

Baizano

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
SECTOR ENERGÍA

DIRECCIÓN DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

BOLETÍN DEL



AÑO 7, N°. 13 - 14, SAN JOSÉ, COSTA RICA

PUBLICADO EN MAYO DE 1997

ISSN 1015-4396

**INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
SECTOR ENERGÍA**



AÑO 7, Nº. 13 - 14, 1994

1988

SAN JOSÉ, COSTA RICA

PUBLICADO EN MAYO DE 1997

ISSN 1015-4396

Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM)*
 Oficina de Sismología y Vulcanología
 Departamento de Ingeniería Geológica
 Instituto Costarricense de Electricidad
 Apdo. 10032-1000, San José, Costa Rica

Teléfonos (Telephones): (506) 220-7741; 695-5193

Fax: (506) 2208212

e-mail: wtaylor@cariari.ucr.ac.cr

ganduni@cariari.ucr.ac.cr

El Observatorio Sismológico y Vulcanológico del Arenal y Miravalles (OSIVAM) es parte de la Oficina de Sismología y Vulcanología del Departamento de Ingeniería Geológica del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), la cual, conjuntamente con la Sección de Sismología, Vulcanología y Geofísica de la Escuela Centroamericana de Geología (Universidad de Costa Rica), constituyen la Red Sismológica Nacional (RSN: ICE-UCR).

The Arenal and Miravalles Seismological and Volcanological Observatory (OSIVAM) is part of the Seismology and Volcanology Office of the Department of Geological Engineering of the Costa Rican Institute of Electricity (ICE), which together with the Section of Seismology, Volcanology and Geophysical Exploration of the Central American School of Geology (University of Costa Rica), constitute the National Seismological Network (RSN:ICE-UCR).

- * Miembro de la Organización Mundial de Observatorios de Volcanes (WOVO).
- * Member of the World Organization of Volcano Observatories (WOVO).

PRESENTACIÓN

Con agrado presentamos el volumen 7 de nuestro Boletín, esta vez bajo el nombre de **BOLETÍN OSIVAM**, dada la reciente construcción del **OBSERVATORIO SISMOLÓGICO Y VULCANOLÓGICO DE ARENAL Y MIRAVALLS (OSIVAM)**. El cambio de nombre obedece a la puesta en marcha de la moderna red digital telemétrica, marca Lennartz, con un total de 12 estaciones sismográficas y 4 estaciones acelerográficas, todas de tres componentes que auscultan a los volcanes Arenal y Miravalles, incluyendo las grandes obras ingenieriles que conforman el Campo Geotérmico Miravalles, el Complejo Hidroeléctrico Arenal-Corobicí-Sandillal, el Complejo Eólico Tejona y zonas aledañas. Las estaciones transmiten vía telemetría a un centro único de registro con sede en el cerro Chiripa, a unos 12 km de Tilarán, donde antiguamente se ubicaba el primer **Observatorio Sismológico Telemétrico de Costa Rica**, operado por el ICE entre 1974 y 1978.

Del otrora **BOLETÍN DEL OVA (Observatorio Vulcanológico del Arenal)**, editado desde 1988 quedaron los 12 números anteriores, contabilizando 36 artículos geocientíficos sobre el volcán Arenal y áreas vecinas, para un total de 566 páginas. En ellas se han resaltado diversos tópicos sobre la Vulcanología y temas afines, dejando plasmadas a su vez la inquietudes que aún persisten, en este laboratorio natural. Se contó con la valiosa participación de 39 autores de 8 nacionalidades diferentes, en orden de predominancia, Costa Rica, Italia, Estados Unidos; Francia, Inglaterra y Alemania poseen una posición igualitaria, además, tenemos un colaborador de Nicaragua y otro de Colombia. A todos ellos, y a muchos otros colegas deseamos dejar patente nuestro profundo agradecimiento.

Con la edición de este nuevo número dual (Año 7, No. 13-14), venimos a ampliar nuestro programa de investigación sismológica y geovulcanológica, enmarcado ahora en una región más extensa, y geológicamente muy activa, en donde no sólo se ubican estructuras geológicas de sumo interés, como grábenes, horsts, fallas y volcanes tanto activos como latentes, así como calderas, sino que es la región en donde se concentra casi el 50% de la producción eléctrica de nuestro país. Por ello, el ICE se ha abocado a su estudio en detalle desde mayo de 1974. Por otro lado, cumplimos con nuestra labor informativa, en aras del progreso y de las ciencias, dejando en alto la calidad tecnológica y científica y el potencial humano, con que cuenta nuestro país y nuestra institución en particular.

Esperamos que la presente edición y las venideras, sea de su completo agrado y utilidad, y, más ambiciosamente, el estímulo para futuras investigaciones. De igual manera, estamos deseosos de recibir sus comentarios y contribuciones.

Guillermo E. Alvarado
Oficina de Sismología y Vulcanología
Instituto Costarricense de Electricidad

Mayo, 1997.

PREFACE

With pleasure we present volume 7 of our bulletin, this time under the name of **BOLETÍN OSIVAM**, due to the recent inauguration of the **OBSERVATORIO SISMOLÓGICO Y VULCANOLÓGICO DE ARENAL Y MIRAVALLS (OSIVAM)**. The change in the name arises from the implementation of a new modern digital, telemetric seismographic network (Lennartz), with 12 seismic stations and 4 strong motion instruments, of three components all of which are for the monitoring of Arenal and Miravalles volcanoes, including also the civil works which conform the Miravalles Geothermal Field, the Arenal-Corobici-Sandillal Hydroelectric Complex, the Tejona Eolic Complex and surrounding areas. The stations transmit via radio to a recording center located at Cerro Chiripa, 12 km from the town of Tilarán, Guanacaste province, Northern Costa Rica, where the Observatorio Sismológico Telemétrico de Costa Rica used to be located and operated by ICE between 1974 and 1978.

From the former *Boletín del OVA (Observatorio Vulcanológico Arenal)*, edited since 1988, last the 12 numbers published, counting with 36 geoscientific papers about Arenal volcano and surrounding area, for a total of 566 pages of edition. In them, diverse topics about Volcanology and related themes have been brought up leaving still some more questions not yet solved, in this natural laboratory. The participation of 39 authors of 8 different nations was very valuable, in order of predominancy: Costa Rica, Italy, United States; France, England and Germany in similar position. We had also a collaboration from Nicaragua and from Colombia. To all of them, and to many other colleagues we wish to express our gratitude.

With the edition of this new dual volume (year 7, No. 13-14), we increase our program of seismological and geo-volcanological research, now covering a broader region, which is geologically very active, where we can find geologic tectonic structures of high interest, such as grabens, horsts, faults, active and dormant volcanoes, including calderas. This also the region where the generation of almost 50% of the electric power of Costa Rica is concentrated. Thus, ICE has had the task of detailed investigation of this region since 1974. On the other hand, we also fulfill an important informative roll on behalf of the progress of science, upbringing the tecnologic and scientific quality and human potential of our country and our institution in particular.

We hope that the present and future editions will be to your entire satisfaction and usefullness, and even more, the motivation for new researches. In the same way, we will be pleased to get your observations or collaborations.

Guillermo E. Alvarado
Oficina de Sismología y Vulcanología
Instituto Costarricense de Electricidad

May, 1997.

ÍNDICE, VOLUMEN I

Rafael A. Barquero Brief Description of Arenal-Miravalles Digital Seismological Network Costa Rica	1
--	---

Rafael A. Barquero, José M. Barrantes, Ileana M. Boschini, Waldo D. Taylor, Alvaro Climent & Guillermo E. Alvarado La Red Sismológica Digital del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM)	7
---	---

Waldo D. Taylor Funcionamiento de la Red Sismológica Digital de Miravalles y Arenal para el período de enero de 1994 a julio de 1995	16
--	----

Waldo D. Taylor & Matthias Ohrnberger Microzonificación sísmica preliminar del Complejo Geotérmico de Miravalles	34
---	----

Gerardo J. Soto La actividad del volcán Arenal durante 1994	53
--	----

Guillermo E. Alvarado & Gerardo J. Soto Aspectos Petrológicos de las Tefras del Arenal a la luz de Nuevos Datos Geoquímicos y Cronoestratigráficos	58
--	----

Las opiniones vertidas por los autores de los artículos son de su propia y entera responsabilidad, y el Boletín del OSIVAM no toma necesariamente éstas como su posición oficial.

Boletín OSIVAM	1994	Año 7, No. 13 - 14	1 - 6	San José, Costa Rica, mayo 1997
----------------	------	--------------------	-------	---------------------------------

Brief Description of Arenal-Miravalles Digital Seismological Network, Costa Rica

Rafael Barquero, José M. Barrantes, Ileana Boschini, Waldo D. Taylor, Alvaro Climent & Guillermo E. Alvarado. Oficina de Sismología y Vulcanología, Instituto Costarricense de Electricidad. Apdo. 10032-1000, San José, Costa Rica. Observatorio Sismológico y Vulcanológico Arenal Miravalles (OSIVAM), Costa Rica.

Barquero, R., Barrantes, J.M., Boschini, I., Taylor, W.D., Climent, A. & Alvarado, G.E., 1997. Brief Description of Arenal-Miravalles Digital Seismological Network, Costa Rica. -Bol. OSIVAM, 7 (13-14): 1 - 6, 1994; San José.

ABSTRACT

For more than 20 years, the Costarrican Institute of Electricity (ICE) has developed seismological research on zones of hydroelectric and geothermal projects in Costa Rica with the goal of a better design for civil works and their posterior monitoring after construction. The main characteristics and objectives of the seismic network are presented in this paper. This network includes the most modern digital technology to date. This new instrumentation opens a wider horizon for the understanding of natural phenomena such as earthquakes and volcanic activity also and facilitates the permanent monitoring of the Arenal-Corobici-Sandillal Hydroelectric Complex and the Miravalles Geothermal field. The center for recording and processing of data is located at the new building of the Arenal-Miravalles Seismological and Volcanological Observatory (OSIVAM) at Tilarán, Guanacaste.

RESUMEN

Por más de 20 años, el Instituto Costarricense de Electricidad ha desarrollado investigaciones sismológicas en zonas de proyectos hidroeléctricos y geotérmicos en Costa Rica, con el fin de diseñar adecuadamente las obras planeadas y de auscultarlos una vez construidos. En este trabajo se presentan las principales características de la nueva instrumentación así como de sus objetivos. Esta moderna red incorpora la más reciente tecnología digital de nuestro tiempo. Dicha red ubica a nuestro país a la vanguardia en instrumentación sismológica, abre nuevos horizontes para una mejor comprensión de los fenómenos naturales, como lo son los terremotos y las erupciones volcánicas, y permite la creación de una importante base de datos para futuros diseños ingenieriles. Además, facilita la permanente auscultación del Complejo Hidroeléctrico Arenal-Corobici-Sandillal y del Campo Geotérmico Miravalles. El centro de registro y procesamiento de datos se ubica en el nuevo edificio del Observatorio Sismológico y Vulcanológico del Arenal y Miravalles (OSIVAM) en Tilarán, Guanacaste.

INTRODUCTION

At the northern region of Costa Rica, the Costarrican Institute of Electricity (ICE) has developed important power projects such as the Miravalles Geothermal Plant, the Arenal-Corobici-Sandillal Hydroelectric Complex and the Tejona Eolic Proyect. In this region, there are important tectonic structures capable of generating strong earthquakes and volcanic activity.

Seismological studies, carried out in different regions of the world, where geothermal resources are being exploited, have shown some relation between an

increase in the seismic activity and the exploitation or reinjection of fluids underground. On the other hand, the presence of Arenal volcano, which has been active for more than 26 years, requires a permanent monitoring of the region.

The Arenal-Miravalles Digital Seismic Network (fig. 1) was implemented by ICE in 1994, a new building for the Seismological and Volcanological Observatory (OSIVAM) was constructed for the main recording and processing center and laboratories.

