentran sobre depósitos volcánicos recientes y poco consolidados: principalmente capas de cenizas y lapilli en los que no hay mucho desarrollo de suelo; las estaciones CHI y BAL se encuentran sobre rocas piroclásticas, epiclásticas y lávicas del Grupo Aguacate y la Formación Monteverde, en los que el suelo es más desarrollado y espeso. En ambos casos, las condiciones geológicas de sitio no son muy buenas y es de esperar que respondan favorablemente a la excitación sísmica, especialmente a bajas frecuencias.

Conclusiones

Debido a la heterogeneidad litológica y de las facies volcánicas de un estratovolcán como el Arenal, antes de realizar cualquier interpretación sobre las frecuencias de las señales sismo-volcánicas, es necesario tener seguridad de que éstas no sean producto de los efectos de sitio o bien, que no estén influenciadas por ellos. Tomando segmentos de tremor armónico se siguieron dos procedimientos

para separar los efectos de la fuente y los efectos de sitio: 1) la comparación de los espectros de frecuencia observados en cada estación y 2) el método de las razones espectrales propuesto por Nakamura (1989). Mediante el primero, se observó que los picos de frecuencia fundamental y los sobretonos del tremor armónico son comunes en todas las estaciones, independientemente de la distancia de éstas al cráter activo y la posición en el edificio volcánico, lo cual es sin duda efecto de la fuente sísmica. Mediante el segundo, se observó que los sitios de registro de la red sismológica del OSIVAM generan amplificación de las señal en el ámbito de las bajas frecuencias (< 5 Hz), el cual es de sumo interés en el estudio de la evolución de la actividad sismo-volcánica del Arenal.

El método de las razones espectrales propuesto por Nakamura (1989) muestra ser eficiente en la separación de los efectos de la fuente y de sitio tal y como se comprobó al remover exitosamente los picos de frecuencia del tremor armónico. Igualmente, promete ser una herramienta útil para estudios concernientes a la selección de sitios para la instalación de equipo sismográfico en áreas volcánicas.

Actualmente, se prepara un estudio más riguroso sobre los efectos de sitio en el volcán Arenal, el cual será remitido al Geophysical Research Letters.

Agradecimientos: Mi agradecimiento al personal del ICE, en particular del OSIVAM y de la Sección de Sismología, Vulcanología y Exploración Geofísica de la Universidad de Costa Rica (UCR). El apoyo de Víctor Schmidt y Aaron Moya del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la UCR fue fundamental para el desarrollo del estudio.

Referencias

Alvarado, G.E., Taylor, W., Ohrnberger, M., Soto, G. and Madrigal, L., 1997. **First observations of volcanic seismicity at Arenal volcano (Costa Rica) using a new three-component seismic digital network**. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 8 (15-16): 11-45; San José.

Coutel, F. & Mora, P., 1998. **Simulation - Based Comparison of Four Site-Response Estimation Techniques**. -Bull. Seism. Soc. of America, 88 (1): 30-42.

Mora, M., 1998. **Análisis espectral del tremor armónico del volcán Arenal (Costa Rica) y modelización de su fuente**. Tesis de Licenciatura, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica: 113 pp + 1 apén.; San José.

Nakamura, Y., 1989. **A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface**.Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, 30(1), 25 - 33.

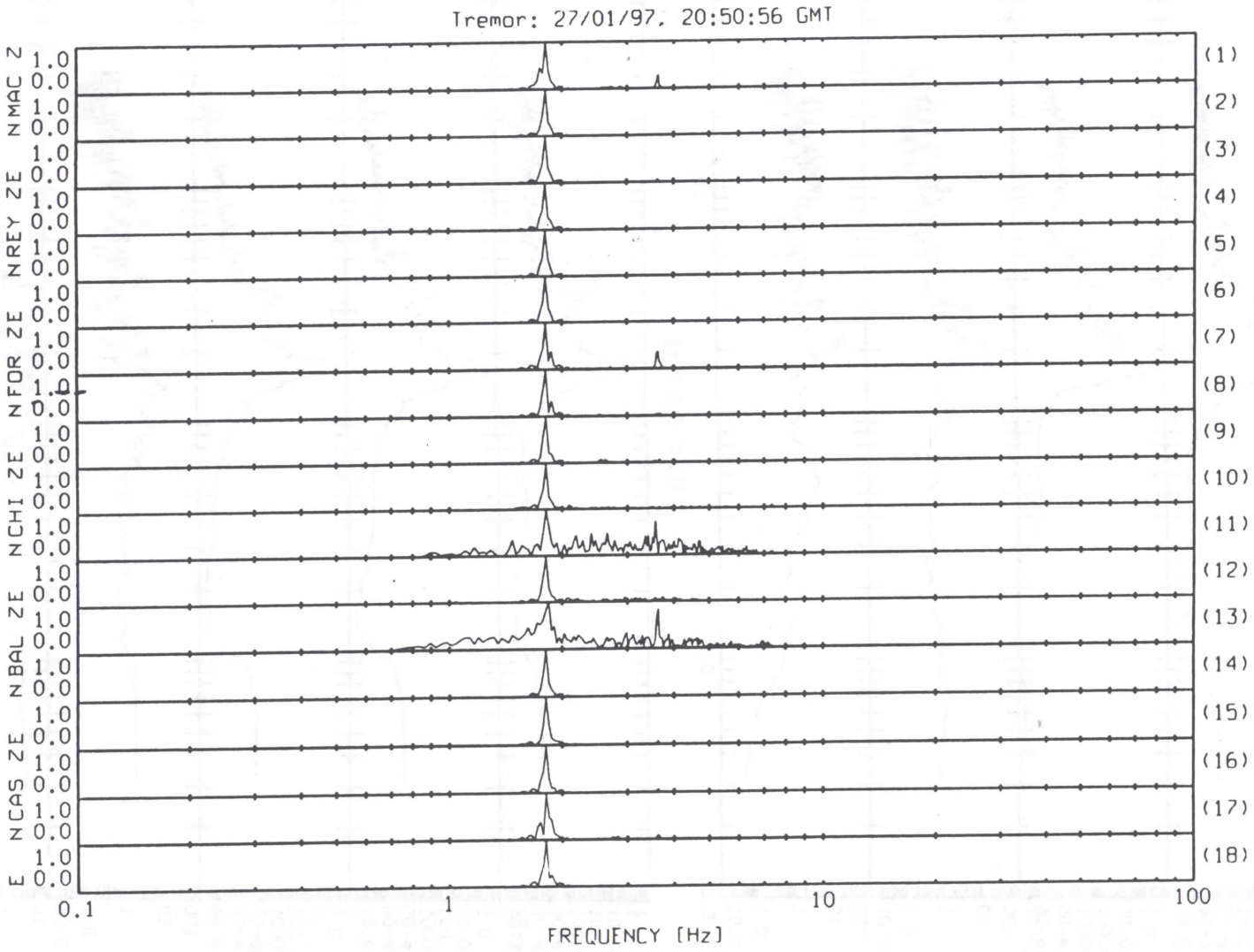


Figura 2: Espectros de velocidad de un segmento de tremor registrado el 27/01/97 a las 20:50:56 (GMT). Se muestran todas las componentes (Z, NS y EW) de las seis estaciones de la red de Arenal.

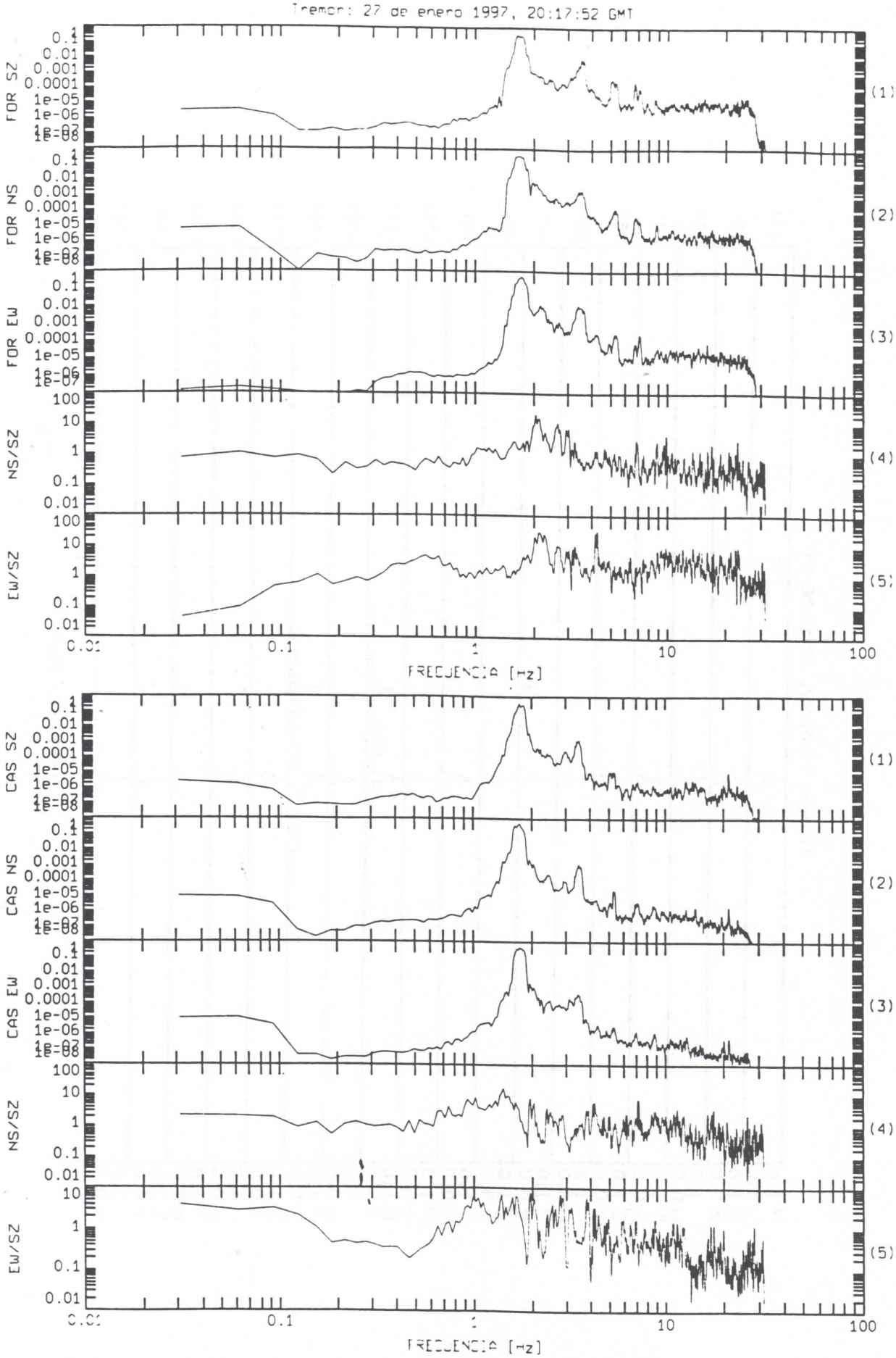


Figura 3a: Arriba: de 1 a 3 son los espectros de potencia en las componentes de la estación FOR, 4 y 5 son las relaciones espectrales de las componentes horizontales con respecto de la componente vertical. Abajo se muestra la misma secuencia anterior para la estación CAS. El tremor utilizado es del día 27/01/97 a las 20:17:52 (GMT).

