

**UEN Proyectos y Servicios Asociados
Centro de Servicio Exploración Subterránea
Área de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica**

Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles



Boletín
del

O
S
I
V
A
M

Volcán Arenal, febrero 2004

**Año 15, Nº 27, San José, Costa Rica
Diciembre de 2004**

RED SISMOLÓGICA NACIONAL
(RSN)
Depto. de Geología (ICE)
Escuela de Geología (UCR)

ISSN 1015-4396

ICE
U.E.N. Proyectos y Servicios Asociados
C.S. Exploración Subterránea

Área de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica

**Boletín del Observatorio Sismológico y
Vulcanológico
de Arenal y Miravalles (OSIVAM)**

Editores:
Guillermo E. Alvarado I.
Luis A. Madrigal S.

Año 15, N° 27

San José, Costa Rica

Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM)

Apdo. 10032-1000 San José, Costa Rica
Telephones: (506) 6956522, 2207741
Fax: (506) 6955193, 2208212
e-mail: galvaradoi@ice.go.cr; wtaylor@ice.go.cr

The Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM), belongs to the Área de Amenaza y Auscultación Sísmica y Volcánica of Instituto Costarricense de Electricidad (ICE, Costa Rica), and it is member of the World Organization of Volcano Observatorios (WOVO).

Formerly, between 1988 and 1995 it was named Observatorio Vulcanológico del Arenal (OVA), for then devoted mainly to the Arenal volcano observation, besides other monitoring tasks. However, due to the installation of a new geothermal plant located at the foot of Miravalles Volcano, which started production in 1994, ICE advocated to the 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 sub-networks around Arenal and Miravalles volcanoes, OVA became OSIVAM in 1996. Today, detailed research is also being carried out by OSIVAM at Rincón de la Vieja volcano, site for a new geothermal exploration.

Professional staff of OSIVAM and related tasks:

Guillermo Alvarado	Volcanology and Neotectonics
Waldo Taylor	Seismology and Neotectonics
Rafael Barquero	Seismology and Seismotectonics
Ileana Boschini	Seismology and Seismotectonics
Álvaro Climent	Seismic Engineering
José M. Barrantes	Electronic Engineering
José Cerdas	Geodesy, Topography
José Fernández	Chemistry
Jochen Bundschuh	Geochemistry and Hydrogeology

Technical and auxiliary staff

Francisco Arias	Raúl Barquero
Dagoberto Boniche	Guido Calvo
Luis Madrigal	Randall Mejías
Marco Naranjo	María Torres

Arenal, Miravalles and Rincón de la Vieja volcanoes

Arenal volcano is located in the northern part of Costa Rica, halfway between Guanacaste and Central volcanic ranges. The height of the volcano is about 1657 m above the sea level and around 1100 m over the surrounding area. Being at least a 7000 year old volcano, its current volcanic activity has been continuous since July of 1968 and is characterized by strombolian explosions, lava and pyroclastic flows, fumarolic activity and a permanent lava pool since 1974; also small volcano-tectonic swarms take place occasionally. Recording of seismic and visual data has been continuously accomplished since 1974.

Miravalles volcano is located in the Guanacaste Volcanic Range. The complex volcano edifice lies over a series of old stratovolcanoes built through the past 1 million years. The volcano rises 2028 m above the sea level at the site of Guayabo Caldera, where the main ignimbrite events have taken place 0.6 millions years ago. In despite of the lack of historical activity records during the last three centuries, this volcano may have presented 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 also located in the Guanacaste Volcanic Range, with a summit height of 1895 m above the sea level. It is an enormous active complex stratovolcano whose activity consists of sporadic phreatic and phreatomagmatic eruptions, with laharcic episodes and fumaroles. At present, ICE is investigating the geothermal potential of this volcano.

Seismological instrumentation

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

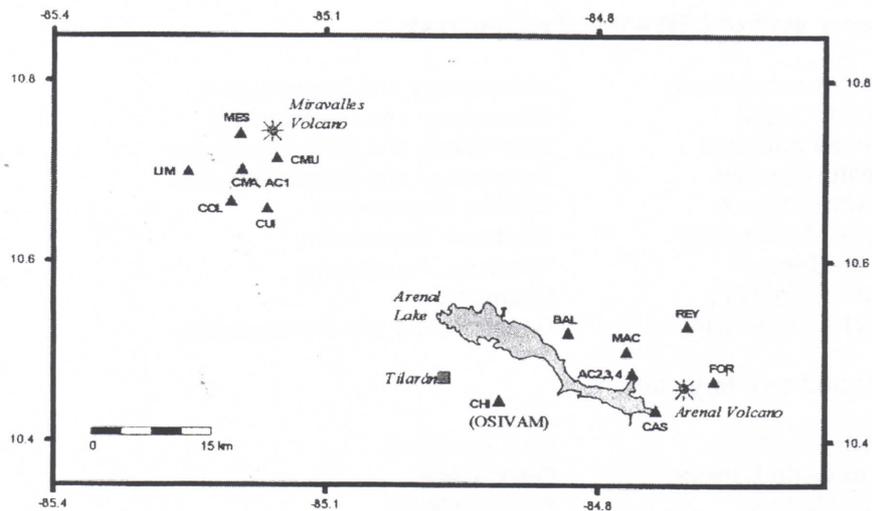


Figure 1. Arenal and Miravalles seismological networks.

There are 4 digital seismic stations (FOR, CAS, MAC and REY) around Arenal volcano 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 Chiripa Mount (near Tilarán town).

The seismic stations, developed by Lennartz Electronics GmbH, are equipped with short period (1 s) 3 component geophones, with damping factor of 0.707, effective sensitivity of 400 V/m/s (100 V/m/s for strong motion device) and dynamic range of 120

dB. The response frequency of the instruments to ground velocity is flat between 1 and 80 Hz. Each remote consists of a MARS-88 record system with 4-MB buffer RAM, GPS time signal receiver, solar panels and buffer batteries. The trigger system is controlled by the STA/LTA ratio with a pre-event memory of 32 seconds and a post-event memory of 40 seconds.

Data processing is achieved by using software provided by Lennartz. (Mars-88) and the SEISAN program (Haskov & Ottemöller, University of Bergen, Norway). The database is stored in optical disks (2.6 GB) and compact disks (700 MB).

From 1975 to 1978, a network of analogical seismographic stations was operating around Arenal volcano. In the present, only one station (called Fortuna: FOR) is still under operation, located 3.7 km eastwards 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 has the same code name and is located right beside this other station.

Table 1. 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°28.10	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	1029
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
Limal	LIM	10°41.97	85°15.24	591
Colonia	COL	10°40.01	85°12.35	445
Caro 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 (figure 2)

- A network of 9 dry tilt stations (C, D, F, I, J, K, L, M and N) located along radial lines around the volcano. Stations A and E were destroyed by volcanic activity, station B (1991) by strong erosion and G by anthropic effects.
- Geochemical and thermal monitoring of 6 hot and cool springs (FD, QB, QF, QG, QL and RT) every month and occasionally 2 degassing sites (QN and FF).
- Field geological observation (observational monitoring) is carried out periodically in order to inspect 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 micro-gravity.
- Geochemical and thermal monitoring at one site.

Rincón de la Vieja Volcano

- An arrangement of BMS for precise leveling and geophysical surveillance.
- Field geological observation.

Together with the routine volcanic and seismic monitoring here 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 27 issues from 1988 to 2003.
- Annual summaries of the seismic and volcanic activities in Miravalles, Tenorio, Rincón de la Vieja and Arenal volcanoes.
- Special reports in case of seismic and volcanic crisis.

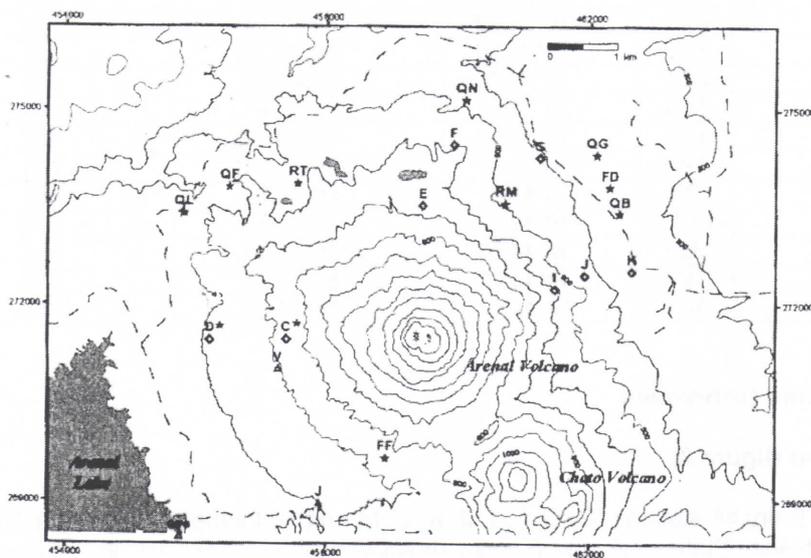
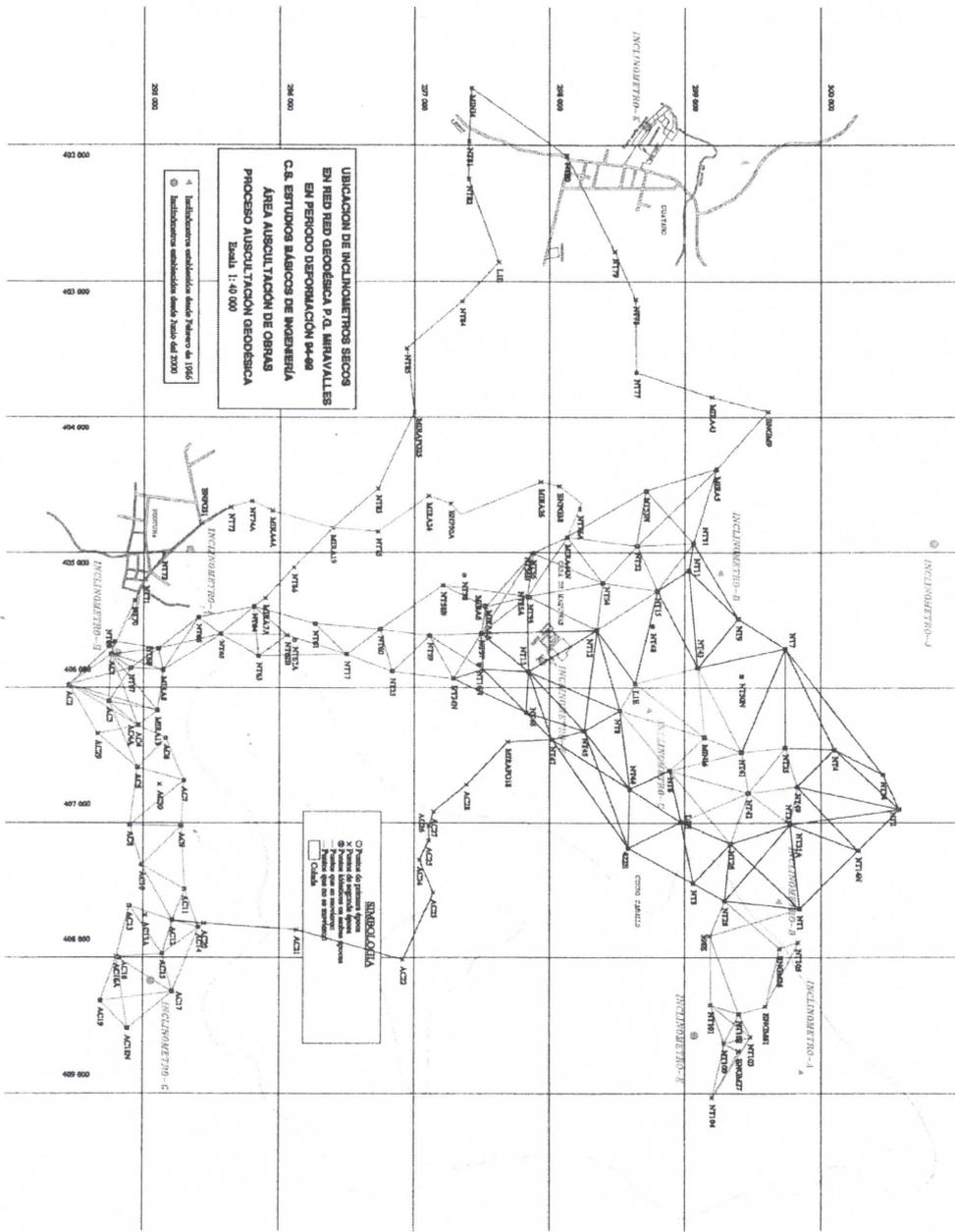


Figure 2. Arenal Volcano monitoring. The stars represent the sites for geochemical sampling, the triangles represent the location of the ash collectors and the rhombuses are the dry tilt stations. C* and D* points include dry tilt station and ash collector.



UBICACION DE INCLINOMETROS SECOS
 EN RED RED GEODESICA P.L. MIRAVALLLES
 EN PERIODO DEPENDENCIA IN-48
 C.S. ESTUDIOS BÁSICOS DE INGENIERIA
 AREA AUSCULTACION DE OBRAS
 PROCESO AUSCULTACION GEODESICA
 Escala 1:40 000

○ Puntos establecidos desde Febrero de 1966
 ● Puntos establecidos desde Marzo del 2000

○ Puntos de primera especie
 ● Puntos de segunda especie
 ● Puntos que no se movieron
 □ Cables

Índice

Waldo Taylor

La actividad sismotectónica durante el 2003 en los alrededores de los proyectos de generación eléctrica Miravalles, ARCOSA y Tejona (norte de Costa Rica) _____ 1

Waldo Taylor, Luis Madrigal & Gerardo J. Soto

La actividad del volcán Arenal durante el año 2003 _____ 11

Stephanie Murillo & Pablo Ruiz

Datos paramétricos de las coladas de lava del Arenal (Costa Rica) entre 1968 y el 2002 _____ 25

Guillermo E. Alvarado

Nota Técnica, descripción de la perforación en el Cerro Chiripa _____ 34

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

La actividad sismotectónica durante el 2003 en los alrededores de los proyectos de generación eléctrica Miravalles, ARCOSA y Tejona (norte de Costa Rica)

[Seismotectonic activity in the surroundings of Miravalles, ARCOSA and Tejona electricity generation projects (north of Costa Rica), throughout the year 2003]

Waldo Taylor

wtaylor@ice.go.cr

Área de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica, ICE, Apdo. 10032-1000, San José, Costa Rica

Taylor, W., 2004. La actividad sismotectónica durante el 2003 en los alrededores de los proyectos de generación eléctrica Miravalles, ARCOSA y Tejona, Norte de Costa Rica.- Boletín OSIVAM, 15 (27): 1-10. San José.

Resumen

Durante el año 2003 se localizaron 353 sismos en la zona de interés que mantiene instrumentada el OSIVAM-ICE. La mayoría de ellos (91%) fueron corticales someros (profundidades inferiores a 25 km), mientras que el 9% restante por lo general están relacionados a la interacción entre las placas Coco y Caribe. La actividad sísmica local se distribuyó en tres zonas principales: a) en el Campo Geotérmico de Miravalles (CGM); b) cerca de Bijagua de Upala; y c) en el flanco sureste del volcán Tenorio, cerca de Tierras Morenas. La sismicidad en el CGM está fuertemente ligada a la explotación del campo geotérmico debido a que los sismos se distribuyen, en superficie y profundidad, dentro de las zonas de producción e inyección (la mayoría con profundidades < 2,5 km), y porque los micro-enjambres de sismos (11-15 micro-temblores con magnitudes $M_L < 2,0$) se producen en intervalos de pocos minutos (< 25 min.). Los eventos sentidos por los habitantes de las poblaciones cercanas, se produjeron durante agosto y setiembre, especialmente el 1 de setiembre a las 7:25 p.m., cuando se produjo un sismo ($M_L = 3,8$) que fue sentido (IMM= IV) en los poblados de Guayabo y la Fortuna de Bagaces. Desde el enjambre sísmico ocurrido en el año 2002, la zona sísmica de Bijagua de Upala ha mantenido una actividad moderada hasta el presente con sismos de magnitudes $M_L < 2,0$ y profundidades entre 3 y 7 km. Por otro lado, la sismicidad en Tierras Morenas y alrededores (magnitudes $M_L < 2,3$; profundidades entre 1 y 6 km) sugiere que la zona permanece activa. Prueba de ello fue el sismo ($M_L = 3,8$) registrado el 21 de setiembre a las 5:39 a.m., sentido (IMM= IV) en Tierras Morenas y en Tilarán (IMM= III). Según el mecanismo focal compuesto, se trata de un fallamiento de desplazamiento de rumbo sinistral con dirección N 40°E.