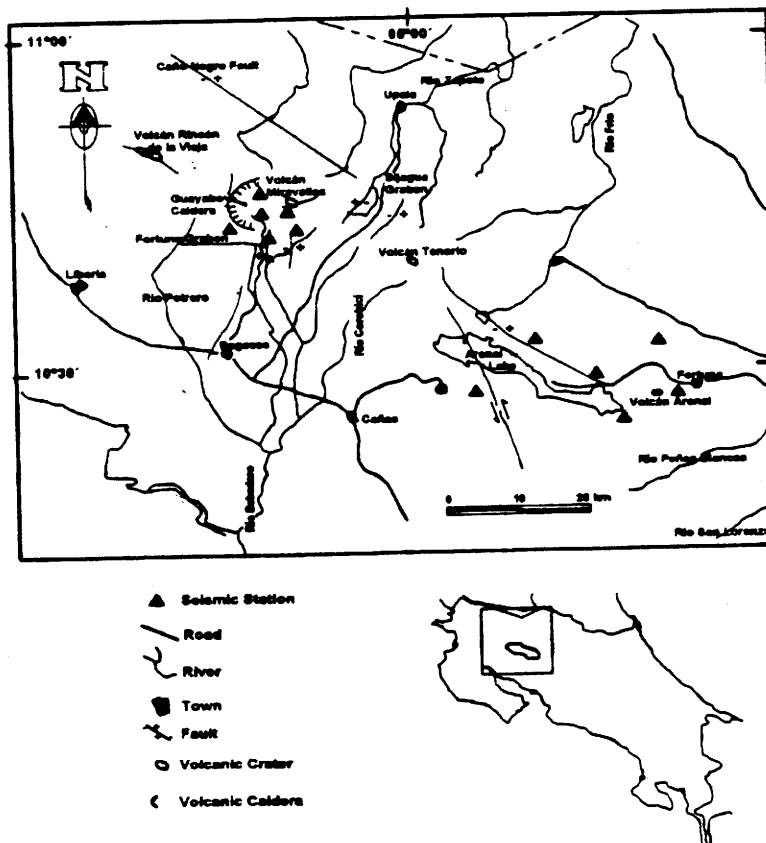


Figure 1: Arenal - Miravalles Seismic - Network.

MIRAVALLS SEISMIC NETWORK

The Miravalles Geothermal Plant was inaugurated on March 25, 1994, with a first unit of 55 MW of generation capacity. The geothermal field is located within a caldera structure where several fault systems have been determined. The Miravalles area has been monitored with portable seismic equipment in different periods (1978, 1983-84, 1986 and 1991-present). The results of this work have permitted know the main seismic characteristics of the zone, showing relatively low level of activity (10 to 15 microearthquakes per month), and also several seismic alignments probably related to local active faults.

Understanding that there is a possible relation between increased seismic activity and the reinjection of fluids for the

exploitation of energy, as suggested by seismic studies being carried out in different parts of the world, ICE has considered necessary the implementation of this modern seismic network for the monitoring of the geothermal field. The main objectives of the network are:

1. Permanent monitoring of the geothermal field.
2. Early detection of any anomaly that could be induced by the geothermal exploitation.
3. Determination of seismic parameters of local earthquakes and their classification.
4. Further seismological scientific investigations related to Geothermics.

ARENAL VOLCANO SEISMIC NETWORK

The Arenal Volcano is located between the Guanacaste and Central Volcanic Ranges. In this region ICE has developed the most important hydroelectric projects in the country, generating almost 40% of the electric power. Arenal Volcano has been active since 1968 and has kept a regular strombolian and effusive activity characterized by many daily explosions and low frequency earthquakes and tremors. Because of the short distance between the volcano and the Sangregado dam of Arenal Lake (6 km), it is very important for ICE to maintain a permanent monitoring of the volcano.

The digital seismic network was

designed mainly in order to cover the volcano for a good localization and characterization of the different seismic signals. The digital data allows scientists to make many types of seismic analysis such as spectral analysis, polarization of signals, particle motion analysis, correlation of seismicity, energy and eruptive activity at the volcano, etc. These kinds of investigations will help scientists to better understand the volcano and define parameters for activity prognostics. The network will also help in the monitoring of the Arenal Lake area. This task is also very important because actually the reservoir is located within a graben type tectonic structure, limited by important active or potentially active faults.

INSTRUMENTATION

The Arenal-Miravalles seismic network is integrated by 12 digital seismic stations and 4 strong-motion instruments from the Lennartz Instrument Co. The stations are distributed 6 at the Miravalles geothermal field and 6 around the Arenal volcano (fig. 1), there are also 3 strong motion seismometers at Sangregado Dam and one at the Miravalles power house. Each station includes a 3 component seismometer, a GPS system for time calibration, signal conditioner and transmitters, the MARS-88

data acquisition system and a workstation for the data processing (fig. 2). The processing system consists of a Hewlett-Packard UNIX workstation with multitask operative system. The computer automatically runs the programs for the cyclid interrogation and collection of data from each station. An optic disk unit of 650 MBytes is used for the data storage. The processing of data is done with the PITSA and SEISAN programs which includes a series of routines currently used in Seismology.

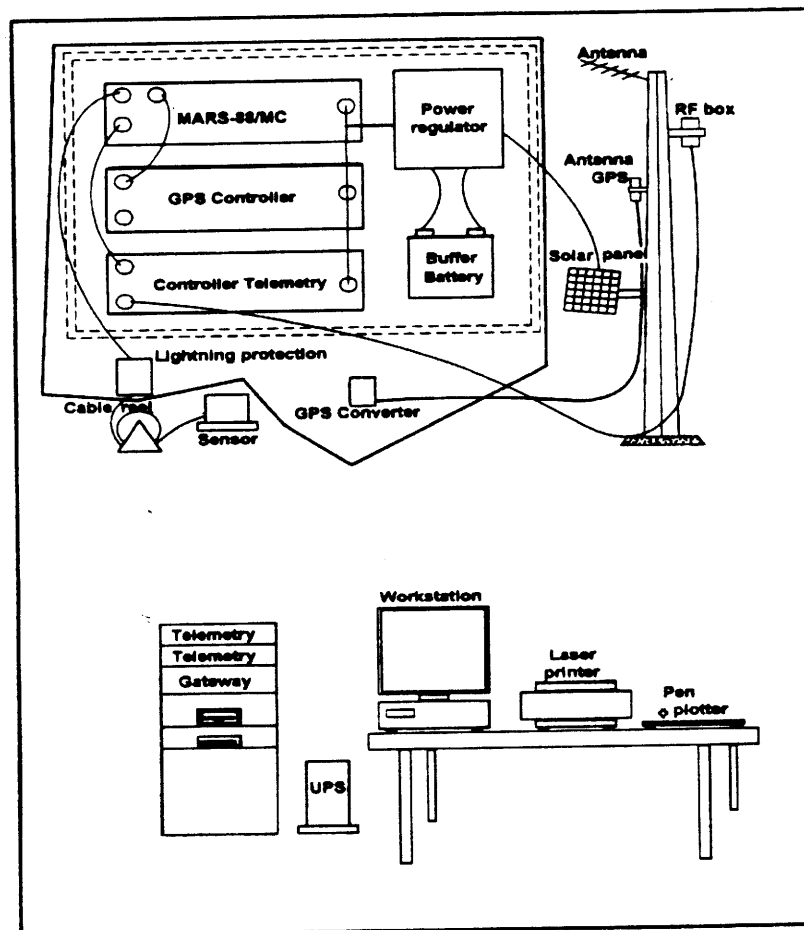


Figure 2: Communications, processing, analysis and storage systems for the seismological data.

NETWORK COMPONENTS

LE-3D - 1 Hz seismometers: These are electronic sensors installed in each station to record the seismic waves. They are compact and light geophones (1,9 kg) of 3 components (Z, NS, EW). The sensitivity is 400 V/m/s.

Time signal receptor (GPS): Carries on the time calibration and site location. The time output is compatible with all Lennartz instruments. The master clock at each station is calibrated by a GPS.

Transmission devices: Includes the transmitter and receivers and antennas. The transmission of data is done in packets and each station is identified by a code. The control packets contain the destination and sender information to facilitate the routing. The stations count with a microprocessor dedicated to the control of transmission/reception protocols.

Data acquisition: The data acquisition system (MARS-88) has 3 channels for data and 1 channel for monitoring for the simulation of analogic signals. For each channel there is an analogic/digital converter. The sampling of converters is synchronized by the internal master clock. The samples are taken in all the channels, at the same time. The sampling intervals are 2,4,8,16,32,64 and 128 miliseconds (500 Hz to 8 Hz). The band width is 0.4 by sampling frequency (up to 200 Hz with 500 Hz of sampling).

Dynamic range is 120 decibels (20 Bits). The sampling rate of 125 samples per second allows a band width of 50 Hz. The master clock contains a crystal oscilator controled by a device which ensures stability for long periods of time.

The instrument includes a liquid crystal screen for the control of parameters in the field. The backup memory is 4 MBytes.

Storage, processing and analysis of data: The processing unit consists of a workstation with the HP-UX UNIX multitask operative system. This computer operates the programs for cyclid interrogation of the stations, gets the data and determines coincidences at the different groups or sub networks pre-defined.

These programs run automatically, without interaction with the user. The data processing can be done automatically or interactively. For the storage of information an optical disc unit of 650 MBytes is used. The data can be processed immediately with the SEISAN and PITSA programs which includes a series of routines commonly used in Seismology.

Center for reception, processing and maintenance: This center is a modern building located near the town of Tilarán, province of Guanacaste, strategically located for a good reception of signals from Miravalles and Arenal networks.

CONCLUSION

The conception of this new seismological network incorporates the modern digital technology and substitutes old analogic systems with all the new advantages for the investigation in Seismology.

The digital technology opens a new wide horizon toward the comprehension of natural phenomena in Costa Rica such as earthquakes and volcanic activity.

The implementation of this modern network will afford much more good quality data for the monitoring of the geothermal

field and will help in the efforts for the forecasting of strong volcanic eruptions or early detection of induced seismicity.

The new instrumentation will make it possible to carry on more research in order to determine seismic sources and establish more complete geological models for the geothermal field, Arenal volcano and the graben tectonic structure where Arenal reservoir is located. Also, it will be possible to study the behavior of Sangregado Dam or the Miravalles Geothermal Plant powerhouse during strong earthquakes.

Boletín OSIVAM	1994	Año 7, No. 13 - 14	7 - 15	San José, Costa Rica, mayo 1997
----------------	------	--------------------	--------	---------------------------------

La Red Sismológica Digital del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM)

Rafael A. Barquero, José M. Barrantes, Ileana M. Boschini, Waldo D. Taylor, Alvaro Climent & Guillermo E. Alvarado. Oficina de Sismología y Vulcanología, Departamento de Ingeniería Geológica, ICE.

Barquero, R., Barrantes, J.M., Boschini, I.M., Taylor, W.D., Climent, A. & Alvarado, G.E., 1997. La Red Sismológica Digital del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM). -Bol. OSIVAM, 7 (13-14): 7 - 15, 1994; San José.

RESUMEN

Por espacio de más de 20 años, el ICE ha desarrollado investigaciones sismológicas en zonas de proyectos hidroeléctricos y geotérmicos en Costa Rica con el fin de diseñar adecuadamente las grandes obras ingenieriles planeadas como presas y casas de máquinas, y de auscultarlos una vez construidos. A continuación se presenta, en forma resumida, el proceso que llevó al diseño, adquisición, implementación y puesta en operación de la última y moderna red sismológica digital, una de las más avanzadas de Latinoamérica. Dicha red, pone a nuestro país a la vanguardia en la instrumentación sismológica y nos abre notoriamente los horizontes para una mejor comprensión de los fenómenos naturales y poseer una base de datos para futuros diseños de grandes obras. Además, permite la permanente auscultación en tiempo real del Complejo Hidroeléctrico Arenal-Corobici-Sandillal, del Complejo Geotérmico Miravalles y, en parte, de la Planta Eólica de Tejona, así como el Campo Geotérmico volcán Tenorio. El centro de registro y procesamiento de dicha red, que consta de doce estaciones sismológicas digitales y cuatro acelerógrafos, está ubicado en el Cerro Chiripa (Tilarán) en el edificio del Observatorio Sismológico y Vulcanológico del Arenal y Miravalles (OSIVAM).