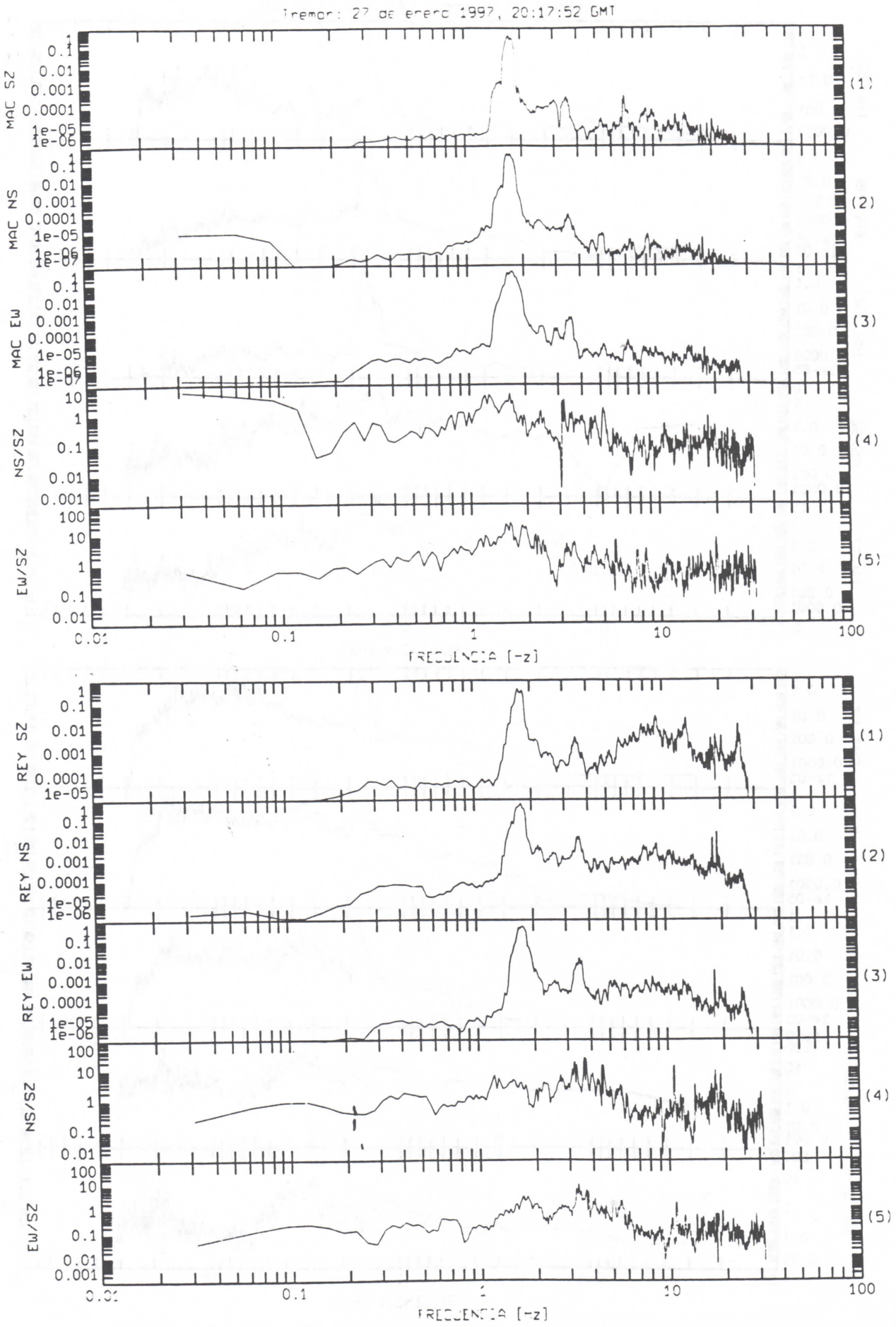


Figura 3b: Arriba: de 1 a 3 son los espectros de potencia en las componentes de la estación MAC, 4 y 5 son las relaciones espectrales de las componentes horizontales con respecto de la componente vertical. Abajo se muestra la misma secuencia anterior para la estación REY. El tremor utilizado es del día 27/01/97 a las 20:17:52 (GMT).

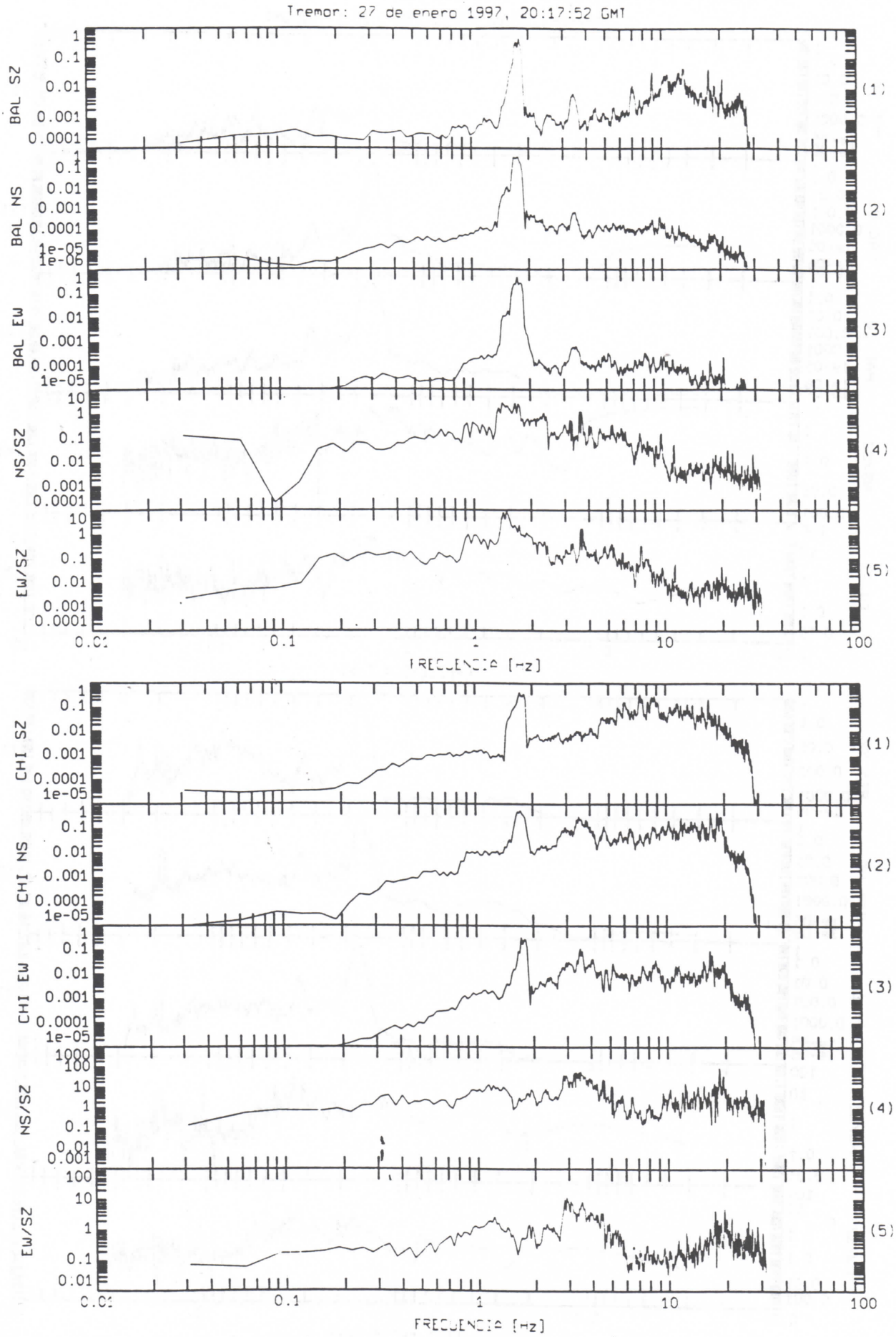


Figura 3c: Arriba: de 1 a 3 son los espectros de potencia en las componentes de la estación BAL, 4 y 5 son las relaciones espectrales de las componentes horizontales con respecto de la componente vertical. Abajo se muestra la misma secuencia anterior para la estación CHI. El tremor utilizado es del día 27/01/97 a las 20:17:52 (GMT).

Boletín OSIVAM	Año 12, No. 23-24	39-53	San José, Costa Rica, diciembre, 2000

Los flujos piroclásticos del volcán Arenal (Costa Rica) entre 1975 y 2000: Origen, frecuencia, distribución y peligro asociado

The pyroclastic flows of Arenal Volcano (Costa Rica) between 1975 and 2000: Origin, frequency, distribution and related hazard

Guillermo E. Alvarado & Ivonne Arroyo
Área de Amenaza y Auscultación Sismo-volcánica, ICE, Apdo. 10032-1000, San José, Costa Rica.

Alvarado, G.E. & Arroyo, I., 2000. Los flujos piroclásticos del volcán Arenal (Costa Rica) entre 1975 y 2000: Origen, frecuencia, distribución y peligro asociado. -Boletín OSIVAM, 12 (23-24): 39-53; San José.

Resumen

Un total de al menos 52 eventos de flujos piroclásticos (individuales o compuestos por varios lóbulos o pulsos) han sido reportados en el volcán Arenal entre 1975 y 2000, y particularmente de 1986 al 2000. La compilación reveló que los años con más intensa actividad de flujos piroclásticos fueron los de 1992-93, seguidos por 1987,1989, 1996 y 1998. En coaintraposición, los años de 1976-1986, 1991, 1994-95 y 1999 fueron de mayor calma. Los meses en los que se ha reportado menos flujos piroclásticos son los de principios y fin de año (enero y diciembre), y en julio. Si nos referimos a las horas de los reportes, vemos cómo éstas se concentran en las horas diurnas de mayor actividad turística (entre las 9 a.m. y las 6 p.m.) y con mejor visibilidad relativa. En general, se puede decir que entre 1986 y el 2000 (periodo con mayor actividad de flujos piroclásticos) se generaron unos 51 eventos, que variaron entre 1 y 7 flujos por año (3,5 eventos por año), de los cuales tan solo 3 flujos superaron o igualaron los 2 km de longitud (un evento de este tipo cada 4,6 años). El paso de una actividad meramente efusiva, entre 1975 y 1983, a una actividad efusiva-estromboliana a partir de 1984, pudo haber desestabilizado y modificado la geometría del cono y su conducto eruptivo, favoreciendo la generación de flujos piroclásticos; el flujo de 1975 parece estar igualmente asociado con una desestabilización del cráter C, debido a la migración del foco del cráter inferior (A) al superior y actualmente activo (C). Durante 25 años solo un flujo alcanzó los 3,6 km de longitud, justo hasta donde actualmente se encuentran las instalaciones termales del río Tabacón. Los flujos ocurren en un gran radio de acción de unos 315°, pero son más frecuentes en todo el semicírculo occidental, y de mayor longitud en sus flancos norte y noroeste. El antiguo cono del Arenal (cráter D) protege los flancos noreste, este y, en parte, el sudeste mientras aquél mantenga su estabilidad. La longitud de los flujos entre 1986 y el 2000 varió entre 3,2 y 0,3 km, siendo lo más normal entre 0,4 y 1 km (0,7 km como promedio). Los flujos se originan asociados con tres procesos principalmente: a) colapsos de columnas eruptivas estrombolianas, b) derrumbes del frente de coladas de lava en bloques, y c) derrumbe del lago de lava cratérico sumital con explosiones asociadas. Sismos de tipo A parecen preceder a los mayores eventos piroclásticos entre unas semanas a varios meses de antelación. Son estos últimos los más estudiados y los que han llegado a alcanzar mayores distancias (2-3,6 km), por lo que ofrecen un mayor peligro. Su velocidad suele ser de unos 80-120 km/h por lo que requieren de tan sólo 2-3 minutos para alcanzar una distancia de 4 km, justo hasta los sectores turísticos. Tanto los diagramas como la presencia del lago de lava cuspidal, sugieren que este tipo de proceso (flujos piroclásticos) puede darse nuevamente en el futuro cercano.

Abstract

A study of a total of at least 52 events of pyroclastic flows (individual or compound by several lobes or pulses) have been reported at Arenal volcano between 1975 and 2000, and particularly from 1986 to 2000. This compilation revealed that the years with stronger activity of pyroclastic flows were 1992-93, followed by 1987, 1989 and 1998. In the other hand, years 1976-1986, 1991, 1994-95 and 1999 were relatively more quiet. The months with less pyroclastic flows reported have been the beginning and the end of the years and July. In reference to the hours of reports, we can see that these concentrate during daylight hours, which coincide with the time of tourist activity (between 9 a.m and 6 p.m.).and also with better visibility. In general, we can say that between 1986 and 2000 (period of stronger activity of pyroclastic flows) 51 events were generated, varying between 1 and 7 flows (3.6 events per year), from where only 3 flows had 2 km of length or more (one event of this type every 4.6 years). The change of an effusive activity, between 1975 and 1983, to an effusive-strombolian from 1984 on, could have unstabilized and modified the geometry of the cone and its eruptive conduit, favoring the generation of pyroclastic flows; the 1975 pyroclastic flow seem also to be associated with unstabilization at crater C, due to the migration of the lower crater (A) focus to the upper and actually active one (C). During 25 years only one flow reached the 3.6 km of length, just where at present time is located the Tabacón Resort. The flows take place at a radius of action of 315°, but they are more frequent on the western circle, and longer at the north and northwestern flanks. The former Arenal cone (crater D) protects the northeast, east and , in part, the southeast flanks while it maintains its stability. From 1986 to 2000, the length of the flows varies between 3.6 and 0.3 km, been the most frequent between 0.4 and 1.0 km (an average of 0.7 km). The flows originate by three main factors: a) collapse of eruptive strombolian columns, b) landslides of blocky lava fronts, and c) landslide of the summital crater lava lake with associated explosions. A type earthquakes seem to precede the major pyroclastic events, with several weeks to months of antelation. These last ones are the best studied and the ones of major length (2-3.6 km), and by this reason the most hazardous. Its velocity is usually of 80-120 km/h, so they require only 2-3 minutes to reach a distance of 4 km, just where the touristic sectors are. The diagrams as well as the presence of summit lava lake, suggest that this kind of process (pyroclastic flows) can take place again in the near future.