Abstract

A total amount of 353 earthquakes was located by OSIVAM-ICE in its area of main interest in 2003. Most of them (91%) had crustal origin (less than 25 km depth); the remaining 9% are related with the interaction between Coco and Caribbean plates. Shallow seismicity was concentrated in three main areas: a) within the Miravalles Geothermal Field (MGF); b) near Bijagua of Upala; and c) south-east flank of Tenorio Volcano, near Tierras Morenas. The MGF seismicity is strongly related with the exploitation activities due to the distribution of the earthquakes in surface and depth (the majority < 2,5 km depth) along the exploitation and injection areas and the generation of micro-swarms (11-15 micro-earthquakes with magnitudes $M_L < 2,0$) in short time intervals (< 25 min.). Felt earthquakes in nearby towns, occurred during August and September, especially at Sep 1 at 7:25 p.m., when an earthquake ($M_L = 3,8$) was felt in Guayabo and Fortuna de Bagaces (MMI= IV). Since the Bijagua de Upala seismic swarm occurred in 2002, the seismic area at Bijagua de Upala keep a moderate seismicity until today, yield $M_L < 2,0$ magnitudes earthquakes with depths between 3 and 7 km. On the other hand, the seismicity in the surroundings of Tierras Morenas had earthquakes ($M_L < 2,3$ magnitude, depths between 1 and 6 km), showing that the zone is active. Prove of that was the earthquake ($M_L = 3,8$) recorded in Sep 21 at 5:39 a.m., felt at Tierras Morenas (MMI= IV) and Tilarán (MMI= III). According to the composite focal mechanism, it is a vertical N40°E left strike slip system.

1. Introducción

La red sismológica está compuesta por 11 estaciones sismológicas: 5 estaciones en Miravalles (LIM, MES, CMU, CUI. y COL), 4 estaciones alrededor del volcán Arenal (FOR, REY, MAC y CAS), una estación en el flanco norte de la Laguna de Arenal (BAL) y una estación en el flanco sur de la Laguna de Arenal (CHI); y 7 acelerógrafos: 1 estación en Miravalles (AC1), 3 estaciones en la presa de Sangregado (AC2, AC3 y AC4) y 3 estaciones en la presa de Sandillal (PS1, PS2 y PS3). Durante este año las estaciones sismológicas BAL, AC1, FOR, MAC y REY han estado fuera de servicio por falta de repuestos o debido a que no tienen GPS (reloj) y al perder el tiempo, quedan fuera de servicio. La Figura 1 muestra la localización de las estaciones del OSIVAM y el mapa tectónico local del área.

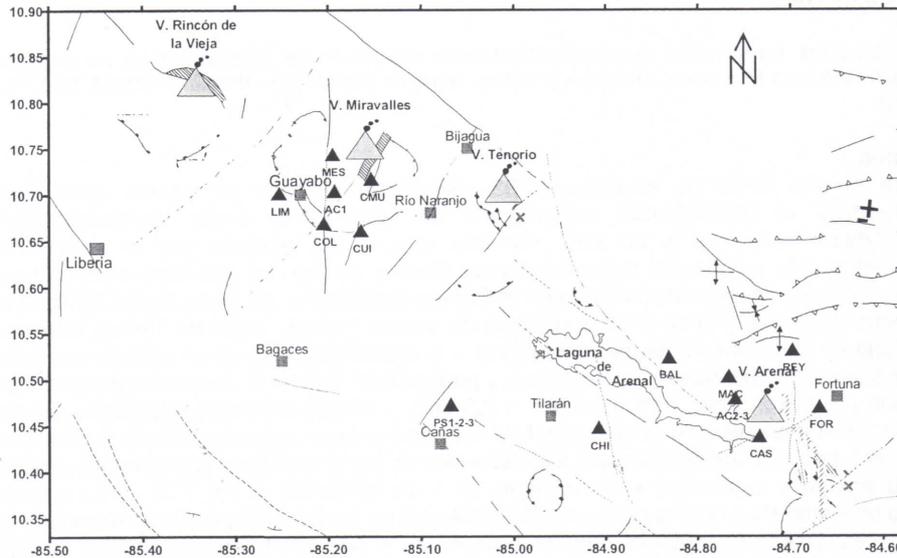


Figura 1. Localización de las estaciones sismológicas y acelerométricas del OSIVAM (triángulos negros). Los cuadrados son poblaciones, las líneas rectas (continuas y/o discontinuas) representan las fallas más importantes en la región, las líneas con triángulos son fallas inversas, las líneas con flechas son pliegues, las líneas anchas a rayas son fallas inferidas, las líneas curvas con cuadrados son bordes de caldera (modificado de Denyer et al., 2003).

2. Actividad Sísmica

Durante este año las estaciones sismológicas del OSIVAM registraron 1533 sismos, de los cuales 1042 son regionales (distancias epicentrales mayores a 80 km y profundidades mayores a 25 km) y 491 son sismos locales (distancias epicentrales menores a 80 km y profundidades menores a 25 km). Del total de eventos registrados se localizaron 718. El Tabla 1 muestra del detalle de sismos registrados y localizados por mes. La ubicación de los sismos locales en los alrededores del PGM, ARCOSA y TEJONA pueden ser observadas en la Figura 2. En total fue posible localizar 353 eventos sísmicos en esa área con profundidades máximas de 25 km y magnitudes locales (M_L) generalmente inferiores a los 2,5 grados, con excepción de dos sismos de 3,8 M_L registrados en La Fortuna de Bagaces y Tierras Morenas de Tilarán en setiembre. Estos sismos están asociados con fallas locales. Por su parte, 34 sismos con profundidades superiores a 25 km y M_L entre 2 los 3 grados, se localizan en su gran mayoría al suroeste del área y asociados al proceso de subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe.

Tabla 1. Número de sismos registrados mensualmente durante el año 2003.

Mes	Sismos regionales	Sismos locales	Eventos localizados	Eventos locales cercanos al PGM, ARCOSA y Tejona
ENERO	75	15	35	10
FEBRERO	53	32	49	24
MARZO	88	35	55	24
ABRIL	74	23	50	24
MAYO	84	33	60	19
JUNIO	102	33	54	23
JULIO	78	37	60	30
AGOSTO	79	37	53	23
SETIEMBRE	95	106	90	73
OCTUBRE	126	64	87	41
NOVIEMBRE	92	54	74	42
DICIEMBRE	96	22	51	20
TOTAL	1042	491	718	353

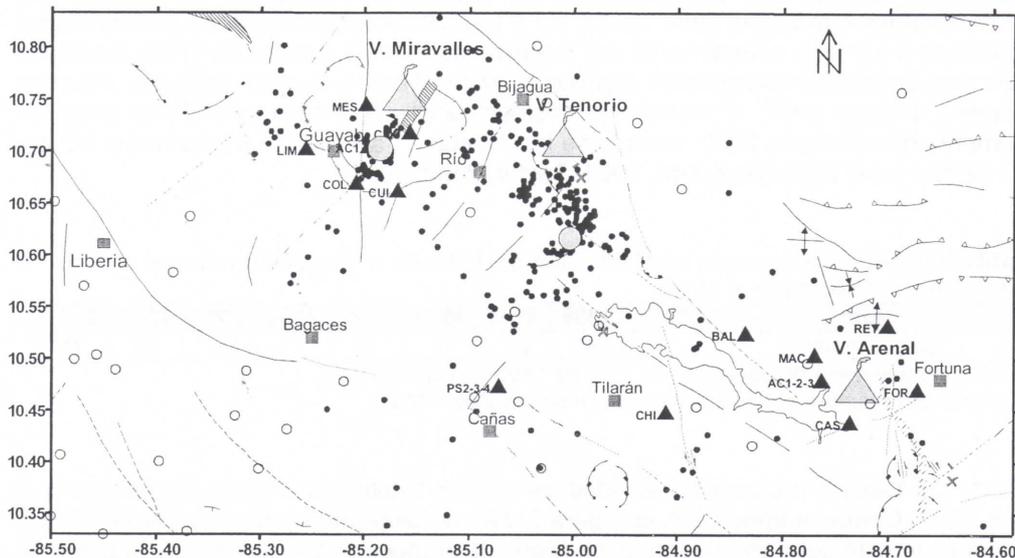


Figura 2. Sismos locales (puntos de color negro) localizados en los alrededores del PGM, ARCOSA y Tejona durante el año 2003. Los círculos grises indican la ubicación de los dos sismos locales de mayor magnitud ($M_L = 3,8$) ocurridos durante el mes de julio. Los círculos blancos muestran la localización de los sismos con más de 25 km de profundidad. La simbología es la misma que en la Figura anterior.

2.1 Sismicidad en los alrededores y dentro del Campo Geotérmico de Miravalles

Por primera vez, desde que fue instalada la red digital del OSIVAM (diciembre de 1993), se produjeron diez microsismos que se localizaron entre 5 y 10 km al noroeste de la estación Limonal (LIM) durante el mes de mayo del 2003, y tuvieron magnitudes locales bajas ($M_L < 2,1$) y profundidades entre los 5 y 7 km. Previamente, tan solo se habían registrado seis microsismos en esa misma área en 9 años de operación de la red digital. Como puede apreciarse en la Figura 2, en las cercanías de la estación LIM, hay sistemas de fallas con rumbo NE (Denyer et al., 2003). El mecanismo focal compuesto sugiere un fallamiento con el mismo rumbo, por lo que no se descarta a que estos sismos posiblemente están asociados con este sistema de fallas.

Al este de Miravalles, desde el año 2001 y especialmente después del enjambre de Bijagua de Upala y Río Naranjo del año 2002, la actividad sísmica en ese sector se ha mantenido con un promedio entre 6 y 7 sismos mensuales de baja magnitud ($M_L < 2,0$) y profundidades entre los 3 y los 7 km, lo que indica que la zona continua activa.

Dentro de lo que son propiamente los límites del campo geotérmico (aproximadamente un área de 90 km^2), varios sismos fueron sentidos levemente en los meses de febrero, abril y setiembre, y en total se han localizado 78 eventos con profundidades que varían entre los 1,0 y 7,0 km (70 microsismos tienen profundidades inferiores a 3,0 km), normalmente con magnitudes $M_L < 2,1$ grados. El Tabla 2 muestra que con excepción del enjambre sísmico ocurrido al este y sureste de Cabro Muco en octubre del año 1997, el número de sismos localizados dentro del PGM viene en aumento desde el año 2000, cuando se localizaron 11 sismos, 36 sismos en el 2001 y 52 sismos en el 2002 (Barquero, 2001; Taylor, 2002, 2003).

Tabla 2. Sismos localizados en los alrededores del PGM (90 km^2) para los años del periodo 1995-2003. Profundidades < 15 km.

Año	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Sismos totales	3*	4*	22 ¹	1	2	11	36	52	78

*La red estuvo fuera de operación de julio de 1995 a mayo de 1996.

¹Ocurrió un enjambre sísmico al este y sureste de Cabro Muco.

El Tabla 3 muestra la cantidad de sismos localizados mensualmente para el año 2003. Como se aprecia en la Figura 3, hay un grupo de sismos que se concentra hacia el noreste del campo geotérmico (Zona de producción Unidad III), y una segunda agrupación en el centro del campo, donde se concentra la zona de producción de las Unidades I y II. La zona de reinyección hasta la fecha ha presentado poca actividad sísmica.

Tabla 3. Número de sismos localizados por mes, año 2003 en el PGM (90 km²).

Mes	Eventos locales cercanos al PGM
Enero	0
Febrero	12
Marzo	4
Abril	13
Mayo	2
Junio	5
Julio	3
Agosto	13
Setiembre	14
Octubre	3
Noviembre	7
Diciembre	2
Total	78

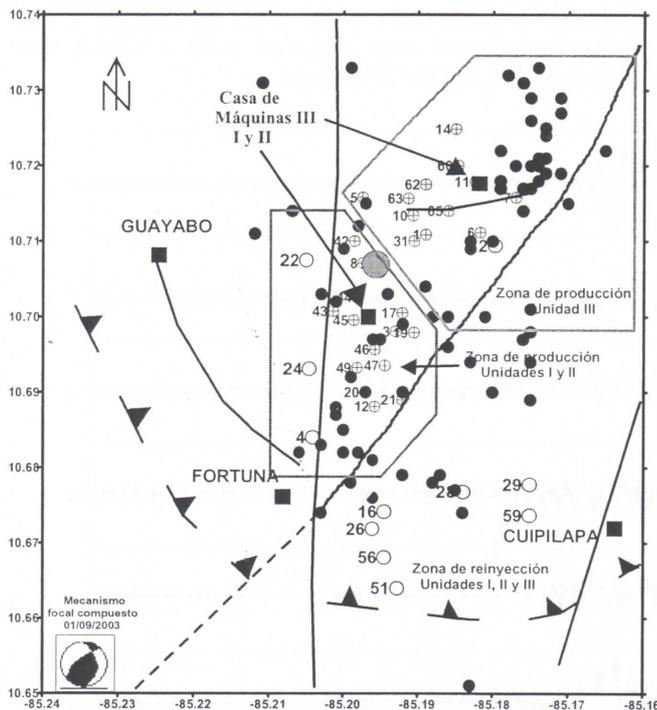


Figura 3. Localización de los micro-sismos (círculos negros) dentro de los límites del campo geotérmico durante el primer semestre del año 2003. Los círculos blancos son los pozos inyectoros, los círculos con una cruz son los pozos productores. Se indica la localización del sismo del 1 de setiembre (círculo gris, 3,8 M_L) y el mecanismo focal compuesto (inversa con movimiento lateral izquierdo).

La distribución de los sismos dentro del campo (Figura 3) es muy similar a la de los últimos dos años y al igual que lo ocurrido durante el mes de abril del año 2001 (cuando por primera vez se produjeron cinco sismos en un día, cuatro de los cuales se registraron en una hora) y durante el mes de mayo del año 2002 (seis sismos en menos de 30 minutos). Durante el año 2003, se han producido cuatro picos importantes de sismicidad (Figura 4), donde la mayoría de los sismos se registraron en cuestión de pocos minutos (25 minutos o menos).

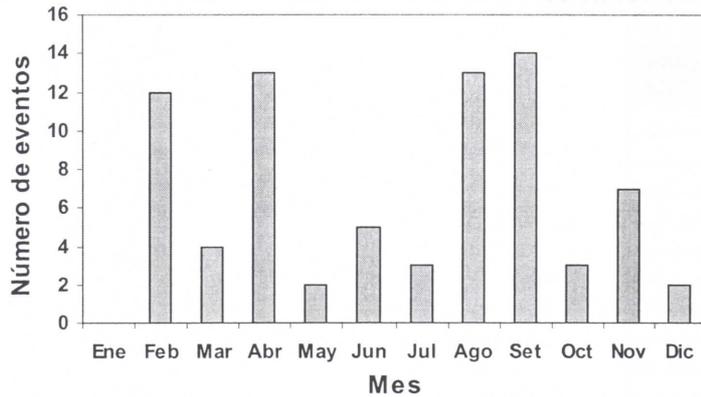


Figura 4. Número de micro sismos registrados mensualmente en el CGM durante el 2003.