ABSTRACT

For more than 20 years, the Costarrican Institute of Electricity has developed seismological research on zones of hydroelectric and geothermal projects in Costa Rica with the task of a better design of the civil works and their posterior monitoring after construction. The main characteristics and objectives of the seismic network are presented in this paper. This network includes all the modern digital technology up to date in the world. This new instrumentations opens a wider horizon for the understanding of natural phenomena such as earthquakes and volcanic activity and facilitates the permanent monitoring of the Arenal-Corobici-Sandillal Hydroelectric Complex and the Miravalles Geothermal field. The center for recording and processing of data is located at the new building of the Arenal Miravalles Seismological and Volcanological Observatory (OSIVAM) at Tilarán, Guanacaste.

INTRODUCCIÓN

El ICE comienza su participación en el campo de la Vulcanología y Sismología a raíz de la actividad del volcán Irazú en 1963. La ceniza expedida por este volcán desestabilizó la cuenca del río Reventado, de la cual bajaron corrientes de lodo en la época lluviosa que destruyeron la población de Taras de Cartago.

En ese año se crea en el ICE la Oficina de Control de Ríos, encargada de la auscultación y análisis de avenidas de lodo (lahares) del Reventado. En esa misma época, el ICE construyó un búnker en las cercanías del cráter activo del Irazú, para que los vulcanólogos y guardias de control pudieran realizar observaciones geofísicas y actividad visual, protegidos de las lluvias de rocas volcánicas. El reconocido vulcanólogo francés, H. Tazieff lo definió como el **"primer observatorio vulcanológico del continente americano"**. En 1965, en el mismo año que el Irazú finalizó su fase eruptiva, se iniciaron estudios geológicos y topográficos en los alrededores del volcán Arenal, base fundamental para lo que después fue el segundo complejo hidroeléctrico, en tamaño, de América Central y el Caribe. Dada la envergadura de las obras civiles planeadas en la región de Guanacaste, en 1974, el ICE decidió instalar la primera red sismológica (analógica) telemétrica de Costa Rica con sede en el Cerro Chiripa, a 12 km de Tilarán, que se constituyó en el primer observatorio sismológico moderno de América Central.

La Oficina de Sismología y Vulcanología (OSV), dependencia del Departamento de Ingeniería Geológica del

ICE, está a cargo de los estudios sismológicos y vulcanológicos desde 1974. Realiza además, la evaluación de la amenaza sísmica y volcánica para los proyectos de generación eléctrica que el ICE desarrolla. Una vez puestos los proyectos en marcha, esta Oficina continúa el programa de auscultación en la región, con el objetivo de velar por su seguridad y de que la información obtenida, así como investigaciones neotectónicas y de geovulcanología aplicada a la ingeniería sirvan de base para proyectos futuros.

En la región norte del país, el ICE ha desarrollado importantes obras energéticas, como la Planta Geotérmica Miravalles y el Complejo Hidroeléctrico de Arenal-Corobicí-Sandillal y el Proyecto Eólico Tejona. Es por esa razón que la Oficina de Sismología y Vulcanología, a raíz de un requerimiento del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), presentó un proyecto de auscultación sísmica y volcánica para las áreas de Miravalles y Arenal. En este, se recomienda la adquisición de una red sismológica de alta tecnología, completamente digital, que permita la recolección de información sísmica, procesamiento y análisis mediante un sistema automatizado. Para ello, la OSV definió la ubicación geográfica de las estaciones de tal forma que se obtenga una adecuada cobertura para el monitoreo sismológico permanente de la zonas del volcán Arenal y lago homónimo y del Campo Geotérmico Miravalles, en donde existen estructuras tectónicas capaces de generar sismos importantes y en donde se realizan labores como la explotación y reinyección de fluidos, actividades que en algunas casos pueden generar cambios en la

actividad sísmica. Por otra parte, la presencia de un volcán muy activo, como lo es el Arenal, que ha mantenido su actividad explosiva y efusión de lavas desde 1968, requiere del monitoreo permanente de esta zona para detectar rápidamente cualquier actividad sísmica anómala que pueda afectar las obras del ICE. Todo esto permite hacer investigaciones más profundas que ayuden a definir las fuentes sísmicas y establecer modelos geológicos más completos para la zona del campo geotérmico, del volcán Arenal y de la estructura tectónica tipo graben complejo, donde se asienta el lago Arenal.

El diseño de la red sismológica permitirá a su vez, cualquier expansión

futura que se requiera, como es la auscultación en proyectos como los geotérmicos de Rincón de la Vieja y Tenorio o los hidroeléctricos de Toro y Laguna Hule.

Paralelamente a la información de interés para el ICE, en OSIVAM, se registran gran cantidad de sismos de otras partes del país, información que se suministra a la Red Sismológica Nacional (RSN:ICE-UCR), para su labor de auscultación permanente del territorio nacional (fig. 1). De esta manera, la OSV cumple mejor su función en lo que respecta no solo a la comprensión de nuestro ambiente geológico sino también a la protección de las obras civiles del ICE y su entorno humano.

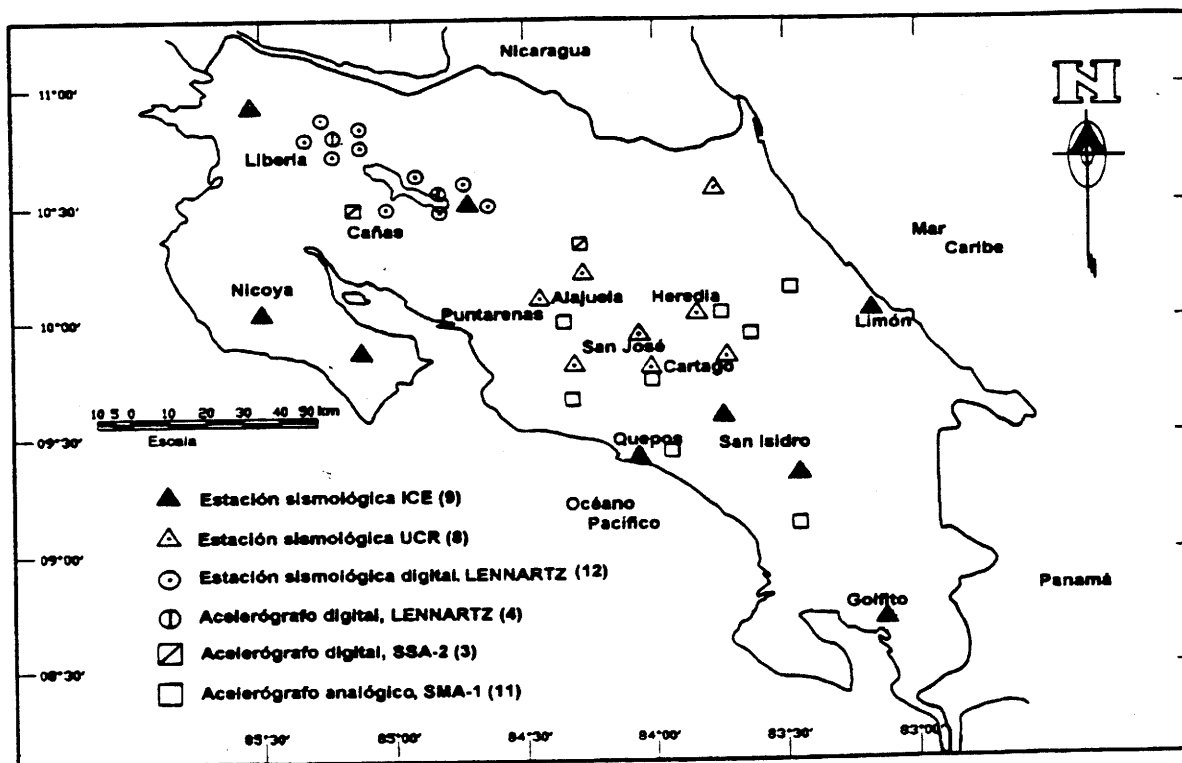


Figura 1: Red de auscultación sismológica y acelerográfica del ICE y de la RSN:ICE-UCR.

DISEÑO, ADQUISICIÓN E IMPLEMENTACIÓN

La concepción de una moderna red sismográfica, que incorpora la tecnología digital, sustituye la antigua tecnología analógica. Lo anterior significó un gran reto para los profesionales del ICE involucrados, pues no se contaba con experiencia previa en esta innovadora tecnología.

El diseño de la red de Miravalles-Arenal involucró la resolución de una serie de problemas para lograr una buena cobertura de los sitios de interés, encontrar sitios que permitieran condiciones favorables tanto sísmicamente como también para la transmisión hasta el centro principal. Para ello fue necesario hacer múltiples pruebas, como por ejemplo estudios geofísicos y análisis de propagación de señales para transmisión. Fue así como finalmente se logró conformar la red de Miravalles-Arenal con un centro principal de registro en Cerro Chiripa, cerca de Tilarán.

La construcción de la infraestructura, así como la instalación de los equipos, estuvo recargada en su mayor parte en el ICE, lo cual representó gran cantidad de tiempo y trabajo, pudiéndose concluir gracias a la valiosa colaboración de diversas dependencias de nuestra Institución.

La infraestructura básica, que se implementó para hacer posible la instalación

de los equipos de una manera óptima, con todas las facilidades que se requerían, consiste básicamente de lo siguiente:

a) **Estaciones de campo:** Para cada una de las 16 estaciones localizadas tanto en la los alrededores de la Planta Geotérmica Miravalles como del Complejo Hidroeléctrico de Arenal, se cuenta con lo siguiente:

- Caseta de concreto armado de gran seguridad contra vandalismo y terremotos.

- Caja para el geófono excavada a un metro de profundidad y con una base de unos 50 cm de espesor de concreto.

- Torre de metal de 15 metros de altura

- Malla de protección contra descargas eléctricas

b) **Observatorio:** En 1994 finalizó la construcción un moderno edificio en el Cerro Chiripa. En él se instaló el centro principal de recepción y procesamiento de datos de toda la red sismológica. Este edificio está localizado en un punto estratégico el cual cumple con los requerimientos básicos para la transmisión y recepción de información vía telemétrica de todas las estaciones.

INSTRUMENTACIÓN

La Red Sismológica de Miravalles-Arenal está integrada por 12 estaciones sismológicas digitales marca Lennartz de fabricación alemana, seis instaladas en

Miravalles y seis en los alrededores del volcán Arenal, además de cuatro acelerógrafos, uno instalado en Casa de Máquinas de Miravalles y los otros tres en la

represa de Sangregado (fig. 1). Cada estación incluye un sismómetro digital de tres componentes, un GPS para la calibración del tiempo y localización, el acondicionador de señal, el transmisor y las antenas del GPS y de transmisión ubicadas en la torre. En el centro principal se encuentra el sistema de adquisición de datos MARS-88, dos HP 9000 serie 400, WORKSTATION para el procesamiento y análisis de la información y las antenas para la recepción de datos.

Sismómetro LE-3D/1 Hz: Es un dispositivo que se instala en cada estación para registrar los movimientos sísmicos. Se trata de un geófono activo, compacto y liviano (1,9 kg), de 3 componentes (vertical, norte-sur y este-oeste), que incluye la electrónica para realimentación, preamplificación y filtrado. La sensibilidad es idéntica para todos los componentes (400 V/m/s).