Introducción

El Arenal es mundialmente famoso por diversos aspectos: 1) por ser, junto con el Mayon (Filipinas), el volcán en el que se dieron a conocer ampliamente los flujos piroclásticos y los primeros cálculos sobre las velocidades iniciales de los bloques balísticos eruptados (Fudali y Melson, 1972; Melson y Sáenz, 1973), 2) por mantenerse activo durante más de 32 años y estar dentro de los 16 volcanes más activos en los últimos 25 años, además de estar incluido dentro de los cuatro más activos en el continente americano (Simkin y Siebert, 2000) y uno de los 100 volcanes más activos del mundo (Tazieff and Sabroux, 1983; Yokoyama *et al.*, 1984), 3) por poseer un amplio espectro en el tipo de flujos piroclásticos y por estar muchos de ellos raramente asociados con actividad estromboliana y, finalmente, 4) por estar dentro de los volcanes más visitados por turistas extranjeros en América. Estos factores no solo han motivado las investigaciones científicas, sino que han dado pie a un gran desarrollo turístico en la región y al pie del volcán, en particular desde 1990, con un despuntar en infraestructura, que se ha traducido en profundos cambios socio-económicos y culturales para los lugareños que todavía no han sido evaluados. Todo ello ha representado un incremento en la vulnerabilidad volcánica. Así, en los últimos años, el volcán ha estado en los titulares mundiales por su

actividad de flujos piroclásticos y por el hecho de que dos personas murieron recientemente a causa de los mismos, y 11 más por acercarse demasiado al volcán en una avioneta turística.

El presente trabajo reúne y evalúa por primera vez la información acerca de todos los flujos piroclásticos reportados en la literatura vulcanológica, en particular aquéllos incluidos en el *SEAN Bulletin* (*Smitsonian Institution*), después denominado *Global Volcanism Network* (GVN), el Boletín del Volcán Arenal (OVA), posteriormente Boletín del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM), y con base en reportes del Boletín de Vulcanología de la Universidad Nacional (UNA) y en otras publicaciones. Se compiló parámetros tales como la fecha, la hora en que ocurrieron, la longitud alcanzada, el número de pulsos y el flanco sobre el cual se propagaron (tabla 1). En muchos casos la información es incompleta o es contradictoria (caso de los meses de 1987 entre el *SEAN Bull.* y el Bol. Vulcanol.-UNA), o simplemente se reporta el mes sin más detalles (varios ejemplos en 1988, 1990 y 1992, entre otros). En aquellos casos en los que solamente se describen "flujos pequeños", sin precisar su longitud, se estimó arbitrariamente una longitud 0,4 km. De igual modo, y aunadas con los problemas ya mencionados, las inclemencias del tiempo y la nocturnidad durante las cuales pudieron suceder varios flujos no registrados, hacen que muchos de los datos acá reportados sean estimaciones mínimas. Aun con todos estos atenuantes, se desprenden datos sumamente interesantes, que si bien eran conocidos previamente por experiencia o intuición, nunca se habían presentado en forma sinóptica y estadística. Se discutirá sobre la frecuencia espacial y temporal, los horarios y las distancias recorridas, así como los diferentes orígenes en los últimos 25 años, y en particular para los últimos 15 años, que es cuando tenemos un registro más continuo de observación y de mediciones de campo. Estos factores son fundamentales, no solo para conocer la dinámica eruptiva del Arenal y sus flujos piroclásticos asociados, sino para evaluar su peligro implícito.

Aspectos morfológicos y eruptivos del Arenal

Previamente a la descripción del origen de los flujos piroclásticos, es conveniente describir algunos aspectos de interés morfológico referentes al Arenal. El volcán posee actualmente un único cráter activo (cráter C), que ha estado en crecimiento continuo desde su formación en 1968, y en particular desde 1979. En el presente su altura es de unos 1657 m. La pendiente del cono es de unos 30°-34°, muy cerca del ángulo de estabilidad de los productos piroclásticos y efusivos del Arenal.

Su actividad eruptiva, después de su violento despertar en 1968, se limitó a la continua efusión de coladas de lava, primero desde su cráter inferior (cráter A) entre 1968 y 1974, y desde ese entonces hasta el presente la actividad se trasladó al cráter sumital o C. Allí, nuevamente, la actividad fue predominantemente de tipo efusiva (coladas de lava), pero con fases explosivas efímeras en 1975 y 1980. A partir de mayo de 1984 éstas se hicieron más frecuentes, tipificadas como explosivas de tipo estromboliano, que se alternan con las efusiones lávicas. Un lago

cratérico cuspidal está presente quizás desde 1975 y seguramente desde 1980, y por lo menos a partir de 1993 se presenta además actividad efímera de hornitos o conos de salpicaduras de lava. Es justo durante esta fase eruptiva cuspidal (1975-2000) en la que se ha generado flujos piroclásticos coetáneos con el paulatino crecimiento del cono.

Tipos de flujos piroclásticos

Los flujos piroclásticos del Arenal entre 1975 y el 2000 pueden clasificarse, de acuerdo con su origen y tipo de depósitos, básicamente en tres: a) asociados con colapsos de columnas eruptivas estrombolianas (p.ej. 13 de julio 1987, 11 de marzo de 1988 y 24 de febrero de 1992), b) asociados con derrumbes del frente de coladas de lava en bloques (p.ej. mayo-junio, 1993), y c) asociados con el derrumbe del lago de lava cratérico sumital con explosiones asociadas (p.ej. junio 1975, 28 de agosto 1993, 5 de mayo 1998 y 23 de agosto 2000). Para algunos autores, flujos similares en otras partes del mundo se asemejan más a avalanchas, dado que existe una fuerte componente de transporte por rodamiento e interacción intraclastos y con el suelo, por los que los clasifican como avalanchas piroclásticas (ver discusión en Francis *et al.*, 1973; Mellors *et al.*, 1988).

Los depósitos de los flujos asociados con colapso de columnas eruptivas, aunque fotografiados, no han sido estudiados en el campo dado su peligro permanente implícito. Los flujos piroclásticos relacionados con colapsos de coladas de lava parecen formar abanicos de detritos de bloques de lava polihédricos en una matriz de detritos lávicos (tamaño de ceniza y lapilli), mayoritariamente en contacto puntual. Vale la pena acotar que en el caso de derrumbes de frentes de lava, se tomaron únicamente aquellos casos referidos como "flujos piroclásticos", y la distancia tomada en consideración es aquella recorrida entre el frente lávico y el frente alcanzado por el flujo piroclástico.

Los depósitos asociados con derrumbes de los lagos de lava están constituidos por grandes (normalmente métricas) bombas "corteza de pan" (pero no de origen balístico), por bloques de lava con grietas de enfriamiento y por bloques de lavas pre-existentes, en una matriz (contacto puntual o flotante) de detritos; suelen presentar gradación inversa. Para más detalles de estos últimos tipos véanse los trabajos de Soto *et al.* (1996), Alvarado *et al.* (1998) y Arroyo *et al.* (2000).

Los flujos piroclásticos en el tiempo y en el espacio (1975-2000)

El primer flujo piroclástico reportado y de importancia después de los de 1968 (fase inicial en conducto cerrado), fue el del 21 de junio de 1975 (conducto abierto), justo en el momento en que la actividad eruptiva migró del cráter inferior A al superior C y actualmente activo. Dicho flujo viajó 3,6 km por el valle del río Tabacón (distancia máxima alcanzada por un flujo de bloques, bombas y cenizas en el Arenal), más allá de las actuales instalaciones de los balnearios. Varios flujos menores siguieron a dicha actividad. Después de ello, se dio una supuesta calma en la generación de flujos piroclásticos de casi 11 años, la cual se rompió a mediados

de marzo de 1986, fecha en la cual se inició una serie de flujos piroclásticos de manera más o menos periódica hasta 1991. A partir de 1992, se dio un incremento más notorio, que prácticamente finalizó con el conocido flujo del 28 de agosto de 1993. A partir de ahí, la actividad fue baja, para volver a incrementarse en 1996 y recrudecer desde enero de 1998 hasta el presente (23 de agosto del 2000). (figs. 1 y 2).

La duración de los flujos piroclásticos puede fluctuar desde menos de dos minutos y a modo de un único evento, hasta un poco más de 5 horas (5 de mayo 1998 y 23 de agosto de 2000), excepcionalmente 5 días (p.ej. junio de 1975), y constituidos por varios pulsos sucesivos, inclusive más de 20 (tabla 1). Valga señalar que en los gráficos elaborados en este trabajo, no se incluyó la totalidad de los pulsos de los flujos piroclásticos ocurridos en junio de 1975 (más de 8, pero se desconocen detalles), mayo de 1998 (23) y agosto de 2000 (27) por tratarse de eventos de magnitud muy superior a la normal y por motivos de escala y/o del tipo de gráfico; no obstante, estos flujos descendieron por los flancos que, aún sin incluirlos, se catalogan como las más peligrosos por este tipo de actividad volcánica de acuerdo con la presente compilación, como se explica más adelante.

Se observa en los diagramas (figs. 1, 2 y 3a) que los años con más intensa actividad fueron los de 1992-93, seguidos por 1987, 1989, 1996 y 1998. En contraposición, los años de 1976-1986, 1991, y particularmente de 1994-95 y 1999 fueron relativamente tranquilos. Resulta interesante y tentadoramente coincidente, que la mayor cantidad de reportes corresponden con la época en que se iniciaron las mejorías de las vías de acceso a los alrededores del volcán, las cuales cambiaron substancialmente a partir de 1986 y, al volverse un volcán turístico por excelencia, a partir de 1990. Sin embargo, parece cierto que entre 1976 y 1985 no hubo flujos piroclásticos importantes, debido a que la actividad predominante era efusiva, siendo normal que los vulcanólogos subieran hasta el cráter a estudiar el lago de lava. Igualmente verdaderos podrían ser algunos de los años de pasividad anteriormente reportados para la década de los años noventa.

Los flujos han llegado a alcanzar distancias máximas de hasta 3,6 km, aunque normalmente son inferiores a los 2 km, y, por lo general, aún menores al kilómetro de emplazamiento, para un promedio de todos los lóbulos registrados de 0,7 km (tabla 1, fig. 3b). Aquéllos que han alcanzado distancias superiores o iguales a los 2 km han estado asociados con el colapso del lago de lava y con explosiones concomitantes, y han ocurrido en mayo-junio y en agosto. Los meses en los que se ha reportado menos flujos son los mediados de año (julio) y fin/inicios de año (octubre-diciembre-enero) (fig. 4a).

Si nos referimos a las horas de reportes, vemos cómo éstas se concentran de forma evidente en horas diurnas, de mayor actividad turística (entre las 9 a.m. y las 6 p.m.) y con mejor visibilidad relativa (fig. 4a). De lo anterior se desprende lo ya especulado por Alvarado *et al.* (1998): que muchos flujos menores quizá no llegaron a ser reportados por haber ocurrido en horas de la noche y/o con escasa visibilidad (lluvia o nublado).

Desde el punto de vista de mayor incidencia en los flancos del Arenal (figs. 5a,b y c) se determina que desde el NE hasta el SE, en un amplio semicírculo de unos 315°, son propensos a que bajen flujos piroclásticos, pero es el semicírculo formado entre el norte, el oeste y el sur el que ofrecen una mayor incidencia por la dualidad conjunta de la longitud que suelen alcanzar y por su frecuencia. Asimismo, aunque los flujos parecen ser más frecuentes hacia el sur y el oeste, hacia el norte suelen ser de mayor longitud (figs. 5b y c), incluyendo al evento más largo conocido (junio de 1975). Además, hay que anotar que justo al sur del Arenal se encuentra un punto de observación de grupos de científicos, aficionados y hoteleros (Arenal Observatory Lodge), que puede acrecentar preferencialmente el número de observaciones con respecto a otros flancos.

Amenaza volcánica

Aunque el hemisferio oeste, en un amplio semicírculo, es preferencial al descenso de flujos piroclásticos, son los flancos norte y noroeste los que ofrecen una mayor incidencia por la dualidad conjunta de la longitud que suelen alcanzar y por su frecuencia. El flanco oriental parece estar relativamente protegido, por el momento, de estos flujos piroclásticos hasta tanto no se desestabilice el cono antiguo (cráter D). Claramente, la longitud que suelen alcanzar los flujos es inferior a los 2 km, aunque sabemos que pueden llegar al superar los 3,6 km de extensión. Las nuevas disposiciones de regulación del Arenal (La Gaceta N° 8, 11 enero del 2001) contemplan algunos de estos factores.

En general, se puede decir que entre 1986 y el 2000 se generaron unos 51 eventos de flujos o avalanchas piroclásticas (3,4 eventos por año), de los cuales tan sólo 3 superaron o igualaron los 2 km de longitud (un evento de este tipo cada 4,6 años). Si tomamos en cuenta el flujo de 1975 (concomitante a la migración de la actividad del cráter inferior al superior), entonces la frecuencia por año disminuye a unos 2,1 flujos/año y a un evento importante de longitud mayor a 2 km cada 6,2 años. Durante 25 años sólo un flujo alcanzó los 3,6 km de longitud, canalizado en el valle del río Tabacón.

Tanto los diagramas que resumen esta compilación como la presencia actual del lago del lava cuspidal, sugieren que este tipo de fenómeno (flujos piroclásticos) puede darse nuevamente en el futuro, quizás alguno importante ($L \geq 2$km) dentro de unos 3-7 años plazo. Con una velocidad entre 80 y 120 km/h, requieren de tan sólo de 2-3 minutos para alcanzar una distancia de 4 km.