Durante los sismos del mes de febrero, fue posible identificar claramente ondas superficiales en los registros de las estaciones más alejadas (LIM y CMU) que sugieren la poca profundidad del origen de los sismos (Figura 5).

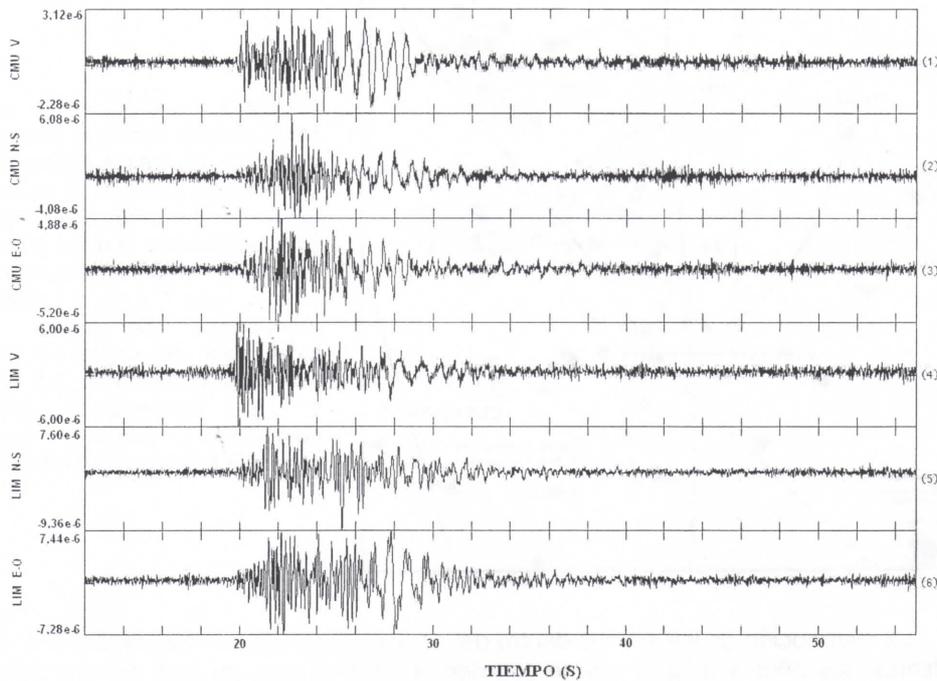


Figura 5. Sismo del mes de febrero localizado en el centro del campo geotérmico Miravalles, donde se muestran las ondas superficiales registradas en las estaciones más lejanas (5-7 km).

Algunos de los eventos sentidos durante este año por los habitantes de las poblaciones cercanas, se produjeron durante agosto y setiembre, especialmente el 1 de setiembre a las 7:25 p.m. cuando se produjo un sismo que alcanzó una magnitud $3,8 M_L$ y fue sentido en los poblados de Guayabo y La Fortuna de Bagaces con una intensidad de IV en la escala Mercalli modificada (IMM). El mecanismo focal compuesto sugiere que se trata de un movimiento oblicuo, inverso con movimiento lateral izquierda (Figura 3).

Aunque la sismicidad del campo geotérmico continua siendo muy baja, estos grupos de sismos en cortos intervalos de tiempo son una característica que no se presentaba anteriormente al año 2001, lo que podría significar que, si bien es cierto que hasta la fecha los efectos de la producción explotación son mínimos, éstos pudiesen estar indicando el inicio de una pequeña sismicidad inducida a lo largo de las zonas de fallas de rumbos N-S y NE-NO. Normalmente, el efecto térmico que ejerce el agua reinyectada y la explotación misma del yacimiento, afectan la presión de poro del medio fracturado, lo cual genera un cambio volumétrico del sistema que conlleva a desestabilizar el campo de esfuerzos prevaleciente, por cortos intervalos de tiempos hasta alcanzar nuevamente el equilibrio. Este aumento de la sismicidad en el PGM, parece estar asociado con un incremento en el número de sismos locales de la cordillera volcánica, por lo que es difícil determinar que tanto ha aumentado la sismicidad debido a los procesos de explotación (ver conclusiones).

2.2 Sismicidad en los alrededores de los proyectos Arenal, Corobicí, Sandillal (ARCOSA) y Tejona.

En el año 2003 se registraron y localizaron un total de 113 eventos sísmicos (Figura 6). Todos los eventos son someros o locales (profundidad < 25 km), son producidos por fallamiento local, y tienen magnitudes $M_L < 2,8$ grados, con excepción del sismo de $M_L = 3,8$ registrado el 21 de setiembre a las 5:39 a.m., sentido con intensidad IV (IMM) en Tierras Morenas y III en Tilarán. Los parámetros más importantes del sismo se detallan en el Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros del sismo del 21 de setiembre a la 5:38 a.m.

Magnitud Local	3,8
Profundidad	2,8 km
Localización	7 km al norte de Tierras Morenas de Tilarán
Tipo de ruptura	Según el mecanismo focal compuesto se trata de un fallamiento de desplazamiento de rumbo sinistral con dirección N 40°E

El Tabla 5 muestra el total de sismos localizados anualmente para el periodo 1994-2003, dentro de la misma área mostrada en la Figura 6. Claramente se aprecia como el año 2003 presentó actividad sísmica superior a los enjambres sísmicos de los años 1997 y 1998, y es claro como la actividad se ha mantenido en niveles moderados desde el 1997, y especialmente ha ido aumentando desde el año 2001.

Tabla 5. Sismos localizados en los alrededores de los proyectos ARCOSA y Tejona para los años del periodo 1994-2003. Profundidades < 25 km.

Año	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Sismos totales	4	5*	11*	77 ¹	89 ¹	14	22	56	65	113

* La red estuvo fuera de operación de julio de 1995 a mayo de 1996.

¹ Enjambre sísmico en los alrededores de Tierras Morenas.

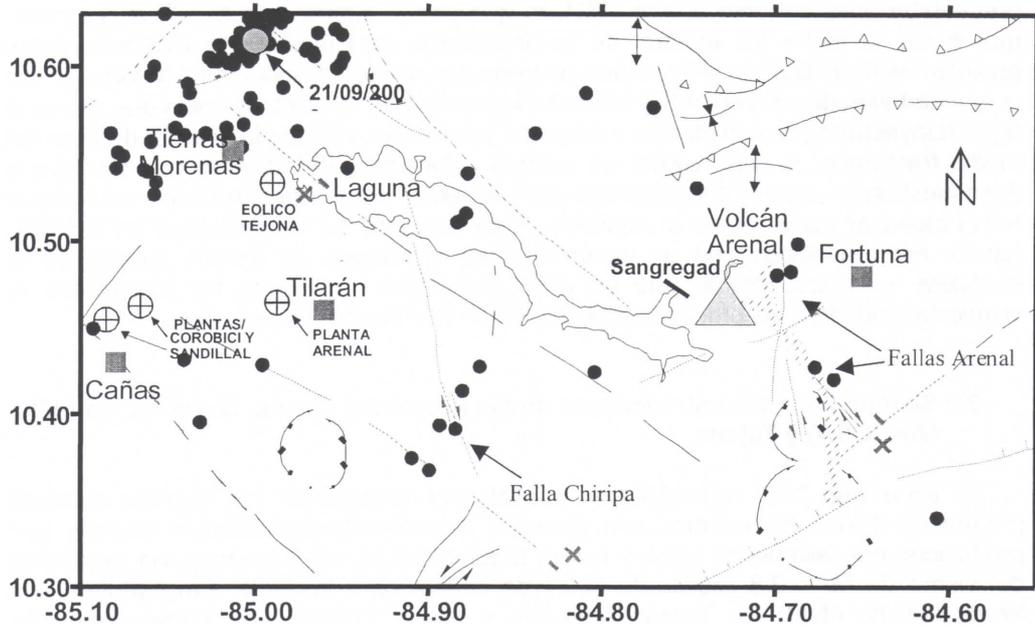


Figura 6. Localización de los eventos someros (puntos negros) con menos de 25 km de profundidad en los alrededores de ARCOSA y Tejona para el año 2003. El sismo de magnitud más alta ($M_L=3,8$) se indica con un punto gris.

En los últimos años se produjeron enjambres sísmicos en la región comprendida entre Tierras Morenas y Cañas, en una franja con dirección NE-SO. Durante este año, esta zona aumentó su actividad sísmica comparada con los años anteriores y la franja sísmica (definida desde 1997) nuevamente aparece con una actividad concentrada al norte de Tierras Morenas, en el flanco sureste del volcán Tenorio. Hay una concentración de sismos en el borde de la caldera donde se produjo el sismo del 21 de setiembre ($3,8 M_L$). Con esta situación, es claro que ese sector es activo y de especial atención para los intereses del ICE, pues es un fuerte candidato a producir sismos de regular magnitud ($5,5 M_L$).

Dos zonas fallamiento activo son importantes de mencionar. La primera es la falla Chiripa que originó el terremoto de Tilarán (1973); y la segunda es la zona de debilidad en las cercanías del volcán Arenal (Figura 6). Ambas han presentado actividad, que aunque mínima, evidencia que son fallas activas y capaces de generar actividad sísmica importante en cualquier momento.

3. Conclusiones

El mecanismo focal compuesto de la actividad sísmica, localizada al noroeste de la estación de Limonal (LIM), puede estar asociado al fallamiento de rumbo noreste claramente identificado en la zona por Denyer et al. (2003) y por fotografías aéreas.

En el área de PGM, aunque la actividad sísmica aunque sigue siendo baja, se duplicó en comparación con los años 2001 y 2002 y se localizó en el centro y el noreste del campo. Durante los meses de febrero, abril, agosto y setiembre, y al igual que los dos años anteriores, se produjeron una secuencia de sismos en pocos minutos. Por esta característica, que no se presentaba antes del 2001 y por el tipo de señal registrada, en donde claramente se puede apreciar las ondas superficiales al final del registro, se puede concluir que en el PGM los sismos se están produciendo a poca profundidad, en zonas donde se dan movimientos de fluidos que han provocado estas pequeñas series de sismos, y muy probablemente están asociados con rupturas a lo largo de zonas de falla. Además, aunque la sismicidad del PGM ha sido baja, es claro que a aumentado a partir del año 2000, con un evento importante de 3,8 M_L grados ocurrido en el mes de setiembre. En la localidad de Bijagua de Upala, se ha mantenido desde el enjambre del enero-marzo del 2002 con actividad sísmica constante, generando de 6 a 7 sismos mensualmente.

Por su parte, la sismicidad en los alrededores de ARCOSA, se ha mantenido con una actividad moderada en los últimos años (desde 1997), en donde el alineamiento sísmico NE-SO que se extiende desde el noreste de Tierras Morenas hasta Cañas, sigue poniendo en evidencia la presencia de un sistema tectónico activo. El mismo de $M_L = 3,8$ grados fue sentido en Tierras Morenas y Tilarán con intensidades de IV y III.

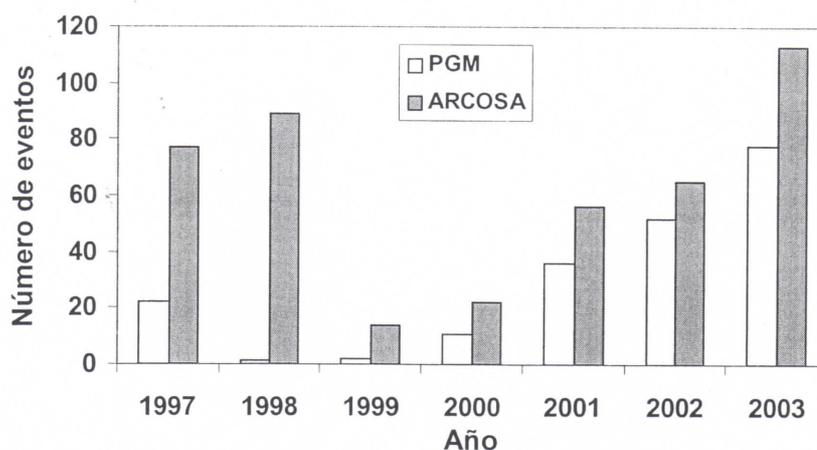


Figura 7. Comparación de la sismicidad base local en los proyectos de generación eléctrica ARCOSA y PGM en los últimos años.

La Figura 7 es una comparación de la sismicidad en el PGM y ARCOSA en los últimos siete años. Después de los enjambres sísmicos de 1997 y 1998, claramente se aprecia la tendencia al aumento paulatino de la sismicidad base. La ocurrencia de enjambres sísmicos especialmente desde en los últimos dos años (Bijagua de Upala, Guachipelín-Pailas y Tierras Morenas) es evidencia clara de ello. Este incremento en la sismicidad local, sugiere que la sismicidad en el PGM no se debe en su totalidad a la explotación del campo geotérmico, aunque es muy probable, que esta contribuya a la generación de sismos en las fallas activas que se localizan dentro del PGM.

Agradecimientos

Agradecemos a Guillermo E. Alvarado por la revisión de este trabajo y sus valiosos comentarios. Y a los técnicos Marco T. Naranjo, Francisco Arias, Dagoberto Boniche y Luis Madrigal en la recolección de la información.

Referencias

Barquero, R., 2001. Resumen de la actividad sísmica en las zonas de Miravalles y Arenal durante el año de 2000.- Boletín OSIVAM, 12 (23-24): 7-14, San José.

Barquero, R., 2001. Resumen de la actividad sísmica en las zonas de Miravalles y Arenal durante el año de 1999.- Boletín OSIVAM, 12 (23-24): 1-6, San José.

Denyer, P., Montero, W. & Alvarado, G. E., 2003. Atlas Tectónico de Costa Rica. Editorial de la Universidad de Costa Rica. 81 pp.

Taylor, W., 2003. La actividad sismotectónica durante el 2002 en los alrededores de los proyectos de generación eléctrica de Guanacaste.- Boletín OSIVAM, 14 (26): 1-9, San José.

Taylor, W., 2002. La actividad sismotectónica durante el 2001 en los alrededores de los proyectos de generación eléctrica Miravalles, ARCOSA y Tejona.- Boletín OSIVAM, 12 (25): 1-9, San José.

La actividad del volcán Arenal durante el año 2003

[The activity of the Arenal Volcano throughout the year 2003]

Waldo Taylor, Luis Madrigal & Gerardo J. Soto

wtaylor@ice.go.cr, lmadriral@ice.go.cr, katomirodriguez@yahoo.com

Área de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica, ICE, Apdo. 10032-1000, San José, Costa Rica

Taylor, W., Madrigal, L. & Soto, G. J., 2004. La actividad del volcán Arenal durante el año 2003. Boletín OSIVAM, 15 (27): 11-24, San José.

Resumen

Durante el año 2003 la actividad del volcán Arenal ha sido similar a la que mantiene desde 1984, es decir, de tipo estromboliano y efusión de lavas. Consistió de explosiones con piroclastos balísticos y eólicos, coladas de lava, emisiones de columnas de vapor y de gases, algunas audibles (soplidos y sonidos tipo jet). Las amplitudes promedio anual de los tremores (movimiento de lava en la chimenea y la cámara magmática) y otras señales volcánicas (entre los que se incluyen erupciones y desgasificaciones) se mantuvieron estables con respecto a los años anteriores. El contenido promedio anual de la frecuencia del tremor se mantiene en descenso desde setiembre del año 2002 (2,43 Hz), disminuyó en comparación con los dos años anteriores y se encuentra en 2,06 Hz, cerca del promedio del periodo 1994-2003 (2,05 Hz). Estas características son un indicador de que la profundidad a la cual se generan estas ondas sísmicas está variando con el tiempo, pero por sí solo, no es suficiente para definir si el volcán puede entrar en una etapa de mayor actividad en un futuro cercano. Por el contrario, la tendencia general del volcán es que las amplitudes de todas las señales de origen volcánico (tremores y erupciones entre otras) están disminuyendo y, por lo tanto, en un futuro cercano el volcán entra a un periodo de inactividad. Además, los registros de la estación sísmológica analógica (Fortuna), donde se realiza el conteo de eventos, muestra que la cantidad de erupciones y tremores viene en descenso desde el año 2000.