Sistema de adquisición de datos MARS-88: Este sistema dispone de tres canales de datos y un canal de monitoreo para la simulación analógica de las señales. Para cada uno de los tres canales existe un convertidor analógico/digital. El muestreo de los convertidores se sincroniza con el reloj maestro interno: las muestras de todos los canales se toma exactamente al mismo tiempo. Los intervalos de muestreo son 2, 4, 8, 16, 32, 64 y 128 ms (500 Hz hasta aproximadamente 8 Hz). El ancho de banda útil es de 0,4 por frecuencia de muestreo (hasta 200 Hz con 500 Hz de muestreo).

El ámbito dinámico es de 120 dB (20 Bits). El muestreo de 125 muestras por segundo permite un ancho de banda útil de 50 Hz. El reloj maestro interno contiene un oscilador de cristal térmicamente

compensado, que está controlado por un dispositivo para la estabilidad durante largo tiempo. El reloj contiene el decodificador de tiempo y la sincronización con la entrada de señal de tiempo.

El instrumento incluye un teclado y pantalla de cristal líquido para observar y cambiar los parámetros en el campo. La memoria de respaldo consiste de 4 MBytes de memoria, organizada como base de datos. Aquí se recolectan los datos pre-evento y post-evento y los datos disparados en bloques de 500 muestras.

Receptor de señal de tiempo (GPS): Posee la salida de la señal de tiempo, compatible con todos los instrumentos Lennartz. Los relojes maestros de todas las estaciones se sincronizan con el GPS.

Transmisión: Para el desarrollo de la red digital telemétrica MARS-88 se utilizaron tecnologías avanzadas en lo que a comunicación electrónica se refiere. La transmisión de los datos se realiza en paquetes y cada estación se identifica con un código único. Los paquetes de control que viajan por la red contienen su destino y remitente para facilitar el enrutamiento. Las estaciones disponen cada una de un microprocesador dedicado al control de los protocolos y la transmisión/recepción. El microprocesador para el control de los protocolos y la transmisión se encarga del enrutamiento para las estaciones vecinas que no tienen conexión directa con el centro principal.

Centro principal de procesamiento de datos: Este se divide en la sección de comunicación (transmisión-recepción) y el

sistema de procesamiento, análisis y almacenamiento de datos. El sistema de procesamiento consiste en dos HP 9000 serie 400 WORKSTATION con el sistema operativo de multi-tarea HP-UX 8.0 UNIX. Este computador opera los programas para la interrogación cíclica de las estaciones, recolección de los datos y determinación de las coincidencias en los diferentes grupos o subredes predefinidas. Estos programas funcionan automáticamente, sin interacción con el usuario. El procesamiento de los datos puede funcionar en forma automática o interactiva. Para archivar información se emplea una unidad de disco óptico de 650 MBytes. El transpaso de los datos a computadores IBM compatible se realiza a través de la red electrónica (ETHERNET) o por discos flexibles. El procesamiento de los datos se realiza mediante los programas PITSA y SEISAN que incluyen una serie de rutinas que comúnmente se emplean en sismología (fig. 2).

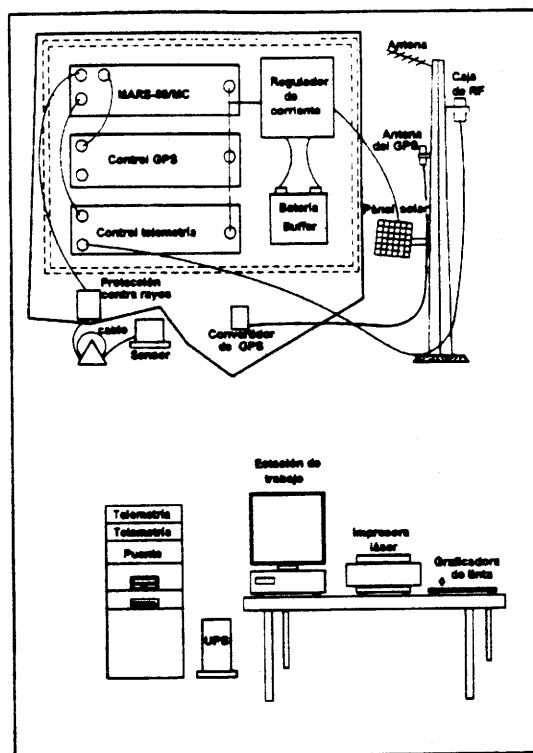


Figura 2: Sistema de comunicaciones, procesamiento, análisis y almacenamiento de información sismológica.

FUNCIONES DE LA RED

Mediante esta red es posible realizar una serie de cálculos sismológicos en forma rápida y precisa, labor para la cual antes se requería de un largo y laborioso proceso de obtención de datos, lectura manual y procesamiento. Hoy día, los procesos que antes requerían de varios días de trabajo se pueden realizar en unos pocos minutos y con mayor precisión. Entre el sinnúmero de posibilidades tenemos: el cálculo de diferentes magnitudes de los sismos, la lectura y el estudio en el tiempo de las diferentes ondas sísmicas, incluyendo análisis

espectrales, contenido de frecuencias, movimiento de la partícula en dos o tres dimensiones, ubicación de los temblores, diagramación de los epicentros, acercamientos o visiones regionales de la sismicidad, etc. Además, se pueden localizar microtemblores con mucha mayor precisión que con las estaciones analógicas, siendo esto importante para detectar eventual sismicidad inducida y enjambres de temblores. También se pueden realizar análisis detallados de los acelerogramas que se obtendrán cuando ocurran sismos fuertes, lográndose así

información sobre el comportamiento de la presa Sangregado y la Casa de Máquinas de

Miravalles ante esas sacudidas.

OPERACIÓN

Red Sismográfica de Miravalles

La Central Geotérmica de Miravalles se inauguró el 25 de marzo de 1994 con una primera unidad que tiene una capacidad de generación de 55 Megavatios. El proyecto se ubica dentro de una estructura caldérica de origen volcano-tectónico, en donde se han determinado varios sistemas de fallas, algunas de ellas activas.

La región de Miravalles ha sido auscultada con equipo sismológico en diferentes períodos (1978, 1983-1984, 1986 y 1991-presente). Los resultados de este trabajo han permitido establecer el régimen sísmico de la región, el cual muestra niveles de actividad relativamente bajos (un promedio de 10 a 15 eventos por mes) y también se han determinado algunos alineamientos sísmicos y posibles fallas activas locales.

Dado que los estudios sismológicos llevados a cabo en diversas zonas del mundo, han mostrado cierta relación entre el incremento en la actividad sísmica local y la explotación o reinyección de fluidos en el subsuelo o ambas, el ICE consideró necesario la implementación de una moderna red de auscultación sísmica en la región de Miravalles. Los objetivos principales que se pretenden lograr con esta red son:

1. Auscultación continua y permanente

del campo geotérmico, con especial interés una vez iniciada la explotación del mismo, para detectar cualquier anomalía sísmica que pudiera ser inducida.

2. Determinación de todos los parámetros de los eventos sísmicos locales (dentro de un radio de 50 km del proyecto), como son: las coordenadas del epicentro, profundidad, magnitud, duración, mecanismo focal, etc.
3. Reconocimiento y clasificación de los diferentes tipos de señales que se registren, ya sean sismos u otros tipos de señales como ruido, descargas eléctricas, actividad volcánica, etc. Para esto será necesario hacer estudios espectrales de los diferentes tipos de señales y servirá para lograr una calibración óptima de las estaciones.
4. Realizar otros proyectos de investigación específicos conjuntamente con expertos o instituciones tanto nacionales como internacionales. Estos estudios deberán ser enfocados hacia el mejor aprovechamiento de los recursos geotérmicos y la seguridad del proyecto.

RED SISMOGRÁFICA DE ARENAL

El volcán Arenal está ubicado entre las cordilleras de Guanacaste y la Central, en donde el ICE ha desarrollado el proyecto de generación hidroeléctrica más importante del país. El Arenal entró en actividad a partir de 1968 con explosiones fuertes que provocaron la destrucción de dos pequeños poblados en sus cercanías y la muerte de 78 personas. Además, ocasionó grandes pérdidas económicas, por ser esa una región eminentemente agrícola y ganadera. La actividad volcánica, con efusión de lavas y explosiones con gases y bloques incandescentes, se ha mantenido en forma más o menos continua hasta el presente, para el ICE es muy importante mantener una vigilancia permanente de este volcán, ubicado a menos de 7 km de la Presa de Sangregado.

Desde inicios de la construcción del proyecto Arenal, se iniciaron también los estudios sismológicos en la región. Una primera red semidigital integrada por nueve estaciones operó durante el período 1974-1978. Durante este período se logró localizar una cantidad apreciable de eventos sísmicos, muchos de los cuales eran réplicas del terremoto de Tilarán del 14 de abril de 1973 ($M=6,5$). Este evento se asoció con una falla de rumbo NW-SE, de unos 20 km de longitud, ubicada al noreste de la ciudad de Tilarán. Paralelamente, se realizaron también investigaciones sismológicas propiamente en el volcán Arenal con las cuales se logró, entre otras cosas, una clasificación básica de los tipos de eventos sísmicos de origen volcánico, así como su caracterización. De esta red se mantuvo, luego de que fuera redistribuida para la auscultación del país,

una única estación cercana al volcán, la estación Fortuna (FOR), localizada a 4 km al este del edificio volcánico. Esta estación ha permitido mantener, un monitoreo básico de la actividad en el volcán.

La red sismológica digital, se diseñó de tal forma que ofrezca una cobertura apropiada del aparato volcánico, la cual permitirá una buena localización de eventos tipo A y tectónicos que se registren en la región, aunque estos son poco frecuentes. Con los otros tipos de señales volcánicas por sus características, será casi imposible obtener una localización confiable. Sin embargo, es posible hacer con ellos otros tipos de investigaciones como por ejemplo: análisis espectrales para la determinación de las características de las fuentes, estudios de polarización de señales, caracterización de las señales de trémor durante los cambios de baja a alta actividad en el volcán, correlación entre la sismicidad, su energía y la actividad eruptiva, etc. Este tipo de estudios permitirán luego realizar modelos del volcán y definir parámetros con los cuales intentar pronósticos de la actividad futura del volcán. La estación analógica Fortuna continuará operando en forma continua y enviando su señal vía telefónica hasta el centro de registro y con ello continuarán los estudios de índole estadístico que regularmente se llevan a cabo. Esta red digital también cumplirá otro objetivo muy importante, como es el monitoreo sísmico de los alrededores del embalse de Arenal. Como es sabido, este embalse se ubica dentro de una estructura tectónica tipo "graben", limitada por fallas activas con potencial de generar sismos de magnitud moderada a alta en el futuro.

CONCLUSIÓN

Después de un arduo trabajo y contando con la valiosa colaboración de varias dependencias del ICE como la Dirección de Telecomunicaciones y la Dirección de Construcción se logró finalmente implementar y poner en operación la red sismográfica digital de Arenal-Miravalles en 1993, y conformar el Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM).

La puesta en marcha de todo el sistema no ha sido fácil, pues además de múltiples problemas tanto de "hardware" como de "software", nuestra experiencia en tecnología digital era escasa. Sin embargo, la entereza y capacidad de nuestros profesionales y técnicos han hecho posible ir solventando poco a poco los inconvenientes que se han ido presentando en el camino y se ha logrado ya iniciar el registro y procesamiento continuo de los datos. Esto nos abre un horizonte más claro hacia la comprensión de los fenómenos geológicos,

tales como lo son los terremotos y las erupciones volcánicas, a fin de tener mejores bases para diseñar más adecuadamente futuros proyectos, así como para conocer y eventualmente predecir erupciones volcánicas, todo en pro de la adecuada auscultación de las grandes obras, así como la mitigación y prevención ante desastres naturales.