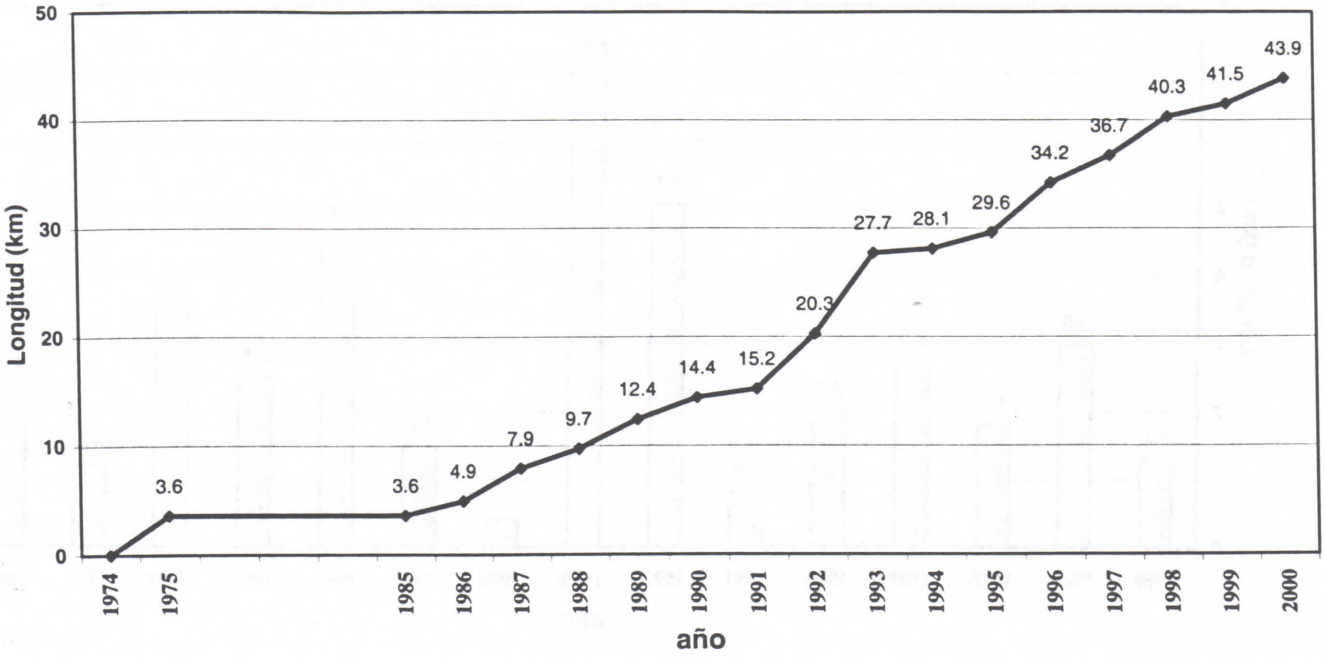
Tabla 1: Información disponible de los flujos piroclásticos del volcán Arenal entre 1975 y 2000

Fecha	Hora Local	Longitud (km)	Flanco	Sismicidad premonitora (tipo A)	Número de flujos	Referencia
17-21 junio 1975	08:00-11:00 (17)	3,6	NW	22 enero-4 febrero 1975	al menos 8 pulsos	Barquero *et al.*,1992
16 marzo 1986		1,3	NW		se observó el depósito	Alvarado & Barquero, 1987
18 marzo 1987	10:05	0,5	SW	7-8 marzo, 1987	1	GVN,1987
29 junio 1987	16:55	0,5			1	GVN,1987
13 julio 1987	16:31	0,4 y 0,8	WNW y SSE		1 evento con 2 lóbulos	GVN,1987; este trabajo
17 julio 1987	14:30	0,5-0,8			1	GVN,1987;Bol.Vulcanol.19
15 set. 1987	10:28	0,5-0,8			1	Bol. Vulcanol. 19
11 marzo 1988	9:53	0,4 y 1	SW y S		1 evento con 2 lóbulos	Barquero & Alvarado,1989; Bol. Vulcanol. 20
28 marzo 1988		~0,4			1	Barquero & Alvarado,1989
junio 1988		~0,4			1	Barquero & Alvarado,1989
21-22 feb. 1989	10:12,12:35;13:53	~0,4	todos SE		1 evento con 3 pulsos	Bol. Vulcanol. 20
6 abril 1989	13:41	0,8-1			1	GVN,1989
12 abril 1989	11:34,13:37	0,8 y 1			1 evento con 2 pulsos	GVN,1989
9 nov. 1989	2:30	0,4	S		varios (> 2)	GVN,1990
abril 1990		0,8 y 0,8	dos al S		2	GVN,1990
29 mayo 1990		~0,4	NW		1	Barquero & Soto, 1991
agosto 1990		~0,4			varios peq. flujos	GVN,1990
octubre 1990		~0,4			1?	GVN,1990
22 mayo 1991	5:10	~0,4			1	Barquero & Soto, 1991
9-10 dic 1991	¿diurno?	~0,4			al menos 3 muy peq.	GVN,1991
24 febrero 1992		1,1	W		1	Soto *et al.*,1992;GVN,1992
3 mayo1992	7:23	0,4	W		varios, este fue observado	GVN,1992
4 agosto 1992	15:43, 16:04	0,4, 0,4 y 0,8	W,S; S		2 eventos con 2 y 1 lóbulos	GVN,1992
setiembre 1992		0,3, 0,7 y 0,7	NE, N y S		1 evento con 3 lóbulos	GVN,1992
octubre 1992		1,3, 1,5 y 1,65	SW, W y S		1 evento con tres lóbulos	Soto *et al.*,1992;GVN,1992
noviembre 1992		~0,4	W, SW		varios pequeños	GVN,1992

febrero 1993		1,4	S		1	GVN,1993
23 marzo 1993	19:30	0.9	SE		1	GVN,1993
15 abril 1993		~0,4			varios esporádicos	GVN,1993
12 mayo 1993	12:35	~0,4	WSW		1 evento con al menos 3 lóbulos	GVN,1993
24 junio 1993	14:34	0,75	SW		varios pulsos, este es el mayor	GVN,1993
28 agosto1993	21:00	2,2, 2,6 y 3,2	W, NW y NNW	11 mayo-3 junio	1 evento con tres lóbulos	Soto *et al.*,1996;GVN,1993
noviembre 1993		~0,4	SW		1	GVN,1993
29 set. 1994		~0,4			varios de colapso frente colada	GVN,1994
setiembre 1995		~0,4			ocasionales	GVN,1995
diciembre 1995		1,0-1,1			dep vistos a final de dic	GVN,1996
ppios abril 1996		0,9	SW		se observó depósito	GVN,1996
finales abril 1996		0,3	NW		se observó depósito	GVN,1996
29 agosto 1996	en la mañana	~0,4	SE		1	Soto & Arias,1998; GVN,1996
11 set. 1996	9:26	0,5	SW		1	GVN,1996
29-30 set. 1996	17:00,17:26;16:34	~0,4	SW, N; NW		3 pulsos	GVN,1996
20 nov. 1996	14:54	0,1-1,0	N		varios pulsos	GVN,1996
30 dic. 1996	16:30	0,9-1,1			1	GVN,1996
14 enero 1997	en la noche	1,3	NE		1	GVN,1997
27 febrero 1997	16:00	~0,4			una avalancha incandesce	GVN,1997
mayo? 1997		~0,4	N, W		se observó depósito	GVN,1997
19-20 agosto 1997		0,4 y 0,4	S; NW		2 pulsos	GVN,1997
enero 1998		0,6	SE		1	GVN,1998
febrero 1998		1	SE		1	GVN,1998
5 mayo 1998	12:20-17:42	2	NNW		1 evento con 23 pulsos	Alvarado *et al.*,1997
26 octubre 1999	17:21	1,2	W	10 agosto-20 octubre 1999	1	Arroyo *et al.*,1999
23 agosto 2000	09:55-15:16	2,35	N	junio 2000	1 evento con 27 pulsos	este trabajo

Tabla 1: continuación

(a) Curva acumulada de la longitud de los eventos máximos de los flujos piroclásticos entre 1975 y 2000



(b) Curva acumulada de la longitud de todos los pulsos de los flujos piroclásticos entre 1986 y 2000 (excepto mayo 1998 y agosto 2000)

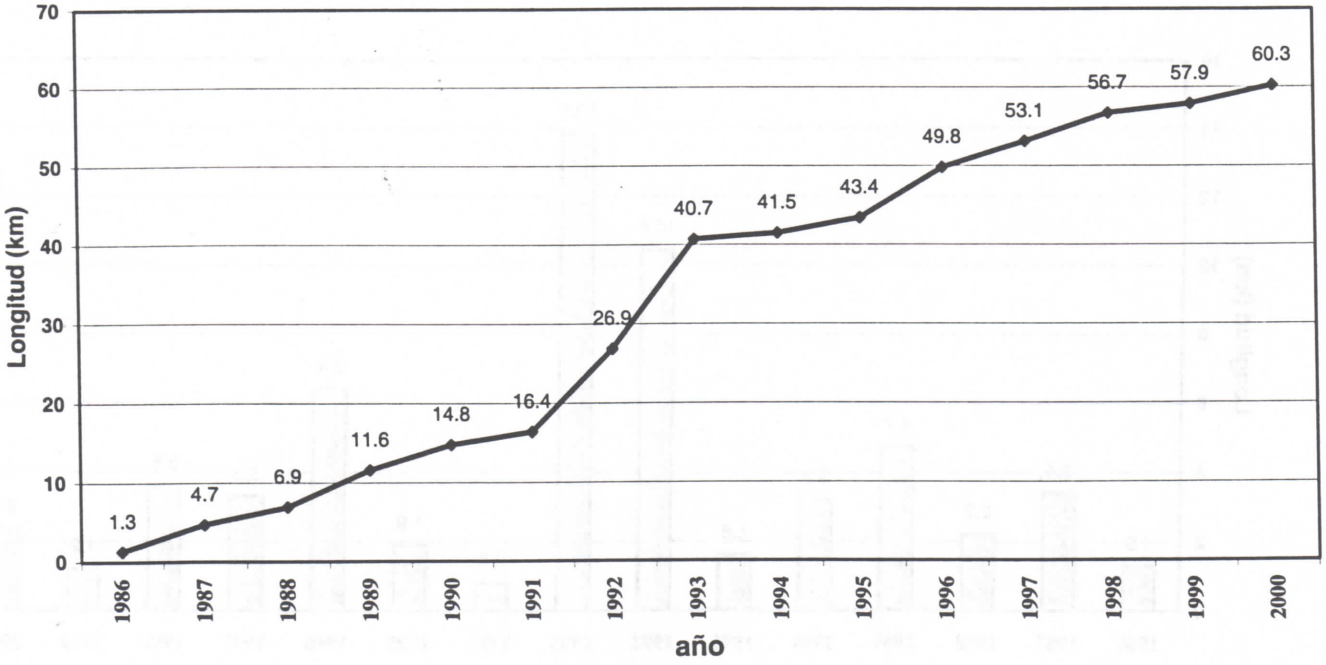
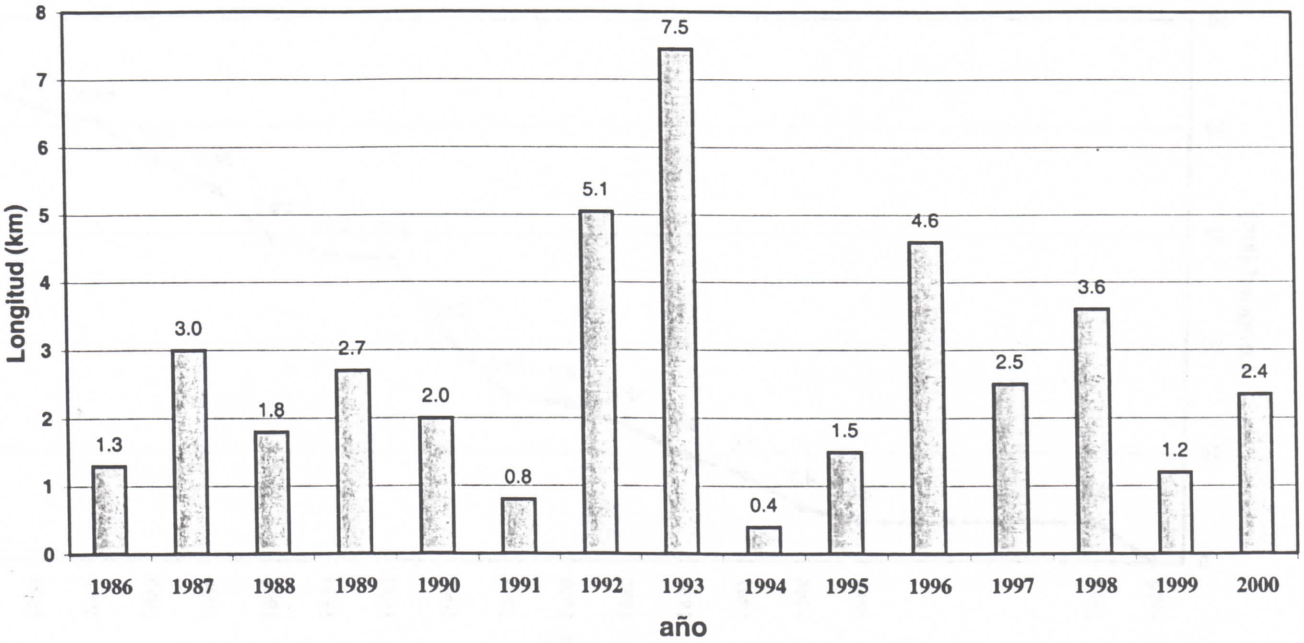