Abstract

During 2003, the activity of Arenal volcano has been similar to that since 1984. It consisted in explosions with ballistic and air-fall pyroclasts, lava flows, emission of gas and steam columns, some of them audible (blows and noise-like-jet type). The annual average amplitude of tremors (lava motions into the pipe) and other volcanic signals (i.e. eruptions and degassing) is constant compared to previous years. The annual average frequency content of tremor is decreasing since September 2002 (2.43 Hz), decreased related to last two years and is 2,06 Hz right now, close to the period 1994-2003 average (2.05 Hz). These characteristics indicate that the depth where seismic waves are generated is varying in time, but is not enough to show if the volcano is going to have a high volcanic activity soon. On the contrary, the volcano general tendency is for decreasing amplitudes of all volcanic signals (tremor and explosions) and therefore the volcano is going to an inactive period in the future. Furthermore, records of the analog seismic station (Fortuna), where events are counted, shows that the quantity of events is decreasing since the year 2000.

1. Introducción

Desde 1994, el Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM) mantiene una red sismológica digital de 5 estaciones alrededor del volcán Arenal (Figura 1). Se actualiza rutinariamente una base de datos digital de las amplitudes y frecuencias de los tremores volcánicos y de las amplitudes de las señales sísmicas de origen volcánico diferentes a los tremores (como por ejemplo los eventos explosivos tipo E, desgasificaciones y otras) registrados, que han cumplido el criterio para ser guardados permanentemente. Debido a las limitaciones físicas en relación con el enorme grado de actividad sísmica del volcán, actualmente se archivan solamente los eventos registrados por la estación Castillo (CAS). Además, se mantiene un registro continuo de la actividad volcánica en papel termosensible mediante el equipo analógico de la estación Fortuna (FOR) desde 1975, y especialmente desde 1984 para determinar la cantidad de minutos tremor y explosiones (tipo E).

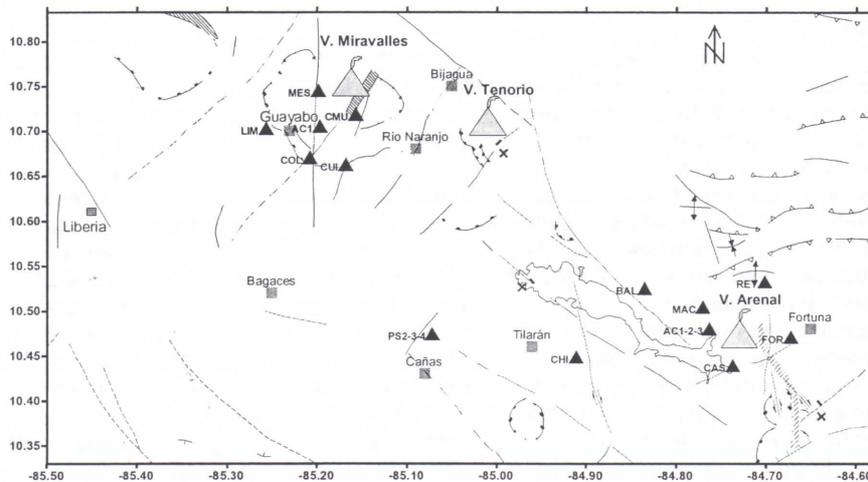


Figura 1. Localización de las estaciones sismológicas y acelerométricas del OSIVAM (triángulos negros). Los cuadrados son pequeñas poblaciones, las líneas rectas (continuas y/o discontinuas) representan las fallas más importantes en la región, las líneas con triángulos son fallas inversas, las líneas con flechas son pliegues, las líneas anchas a rayas son fallas normales y las líneas curvas con cuadrados son bordes de caldera (modificado de Denyer et al., 2003).

Durante el año 2003 se archivaron las formas de onda digitales de 138 horas de tremor (en 3515 archivos) y 5404 señales sísmicas de origen volcánico diferentes a los tremores, registradas por la estación CAS. En la estación analógica FOR se registraron 530 horas de tremor y 4694 eventos tipo E en 100 días de registro legible.

2. Actividad volcánica observada en el campo

La actividad del Arenal se mantuvo con pequeñas erupciones estrombolianas en el cráter C, cuyos depósitos en la cumbre hicieron crecer al cono algunos metros. Las lavas fluyeron en varios sectores de las laderas, especialmente hacia el norte y noroeste, manteniéndose en las laderas altas del volcán, por lo que su mapeo y el cálculo del volumen son difíciles de realizar. Los derrumbes de los frentes de las coladas fueron frecuentes a lo largo de todo el año y particularmente a las 10:55 a.m. del 5 de setiembre del 2003, cuando se iniciaron una serie de flujos piroclásticos en el flanco norte del volcán Arenal, que se dirigieron hacia el sector de Los Laguitos (Figura 2).

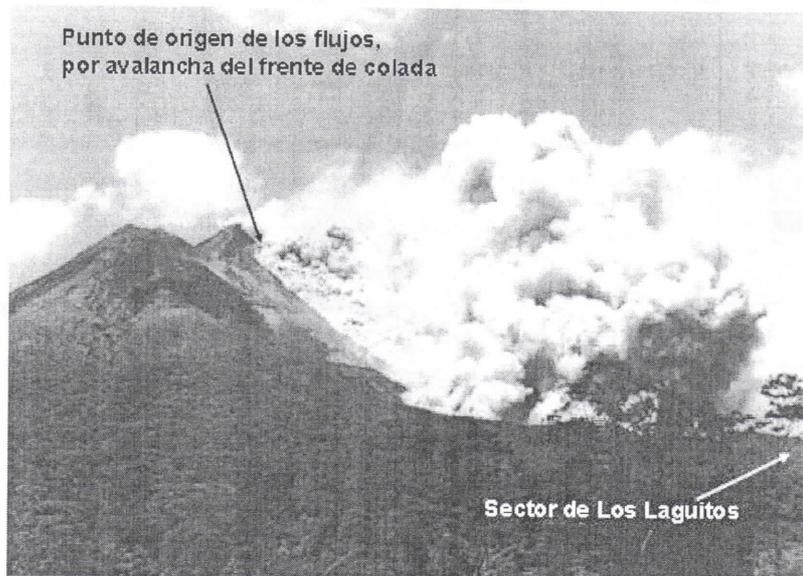


Figura 2. Foto del segundo flujo piroclástico del 5 de setiembre 2003, donde se observa el punto de origen y la columna de ceniza. Captada por Olger Aragón.

Se contaron 5 eventos en el lapso aproximado de una hora. Debido a las óptimas condiciones meteorológicas, los flujos fueron ampliamente observados, filmados y fotografiados por mucha gente, incluidos reporteros y turistas. Esto incidió en una amplia difusión por los medios de comunicación, que dio la vuelta al mundo en pocas horas. El origen de los flujos se debió al colapso de un frente de colada activo que era evacuado desde el borde norte del cráter activo del volcán. Las avalanchas se iniciaron cerca de la cota de 1500 m s.n.m. (Figura 2). Las áreas afectadas están todas dentro de los linderos del Parque Nacional Volcán Arenal, y dentro de las áreas restringidas, de alto peligro. Los flujos avanzaron hasta ~775 m s.n.m., para un trayecto de ~1550 m (1400 m en la componente horizontal). La ceniza fina producida fue arrastrada hacia el oeste, pero se depositó principalmente en los primeros 5 km desde el volcán. El volumen involucrado es muy difícil de calcular (por inaccesibilidad), pero comparando con otros flujos anteriores (Alvarado & Soto, 2002), puede estimarse en el orden de 10^5 m³. El coeficiente de fricción aparente (H/L) es de 0,52. La velocidad no ha sido bien evaluada, en tanto que los vídeos obtenidos no muestran con buen detalle los flujos de principio a fin. Algunos eventos de avalanchas de frentes de coladas, con menor volumen y longitud alcanzaron velocidades mínimas de 11-14 m/s en junio de 1993, mientras que los flujos piroclásticos de los últimos 20 años han tenido velocidades ≤ 33 m/s (120 km/h). La colada de lava desde la cual se originaron los flujos, se mantuvo activa por varias semanas, y desde ella se desprendían bloques que llegaban rodando hasta el frente de los abanicos formados por los flujos. Ninguna de la infraestructura del ICE sufrió daños o se vio afectada por estos eventos. La Figura 3 muestra un mapa simplificado del comportamiento del volcán Arenal en los últimos años.

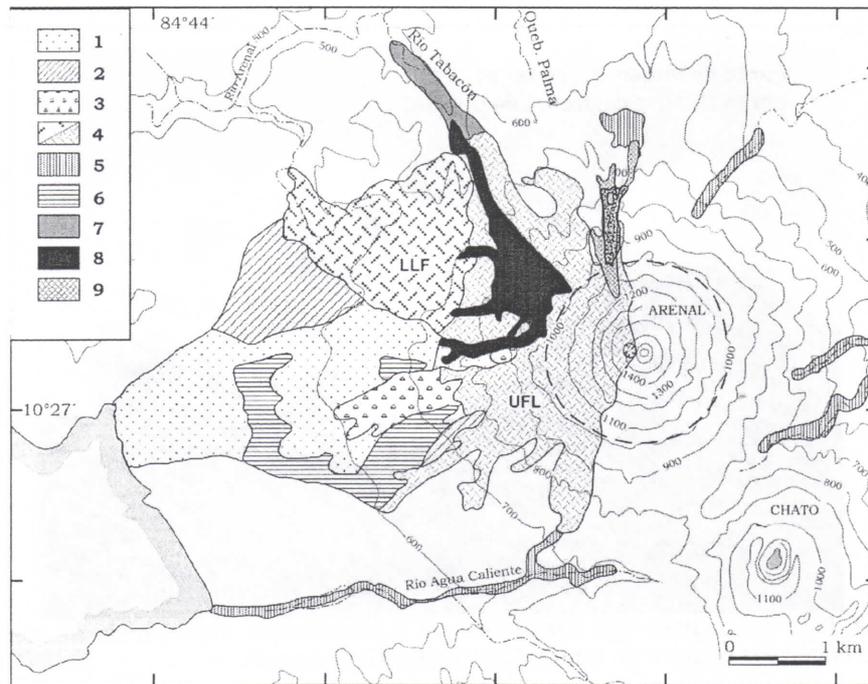


Figura 3. Mapa geológico del Arenal que muestra las unidades desde 1968 hasta el 2004: (1) tefra gruesa de 1968, (2) morfología rugosa producida por los impactos de bloques de 1968, (3) depósitos de flujos de bloques y cenizas de 1968, (4) flujos de lava recientes: LLF son de 1968 a 1973, y UFL son de 1974 a 2004, (5) material erosionado principalmente de las coladas de lava, (6) abanicos epiclásticos compuestos por depósitos retrabajados de las tefras de 1968, (7) depósitos de flujos piroclásticos de junio de 1975, (8) depósitos del flujo piroclástico de agosto de 1993, (9) flujos piroclásticos del 2000 y del 2001. La localización de los flujos del 5 de setiembre está sobre los del 2000 y 2001, en un patrón moteado. La línea de trazos alrededor del cono limita el área de bombardeo intenso por actividad estromboliana desde 1984 al presente.

3. Actividad registrada instrumentalmente

3.1 Registros analógicos

La estación FOR se localiza 3,7 km al ENE del volcán Arenal (Figura 1). En ese sitio se mantenía equipo tanto digital como analógico, pero a finales de julio del 2000, el equipo digital dejó de operar, situación que se mantuvo durante el 2003, debido a problemas técnicos y falta de repuestos.

El rendimiento de la estación analógica FOR durante el 2003 decayó considerablemente con respecto al año 2002 (tiempo efectivo de registro para el 2002: 44,5% mientras que para el año 2003 fue del 27,5%, el segundo más bajo en los últimos 6 años). Esta disminución se debe a que durante cinco meses (de junio a octubre) la estación estuvo fuera de funcionamiento debido a problemas técnicos. A lo anterior, hay que agregar que los meses de enero y mayo la estación tuvo solo un 25% de tiempo efectivo de registro (t.e.r.), mientras que en febrero fue solo del 6,7%. Al igual que en años anteriores, la mayoría del t.e.r. se ubica entre las 6 p.m. y las 6 a.m., cuando el tajo Manolo (ubicado cerca del geófono) no está en su actividad de explotación.

El tabla 1 y la Figura 3 muestran los datos estadísticos de los registros obtenidos por la estación analógica de enero a diciembre del 2003: 530 horas de tremor y 4694 explosiones en 100,33 días efectivos de registro. Se toma en cuenta el t.e.r. para tener un dato más exacto de la actividad explosiva y de tremor. El promedio mensual de explosiones por hora se obtiene dividiendo la cantidad de explosiones entre el t.e.r. de ese mes. El dato del tremor indicado corresponde con el porcentaje de éste en el t.e.r.

Tabla 1. Estadística de los tremores y explosiones registrados en la estación analógica FOR durante el tiempo efectivo de registro (t.e.r) para el año 2003.

Mes	t.e.r. (h)	Efectividad (%)	Número de eventos E	Horas tremor	Eventos E por hora del t.e.r.	Horas tremor del t.e.r. (%)
Enero	187	25,13	259	50	1,39	26,74
Febrero	45	6,7	103	10	2,24	21,74
Marzo	472	63,44	1083	87	2,29	18,43
Abril	480	66,67	931	121	1,94	25,31
Mayo	190	25,54	394	45	2,07	23,68
Junio	n.t.	n.t.	n.t.	n.t.	n.t.	n.t.
Julio	n.t.	n.t.	n.t.	n.t.	n.t.	n.t.
Agosto	n.t.	n.t.	n.t.	n.t.	n.t.	n.t.
Setiembre	n.t.	n.t.	n.t.	n.t.	n.t.	n.t.
Octubre	n.t.	n.t.	n.t.	n.t.	n.t.	n.t.
Noviembre	463	64,31	773	111	1,67	23,97
Diciembre	571	27,49	1151	106	2,02	18,52
Total	2408	27,49 *	4694	530	1,95*	22,01*

* Promedio anual

n.t.: Fuera de funcionamiento.

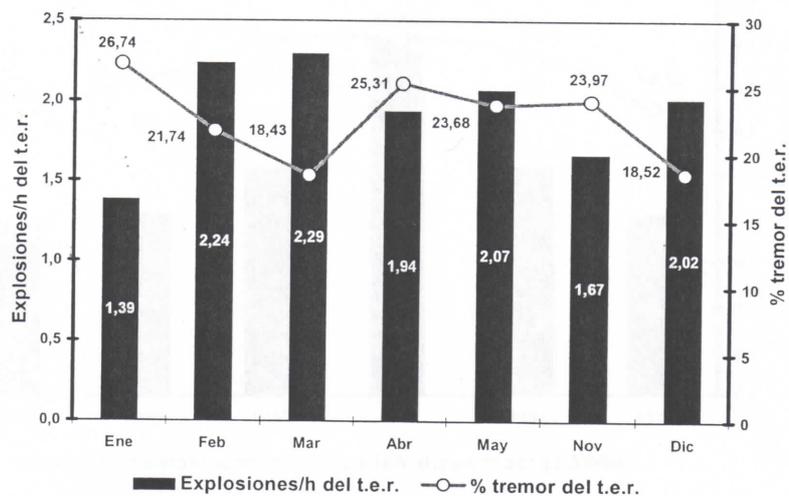


Figura 3. Registros en la estación analógica FOR durante el año 2003. Las barras representan el número promedio de eventos explosivos (tipo E) por hora del tiempo efectivo de registro (t.e.r.). El porcentaje de horas de tremor del t.e.r. se representa con la línea.