También, ya se han iniciado los trabajos conjuntos con científicos extranjeros, con quienes mediante acuerdos de cooperación mutua, se han venido desarrollando proyectos de investigación en el OSIVAM para beneficio tanto para el ICE como para la comunidad científica internacional. La presente red y los resultados que se están obteniendo, nos ponen a un nivel semejante al de varios institutos en el mundo dedicados a la comprensión de los temblores y su aplicación a la ingeniería sismo-resistente.

REFERENCIAS

Barquero, R., Barrantes, J.M., Boschini, I., Taylor, W., Climent, A. & Alvarado, G., 1994. Nueva red sismológica digital Arenal-Miravalles. -Rev. Tecnología-ICE, diciembre, pp. 13-22.

Boletín OSIVAM	1994	Año 7, No. 13 - 14	16 - 33	San José, Costa Rica, mayo 1997
----------------	------	--------------------	---------	---------------------------------

Funcionamiento de la Red Sismologica Digital de Miravalles y Arenal para el período de enero de 1994 a julio de 1995

Waldo D. Taylor, Oficina de Sismología y Vulcanología, ICE, Apdo. 10032-1000, San José, Costa Rica, e-mail: wtaylor@cariari.ucr.ac.cr

Taylor, W. D., 1997. Funcionamiento de la Red Sismológica Digital de Miravalles y Arenal para el período de enero de 1994 a julio de 1995. -Bol. OSIVAM, 7 (13-14): 16 - 33, 1994; San José.

RESUMEN

Las principales labores y objetivos alcanzados desde enero de 1994 a julio de 1995, fueron la lectura, procesamiento y análisis de los datos registrados en las estaciones digitales Lennartz en la red del Campo Geotérmico de Miravalles (CGM) y del Complejo Hidroeléctrico de Arenal (CHA). Durante este período, se registraron 642 sismos tectónicos, de los cuales 418 corresponden con eventos profundos (> 30 km) y 224 a eventos someros (< 30 km). Además, se grabaron 1779 erupciones volcánicas (más de 30 horas de registro) y 1031 señales de tremor, para un total aproximado de 4177 minutos de registro (69,6 horas).

En los primeros 19 meses de funcionamiento, una de las labores principales fue la calibración de la red digital, teniendo como comparación los registros analógicos de cuatro estaciones portátiles MEQ-800, instaladas en los mismos sitios de registro de cuatro estaciones digitales (MES, CUI, CMU, LIM), en el Campo Geotérmico de Miravalles.

Para la calibración de los parámetros de disparo en las dos redes, se utilizaron las comparaciones de la cantidad y simultaneidad de los registros obtenidos en ambas redes (analógica y digital), permitiendo una mejor calibración del algoritmo de disparo. La adecuada calibración de los equipos, se refleja en el aumento de la cantidad de registros digitales en Miravalles, a partir de junio de 1994.

ABSTRACT

The main works and tasks carried out during the period Jan. 1994-Jul. 1995 were the reading, processing and analysis of data recorded by the seismological stations of the Miravalles Geothermal Field and Arenal Hydroelectric Complex. During this period, 642 tectonic events (418 of them regional) and 224 local ones were recorded. Also, 1779 volcanic eruptions (more than 30 hours of recorded time) and 1031 tremor signals totaling approximately 4177 minutes of recording time.

During these 19 months calibration of the digital station at Miravalles Geothermal Field was carried out with the help of analogic stations temporaly located at the same sites of the digital stations. By comparing both kinds of recording (analogic and digital) a better calibration for the new instrumentation was achieved. An increase in the number of recorded events after June 1994 indicates the improvement in the calibration.

INTRODUCCIÓN

La visita de varios consultores en sismología digital, como el Dr. Dieter Stoll de Lennartz Electronics en mayo de 1994, el Dr. Jens Havskov de la Universidad de Bergen en junio de 1994, y el Dr. Conrad Lindholm del Norwegian Seismic Array (NORSAR) a finales de julio de 1994, así como la instalación de varios programas de computación, diseñados para el manejo de bases de datos sismológicos, han permitido un funcionamiento casi óptimo de la red a partir de agosto de 1994. Con la instalación del nuevo programa de recolección de datos instalados durante la visita del ingeniero

Thomas Zenker (Lennartz Electronics) en agosto de 1995, se logró el funcionamiento de la red en un 100%. El presente informe trata de resumir las labores realizadas durante los primeros 18 meses de funcionamiento de la red sismológica digital Lennartz, incluyendo algunas estadísticas de la información obtenida, así como la proyección del funcionamiento de la red hacia el futuro hacia el futuro. La red está compuesta por 12 estaciones sismológicas y cuatro acelerógrafos que se distribuyen uno en Casa de Máquinas de Miravalles y tres en la Presa de Sangregado (fig. 1).

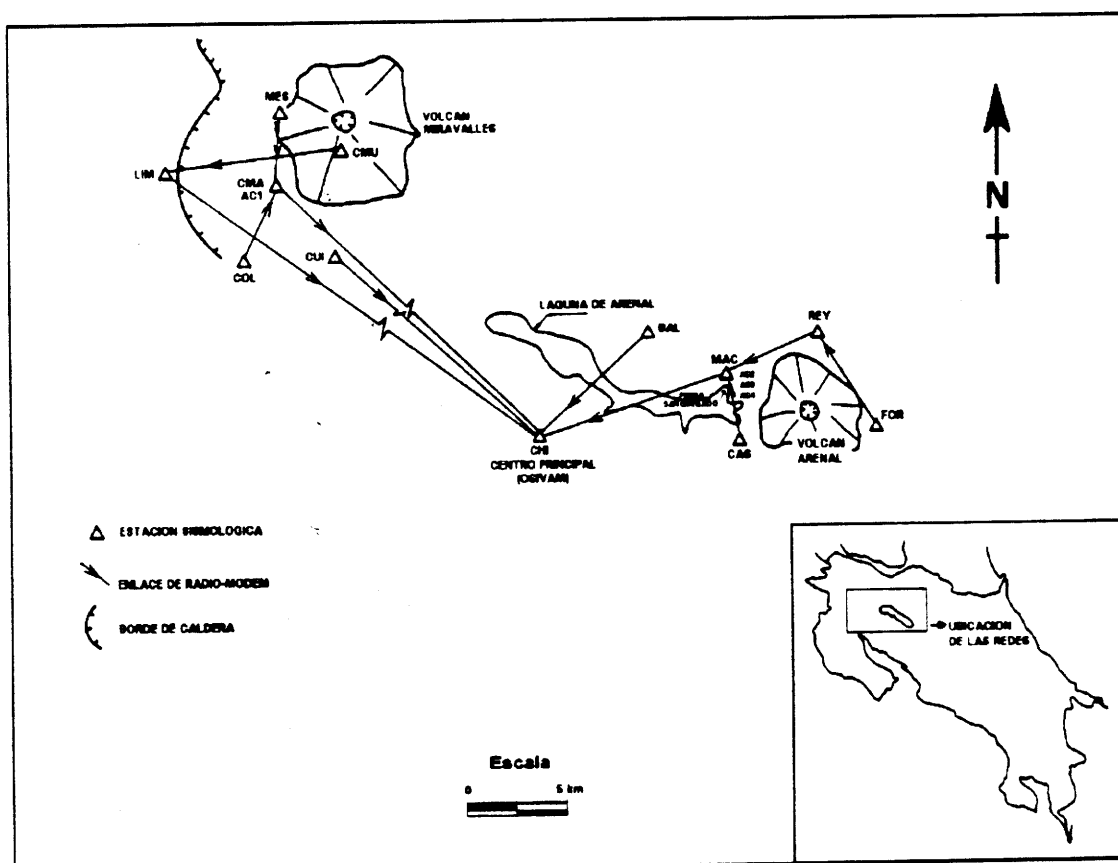


Figura 1: Red Sismológica Digital de Arenal y Miravalles (OSIVAM).

Los objetivos alcanzados hasta finales de julio de 1995 fueron:

- Optimización de los parámetros de disparo.
- Conocimiento adecuado del funcionamiento de la red y de los programas de cómputo utilizados.
- Realización de los manuales de funcionamiento de los equipos sismológicos y estaciones de trabajo.
- Reconocimiento de las limitaciones de operación de la red.
- Adquisición de las señales sísmicas (volcánicas y tectónicas), en el área del CHA, CGM y sus alrededores, utilizando la red digital permanente y la estación digital portátil.

-Cálculo de los parámetros estáticos y dinámicos de los sismos (magnitud, ubicación, profundidad, aceleración, velocidad y desplazamiento máximo).

- Análisis espectral, contenido de frecuencias y movimiento de partículas en dos y tres dimensiones, para el análisis de las diferentes señales volcánicas.
- Diagramación de epicentros y estadísticas de los temblores.
- Realización del mapa preliminar de ruido sísmico natural en el Campo Geotérmico Miravalles (CGM).

Sin embargo, en este informe se hará mención únicamente a los principales resultados de los datos y de la forma de operación de la red.

METODOLOGÍA, MANEJO Y ALMACENAMIENTO DE ARCHIVOS

La actividad normal de selección, análisis, codificación y archivo, de las señales sísmicas (con un promedio de 195 eventos por mes), fue el trabajo rutinario realizado diariamente, para la creación de la base de datos sismológica de los volcanes Arenal y Miravalles.

Las diferentes señales sísmicas fueron recibidas en una estación de trabajo HP9000 serie 400, donde se analizaron, seleccionaron y archivaron en los diferentes formatos y bases de datos.

Todos los datos obtenidos en la redes fueron archivados en discos ópticos de 1020 megavatios cada uno (300 megavatios por

cada lado). Además, como medida de seguridad, hay dos copias de cada archivo, una en formato SEISAN y otra en formato ISAM del programa PITSA.

Los archivos SEISAN son los que se utilizan para el manejo de la base de datos (localización, magnitud y profundidad de los eventos), y fueron almacenados separadamente, es decir, existe uno o varios discos ópticos con los eventos de cada una de las redes.

Para la red de Miravalles, todos los sismos de los años 1994-1995, en formato SEISAN, se encuentran en el lado A y B del disco óptico llamado "RED MIR,

ARCHIVOS SEISAN, ENERO 1994-JULIO 1995", utilizándose aproximadamente 400 megavatos, mientras que para la red de Arenal, se utilizaron cerca de 1000 megavatos, archivados en varios discos ópticos llamados "RED ARE, ARCHIVOS SEISAN".

Los archivos ISAM (formato del programa PITSA) se encuentran todos en una sola base de datos, pero también consisten de varios discos ópticos. Los archivos en este formato son utilizados para los estudios y análisis específicos de una señal, como por ejemplo, aplicar filtros, correcciones de línea base y por instrumento, espectros, movimiento de partículas en dos y tres dimensiones, integraciones, etc.

Además de los archivos digitales, también se tiene un archivo gráfico

(impresiones láser en papel), que contiene la impresión de las trazas de cada estación por cada evento registrado, y una lista al inicio de cada mes con la información del evento y en cuáles estaciones se registró. Para el caso de los eventos volcánicos se tiene, además, la información del tipo de evento (explosión, tremor armónico o espasmódico y tremor de baja frecuencia), frecuencia dominante, amplitud máxima, etc.

Se realizaron giras al campo para la realización de los estudios de análisis frecuencial de ruido sísmico natural en el CGM. Además, se realizó la correlación entre la observación visual y los registros obtenidos por la estación portátil digital, para así identificar adecuadamente los diferentes tipos de señales volcánicas generadas por el Arenal y registradas por las diferentes estaciones.

LOS PARÁMETROS DE DISPARO DEL SISTEMA (TRIGGER)

En general, todas las estaciones sismológicas digitales Lennartz (portátiles y permanentes) tienen varios parámetros variables que son necesarios para la buena detección y registro de las señales sísmicas.

El algoritmo de disparo relaciona los parámetros mediante la ecuación:

$$STA > LTA * ratio + level$$

En el momento en que esta relación se cumpla, el sistema determina que se trata de un evento sísmico.