Figura 1: Curvas acumuladas de longitud de flujos piroclásticos eruptados por el volcán Arenal entre 1975 y 2000

(a) Sumatoria de la longitud anual (total) de los eventos máximos de los flujos piroclásticos entre 1986 y 2000



(b) Longitud anual total de todos los pulsos de los flujos piroclásticos entre 1986 y 2000 (excepto mayo 1998 y agosto 2000)

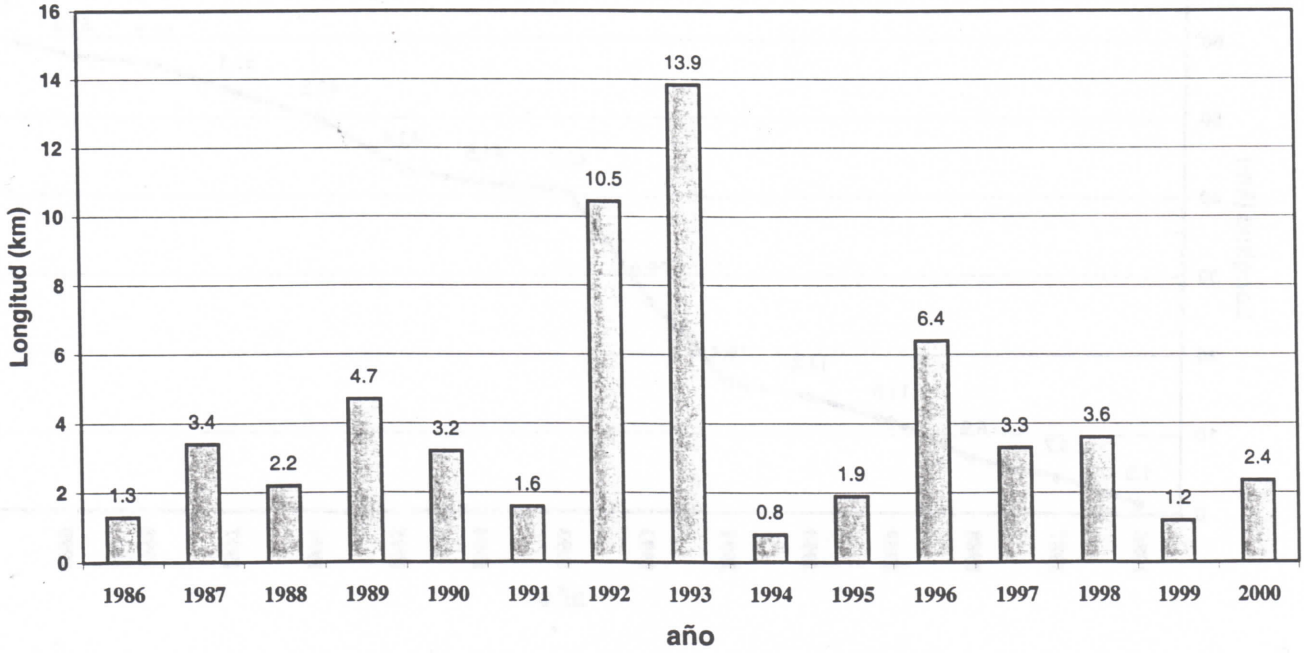
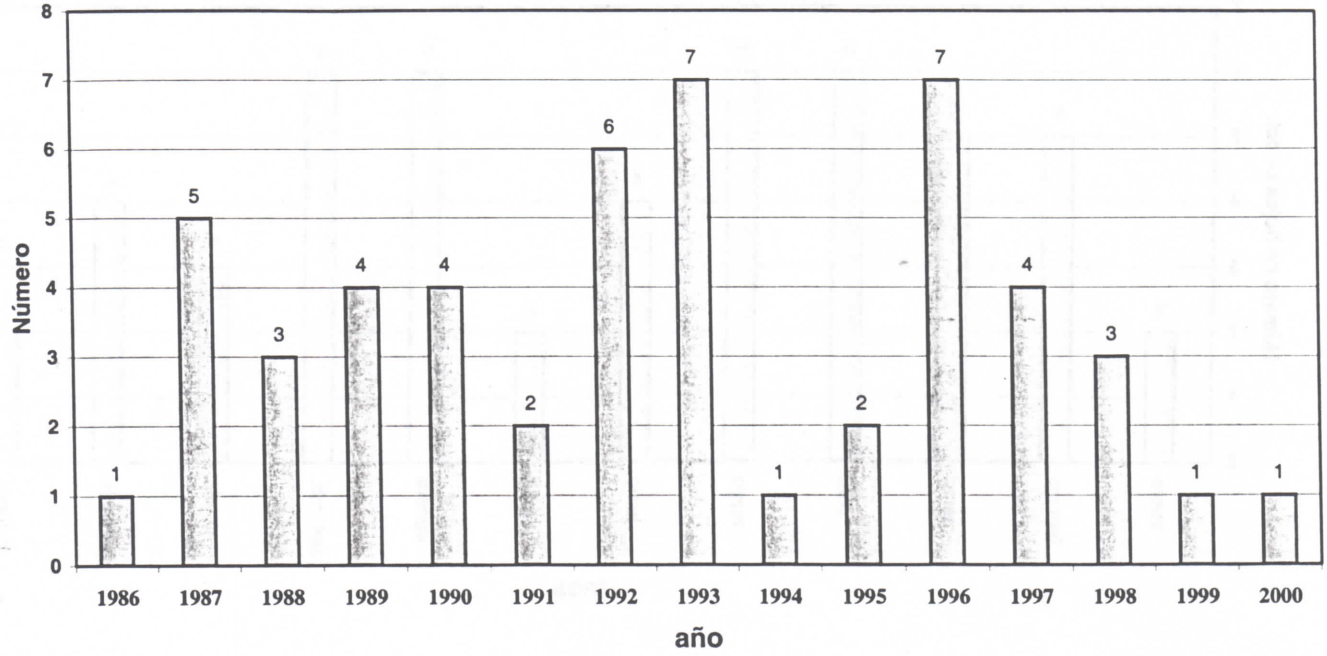


Figura 2: Longitud total por año de los flujos piroclásticos del volcán Arenal entre 1986 y 2000

(a) Número de eventos máximos de flujos piroclásticos por año entre 1986 y 2000



(b) Número de pulsos de flujos piroclásticos por ámbito de longitud entre 1975 y 2000

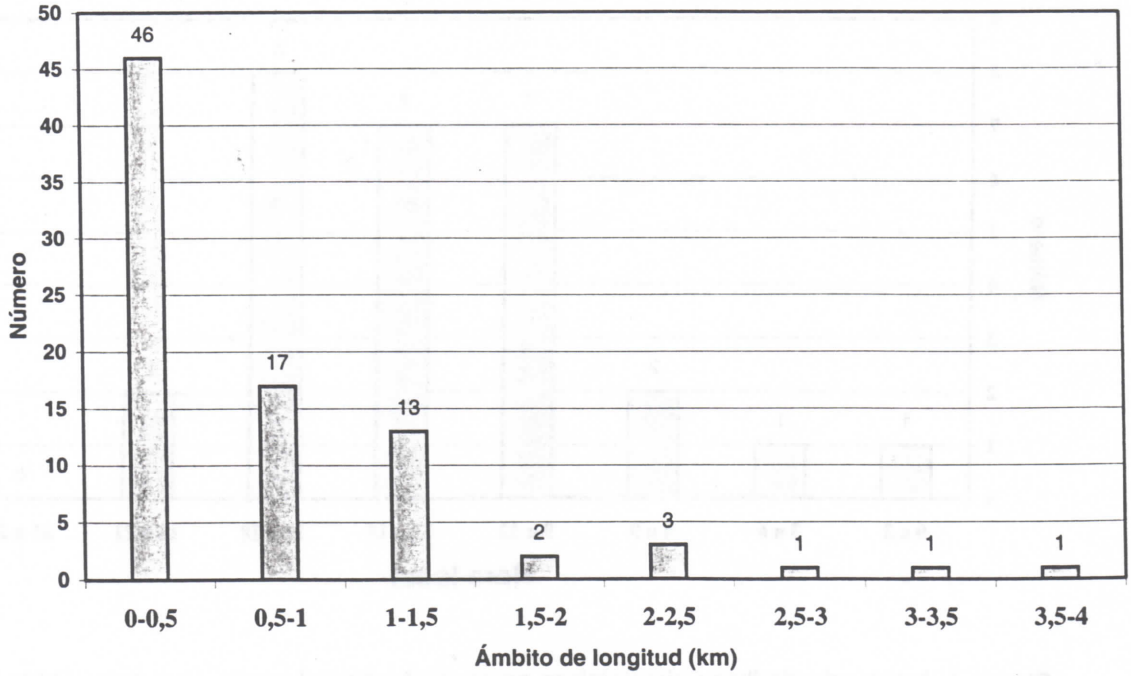
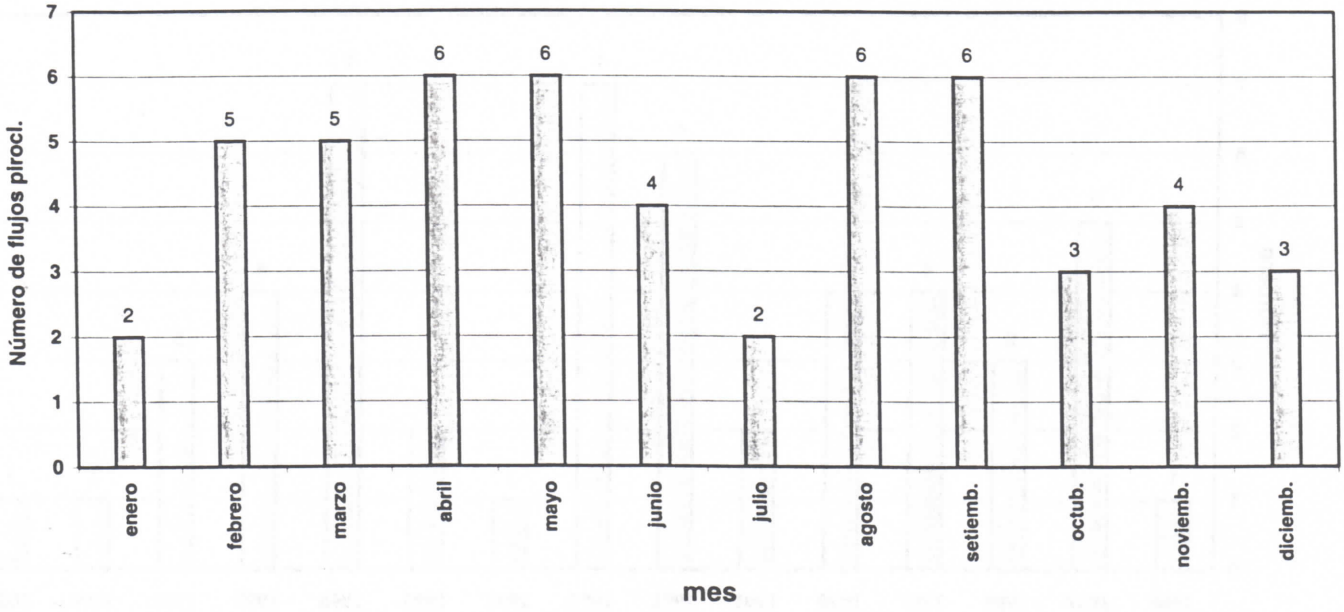


Figura 3: Frecuencia de flujos piroclásticos del volcán Arenal a) por año (entre 1986 y 2000) y b) por ámbito de longitud

(a) Incidencia de flujos piroclásticos por mes, entre 1986 y 2000



(b) Número de flujos piroclásticos según el ámbito de horas en que ocurrieron, entre 1975 y 2000

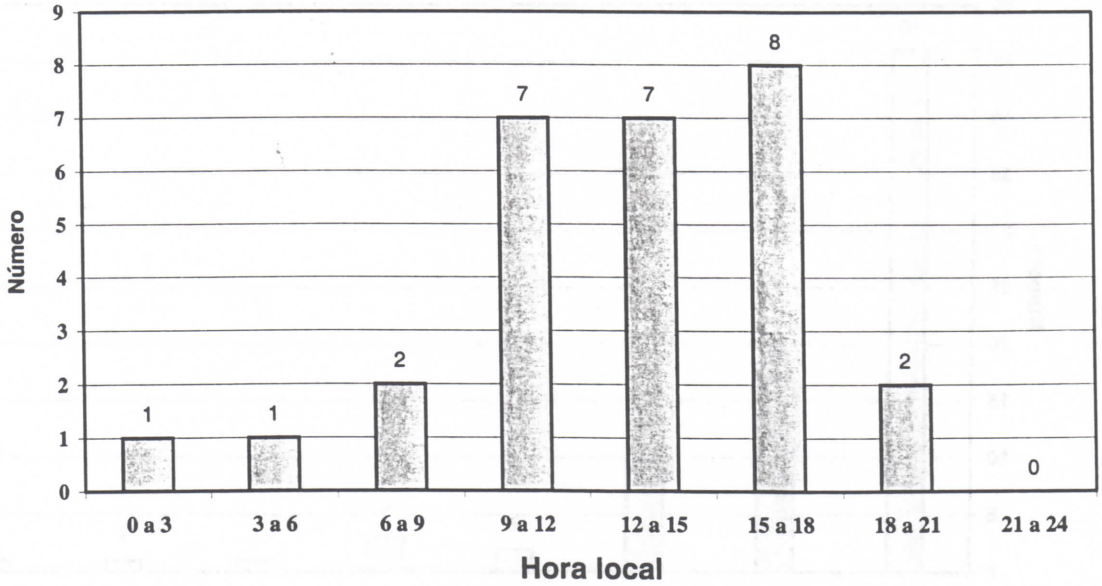


Figura 4: Incidencia de flujos piroclásticos en el volcán Arenal según a) el mes y b) la hora en la que ocurrieron (en este respecto se dispone de información solo para 28 flujos), entre 1975 y 2000.