Debido al problema expuesto de la falta de registros, es difícil observar algún comportamiento específico en la actividad explosiva y de tremor del volcán, utilizando los datos de la estación analógica. Así, para los primeros cinco meses, tenemos un promedio de 1,98 eventos por hora (del t.e.r.), mientras que para los meses de noviembre y diciembre, el promedio es de 1,80; el total anual es de 1,95 eventos por hora del t.e.r. En el caso del tremor, hay un total de 530 horas, lo que representa el 22% del total del t.e.r.

3.2 Registros analógicos 1998-2003

Durante los últimos 6 años (1998-2003) se hizo una minuciosa auscultación de los sismogramas de la estación analógica FOR, aplicada al tiempo efectivo de registro (t.e.r.). En el tabla 2 y en la Figura 4 se muestran los resultados, donde se puede observar una simetría de los datos de tremor y explosiones. El año 1999 tuvo un incremento, en el caso del número de explosiones, de un 25,9% con respecto al año 1998; para el 2000 el incremento fue de un 58,36%. A partir de ese año y hasta el 2003, la cantidad de explosiones promedio por año, así como el dato correspondiente con el tremor, han venido decayendo (Figura 2). Este comportamiento podría indicar que la actividad sismo volcánica del Arenal se encuentra en uno de los niveles más bajos de los últimos años.

Tabla 2. Resumen estadístico de los datos (tremores y explosiones) registrados en la estación analógica FOR, años 1998 al 2003.

Mes	t.e.r. (h)	días (t.e.r.)	% anual	Expl.	Tremor (h)	Explosiones/h del t.e.r.	% tremor del t.e.r.
1998	2918	121,58	33,31	5948	662	2,04	22,69
1999	3978	165,75	45,41	10242	1078	2,57	27,10
2000	4252	177,17	48,41	17302	1206	4,07	28,36
2001	2230	92,92	25,46	5762	627	2,58	28,12
2002	3902	162,58	44,54	8084	974	2,07	24,96
2003	2408	100,33	27,49	4694	530	1,95	22,01
Total	19688	820,33	37,44	52032	5077	2,64	25,79

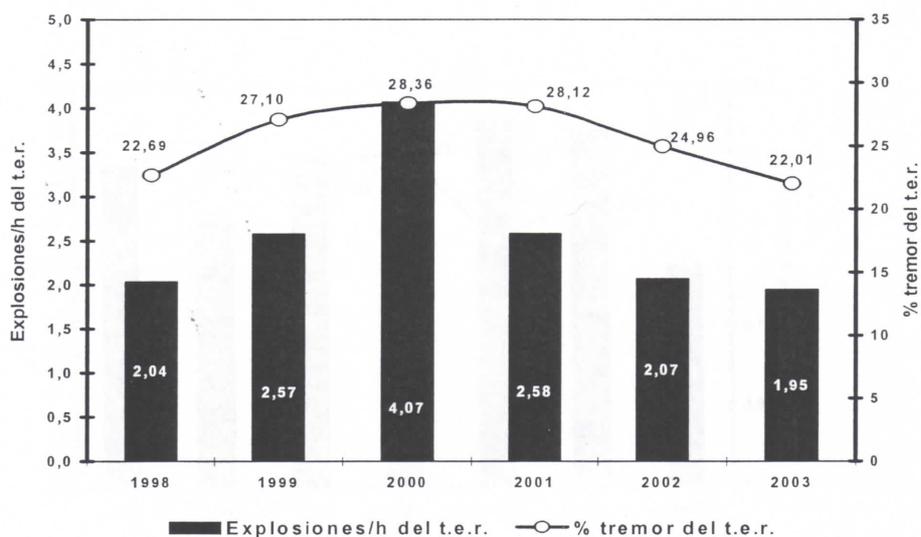


Figura 4. Análisis estadístico de los datos obtenidos de la estación FOR del año 1998 al 2003. Se puede observar la simetría de los datos expuestos en el gráfico; al igual que el decrecimiento gradual, a partir del año 2000, en la actividad explosiva y de tremor.

3.3 Registros digitales

Las estadísticas de los registros digitales se realizan solamente para la estación Castillo (CAS), que se localiza a 5,7 km al SW del volcán (Figura 1). Se hace así debido a que la calidad de los registros en ese sitio es superior a los de la estación digital Fortuna (FOR) y porque presenta un funcionamiento más regular.

En el tabla 3 y la Figura 5 se reseñan la cantidad de eventos volcánicos (5404), tremores (3515) y minutos tremor (8253 min. ó 138 horas aproximadamente) registrados y archivados digitalmente durante cada mes del 2003. El tabla 4 presenta los promedios de las amplitudes (y por ende, de la energía) mensuales de las señales volcánicas y tremores, y los promedios de los contenidos de frecuencias de estos últimos. En los dos tablas también se hace mención al total de eventos registrados y los promedios de los años 2001, 2002 y el período 1994-2003 (Arroyo & Taylor, 2002; Taylor & Madrigal, 2003). Los gráficos de los registros digitales se presentan además normalizados. La normalización se hace con respecto del promedio del periodo 1994-2003. Esto permite una mejor visualización y comprensión de las fluctuaciones ocurridas en el año con respecto de los años anteriores.

Tabla 3. Señales volcánicas y tremores registrados en la estación CAS durante el 2003.

Mes	Señales volcánicas	Tremor	Minutos tremor registrados
Enero	281	27	44
Febrero	321	175	316
Marzo	374	364	1165
Abril	266	227	590
Mayo	479	387	943
Junio	373	174	490
Julio	498	299	782
Agosto	497	402	984
Setiembre	649	429	932
Octubre	645	442	958
Noviembre	366	236	573
Diciembre	655	353	476
Total 2003	5404	3515	8253
Total 2002	2732	1748	3960
Total 2001	3068	3044	6127
TOTAL 1994-2003	16930	12017	-----

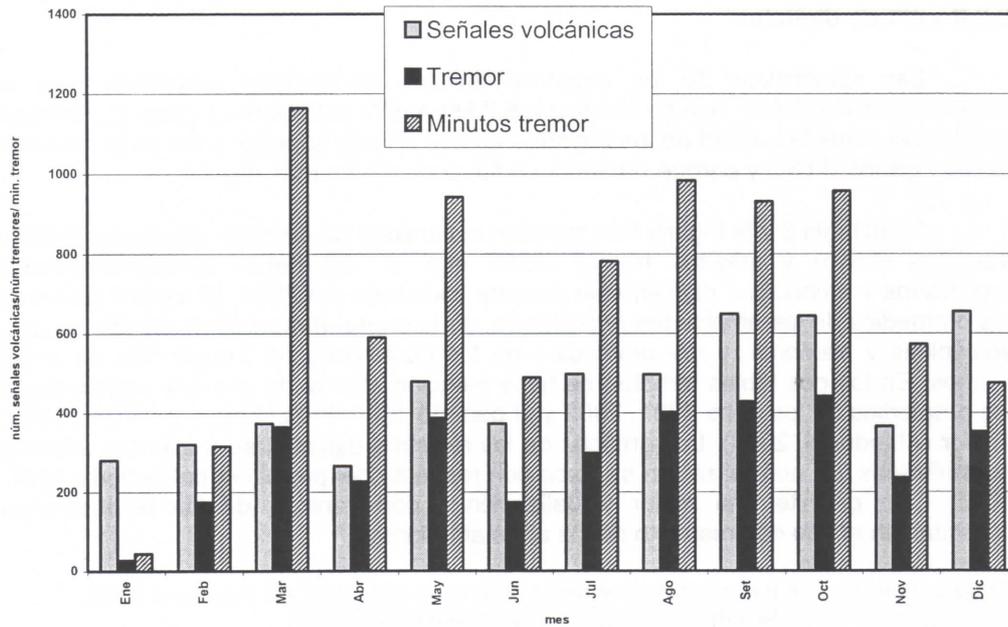


Figura 5. Registro de la estación digital CAS en el 2003. Los valores se muestran en el tabla 3.

Tabla 4. Promedios mensuales de las amplitudes de las señales volcánicas, los tremores y del contenido de frecuencia de los tremores, registrados en la estación CAS durante el 2003.

Mes	Señales volcánicas (m/s)	Tremor (m/s)	Contenido de frecuencia (Hz)
Enero	$6,933 \times 10^{-5}$	$1,731 \times 10^{-5}$	2,25
Febrero	$5,016 \times 10^{-5}$	$1,819 \times 10^{-5}$	2,12
Marzo	$5,938 \times 10^{-5}$	$1,333 \times 10^{-5}$	2,19
Abril	$5,836 \times 10^{-5}$	$2,163 \times 10^{-5}$	2,07
Mayo	$5,922 \times 10^{-5}$	$1,364 \times 10^{-5}$	2,02
Junio	$4,388 \times 10^{-5}$	$1,627 \times 10^{-5}$	2,03
Julio	$4,711 \times 10^{-5}$	$2,056 \times 10^{-5}$	1,92
Agosto	$5,297 \times 10^{-5}$	$1,850 \times 10^{-5}$	2,14
Setiembre	$5,192 \times 10^{-5}$	$2,263 \times 10^{-6}$	2,02
Octubre	$6,604 \times 10^{-5}$	$3,046 \times 10^{-5}$	1,95
Noviembre	$5,091 \times 10^{-5}$	$2,078 \times 10^{-5}$	1,93
Diciembre	$6,271 \times 10^{-5}$	$2,446 \times 10^{-5}$	1,83
PROMEDIO 2003	$5,438 \times 10^{-5}$	$1,680 \times 10^{-5}$	2,06
PROMEDIO 2002	$5,256 \times 10^{-5}$	$1,539 \times 10^{-5}$	2,16
PROMEDIO 2001	$4,495 \times 10^{-5}$	$1,780 \times 10^{-5}$	2,16
PROMEDIO 1994-2003	$5,770 \times 10^{-5}$	$2,186 \times 10^{-5}$	2,05

De la tabla 3, la primera observación a resaltar es cómo la cantidad de señales volcánicas y temores registrados durante el 2003 aumentó con respecto a los dos años anteriores, especialmente en la cantidad de señales volcánicas y minutos de registro de los temores. De la Figura 5 es evidente que el máximo pico de minutos temor se produjo en el mes de marzo y mantuvo una periodo importante de actividad volcánica entre agosto y octubre, cuando se produjeron gran cantidad de temores y señales volcánicas (incluyendo erupciones y desgasificaciones).

3.2.1 Tremores

Durante el 2003, la amplitud promedio de los temores registrados fue de $1,680 \times 10^{-5}$ m/s y la frecuencia promedio 2,06 Hz. En general, las amplitudes se han mantenido estables, muy similares a las de los años 2001 y 2002 ($1,780 \times 10^{-5}$ m/s y $1,539 \times 10^{-5}$ m/s, respectivamente), en tanto que el contenido promedio de la frecuencia descendió con respecto al promedio anual de estos dos últimos años. Para la totalidad del periodo de registro de la red digital (1994-2003), la amplitud promedio de los temores es de $2,186 \times 10^{-5}$ m/s y la frecuencia promedio 2,05 Hz, obtenidas de 12 017 datos.

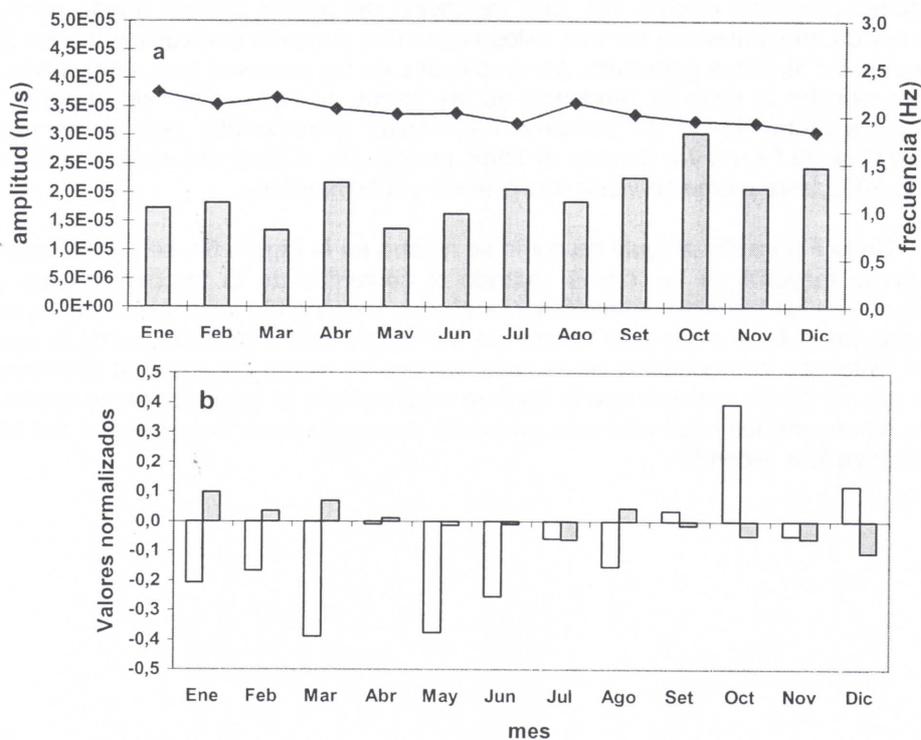


Figura 6. Promedios mensuales de amplitud y frecuencia de temores del 2003 registrados y archivados por la red sismológica digital del OSIVAM (estación CAS). **a-** valores absolutos de amplitud (barras) y frecuencia (rombos) y **b-** valores promedio mensuales normalizados de la amplitud (barras blancas) y de la frecuencia (barras grises) con respecto del promedio total del periodo 1994-2003.

En la Figura 6 se presentan los gráficos de los promedios mensuales de las frecuencias y amplitudes de tremores del año 2003 en valores absolutos y normalizados con respecto al periodo 1994-2003. Las máximas amplitudes promedio mensuales ocurrieron en octubre ($3,046 \times 10^{-5}$) y durante nueve meses fueron inferiores al promedio del periodo 1994-2003. Los promedios mensuales de las frecuencias fueron durante siete meses, inferiores al promedio del periodo 1994-2003. Tal y como se viene apreciando desde hace ya varios años, pareciera existir una relación inversa entre las amplitudes y el contenido de frecuencias, es decir, las amplitudes disminuyen cuando el contenido de frecuencia aumenta y viceversa. Además, la tendencia del promedio mensual de las amplitudes es hacia el aumento mientras que el promedio de mensual de la frecuencia está disminuyendo.

La Figura 7 presenta un gráfico de las frecuencias y amplitudes promedios mensuales de tremores en valores absolutos (Figura 7a) para el periodo 1994-2003 y normalizadas con respecto al promedio de ese mismo periodo (Figura 7b). Las barras de las amplitudes permiten definir en términos generales, cinco períodos de comportamiento, en donde los periodos impares (1, 3 y 5) están definidos por una tendencia a un aumento paulatino de las amplitudes promedio mensuales, cuyos picos máximos son menores que el periodo anterior. Los periodos pares (2 y 4) evidencian todo lo contrario, es decir, hay una tendencia a una disminución paulatina de las amplitudes promedio (Figura 7a). Con excepción del primer periodo donde no hubo datos por un año, pareciera ser que estos tienen una duración que varía entre los 20 y 23 meses. En términos generales, las amplitudes de los tremores han descendido (tal y como muestra la línea de tendencia de las barras de Figura 7a). Por su parte, las frecuencias promedio de los tremores han venido aumentando, pero como puede apreciarse en la Figura 7a, durante el último periodo (5), a partir del mes de setiembre del año 2002, este promedio viene decreciendo paulatinamente.

De la Figura 7b, al igual de como se mostró en la Figura 6b, se puede concluir que, en la mayoría de los casos, cuando el contenido de la frecuencia baja, las amplitudes de los tremores aumentan y viceversa. Esto podría tener cierta lógica si se explicara que debido a que si la frecuencia aumentara con la profundidad de la fuente origen, entonces la atenuación de la onda sísmica es mayor (la amplitud disminuye), por lo que se puede concluir que la cámara magmática o el lugar donde se origina el tremor se encontraba cada año más profunda; empero a partir de setiembre del 2002 ha comenzado a ascender.