El parámetro STA: Se define como el promedio de las amplitudes en un intervalo

corto de tiempo (Short Term Average), que varía entre 0,04 y 100 segundos. En la red está definido en cinco segundos.

El parámetro LTA: Es el promedio de las amplitudes en un intervalo largo (Long Term Average), que varía entre 0,04 y 100 segundos. En la red está definido con un valor de 100 segundos.

El parámetro RATIO (RELACION): El ámbito válido de este parámetro va desde 0 a 32. Se define como la comparación entre los parámetros STA y LTA por medio de la relación:

$$STA/LTA$$

Prácticamente, dicha relación se fijó en un valor de 3 durante todo el año 1994. El mismo fue variado durante 1995 para observar los cambios en la cantidad de eventos registrados, observándose que el valor de 1 es el más apropiado.

El parámetro LEVEL (NIVEL): Define el nivel de disparo. El mismo es agregado al LTA antes de la comparación con el STA, es decir funciona como un peso. Si el parámetro *level* es cero, entonces el disparo estará definido únicamente por las relaciones puras entre el STA y el LTA. En 1994 se cambió el valor varias veces, primeramente en 3, después en 2 y en, 1 y, por último, en 1995 se utilizó en 2 como valor óptimo.

El parámetro UPTIME (Muestreo efectivo): Este parámetro es muy importante, aunque no está definido propiamente en el algoritmo de disparo. Define durante cuantas muestras consecutivas debe cumplirse el algoritmo de disparo, antes de que se tome la señal como un evento, como puede notarse, está directamente relacionado con el muestro (cada 16 o cada 8 milisegundos, dependiendo

del tipo de sensor utilizado). Varía entre 0 y 99 y se utilizó un valor de 3, es decir, la condición de disparo debía mantenerse durante 48 milisegundos en las estaciones sismológicas, y durante 24 milisegundos en los acelerógrafos.

Ahora bien, todos los cambios y pruebas utilizando diferentes relaciones en el algoritmo, se hizo mediante la comparación de la cantidad de registros obtenidos en la red analógica, contra la cantidad de registros obtenidos en la red digital. De esta forma, se fue mejorando el nivel de disparo, y a partir de enero de 1995, aumentó considerablemente el número de eventos que cumplen con la condición. Sin embargo, aún no se ha encontrado el algoritmo ideal para registrar todos los eventos que se desean. Para solucionar el problema, es necesario tener en el OSIVAM los dos registros analógicos continuos de las señales sísmicas, provenientes uno de Arenal y el otro de Miravalles, para continuar con la calibración y en último caso, proceder a recuperar la información de las estaciones digitales en forma manual.

RED SISMOLÓGICA DIGITAL DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE MIRAVALLS

Está integrada por las seis estaciones sismológicas LIM, CUI, MES, COL, CMU y CMA y una estación para el registro de movimiento fuerte (acelerógrafo), llamado AC1 y se localizada junto a CMA en Casa de Máquinas de Miravalles (fig. 2). Todas las

estaciones están funcionando las 24 horas del día, excepto CMU que presenta un problema en el suministro de energía, y que se solucionó con la instalación de baterías externas nuevas.

ESTADÍSTICAS DE LOS SISMOS REGISTRADOS POR LA RED DIGITAL DE MIRAVALLES

La red de Miravalles registró 642 sismos (tabla 1). Se incluyeron dentro de esta estadística, los sismos tectónicos regionales, registrados tanto en la red de Arenal como la red de Miravalles.

Los datos obtenidos representan más de 22 horas de registro digital. Los datos están hasta el 17 de julio de 1995, fecha de traslado del equipo al edificio nuevo del OSIVAM.

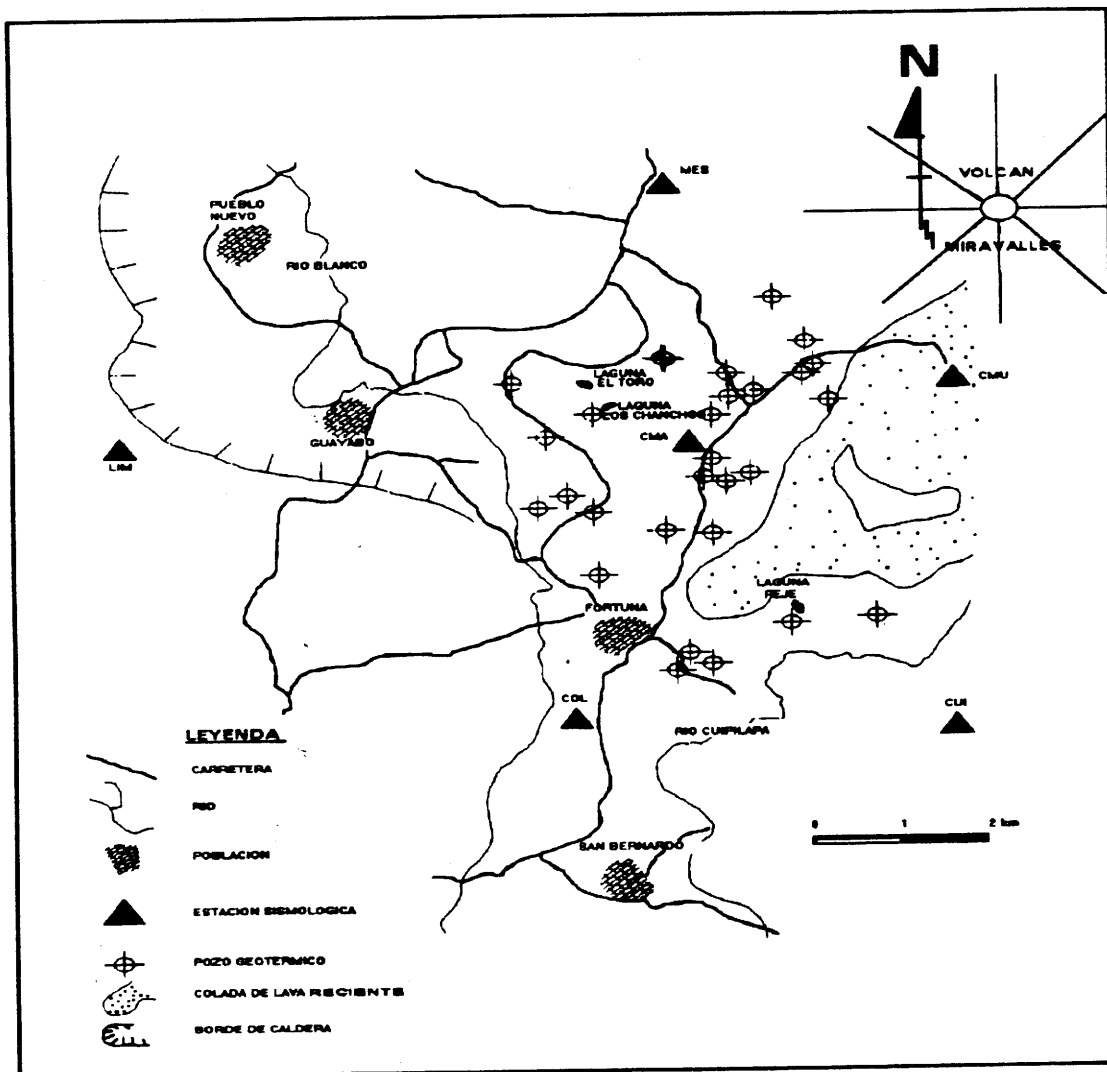


Figura 2: Red Sismológica Digital del Campo Geotérmico de Miravalles.

Tabla 1: Sismos registrados en la red sismologica digital campo geotermico miravalles, enero 1994-julio 1995

Mes	Eventos regionales	Eventos locales	Total
Enero 1994	7	0	7
Febrero 1994	4	1	5
Marzo 1994	5	2	7
Abril 1994	7	1	8
Mayo 1994	11	4	15
Junio 1994	20	11	31
Julio 1994	38	12	50
Agosto 1994	14	8	22
Setiembre 1994	23	18	41
Octubre 1994	29	15	44
Noviembre 1994	12	8	20
Diciembre 1994	12	10	22
Enero 1995	30	11	41
Febrero 1995	32	12	44
Marzo 1995	33	22	55
Abril 1995	70	38	108
Mayo 1995	33	15	48
Junio 1995	30	28	58
Julio 1995	8	8	16
Total	418	224	642

enero a diciembre de 1994, 182 son profundos (> 30 km) y 90 someros (< 30 km) mientras que para el primer semestre de 1995, se registraron 236 sismos profundos y 134 eventos superficiales. Durante los primeros seis meses de 1995, se notó un aumento de la cantidad de sismos tectónicos detectados por la red Arenal y Miravalles, que probablemente se debió al cambio en los parámetros de disparo a partir de febrero de 1995 o más bien, a un aumento también de la actividad sísmica, o ambos factores. La figura 3 es un resumen que muestra la cantidad de registros obtenidos mensualmente desde enero de 1994 hasta julio de 1995.

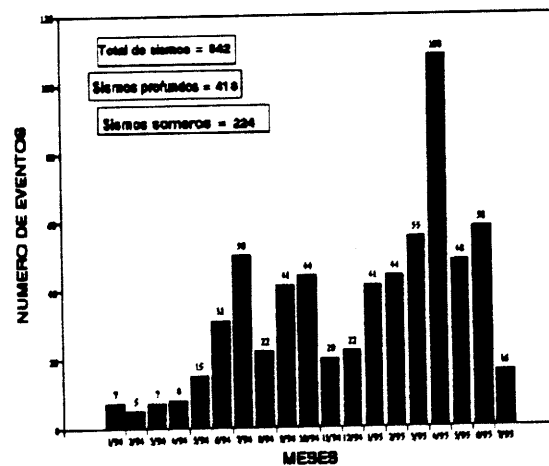


Figura 3: Número mensual de sismos durante el estudio.

Los sismos que se ubican dentro de la cobertura de las redes, son los que pueden considerarse como bien localizados. Los demás eventos deben ser analizados utilizando la base de datos de la Red Sismológica Nacional (RSN:ICE-UCR) para su mejor ubicación. Ahora bien, en un área

con coordenadas $7,0^{\circ}$ - $14,0^{\circ}$ de latitud norte y $81,0^{\circ}$ - $89,0^{\circ}$ de longitud oeste, únicamente 315 son sismos localizables, es decir, sismos que se han registrado en tres o más estaciones simultáneamente, que representan un total de un 49% del total de sismos registrados (fig. 4).