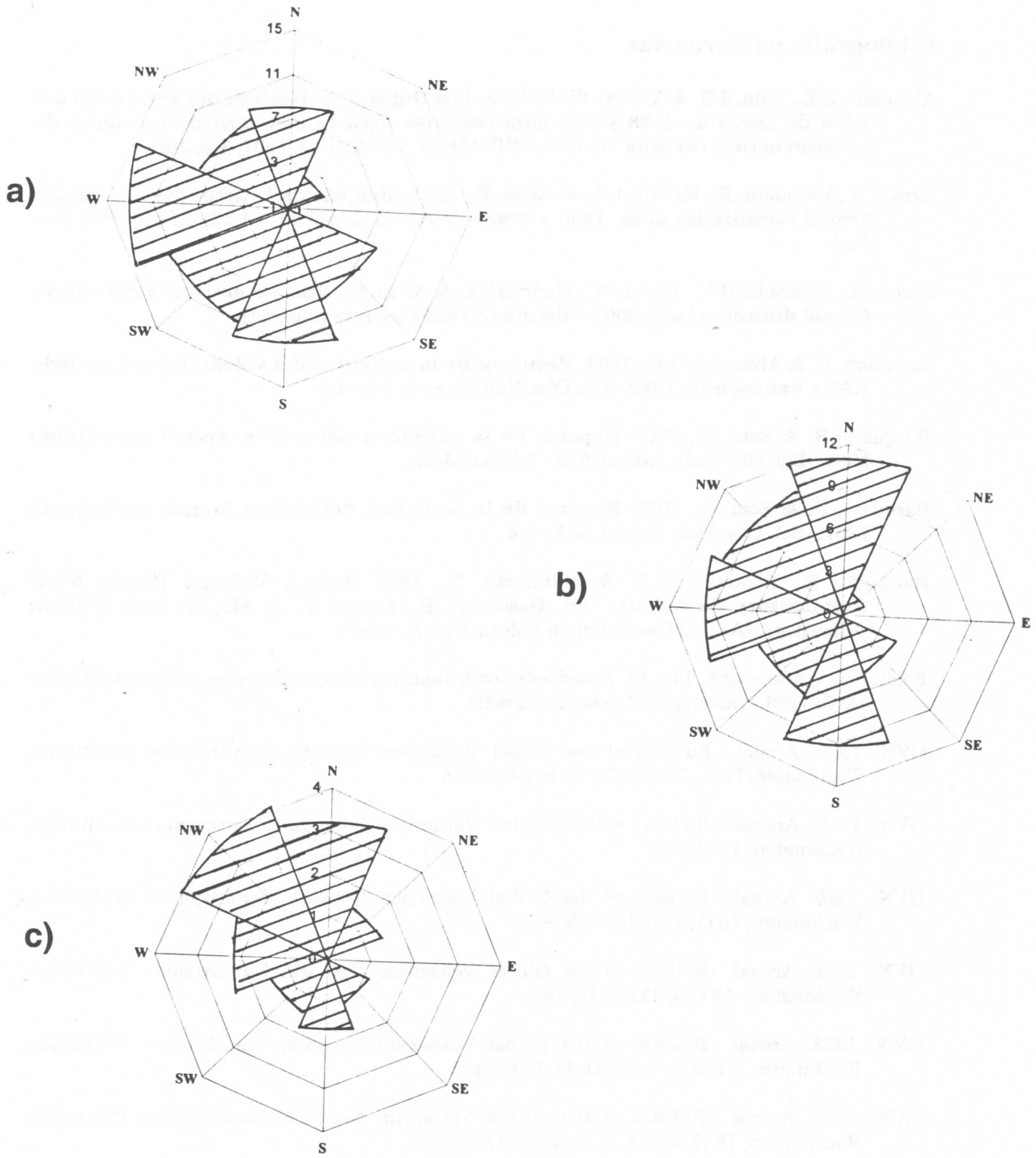


Figura 5: Rosas de a) frecuencia de flujos piroclásticos según el flanco por el que descendieron, b) longitud acumulada de pulsos de flujos piroclásticos por flanco, y c) longitud máxima alcanzada por un flujo piroclástico en cada flanco del volcán; periodo 1975-2000. Se dispone de información para 58 pulsos de flujos piroclásticos.

Bibliografía y referencias

Alvarado, G.E., Soto, J.G. & Taylor, W.D., 1998. **Los flujos piroclásticos del volcán Arenal del 5 de mayo de 1998 y sus implicaciones para la amenaza de las obras de infraestructura cercana**. -Boletín OSIVAM 10 (19-20): 1-13, 1997; San José.

Arroyo, I., Barquero, R., Madrigal, L. & Arias, F., 1999. **Sinopsis de la actividad del volcán Arenal durante los años 1998 y 1999**. -Boletín OSIVAM 11 (21-22): 22-23, 1998, San José.

Arroyo, I., Alvarado, G.E., Taylor, W., Madrigal, L. & Arias, F., 2000. **La actividad del volcán Arenal durante el año 2000**. –Boletín OSIVAM (en este volumen).

Barquero, R. & Alvarado, G.E., 1989. **Resumen de la actividad del volcán Arenal periodo 1988 y enero-junio 1989**. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 2(3): 1-5.

Barquero, R. & Soto, G., 1990. **Reporte de la actividad del volcán Arenal enero-junio 1990**. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 3 (5): 1-3; San José.

Barquero, R. & Soto, G., 1991. **Reporte de la actividad del volcán Arenal, enero-junio 1991**. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 4 (7): 2-4.

Barquero, R., Alvarado, G.E. & Matumoto, T., 1992. **Arenal Volcano (Costa Rica) Premonitory Seismicity**. -En: Gasparini, P., Scarpa, R. & Aki, K. (eds): Volcanic Seismology. IAVCEI Proceeding in Volcanology 3: 84-96.

Boletín de Vulcanología, 19 y 20. **Estado de los Volcanes**: Enero-Diciembre, 1987; Enero 1988-Mayo 1989. Universidad Nacional; Heredia.

GVN, 1987. Arenal. -Bulletin of the Global Volcanism Network, Stmithsonian Institution, Washington, D.C., 12 (3,4, 7 y 8): 8; 4-5; 4-5; 8.

GVN, 1989. Arenal. -Bulletin of the Global Volcanism Network, Stmithsonian Institution, Washington, 14 (5): 11.

GVN, 1990. Arenal. -Bulletin of the Global Volcanism Network, Stmithsonian Institution, Washington, 15 (1, 2, 4, 9): 9; 15; 9; 3.

GVN, 1991. Arenal. -Bulletin of the Global Volcanism Network, Stmithsonian Institution, Washington, 16 (1,2, 12): 9; 15; 10.

GVN, 1992. Arenal. -Bulletin of the Global Volcanism Network, Stmithsonian Institution, Washington, 17 (2, 7, 8, 9, 11): 11; 5; 8; 14; 9.

GVN, 1993. Arenal. -Bulletin of the Global Volcanism Network, Stmithsonian Institution, Washington, 18 (2, 3, 4, 5, 6, 8): 4; 10; 11; 5; 3; 2.

GVN, 1994. Arenal. -Bulletin of the Global Volcanism Network, Stmithsonian Institution, Washington, 19 (9): 11.

GVN, 1995. Arenal. -Bulletin of the Global Volcanism Network, Stmithsonian Institution, Washington, 20 (9): 11.

GVN, 1996. Arenal. -Bulletin of the Global Volcanism Network, Stmithsonian Institution, Washington, 21 (3, 5, 8, 12): 5; 11; 5; 10.

GVN, 1997. Arenal. -Bulletin of the Global Volcanism Network, Stmithsonian Institution, Washington, 22 (3, 5, 9): 5; 7; 7.

Francis, P.W., Rooboo, M.J., Walker, G.P.L., Cobbold, P.R. & Cowerd, M., 1973. **The San Pedro and San Pablo volcanoes of northern Chile and their hot avalanches deposits**. -Geol. Rundsch. 63: 357-388.

Fudali, R.R. & Melson, W.G., 1972. **Ejecta velocities, magma chamber pressure, and kinetic associated with the 1968 eruption of Arenal volcano**. Bull. Volcanol., 35: 383-401.

La Gaceta, 2001. **Reglamento: Comisión de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias, Uso de suelos en los alrededores del Volcán Arenal**, pp. 41-47; San José.

Matumoto, T. & Umaña, J.E., 1976. **Informe sobre la erupción del Volcán Arenal ocurrida el 17 de junio de 1975**. -Revista Geográfica del Instituto Panamericano de Geografía e Historia, 5: 229-315; San José.

Mellors, R.A., Waitt, R.B. & Swanson, D., 1988. **Generation of pyroclastic flows and surges by hot-rock avalanches from the dome of Mount St. Helens volcano, USA**. -Bull. Volcanol, 50: 14-25.

Melson, W.G. & Sáenz, R., 1973. **Volume, energy and cyclicity of eruptions of Arenal Volcano, Costa Rica**. -Bull. Volcanol., 37: 416-437.

Soto, G.J. & Arias, F., 1998. **Síntesis de la actividad del volcán Arenal, año 1996**. -Boletín OSIVAM, 9 (17-18): 11-18.

Soto, G.J., Arias, F. & Barquero, R., 1992. **Resumen de la actividad del volcán Arenal durante 1992**. -Bol.Obs.Vulc. Arenal, S (9-10): 7-23, 1992.

Soto, G.J., Arias, F., Alvarado, G.E., Madrigal, L.A. & Barquero, R., 1996. **Resumen de la actividad del Volcán Arenal durante 1993**. -Bol. Obs. Vulcanol. Arenal, 6 (11-12): 5-22.

Simkin, T. & Sieber, L., 2000. **Earth's volcanoes and eruptions: An Overview**. En: Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H & Stix, J. (eds.): Encyclopedia of Volcanoes, Academic Press, pp. 249-261.

Tazieff, H. & Sabroux, J.C., 1983. **Forecasting volcanic events** (Developments in Vocanology; 1). –Elsevier, Amsterdam, xxii + 535 pp.

Van der Bilt, H., Paniagua, S. & Ávila, G., 1976. **Informe sobre la actividad del volcán Arenal iniciada el 17 de junio de 1975**. -Revista Geográfica del Instituto Panamericano de Geografía e Historia, 5: 295-298; San José.

Yokoyama, I. Tilling, R.I. & Scarpa, R., 1984. **International Mobile Early-Waring System (s) for Volcanic Eruptions and Related Seismic Activities**. –UNESCO, FP/2106-82-01 (2286), París, 102 pp.

Boletín OSIVAM	Año 12, No. 23-24	54-63	San José, Costa Rica, diciembre, 2000

Las facies proximales de la gran erupción piroclástica basáltica ET-3 del volcán Arenal

Proximal facies of the great basaltic pyroclastic eruption ET-3 of Arenal Volcano

Gerardo J. Soto[1], Guillermo E. Alvarado[2], Jorge Bonilla[2], Julio Madrigal[3], Alexander Mata[4], Roberto Ramírez[5], Leonel Rojas[2], Jorge Salazar[6], Emma Tristán[7] & Adrián Villegas[8]

[1]Kotokuji-dai, 5-1-16-24, Kagoshima-shi, 891-0103, Japón.
[2]Área de Amenaza y Auscultación Sismo-volcánica, ICE, Apdo. 10032-1000, San José, Costa Rica.
[3]Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias, Apdo. 5258-100, San José, Costa Rica
[4]VICESA-SICORSA (Sílice de Costa Rica, S.A.), Apdo. postal: 355-7050, Cartago, Costa Rica.
[5]SENARA, Apdo. 5262-1000, San José, Costa Rica
[6]CEMPASA, Apdo. 6558-1000, San José, Costa Rica
[7]Environmental Resources Management, 8 Cavendish Square, London W1, Inglaterra, e-mail: e.tristan@ic.ac.uk
[8]Mina El Valiente ASCARI (Tres Hermanos), Las Juntas de Abangares, Costa Rica

Soto, G.J., Alvarado, G.E., Bonilla, J., Madrigal, J., Mata, A., Ramírez R., Rojas, L., Salazar, J., Tristán, E. & Villegas, A., 2000. Las facies proximales de la gran erupción piroclástica basáltica ET-3 del volcán Arenal. - Boletín OSIVAM, 12 (23-24): 54-63; San José.