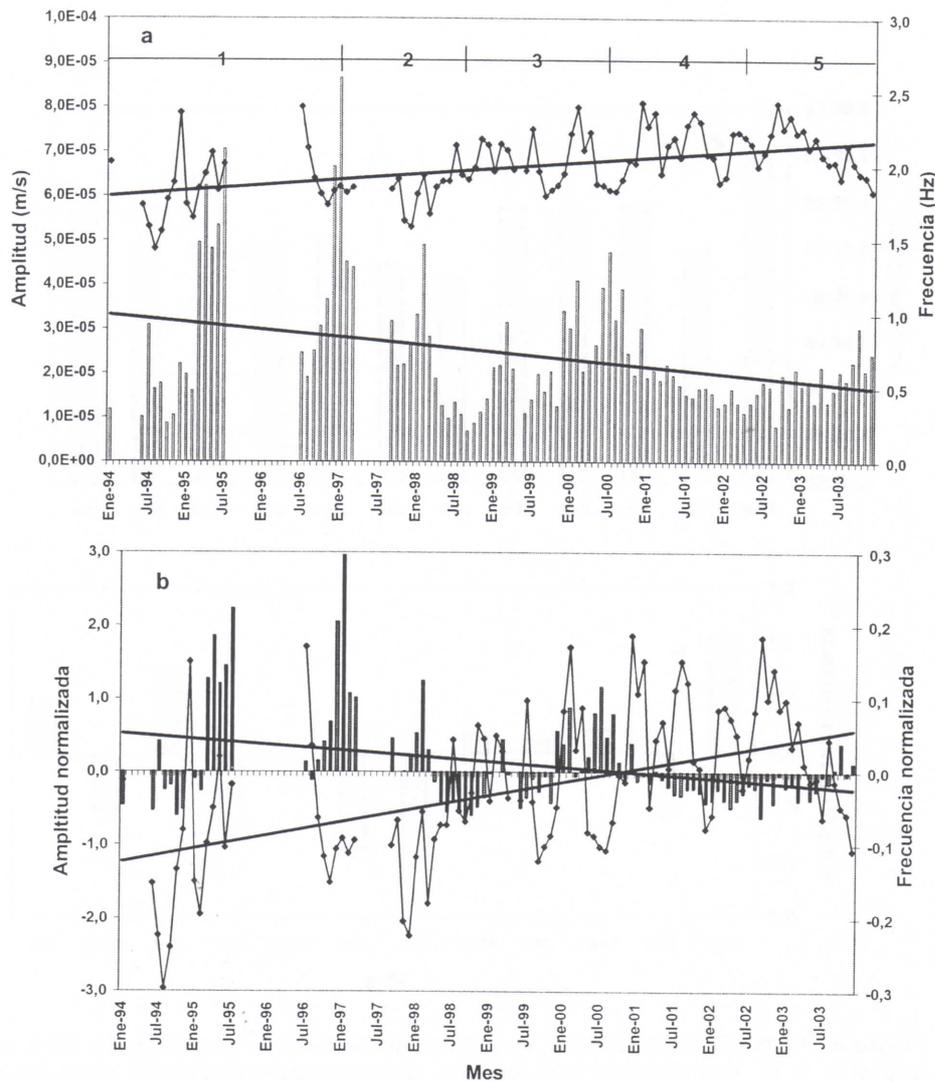


Figura 7. Promedios mensuales de amplitud (barras) y frecuencia de tremores (rombos) para el periodo 1994-2003, **a-** Amplitud absoluta (barras) y frecuencia absoluta (rombos), se indican los cinco periodos de actividad definidos y **b-** Valores de la amplitud (barras) y de la frecuencia (rombos) normalizados con respecto del promedio 1994-2003, registrados y archivados por la red sísmológica digital del OSIVAM. Las líneas inclinadas continuas, representan las líneas de tendencia de cada serie de datos.

3.2.2. Señales volcánicas diferentes a los tremores

A lo largo del 2003, la amplitud promedio de las señales volcánicas diferentes a los tremores (explosiones, desgasificaciones, etc.) registradas en la estación CAS fue de $5,438 \times 10^{-5}$ m/s, ligeramente superior a los promedios anuales de los tres años anteriores: $5,256 \times 10^{-5}$ m/s en el 2002, $4,50 \times 10^{-5}$ m/s en el 2001 y $5,02 \times 10^{-5}$ m/s en el 2000. Para todo el periodo de registro de la red digital (1994-2003), la amplitud promedio de estas señales fue de $5,770 \times 10^{-5}$ m/s, obtenidas de 16 930 datos.

La Figura 8 muestra la amplitud promedio mensual de las señales volcánicas del año 2003, absolutas y normalizadas con respecto del promedio total del periodo 1994-2003. Las amplitudes promedio mayores se registraron en enero ($6,933 \times 10^{-5}$ m/s), en tanto, el mes con señales menos energéticas fue en junio ($4,388 \times 10^{-5}$ m/s).

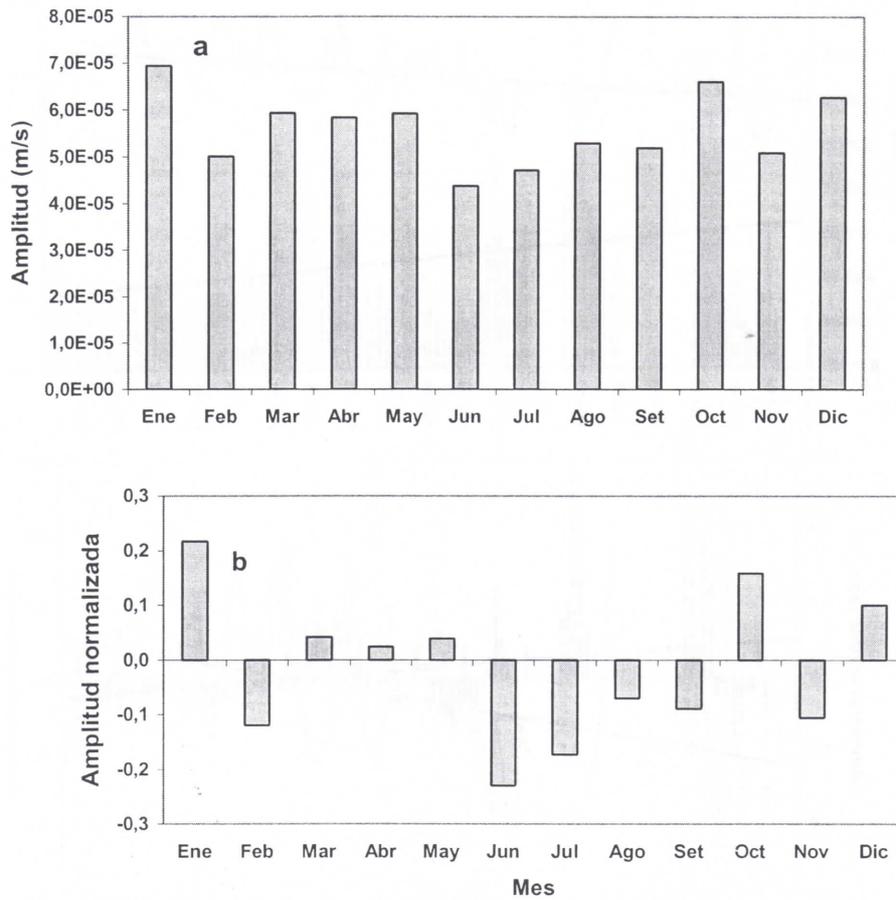


Figura 8. Promedios mensuales de la amplitud de las señales volcánicas del 2003, **a-** absolutos y **b-** normalizados con respecto del promedio del periodo 1994-2003, registrados y archivados por la red sísmológica digital del OSIVAM (estación CAS).

En la Figura 9 se muestran las amplitudes promedio mensuales absolutas y normalizadas con respecto del promedio total para el periodo 1994-2003. Como se aprecia en las líneas de tendencia de dicha Figura, las amplitudes de las señales (al igual que las amplitudes de los tremores en la Figura 7a han venido decreciendo con el tiempo. Sin embargo, pareciera que desde enero del año 2000, la amplitud promedio mensual de las señales volcánicas no varía mucho y ha alcanzado un nivel cercano a $5,0 \times 10^{-5}$ m/s.

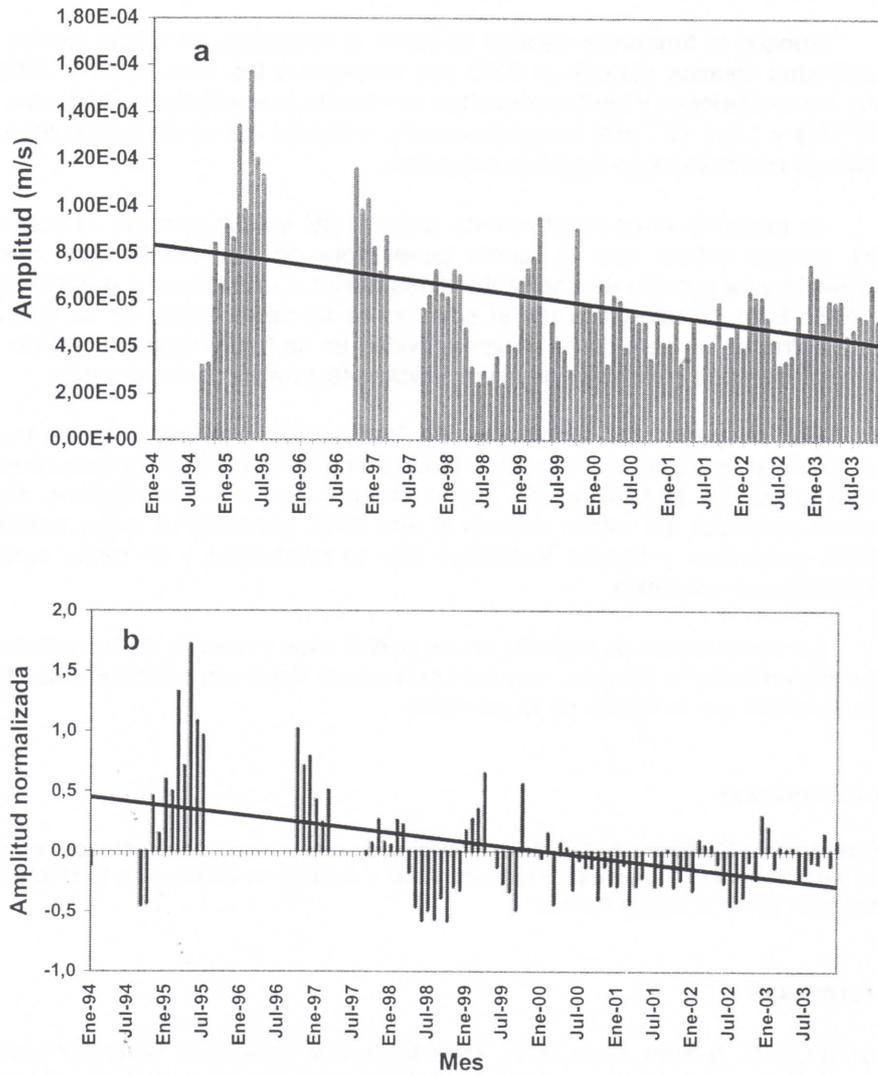


Figura 9. Promedios mensuales de amplitud de las señales volcánicas diferentes a los tremores (erupciones, desgasificación, etc.) para el período 1994-2003, **a-** absolutos y **b-** normalizados con respecto del promedio total de ese mismo lapso, registrados y archivados por la red digital del OSIVAM (estación CAS).

4 Comentarios

Aunque la tendencia general es hacia el descenso, el volcán Arenal aumentó su actividad sísmica durante el 2003 con respecto a los años 2001 y 2002. Por su parte, las explosiones y los tremores han mantenido sus amplitudes cercanas a los $5,0 \times 10^{-5}$ m/s y $1,6 \times 10^{-5}$ m/s, respectivamente, mientras que el contenido de frecuencia disminuyó con respecto a los años anteriores.

Al observar el comportamiento general del volcán durante el periodo 1994-2003, parece indicar que la fuente generadora de las señales tipo tremor está cambiando y ha pasado de una profundidad mayor a una menor a partir de setiembre del 2002. Esta característica por sí sola, no es un fuerte indicador de que el volcán podría entrar en un periodo de mayor actividad en un futuro cercano, debido a que no se han presentado enjambres sísmicos volcánico-tectónicos de importancia.

Por su parte, las amplitudes de las señales volcánicas y los tremores han decrecido con el tiempo y este comportamiento ha sido verificado con equipos digitales y analógicos. La instalación de cuatro nuevos equipos sismológicos de registro continuo alrededor del volcán durante el año 2004, permitirá un mejor análisis de las señales volcánicas y sismos tectónicos que se produzcan y un mejor control de la actividad sismo-volcánica.

La acumulación de material en las partes altas y medias de las coladas de lava y el desprendimiento de éste, seguirán generando flujos piroclásticos disparados casi en su totalidad por la acción de la gravedad.

Agradecimientos

Agradecemos a Guillermo E. Alvarado la revisión de este trabajo y sus valiosos comentarios, y a los técnicos Marco T. Naranjo, Francisco Arias y Dagoberto Boniche en la recolección de la información sobre el volcán Arenal.

Referencias

- Alvarado, G.E. & Soto, G.J., 2002. Pyroclastic flow generated by crater-wall collapse and outpouring of the lava pool of Arenal Volcano, Costa Rica. *Bulletin of Volcanology*, 63:557-568.
- Arroyo, I. & Taylor, W., 2002. La actividad del volcán Arenal durante el año 2001. - *Boletín OSIVAM*, 13 (25):10-26, San José.
- Taylor, W. & Madrigal, L., 2003. La actividad sísmica del volcán Arenal durante el año 2002. - *Boletín OSIVAM*, 14 (26): 10-20, San José.

Datos paramétricos de las coladas de lava del volcán Arenal (Costa Rica) entre 1968 y el 2002

[Parametric data of lava flows from Arenal volcano (Costa Rica) between 1968 and 2002]

Stephanie Murillo & Pablo Ruiz

Universidad de Costa Rica, Escuela Centroamericana de Geología.

Murillo, S. & Ruiz, P. 2004. Datos paramétricos de las coladas de lava Arenal (Costa Rica) entre 1968 y 2002.- Boletín OSIVAM, 15 (27): 25-33. San José.

Resumen

Entre los años 1968 y 2002 ocurrieron al menos 161 coladas de lava en bloques. Al principio las emisiones de lava se caracterizaron por ser pocas y de larga duración. En la década de los ochenta se empieza a notar un incremento en el número de coladas, tendencia que continúa en los años noventas donde se dan los picos máximos de este periodo eruptivo con al menos 10 coladas por año. Como era de esperar, las coladas de mayor duración fueron las que recorrieron más distancia, llegando a alcanzar hasta 3,25 km de longitud. Cambios en el tipo de actividad eruptiva del volcán y eventos como el colapso del cráter C han influido en el número de coladas por año y, por ende, en la longitud acumulada de estas. De acuerdo con los datos obtenidos de la literatura y con los cálculos realizados, las coladas que presentan mayores velocidades son las denominadas 138 y la 112 con 72 y 50 m/día, respectivamente. La primera colada emitida durante este periodo eruptivo es la que presenta un mayor espesor que llega hasta 30 m en algunos lugares. Las direcciones preferenciales de las coladas durante este intervalo de tiempo son SW y NW, con 21% y 19%, respectivamente.