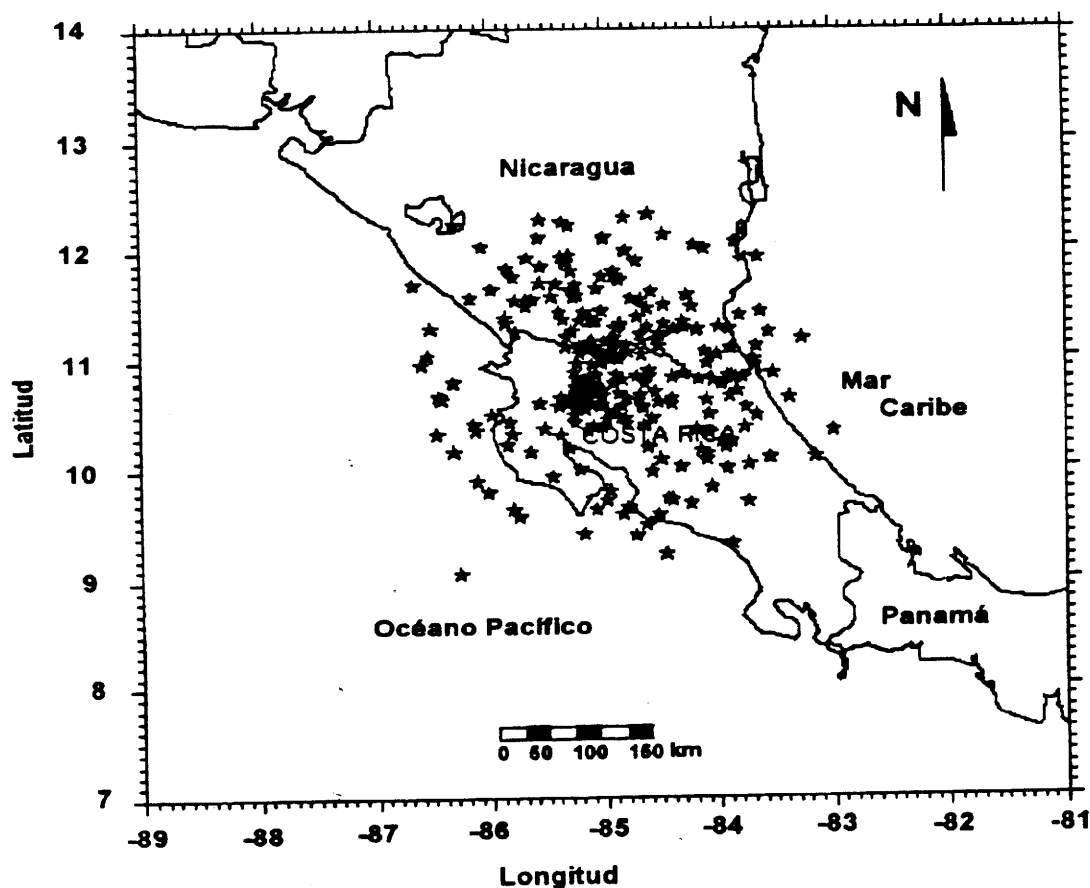


Figura 4: Localización de los principales sismos registrados en las redes del OSIVAM. Los sismos ubicados fuera del área de cobertura de las subredes del OSIVAM, son relocalizados utilizando datos de la Red Sismológica Nacional (RSN:ICE-UCR).

De estos 315 sismos, únicamente 121 se encuentran dentro de las coordenadas $10,0^{\circ}$ - $11,0^{\circ}$ latitud norte y $85,5^{\circ}$ - $84,5^{\circ}$ longitud oeste, que comprende el área dentro

de la cual se localizan la red de Miravalles y la red de Arenal (fig. 5). Además, únicamente 56 de los 121 eventos, son someros.

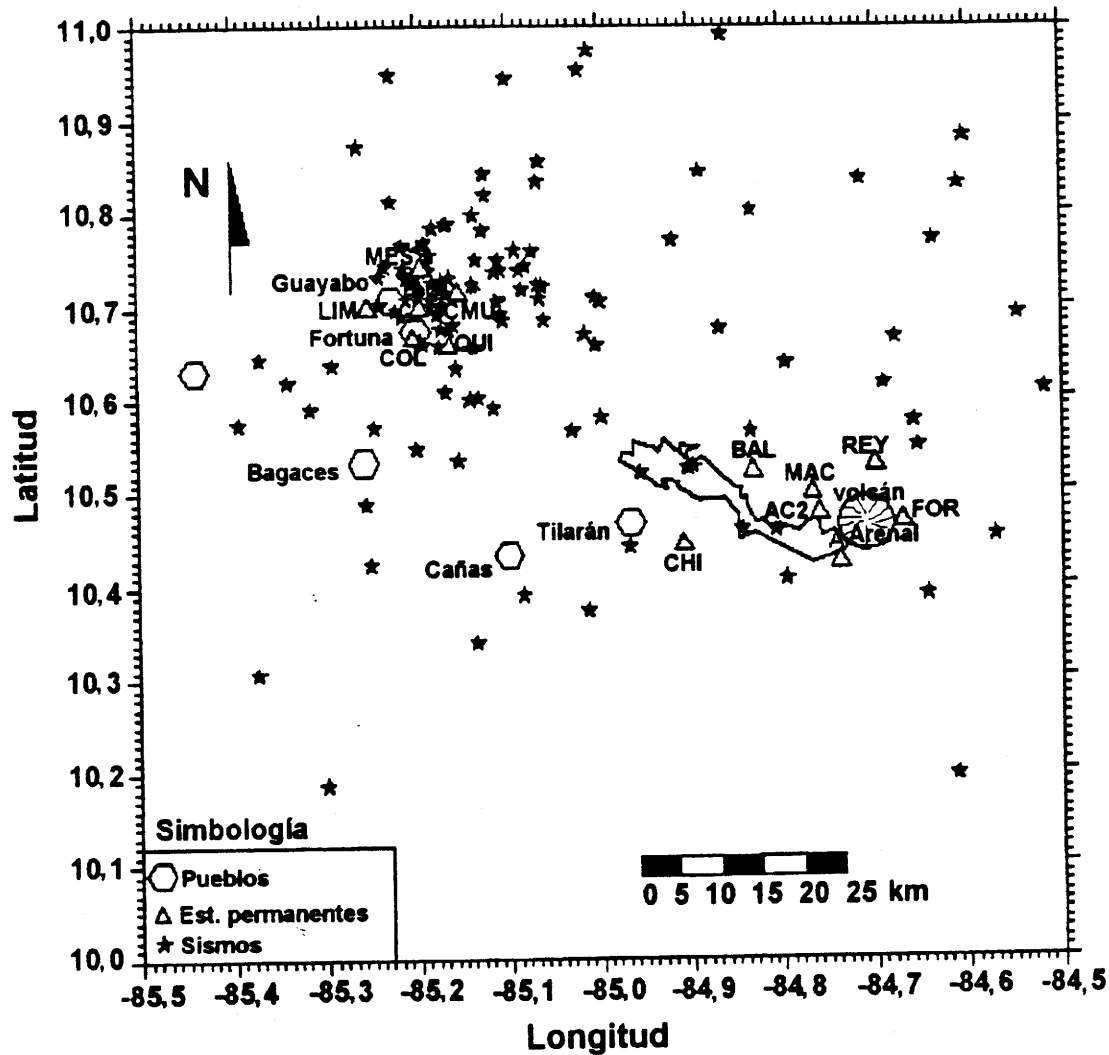


Figura 5: Localización epicentral de los principales eventos en el Campo Geotérmico.

Si se observa el área en los alrededores del Campo Geotérmico (coordenadas $10,6^{\circ}$ - $10,8^{\circ}$ latitud norte y

$85,1^{\circ}$ - $85,3^{\circ}$ longitud oeste), 30 sismos son someros y 22 son profundos (fig. 6).

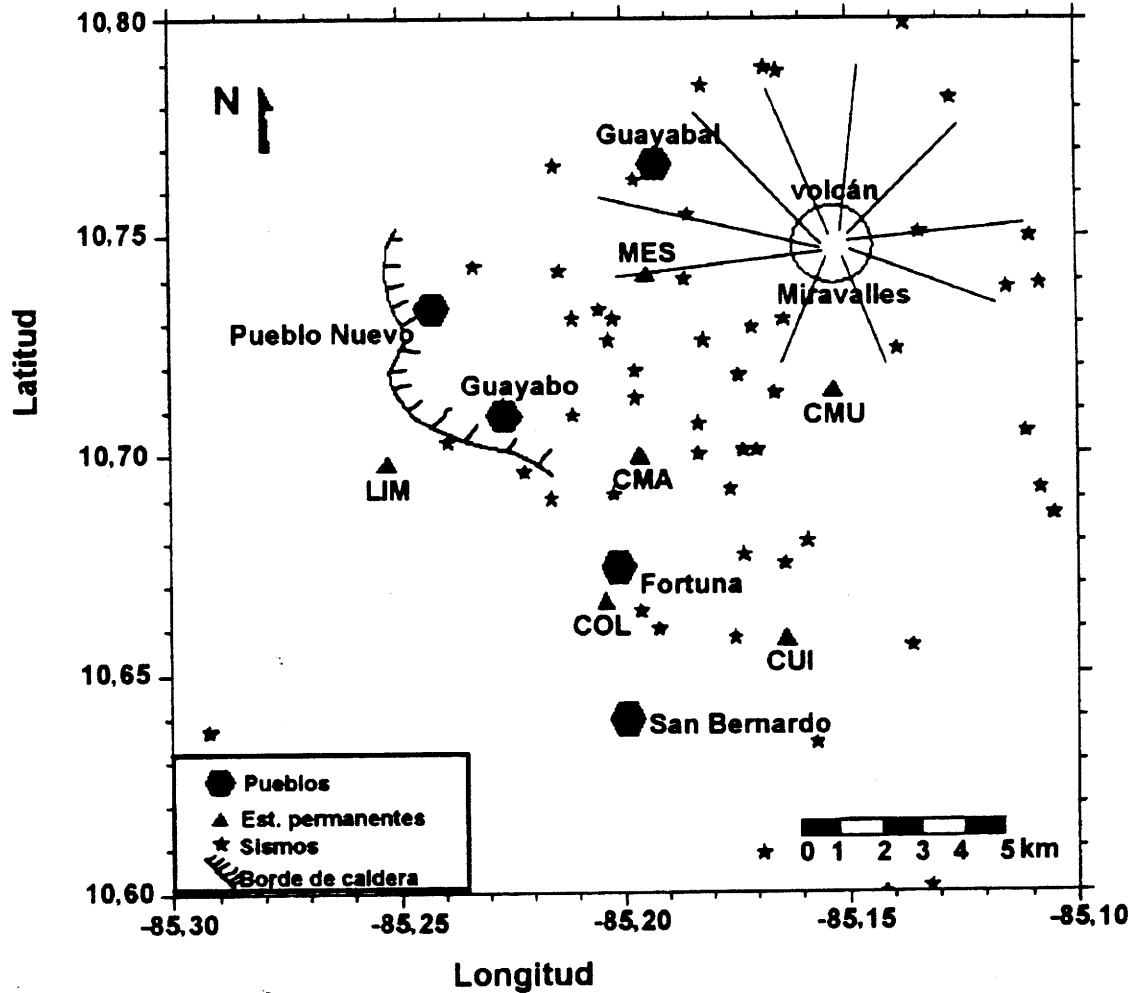


Figura 6: Localización epicentral de los principales eventos en el Campo Geotérmico.

Para una buena localización de eventos, es necesario contar con los siguientes aspectos:

- a- Una buena distribución de la red.
- b- Un buen modelo de corteza.
- c- Una buena determinación de los tiempos de arribo de las ondas sísmicas.

Existe la seguridad de que la distribución de la red está bien, pues se considera que una distancia más o menos equidistante entre las estaciones permite calcular los epicentros con bastante exactitud. La determinación de los tiempos de arribo de las ondas se hace por medio de uno de los programas de computo más avanzados hasta la fecha, permitiendo definir incluso varios tipos de ondas.

El ajuste de las profundidades puede estar asociado en una buena medida con el modelo de corteza utilizado, por lo que se considera necesario mejorar el mismo. Sin embargo, para ello es necesario tener mas datos para su mejor calibración. En otras palabras, estamos seguros de la localización

en cuanto a latitud y longitud, pero la profundidad no está todavía bien calibrada.

Importante es mencionar que el 25 de marzo de 1995, a las 00:47 hora local (06:47 hora GMT), fue sentido un sismo de magnitud local 2,2, localizado a 4 km al NNE de Casa de Máquinas, siendo el primer evento sentido originado dentro del campo geotérmico.

Otro de los estudio importantes que se realizó en el CGM fue el análisis de las frecuencias naturales de ruido de las diferentes fuentes generadoras. Las fuentes analizadas son del tipo urbano, como los pozos, el generador de casa de máquinas y las actividades propiamente urbanas, y del tipo natural, como las hornillas, los ríos, y de la señal natural obtenidas en los diferentes medios geológicos (Taylor & Orhmerger, en este número). De esta manera se pudo determinar el ámbito de frecuencias de los depósitos laháricos y de avalancha volcánica, que varían entre 3,2 y 5,0 Hz, mientras que los materiales blandos y contactos litológicos sugieren frecuencias menores a 3,2 Hz.