Resumen

Se realizó un estudio detallado de una secuencia explosiva proximal correspondiente a la erupción basáltica ET3. La misma se inició como una fase explosiva magmática y culminó con varias fases, tanto magmáticas como freatomagmáticas. Varios niveles erosivos (lapsos cortos) separan la secuencia eruptiva.

Abstract

A detail study of an explosive proximal sequence corresponding to the basaltic eruption ET3 was carried out. It started as a magmatic explosive phase and culminated with several magmatic as well as phreatomagmatic phases. Several short erosive levels (short term) separate the eruptive sequence.

Introducción

La secuencia piroclástica de la erupción ET-3 es la más extensa producida por una erupción basáltica del Arenal. A pesar de que otras erupciones de carácter básico han ocurrido en el Arenal durante los últimos 7 000 años, con una química parecida (*cf.* Ghigliotti *et al.*, 1993; Alvarado & Soto, 1997; Soto *et al.*, 1998), es la

conocida como ET-3 la mejor estudiada, por su extensión y su edad reciente, que implica buenas exposición, preservación e importancia en cuanto a su grado de amenaza. Ghigliotti *et al.* (1992) han descrito la secuencia en detalle dentro del marco de la historia eruptiva del Arenal, y presentan mapas de isopacas e isopletas.

La secuencia proximal de ET-3 fue expuesta en el flanco occidental del volcán, debido a la erosión intensa entre 1988 y 1993, a lo largo de la pared de una de las lomas residuales no cubiertas por las lavas recientes, a tan sólo 1700 m del cráter D. El sitio, nominado Corte 81 Arenal Occidental (271,5 N - 457,8 E, 785 m s.n.m.), fue estudiado entre octubre de 1993 y marzo de 1994. Desafortunadamente, una colada de lava sepultó totalmente al afloramiento a lo largo de sus 300 m de extensión en julio de 1995, por lo que no es asequible para su estudio, al menos hasta que la dinámica erosiva lo exhume de nuevo en el transcurso de los próximos milenios.

El estudio del corte incluyó el levantamiento estratigráfico en un nivel decimétrico, el muestreo de algunos niveles de interés, así como la recolección de muestras para análisis químicos y de radiocarbono

La secuencia conocida de ET-3

Melson (1982, 1984) describió el nivel ET-3 como alternancias de lapilli de composición basáltica concentradas en la parte medio-inferior del nivel, y una parte superior de color amarillo-pardo constituida por ceniza.

Ghigliotti *et al.* (1992) re-estudiaron el depósito de caída ET-3, y lo caracterizaron como numerosas alternancias centimétricas de escorias y lapilli de grano grueso y fino de naturaleza basáltica con niveles de cenizas intercalados. En un corte a 6 km al oeste del volcán, encontraron el sitio con mayor espesor conocido (2,60 m), el cual está efectivamente constituido por dos partes: una inferior (1,20 m) que presenta por lo menos 40 estratos centimétricos de escorias en alternancia con cenizas finas hasta lapilli; y la parte superior (1,40 m), formada por capas delgadas de cenizas con pisolitos y capas escoriáceas subordinadas.

Globalmente, un paleosuelo decimétrico de ceniza de color café pardo, poco desarrollado, separa al suprayacente nivel ET-2 de ET-3, mientras que en el piso, ET-3 presenta continuidad con el infrayacente nivel ET-4, y solamente en algunas secciones estratigráficas es posible observar una discordancia erosional o un nivel centimétrico de ceniza que los separa. Las mismas escorias densas con evidencia de coexistencia de magmas, presentes en el nivel ET-4, fueron observadas en el nivel ET-3.

ET-3 también incluye flujos piroclásticos. El mejor conocido de ellos ha sido extensamente destapado y explotado en el tajo de la quebrada Guillermina. Es de un espesor métrico a decamétrico, e incluye algunas facies muy ricas en bombas escoriáceas y con corteza de pan, casi sin matriz. Aquí, precisamente, se obtuvieron

dos troncos carbonizados, que se han usado para calcular la edad de esta erupción. Borgia *et al.* (1988) dan una edad de radiocarbono no calibrada de 1080±50 d.C. Otra edad, inédita (J.G. Viramonte, comunicación escrita, 1998), es de 1076±94 a. P. La datación fue realizada en el Laboratorio de Radiocarbono del INGEIS de Buenos Aires, Argentina. Una vez calibrados estos datos con base en Stuiver & Reimer (1993), obtenemos una edad de 755±35 a.P., para la primera, y de 960+100-40 a.P., para la segunda. Como se ve, el lapso es amplio y la edad promedio sería 860±50 a.P. o escrita de otro modo, del año 1090 d.C. Dentro del depósito de ET-3, en cortes proximales al volcán, hay bloques de gran tamaño (decimétricos hasta 1 m aprox.), asociados con una actividad balística contemporánea con la erupción.

Se han dibujado curvas isopletas de los espesores del depósito de caída de ET-3 (Ghigliotti *et al.*, 1992; fig. 1), aunque para espesores inferiores de 20 cm, no fue posible construir las isopacas, porque en la facies distal está formada principalmente por capas de ceniza de espesores muy irregulares y fácilmente confundibles con suelos oscuros. Resulta evidente que la zona de dispersión de caída de ET-3 se extiende hacia el occidente del volcán, impulsada por los vientos alisios dominantes.

La secuencia proximal de ET-3

En el corte 81 (figs. 1 y 2), no sólo quedó expuesta la secuencia preservada completa de ET-3, sino además la infrayacente de ET-4, en forma transicional a ET-3, lo cual confirma la hipótesis de Ghigliotti *et al.* (1993) respecto de la consecución inmediata de ambas erupciones. ET-3 muestra un espesor cumulativo de 14 m, con discordancias en medio. Es sobreyacida por un suelo oscuro, rico en materia orgánica, cuya edad obtenida por ^{14}C es de 490±80 a. P. (calibrada tenemos 520±630 a.P. = 1430±30 d.C.), el cual a su vez es sobreyacido por una secuencia proximal de caída y flujos piroclásticos. Seguidamente, hay un paquete de epiclastos con una edad radiométrica absoluta de menos de 200 años (posterior a 1750 d.C.), que son coronados finalmente por los depósitos de 1968.

En la tabla 1 se muestran los espesores del depósito de caída de ET-3, tomados en puntos representativos a lo largo de la bisectriz de dispersión hacia el oeste (fig. 1), como puntos de referencia para comparar con el espesor total en el corte 81, donde la secuencia no sólo es de caída, como se verá.

El techo del nivel ET-4 está constituido por lapilli gris de aspecto dacítico, con bandas claras y oscuras que documentan una coexistencia de magmas, y que transicionalmente pasan a ser más oscuros, hasta que los niveles son netamente escoriáceos oscuros, y es lo que tenemos como el piso de ET-3. Los primeros 3,5 m de la secuencia son paquetes decimétricos de caída, con lapilli predominante y bombas de hasta 20 cm de diámetro. Está coronada por niveles centimétricos de cenizas de caída, y se encuentra una primera discordancia, seguida de cenizas finas a medias de caída, en estratos centimétricos, con un espesor de medio metro. Hay otra discordancia (D2) sobreyacida por 2 m de paquetes decimétricos de caída o flujo, con mala granoselección, separados por paquetes centimétricos de cenizas. El

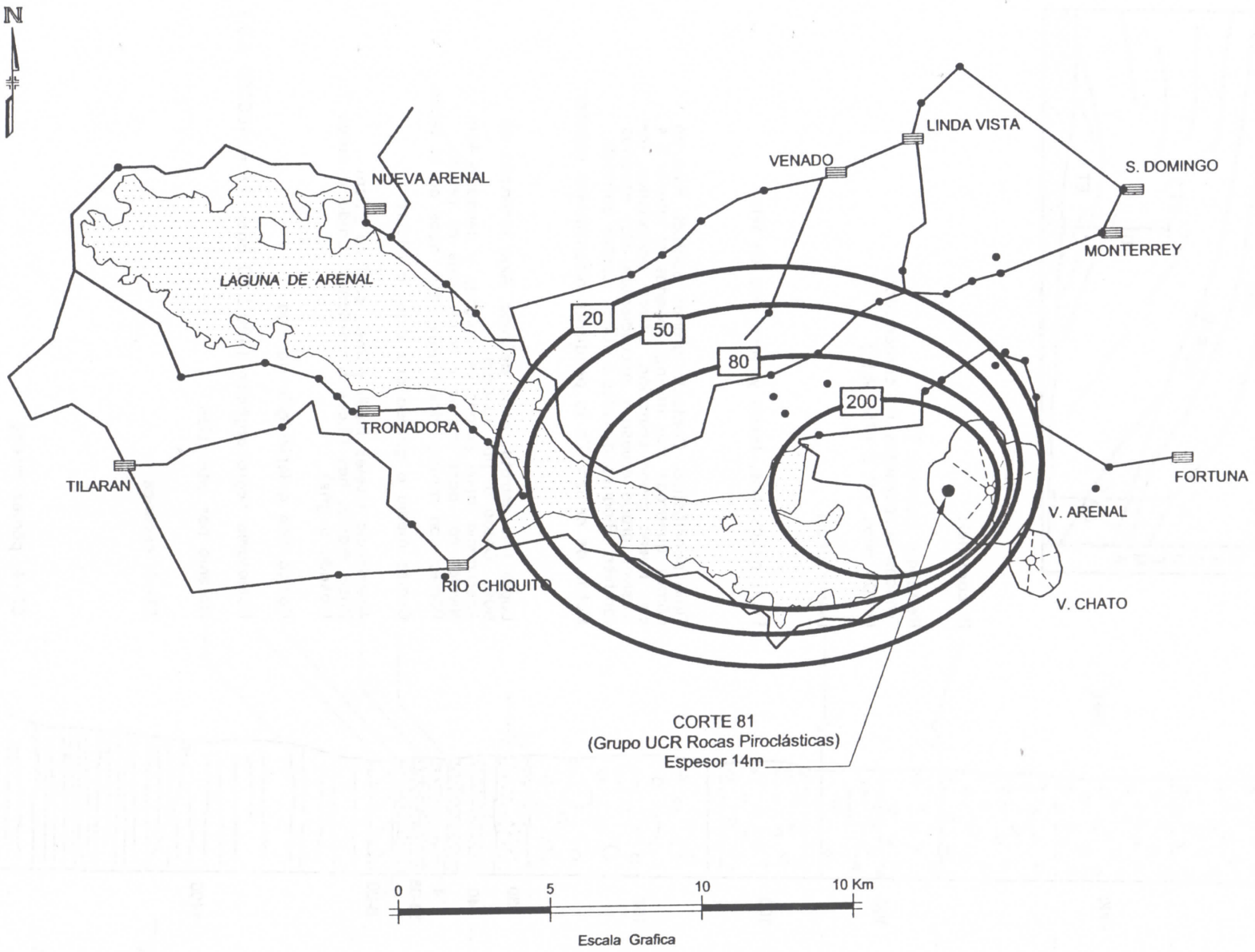


Figura 1: Área de dispersión de los depósitos de caída (cm) de la erupción basáltica ET3. Se ubica el Corte 81 estudiado en detalle.