Abstract

Between 1968 and 2002 there at least 161 blocky lava flows. At the beginning the lava flows were few and long lasting. At the decade of the 80's there is an increase in the number of flows, tendency that continued in the 90's when there occur the highest peaks of this eruptive period with 10 flows per year. The lava flows that lasted longer where the ones that covered a bigger distance, reaching 3,25 km of length. Changes in the type of activity of the volcano and events like the collapse of Crater C have influenced the number of flows per year, and therefore the accumulative length of these. Based on the data obtained in literature and on the calculations made, the flows that show the fastest velocities are the 138 and 112 with 72 m/day and 50 m/day respectively. The first flow emitted during this eruptive period in 1968 was the one that presents the greater thickness reaching 30 m in some places. The preferential directions of the lava flows during this interval of time are SW and NW with 21% and 19% respectively.

Introducción

El volcán Arenal se encuentra ubicado a unos 7 km al WSW de la Fortuna de San Carlos, perteneciendo a la cordillera de Tilarán. Es el estratovolcán de forma cónica más joven de Costa Rica, con un área aproximada de 33 km². En el presente, su altura es de 1670 m. Se sabe que una de las primeras erupciones del Arenal ocurrió hace cerca de 7000 años y que estuvo activo al mismo tiempo que el cerro Chato hasta que este cesó su actividad hace 3500 años. La actividad del Arenal ha estado caracterizada por grandes erupciones periódicas e intervalos de cientos de años y periodos de efusión de lava que dan blindaje al cono contra la erosión (Alvarado, 2000).

Petrográfica y geoquímicamente, las lavas del Arenal son andesitas basálticas, mientras que los productos explosivos gradan desde basaltos hasta dacitas (Borgia et al., 1988). El periodo eruptivo más reciente del Arenal inició con una gran erupción en 1968, la actividad explosiva continuó acompañada por una lenta efusión de lava y la ocasional emisión de flujos piroclásticos provenientes de las aberturas en la cima del flanco oeste (Alvarado, 2000). Diversos especialistas se han abocado al estudio de la dinámica y morfología de los flujos lávicos compuestos del Arenal (Sáenz, 1977; Bennett y Raccichini, 1977; Borgia et al, 1983; Cigolini et al., 1984; Wadge 1984).

El volcán Arenal ha erupcionado, en forma casi continua, más de un centenar de coladas de lava en bloques desde 1968 con temperatura moderadas en un rango de 1100 a 1150°C. Viscosidades calculadas de medidas realizadas a una distancia de entre 50 a 200 m del cráter son del orden de 10⁷ Pa. Este valor relativamente alto es producto del elevado contenido de fenocristales y vidrio riolítico (Borgia et al., 1993; Cigolini et al, 1984).

Las velocidades de las coladas varían entre 0,3 y 50 m/h. La fuente de emisión de coladas de lava primero fue el cráter inferior (cráter A) entre 1968 y 1974 y desde ese entonces hasta el presente la actividad se traslado al cráter C. Allí la actividad, nuevamente fue predominantemente de tipo efusiva (coladas de lava) pero en fases explosivas efímeras en 1975 y 1980. A partir de mayo de 1984 estas se hicieron mas frecuentes, tipificadas como explosivas de tipo estromboliano, que se alternan con las efusiones lávicas. Se presenta también actividad efímera de hornitos o conos de salpicadura de lava a partir de 1993 (Alvarado, 2000).

En la actualidad, las coladas cubren un área de 7,5 km² con espesores variables entre 5 y 100 m (espesor compuesto), para un volumen equivalente de 0,7 km³. Las coladas constituyen agrupaciones escoráceas de aspecto caótico, con flancos empinados e inestables y canales (Alvarado, 2000).

El presente trabajo reúne y evalúa la información de todas las coladas de lava reportadas en la literatura vulcanológica, en particular aquellas incluidas en el Center Short-Lived Phenomena Event Report (CSLP), que luego pasó a ser el SEAN Bulletin (Smitsonian Institution), y que por último se denominó Global Volcanism Network (GVN). Además, se incluyen los datos del 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 (Bol. Vulcanología) y otras publicaciones. Se compilieron parámetros tales como fecha de inicio y final de la colada, duración, altura inicial y final, longitud, velocidad y rumbo (dicha información se encuentra en forma digital en el OSIVAM). En varios casos la información es incompleta, por lo que cuando fue posible se hicieron estimaciones y cálculos de los datos faltantes.

Las coladas de lava temporal y espacialmente (1968-2002)

A partir de la primera colada de lava reportada para el periodo de actividad de 1968, el Arenal ha emitido más de 160 coladas de lava en bloques que han descendido por sus laderas. A través de los años el número de coladas ha variado considerablemente. Inicialmente, la actividad se caracterizó por tener pocas coladas por año pero de larga duración. Por ejemplo, las únicas coladas reportadas para los años de 1968, 1971 y 1972 tuvieron duraciones superiores a los 12 meses, siendo la primera la de mayor duración con 3 años. A finales de los setenta y durante toda la década de los ochenta se empieza a observar un incremento en el número de coladas reportadas siendo el año de 1984 el que marca un primer pico con 7 coladas. Esta tendencia continúa y es en 1990, 1992 y 1998 que se dan los picos máximos de este periodo eruptivo con 10 coladas por año. Llama la atención que entre 1993 y 1994 hay un descenso considerable en el número de coladas por año (Figura 1). Esto se podría explicar si se toma en cuenta que hubo un colapso del cráter C el 28 de agosto de 1993 en el cual su altura disminuye de 1657 a 1600 produciendo mayor cantidad de flujos piroclásticos y otro tipo de actividad.

Hay que destacar que el número de coladas por año no está directamente relacionado con la cantidad de lava emitida ya que algunas de las coladas pueden durar solo unos cuantos meses.

En la figura 2 se muestra la longitud máxima individual de coladas por año. Se nota como las coladas de 1968 y la de enero de 1992 son las que alcanzaron una mayor longitud con 3 y 3,25 km respectivamente. En la figura 3 se puede notar la relación directa que existe entre longitud y duración de las coladas, siendo la colada de 1968 la de mayor duración con 36 meses. El resto de las coladas para la que se tiene tanto el dato de longitud y duración, también guarda esta tipo de relación directa.

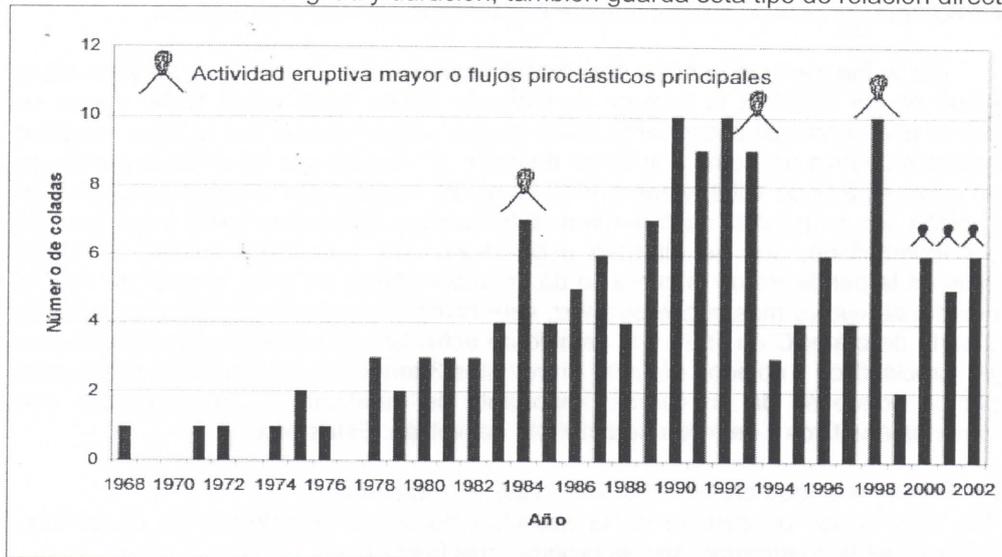


Figura 1. Número de coladas por año.

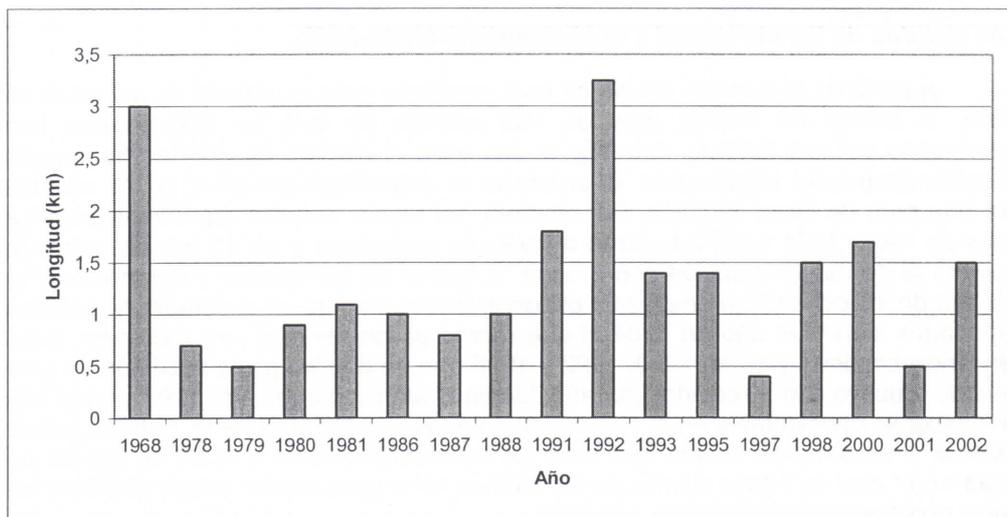


Figura 2. Longitud máxima individual de coladas por año.

La Figura 4 presenta la curva acumulada de la longitud de las coladas. Para las coladas que no se obtuvo información de longitud de la literatura, se calculó asumiendo que la pendiente del volcán es de 35° y que la trayectoria de las coladas es en línea recta. Al haber calculado longitudes y velocidades utilizando el método anterior, los resultados pueden no ser los correctos y variar con respecto a los obtenidos de la literatura (caso para la velocidad de la colada 138 que inició en mayo de 1998). Para las coladas que no se obtuvo información de longitud y que no pudo ser calculada, se asumió arbitrariamente una longitud promedio de 1,25 km.

En la Figura 4 se pueden observar 3 tendencias en la curva acumulada de la longitud de las coladas; la primera se extiende desde 1968 hasta 1984, donde se presenta una pendiente ascendente suave que se podría asociar con la poca cantidad de coladas de lava así como a su larga duración. El cambio que se da en la pendiente de la curva a partir de 1984 y hasta 1993 se puede explicar con el cambio de actividad del volcán: las erupciones se hicieron más frecuentes, tipificadas como explosivas de tipo estromboliano, que se alternan o coexisten con efusiones lávicas. El tercer cambio en la pendiente de la curva se da en 1993 y hasta el 2002, a partir de aquí la pendiente se vuelve mas suave otra vez, este cambio se puede asociar al colapso de una parte de cráter C en 1993 y al cambio de actividad del volcán donde predominan flujos piroclásticos y coladas de lava. Entre estas 3 tendencias de la curva sobresalen 5 puntos donde se da un cambio importante de pendiente y son asociados con fenómenos eruptivos y cambios de actividad del volcán. Estos son:

- 1: En 1974 la actividad efusiva migra del cráter A al cráter C.
- 2: En 1984 se da un cambio en la actividad del volcán en donde las erupciones explosivas del tipo estromboliano se hicieron más frecuentes.
- 3: En 1989 hay un incremento en la actividad estromboliana asociada a un aumento en la sismicidad (GVN, 1989).
- 4: En 1993 se da el colapso de una parte de cráter C.
- 5: Flujos piroclásticos del 5 de mayo de 1998.

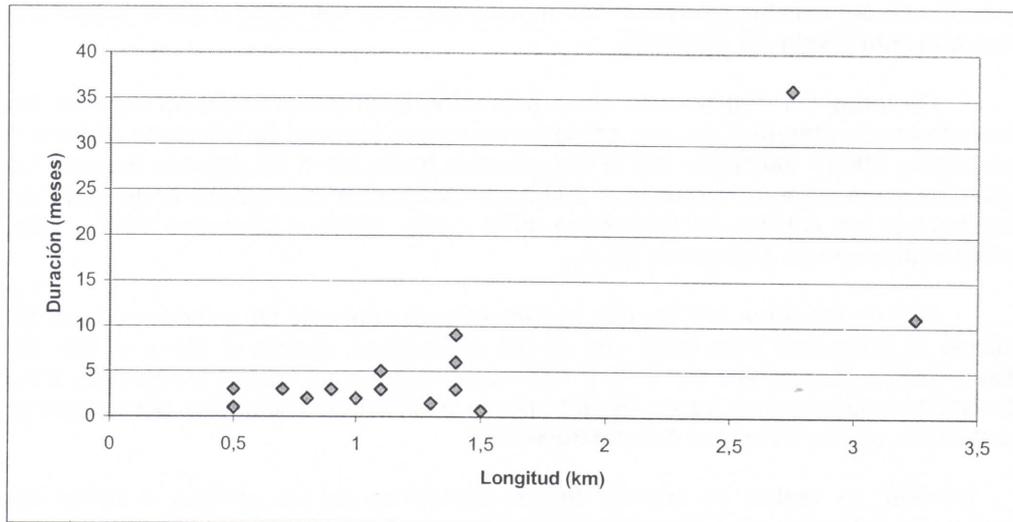


Figura 3. Longitud vrs duración de coladas.

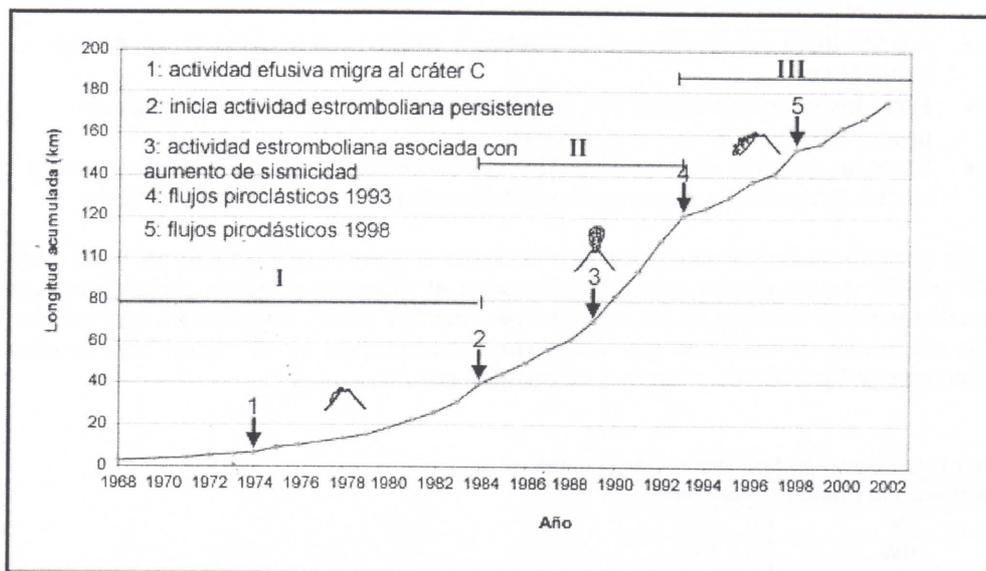


Figura 4. Curva acumulada de la longitud de las coladas.

En la Figura 1 se muestra una relación entre el aumento de la actividad eruptiva o la existencia de flujos piroclásticos importantes con el número de coladas. Esta consiste en que después de que ocurre un flujo piroclástico importante o de que se de un aumento de la actividad eruptiva disminuye el número de coladas por año.

Se realizó un gráfico de velocidades en m/día de las coladas. Algunos datos de las velocidades fueron obtenidos de la literatura y otros fueron calculados. De acuerdo con la Figura 5 la colada que presenta una mayor velocidad es la colada número 138 (mayo, 1998) con una velocidad de 72 m/día. La sigue la colada número 112 (agosto 1993 - mayo, 1995) con una velocidad de 50 m/día.

La colada más lenta de acuerdo con la información obtenida es la número 30 (abril-junio, 1979), que se movía a una velocidad de 5,2 m/día. Solo un porcentaje

pequeño de las coladas presentan información sobre su velocidad o datos suficientes para que esta pueda ser calculada.

De todas las coladas solo cinco presentan información sobre su espesor, de acuerdo con la literatura. La que presenta un mayor espesor es la colada número 1 (setiembre 1968 - setiembre 1971) que alcanzó hasta 30 m en algunos lugares. La sigue la colada número 159 (octubre 2002) con un espesor que variaba entre 23-25 m, seguida por las coladas 31 (setiembre 1979 - julio, 1980) y 32 (mayo 1980 - julio, 1980) ambas con un espesor de 20 m.

Uno de los datos, con los que se trabajó es el rumbo de las coladas de lava. Se calculó el porcentaje para cada una de las direcciones, siendo el SW y el NW las direcciones preferenciales con 21% y 19% respectivamente (Tabla 1 y Figura 6). Esta dirección preferencial se puede explicar por la posición del cráter C y por los pocos obstáculos que se presentan en esta trayectoria.

También se realizó un análisis de las direcciones de las coladas a través del tiempo. Se determinaron 4 aspectos importantes.

- Hacia el NW siempre han habido coladas, además esto concuerda con el alto porcentaje que tiene esta dirección.
- A partir de la colada número 101 (febrero 1992), no hay ninguna con rumbo hacia el sur
- Entre las coladas número 140 (junio 1998) y 155 (junio-julio 2001) hay un predominio de coladas con rumbo NE.
- Entre las coladas 89 (enero 1991) y 123 (enero-abril 1996) predominan las de rumbo SW además que en este periodo no hay coladas con rumbo Norte

En general se puede decir que han ocurrido al menos 161 coladas de lava entre 1968 y 2002 de las cuales solo tres superaron el kilómetro y medio de longitud. Las direcciones preferenciales de las coladas han sido SW y NW. Se encontró una relación entre el cambio de actividad y eventos que han ocurrido en el volcán con longitud acumulada de las coladas y número de coladas por año.

Tabla 1. Dirección preferencial de las coladas.

Rumbo de la colada	Porcentaje
N	15%
NW	19%
NNW	3%
NE	7%
NNE	3%
S	7%
SW	21%
SSW	3%
WSW	2%
WNW	2%
W	13%
Sin dato	6%

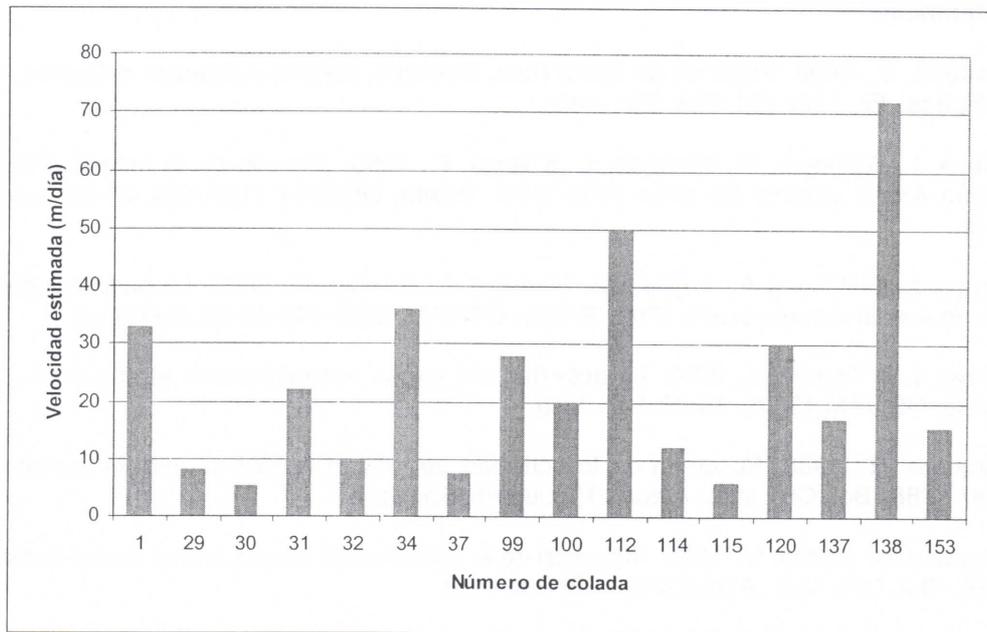


Figura 5. Velocidad estimada de las coladas.

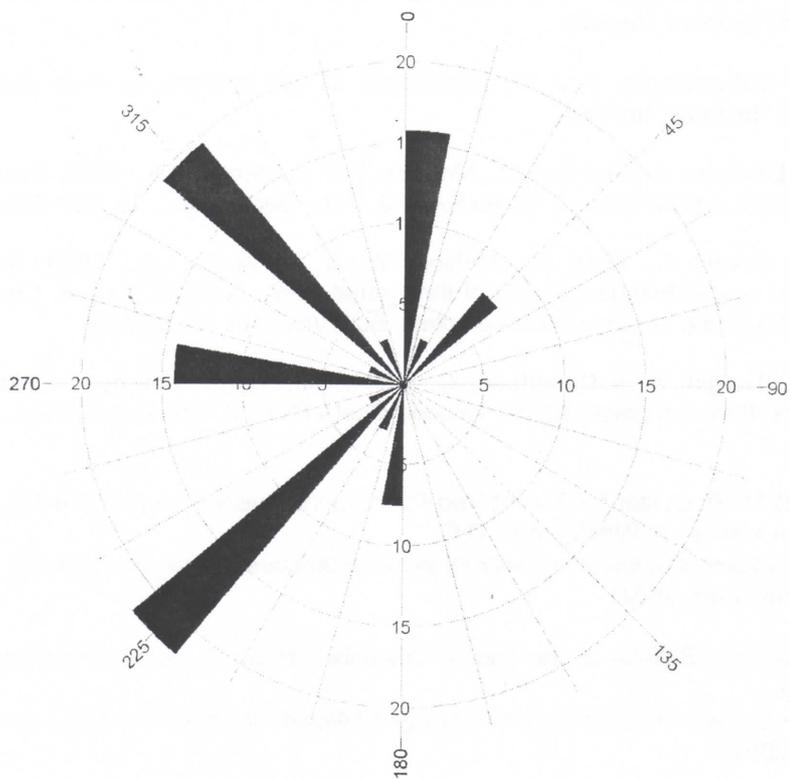


Figura 6: Rosa de dirección preferencial de las coladas

Referencias

- Alvarado, G., 2000. Volcanes de Costa Rica, Geología, historia y riquezas naturales. - 269 págs. Ed. Univ. Est. Dist, San José
- Arroyo, I., Barquero, R., Madrigal, L. & Arias, F., 1999. Síntesis de la actividad del volcán Arenal durante los años 1998-1999. *Boletín OSIVAM* 11(21-22): 21-32; San José.
- Arroyo, I., Guillermo, A., Taylor, W., Madrigal, L. & Arias, F., 2000. La actividad del volcán Arenal durante el año 2000. *Boletín OSIVAM* 12(23-24): 15-29; San José.
- Arroyo, I. & Taylor, W., 2002. La actividad del volcán Arenal durante el año 2001. *Boletín OSIVAM* 13(25): 10-26; San José.
- Barquero, R., 1988. Resumen de la actividad del volcán Arenal durante el período 1987-1988. *Bol. Obs. Vulc. Arenal*, 1(2): 68-69; San José.
- Barquero, R. & Soto, G., 1990. Resumen de la actividad del volcán Arenal Enero-Junio 1990. *Bol. Obs. Vulc. Arenal*, 3(5): 1-3; San José.
- Bennett, E.D. & Raccichini, S., 1977. Las erupciones del Volcán Arenal, Costa Rica. *Rev. Geogr. Amér. Central*, 5-6(I-II): 7-35; Heredia.
- Boletín de Vulcanología*, 1-5, 8-15, 22. Estado de los volcanes: 1978-1991. Universidad Nacional; Heredia.
- Boletín de Vulcanología*; 9 y 14. Cronología de las coladas de lava del volcán. Universidad Nacional; Heredia.
- Borgia, A., Lineman, S., Spencer, D., Morales, L.D. & Brenes, J.A., 1983. Dynamics of lava flow fronts, Arenal volcano, Costa Rica. *J. Volc. Geoth. Res.*, 19: 303-329.
- Borgia, A., Poore, C., Carr, M., Melson, W. & Alvarado, G., 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.
- Cigolini, C., Borgia, A. & Casertano, C., 1984. Intracrateric activity, aa block lava, viscosity and flow dynamics: Arenal volcano Costa Rica. *J. Vol. Geoth. Res.*, 20:155-176.
- CSLP, 1968-1970. Center for Short-Lived Phenomena Event Report (1968-75), Smithsonian Institution, Washington, D.C.
http://www.volcano.si.edu/volcanoes/region14/costaric/arenal/var_01.htm#cslp_6809>[consulta: abril-junio. 2004]
- GVN, 1990-2003. Bulletin of the Global Volcanism Network, Smithsonian Institution, Washington, D.C.
<http://www.volcano.si.edu/gvp/volcanoes/region14/costaric/arenal/var.htm> >[consulta: abril-junio. 2004]
- Sáenz, R., 1971. Erupción del Volcán Arenal en el año de 1968. -*Rev. Geogr. Amér. Central*, 5-6: 149-188; Heredia.

Sean Bull., 1978-1989. Scientific Event Alert Network Bulletin (1978-89), Smithsonian Institution, Washington, D.C.

<http://www.volcano.si.edu/gvp/volcanoes/region14/costaric/arenal/var.htm> >[consulta: abril-junio. 2004]

Soto, G. & Barquero, R., 1991. Resumen de la actividad durante el período Julio-Diciembre 1991. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 4(8): 2-6; San José.

Soto, G., 1997. La actividad del volcán Arenal durante 1994. -Boletín OSIVAM 7(13-14): 53-57; San José.

Soto, G., 1997. La actividad del volcán Arenal durante 1995. -Boletín OSIVAM 8(15-16): 56-61; San José.

Wadge, G., 1984. The magma budget of Volcán Arenal, Costa Rica, from 1968 to 1986. -J. Volcanol. Geotherm. Res., 19: 281-203.



CENTRO DE SERVICIO
EXPLORACION SUBTERRANEA

LOCALIZACION : N 10° 26' 68"

W 84° 54' 59"

FECHA INICIO : 27/10/94

FECHA FINAL :

DIRECCION :

LITOLOGIA

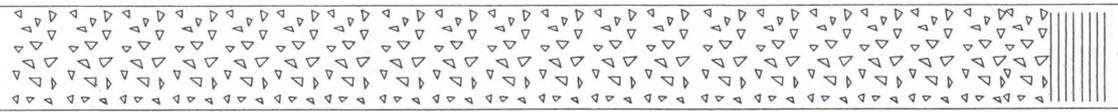
GRÁFICO GEOLÓGICO DE PERFORACIÓN

PROYECTO : OSIVAM, TILARÁN	OPERACION : 1/1	INVESTIGACION GEOLÓGICA PARA AGUA
LUGAR : CHIRIPA/QUEBRADA GRANDE	PROFUNDIDAD TOTAL : 191,00m	PROF. NIVEL FREATICO : 18,25m.
DESCRIBO : GEOL. G. ALVARADO I.	DIBUJO : R.B.O.	VERIFICO : GEOL. G. ALVARADO
ANGULO : VERTICAL		
DIRECCION :		

DESCRIPCION

PROFUNDIDAD EN METROS

0-76,5 Sin recuperación	
76,25-77,25 Laterita	
77,25-86,05 Andesita con pequeños fenocristales de plagioclasas equidimensionales (1-2 mm)	
89,1-98,25 Brecha volcánica meteorizada constituida por fragmentos andesitas subredondeadas a subangulares (0,5 a 6 cm ϕ) en una matriz de frag. tamaño arena color café. Hay varias fallas	
98,25-100,25 Brecha lateritizada	
100,25-104,35 Brecha volcánica café con fragmentos de pómez algo colapsados; meteorizada con poco anfibol ($\phi < 0,5$ cm; 5%). Hay dos fallas	
104,35-105,2 Brecha meteorizada a suelo	
105,2-107,1 Brecha volcánica con pómez pequeño (< 1 cm) dispersa y grandes frag. de lava (1 - 12 cm ϕ) Roca color crema	
107,1-107,4 Lava andesítica con fenocristales de plag. + piriboles (< 2 mm ϕ)	
107,4-107,6 Laterita	
107,6-113,5 Brecha volcánica en frag. lavas (~10%; 0,5 - 10 cm ϕ) y pómez (~5%; < 1 ϕ)	
113,5-122,65 Brecha volcánica: constituida por fragmentos de lavas angulares a subredondeados (~5 - 10%) en 5 poblaciones diferentes: fragmentos de andesitas gris oscuro poco vesiculares ricas en piroxenos, fragmentos de andesitas gris oscuro poco vesiculadas con pequeños (≤ 1 mm ϕ), vesicular y frag. de lava alterada tonos anaranjados, amarillentos y ocres. La pómez es poca (<2%) a ausente	
122,65-132,0 Brecha alterada amarillenta, sobresalen los fragmentos rojizos vesiculares (< 3 cm ϕ ; 5 %) con gran cantidad de pómez tamaño lapilli (<0,5 cm ϕ ; 40%) y frag. de lavas angulares (5%; < 1 cm ϕ). Hacia la parte inferior del contenido de pómez decrece e incrementa el contenido de escoria rojiza	
132-135,7 "Flujo de granos" ricos en frag. de lavas frescas (<2 cm ϕ) angulares y en arenas de lavas, plagioclasas y piriboles sin estructura pero suelen haber pequeñas laminaciones.	



137,9-143,8 Brecha similar a la precedente, pobre en pómez	
143,8-144,0 "Flujo de granos"	
144-145,6 Brecha en dos fallas.	
145,6-145,8 "Flujo de granos"	
145,6-150,1 Brecha pobre en pómez, rica en plagioclasas y piróboles con pocos fragmentos de lavas (<3 cm; 3-10φ). Los fragmentos vesiculares rojizos son pocos, predominando los masivos y vesiculados sanos.	
150,1-151,16 "Flujo granos"	
151,16-153,15 Brecha con pequeños pómez, rica en cristales de plag. + piróboles, frag. de lava (5%, φ 3 cm) color café oscuro.	
153,15-156,4 Brecha con mayor enriquecimiento relativo de pómez (milimétrica), color café	
156,4-159,85 Lava gris andesítica rojiza con pequeños cristales de plagioclasas	
159,85-160,2 Brecha con grandes frag. de lavas (10-20 cm) color café	
160,2-162 Lava gris con fenocristales pequeños de plagioclasas	
162-165,35 Brecha negruzca con fragmentos angulares de lavas masiva y vesiculadas	
165,35-166,4 Lava andesítica con pequeños fenocristales de plagioclasas	
166,4-167,4 Brecha crema a café con frag. de pómez (5% φ < 1cm) y de lava; muy fracturada.	
167,4-169,3 Lava vesicular negra, pequeños plagioclasas	
169,3-169,6 Brecha con frag. de lavas negra vesicular y pequeñas pómez (1 mm φ) aisladas	
169,6-173,25 Lava gris andesítica en pequeñas plagioclasas	
173,25-176,9 Brecha	
176,9-177 Lava	
177-177,3 Brecha con poco porcentaje de pómez, frag. de lava, color gris a gris oscuro	
177,3-185,7 Lava negra vesicular	
185,7-185,9 Brecha rica en ceniza y lapilli fino de pómez	
185,9-190 Lava	
190-191 Brecha con frag. de pómez (<3 cm; φ 5 %), y lavas vesiculares y angulosas.	