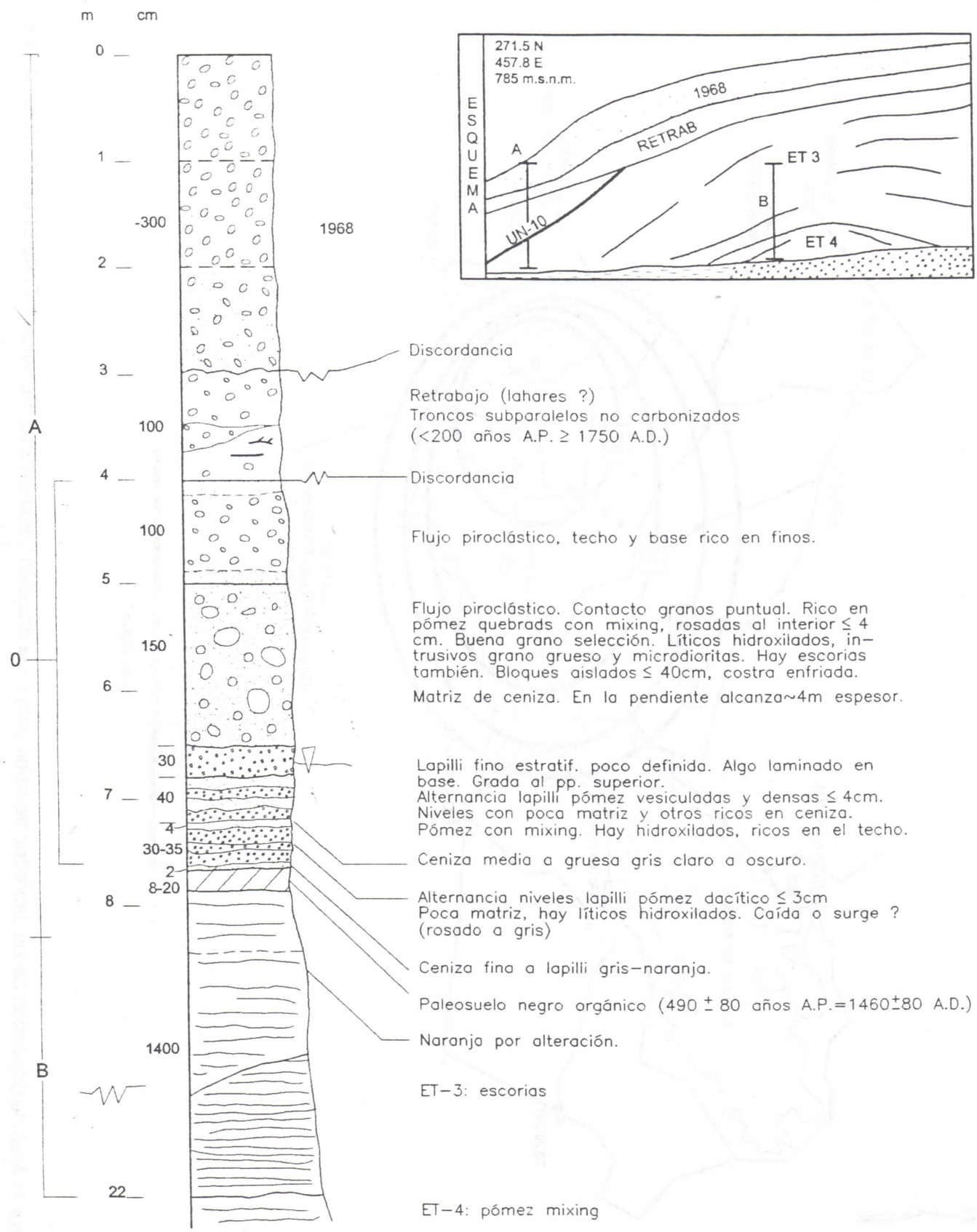


Figura 2: Columna estratigráfica, Corte 81.

techo de este paquete es una serie de oleadas piroclásticas y niveles de caída con un espesor de 1,5 m, y tenemos otra discordancia (D3). El siguiente paquete es de 4,5 m de espesor, formado por niveles centimétricos de oleadas de cenizas finas con laminación inclinada y múltiples estructuras sedimentarias, así como niveles de ceniza fina de caída. Se observan impactos (*bomb & block sags*) de bombas escoriáceas y bloques andesíticos densos, con diámetros de hasta 20 cm. Termina el paquete con otra discordancia (D4), sobreyacida por niveles centimétricos de lapilli y cenizas, con abundantes fragmentos líticos hidrotermalizados, que son más abundantes hacia el techo, y que le daban una tonalidad anaranjada al paquete de tefras. Algunos niveles están formados casi exclusivamente por lapilli líticos hidroxilados, con poca matriz. En la porción oeste del afloramiento, ET-3 estaba coronada por un suelo que se tornaba naranja a negro hacia el techo, muy enriquecido en materia orgánica, que fue el datado radiométricamente, y luego sobreyacido por UN-10 (fig. 2). En el sector este del afloramiento, ET-3 terminaba abruptamente por discordancia erosiva, y se encontraba sobreyacida por los epiclastos datados en menos de 200 años de antigüedad.

Tabla 1: Espesores del depósito de caída ET-3 a lo largo de la bisectriz de dispersión (datos tomados de Ghigliotti *et al.*, 1992) y su comparación con el espesor total en el corte 81.

Corte N	Coordenadas (N-E)	Espesor (cm)	Distancia al volcán (km)	Comentarios
81	271,5 - 457,8	1400	1,7	
4	273,3 - 449,7	>100		
5	272,2 - 447,1	>80		
16	272,4 - 446,3	55		
29	273,4 - 435,6	22		
30	272,0 - 453,4	260		
42	271,3 - 456,8	>140		
45	271,8 - 449,5	12		Erosionado
51	273,1 - 453,2	102		

Discusión

La secuencia proximal de ET-3 estudiada nos revela que, en efecto, la erupción se desarrolló en varias etapas, separadas por lapsos cortos (días o meses quizás), documentados por las discordancias erosivas dentro del paquete de tefras, que no fueron lo suficientemente prolongadas para permitir el desarrollo de suelos.

Además, nos es posible inferir que el carácter y los mecanismos de la erupción variaron, y las pausas obedecen a estos cambios. Así, inmediatamente a la erupción ET-4, se da una eyección progresiva de magma básico. En efecto, ambos, ET-3 y ET-4, pertenecen petrológicamente a un mismo grupo, y se suceden el uno al otro por simple fraccionación, lo que justifica el corto lapso entre ambos eventos y la larga pausa previa a ET-4 (Alvarado & Soto, 1997). Cuando la erupción es netamente basáltica, el conducto estaba probablemente abierto, y el mecanismo es netamente magmático de características estrombolianas (Fig. 5). Al final de esta primera fase, hay un decrecimiento de la energía que se documenta en niveles de menor espesor y granulometría. Las pausas en la erupción dan cabida a las D1 y D2.

Los posibles flujos de la base de la segunda fase nos indicarían una etapa de erupciones explosivas sobrecargadas en material sólido, que originarían colapso de columnas y flujos piroclásticos. Quizás durante esta fase se habría originado el flujo piroclástico de la quebrada Guillermina. Allí, en el afloramiento, el flujo está sobreyacido por una capa de caída de algunos centímetros a decímetros, que serían de las etapas subsecuentes, y no de las primeras etapas estrombolianas fuertes. Al final de la segunda fase abundan los depósitos de oleadas, originados por explosiones freatomagmáticas. Es muy posible que luego de los flujos piroclásticos, la presión de volátiles del magma en erupción bajó lo suficiente para permitir una interacción eficiente entre el agua subterránea y el magma, dando este tipo de erupciones. El cese de la segunda fase se documenta con la D3.

La tercera fase, con depósitos predominantemente de oleadas piroclásticas, sería fundamentalmente freatomagmática, con las mismas características dinámicas del final de la fase anterior. Una nueva pausa eruptiva da la D4. La cuarta fase, con horizontes de oleadas y de caída ricos en líticos hidroxilados, documenta un comportamiento de explosiones freatomagmáticas, en las que son expulsados fragmentos líticos de los acuíferos expuestos en el conducto eruptivo, y en donde posiblemente hay una profundización del nivel de fragmentación. La energía decrece paulatinamente hasta el final de la erupción (D5).

Las cuatro fases de la erupción pueden agruparse en dos conjuntos: uno predominantemente magmático inmediatamente sucesivo a ET-4 y que se prolonga hasta la mitad de la segunda fase, y otro predominantemente freatomagmático, desde ese momento hasta el final. Las apreciaciones con base en los depósitos de caída medios y distales, con una parte basal de grano más grueso que la terminal, hechos por Ghigliotti *et al.* (1992), son congruentes con este modelo.

La edad del suelo orgánico de 520±30 d.C. nos dice la edad máxima de la siguiente erupción y no el final de ET-3. En el afloramiento, las características de los depósitos de flujo y caída sobreyacentes a ET-3 no se parecen mucho a los de ET-2. La edad supuesta de ET-2 es del año 1362 d.C. (*cf.* Chiesa, 1987), obtenida con base en una calibración de la edad de 570±30 a.P. publicada por Sheets (1984). Si calibramos esta edad con base en Stuiver & Reimer (1993), tenemos 550+70-10 a.P. (=1400+10-70 d.C.). La erupción que sigue a ET-2, llamada UN-10, es la

equivalente a un flujo piroclástico en la quebrada Tabacón, datado por Melson & Sáenz (1973), en 1525±20 d.C. (véase discusión en Ghigliotti *et al.*, 1992), cuya calibración nos da en el año 1450+20-10 d.C. Por la edad y las características de campo, lo que sobreyace a ET-3 en el corte 81 es UN-10 y no ET-2, lo que plantea la pregunta de por qué ET-2 no se depositó, puesto que el contacto no es erosivo. La pregunta sigue sin responderse, aun cuando suponemos que debido a la columna piroclástica subpliniana de ET-2 no permitió su depositación por caída en las partes más proximales del volcán.

Conclusiones

Inmediatamente a la erupción de ET-4 ocurrió la eyección progresiva del magma básico de ET-3. La secuencia proximal de ET-3 revela que la erupción se desarrolló en varias etapas, separadas por lapsos cortos documentados por discordancias erosivas. Los mecanismos de la erupción variaron, y las pausas obedecen a estos cambios.

Al inicio de la primera fase, el conducto estaba probablemente abierto, y el mecanismo fue estromboliano. La segunda fase se inicia con erupciones explosivas sobrecargadas en material sólido, que originaron colapso de columnas y flujos piroclásticos. Quizás durante esta fase se originó el flujo piroclástico de la quebrada Guillermina. Al final de la fase abundan los depósitos de oleadas originados por explosiones freatomagmáticas. Es muy posible que la presión de volátiles del magma en erupción bajó lo suficiente para permitir una interacción eficiente entre el agua subterránea y el magma. La tercera fase fue fundamentalmente freatomagmática, con las mismas características dinámicas del final de la fase anterior.

La cuarta fase documenta un comportamiento de explosiones freatomagmáticas, en las que son expulsados fragmentos líticos de los acuíferos expuestos en el conducto eruptivo. La energía decrece paulatinamente hasta el final de la erupción.

Las cuatro fases de la erupción pueden agruparse en dos partes: una inicial predominantemente magmática, que se prolonga hasta la mitad de la segunda fase, y otra predominantemente freatomagmática, desde ese momento hasta el final. Los depósitos de caída medios y distales son congruentes con este modelo.

La edad del suelo orgánico de 1430±30 d.C. nos dice la edad máxima de la siguiente erupción (UN-10) y nos confirma que ET-3 es más antigua que esa edad. No es clara la edad de ET-3, dado que con base en las dos dataciones de radiocarbono citadas podría cubrirse en algún momento entre 755 a.P. y 960 a. P.; una edad promedio sería 860 a. P.

Referencias

Alvarado, G.E. & Soto, G.J., 1997: **Aspectos petrológicos de las tefras del Arenal a la luz de nuevos datos geoquímicos y cronoestratigráficos**. - Boletín OSIVAM, 7(13-14):58-72, 1994.

Borgia, A., Poore, C., Carr, M.J., Melson, W.G. & Alvarado,G.E., 1988: **Structural, stratigraphic and petrologic aspects of the Arenal-Chato Volcanic System, Costa Rica: evolution of a young stratovolcanic complex**. - Bull. Volcanol., 50: 86-105.

Chiesa, S., 1987: **La mayor erupción pliniana del Volcán Arenal, Costa Rica**. - Rev. Geol. Amér. Central, 6:25-41.

Ghigliotti, M., Frullani, A., Alvarado, G.E. & Soto, G.J., 1992: **Distribución areal y características de los depósitos de tefra más recientes (1080-1968 dC) del Volcán Arenal**. - Bol. Obs. Vulc. Arenal, 4(8):11-33.

Ghigliotti, M., Frullani, A., Soto, G.J. & Alvarado, G.E., 1993: **Tefroestratigrafía, historia y ciclos eruptivos del volcán Arenal**. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 5(9-10):52-96.

Melson, W.G., 1982: **Alternation between acidic and basic magma in major explosive eruptions of Arenal Volcano, Costa Rica**. - Boletín de Vulcanología, Univ. Nacional, Costa Rica, 14:65-74.

Melson, W.G., 1984: **Prehistoric eruptions of Arenal volcano, Costa Rica**. - Vínculos, Vol. 10(1-2):34-59.

Melson, W.G. & Sáenz, R., 1973: **Volume, energy and cyclicity of eruptions of Arenal Volcano, Costa Rica**. Bull. Volcanol., 37: 416-437.

Sheets, P.D., 1984:**The Proyecto Prehistórico Arenal: an Introduction**. Vínculos, Vol. 10(1-2):17-29.

Soto, G.J., Alvarado, G.E. & Ghigliotti, M., 1998: **El registro eruptivo del Arenal en el lapso 3000 - 7000 años antes del presente y nuevas deducciones sobre la edad del volcán**. Boletín OSIVAM, 9 (17-18): 19-49, 1996; San José.

Stuiver, M. & Reimer, P.J., 1993: **Extended ^{14}C database and revised CALIB radiocarbon calibration program**. Radiocarbon, 35: 215-230.

Fotografía 1: Vista parcial del antiguo corte 81 en la falda oeste del Arenal, el cual fue cubierto por una colada de lava en julio de 1995.

Fotografía 2: Estudiantes del curso de "Rocas Piroclásticas" describiendo en detalle el corte 81 en marzo de 1994.