PRINCIPALES PROBLEMAS EXPERIMENTADOS EN LA RED DIGITAL DE MIRAVALLES

Los principales problemas detectados en las estaciones durante 1994-1995 fueron:

- a- Caída de paneles solares en la estación CMU debido al viento fuerte. Se solucionó reforzando todas las estructuras para el soporte de los paneles. Dicha medida se implemento en las demás estaciones.
- b- Deterioro de la batería externa de la estación CMU; la misma fue cambiada por una nueva.
- c- Inundación de la caja donde se localiza el geófono en la estación CMA. Se hicieron trabajos de reparación y se solucionó el problema.

d- Deterioro de los cables que van de la torre a la casetilla de la estación LIM. Este problema se solucionó cuando en todas las estaciones (de Arenal y Miravalles), se colocaron cercas protectoras alrededor de las casetillas.

e- Daños en el GPS de la estación COL. Probablemente los daños fueron originados por las condiciones climáticas, el GPS fue cambiado por uno nuevo.

RED SISMOLÓGICA DIGITAL DEL COMPLEJO HIDROELÉCTRICO ARENAL

La red está integrada por cuatro estaciones sismológicas alrededor del Volcán Arenal (CAS, MAC, REY y FOR), para detectar principalmente los eventos volcánicos, y dos estaciones sismológicas localizadas una a cada lado de la Laguna de Arenal (graben de Arenal), llamadas BAL y CHI, y que son utilizadas principalmente para detectar eventos tectónicos originados por las fallas normales, que se localizan a

ambos lados de la Laguna de Arenal, formando una estructura geológica que se conoce con el nombre de "graben". Además, existen tres acelerógrafos instalados en la cresta, la berma y la base de la Presa de Sangregado (AC2, AC3 y AC4, respectivamente). La figura 7 muestra la distribución geográfica de la red digital de Arenal.

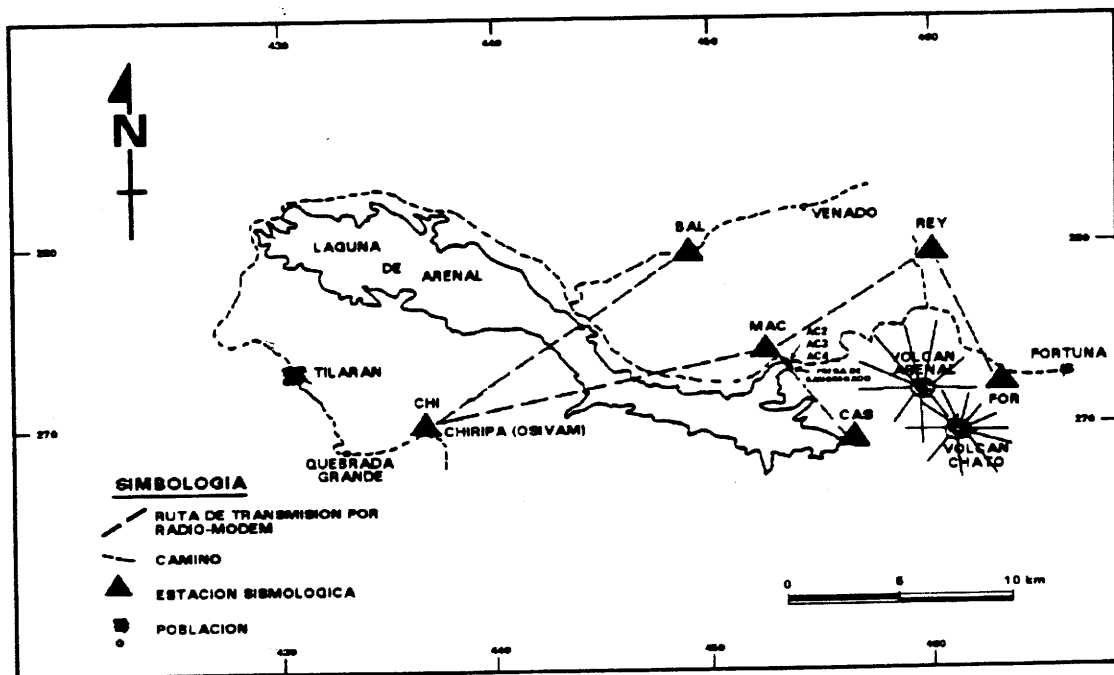


Figura 7: Detalle de la Red Sismológica Digital del volcán Arenal.

ESTADÍSTICAS DE LOS EVENTOS REGISTRADOS POR LA RED DIGITAL DE ARENAL

La red del Volcán Arenal registró 2810 eventos. La mayor parte de estos registros son volcánicos, principalmente de tipo tremor (Tipo T y Tipo LFE) y sismos explosivos (tipo E).

La tabla 2 muestra la cantidad de

registros obtenidos mensualmente durante el período analizado, en ella solo se hace distinción únicamente de dos grandes grupos, tipos E y T, dentro de ellos se incluyen los del tipo de baja frecuencia (LFE). Los tremores representan aproximadamente 4177 minutos (69,6 horas) de registro.

Tabla 2: Señales registradas por mes en la Red Sismológica Digital volcán Arenal, enero 1994 - julio 1995

Mes	Total de erupciones	Total de tremores	Minutos de tremor	Total registros
Enero 1994	86	7	5	93
Febrero 1994	0	0	0	0
Marzo 1994	2	0	0	2
Abril 1994	0	0	0	0
Mayo 1994	6	0	0	6
Junio 1994	160	23	24	183
Julio 1994	70	19	24	89
Agosto 1994	28	5	11	33
Setiembre 1994	166	31	110	197
Octubre 1994	217	37	85	254
Noviembre 1994	176	18	44	194
Diciembre 1994	180	68	175	248
Enero 1995	178	70	300	248
Febrero 1995	107	162	550	269
Marzo 1995	38	73	600	111
Abril 1995	30	90	400	120
Mayo 1995	111	145	750	256
Junio 1995	133	188	720	321
Julio 1995	91	95	379	186
Total	1779	1031	4177	2810

De los 1779 registros de erupciones, únicamente 206 se han registrado en tres estaciones o más, simultáneamente. Sin embargo, se han realizado sólo algunos cálculos de la localización del origen de las explosiones debido a que hasta ahora no se ha realizado un estudio detallado del modelo de corteza somero (primeros kilómetros).

En el total de los registros obtenidos, no se incluyen los sismos regionales que se han registrado en la red de Miravalles y de Arenal, simultáneamente.

Notese cómo durante los meses de febrero a mayo y durante agosto de 1994, la cantidad de registros fue escasa y en algunos meses de cero o nula. Esto se debió principalmente a que las antenas de transmisión y de recepción de las señales telefónicas, instaladas cerca de las antenas de la red sismológica de Arenal, generaba una señal residual dentro del ámbito de frecuencias utilizado por la red. Lo anterior fue comprobado por la Oficina de Telecomunicaciones del ICE, produciendo interferencia de señales y pérdida de información.

Para corregir el problema de la pérdida de información, en setiembre de 1994 se amplió la separación de las antenas de transmisión y recepción de la señal telefónica, con respecto a las antenas de transmisión y recepción de la señal de la red de Arenal, mejorándose con ello la recepción de las señales sísmicas.

Durante los meses de marzo y abril de 1995 se observa una disminución en la cantidad de registros, principalmente en las erupciones. Sin embargo, esta disminución

obedece a un cambio en la forma de selección de los registros que se desean archivar o conservar y no una disminución de la actividad del volcán. Después de observar que muchos de los registros obtenidos eran únicamente de una o dos estaciones, y que por ejemplo, para los meses de enero y febrero se gastaron más de 800 megavatios en archivos ISAM y 800 megavatios en archivos SEISAN, se tomó la decisión de salvar únicamente aquellas erupciones y tremores que se registraran en un mínimo de tres estaciones. Para el caso de los acelerógrafos instalados en la Presa de Sangregado, se archivan solo los registros de los sismos tectónicos, excepto cuando la erupción volcánica está registrada en todas las estaciones sismológicas y en los tres acelerógrafos.

Sin embargo, tal y como puede verse en la tabla anterior, los meses de mayo y junio se caracterizaron por un aumento en la actividad volcánica, esto es más cantidad de erupciones y de tremores registrados, ocupando los dos meses, más de 1200 megavatios sólo en los archivos del formato ISAM.

Un logro importante durante el primer semestre de 1995 fueron las pruebas realizadas para la determinación de la velocidad de la onda P entre el volcán Arenal y las cuatro estaciones más cercanas (FOR, REY, MAC y CAS). La velocidad promedio calculada con las cuatro estaciones fue de 1,07 kilómetros por segundo. Además, se calcularon velocidades de la onda sonora, que es muy cercana a los 340 m/s, análisis de la polarización de la onda del primer arribo y algunas comparaciones entre las señales registradas en las estaciones y las pruebas

visuales realizadas simultáneamente, para poder identificar los diferentes tipos de señales que son recibidas en el OSIVAM (Alvarado *et al.*, 1997).

Alvarado *et al.* (1997) sugiere que el origen de las erupciones en el Volcán Arenal, ocurren a una profundidad entre 200 y 600 metros del cráter. La localización de las erupciones utilizando sólo el tiempo de arribo de la onda primaria (onda P), y el modelo de corteza utilizado no daban una buena localización de las erupciones. Debido a ello, se utilizó una única velocidad única en el modelo de corteza, con el fin de realizar la localización de las erupciones ($V_p = 1,07$ km/s), asumiendo que la señal sísmica llega a las estaciones muy directamente y no sufre el efecto de las reflexiones y refracciones de la corteza superior. El resultado de esta técnica indica claramente que la ubicación en el plano horizontal mejora en forma considerable, con respecto al modelo de corteza anteriormente utilizado.

Como parte de las actividades del OSIVAM, se contó con la colaboración del geofísico Matthias Ohrnberger, quien como parte de su tesis de doctorado en proceso, logró la realización de varios programas de cómputo, entre ellos la adaptación de una metodología llamada "Array Techniques", que utiliza una estación de referencia y hace una correlación cruzada durante un mismo intervalo determinado en otras estaciones, para definir en una cuadrícula un punto o área de máxima correlación. Este máximo representa una dirección del origen de la señal sísmica.

Otro de los logros realizados por Ohrnberger es un programa que cambia el formato de los registros de aceleración en las estaciones Lennartz al formato Kinometrics, con el objetivo de poder hacer espectros de respuesta, siguiendo la misma metodología utilizada para el resto de los registros obtenidos por el ICE en los acelerógrafos de todo el país.

PRINCIPALES PROBLEMAS EXPERIMENTADOS EN LA RED DIGITAL DE ARENAL

Los principales problemas en las estaciones durante el primer período de 19 meses fueron:

- Anteriormente las estaciones MAC y BAL contaban sólo con un panel solar, por lo que fue necesario instalar cuatro paneles solares en cada una, a partir de julio de 1994, debido a que la señal se interrumpía durante la noche por falta de energía.
- Caída de un rayo en el transformador

que suministra la energía eléctrica a la estación CAS. Esto provocó una sobrecarga de voltaje que quemó la fuente, el GPS y el radio modem. Todos los equipos fueron reemplazados por equipos nuevos.

- La caída de un rayo en el OSIVAM en octubre de 1994, quemó el monitor y la entrada de corriente de la computadora utilizada para el control de las estaciones (gateway). Además, dañó el mars-88-212

conocido como estación CHI, que fue enviada a Alemania para su reparación.

- El transformador de 220 voltios a 12 voltios con 3 amperios que alimenta el GPS, el mars-88-212 y los dos radio-modem se quemó en febrero de 1995. Al no ser posible conseguir en el país este tipo de transformador, momentáneamente fue sustituido por dos transformadores de 110 voltios a 12 voltios y 5 amperios para suministrar la energía necesaria a los equipos.

- En junio de 1995 se dañó el convertidor del GPS de la estación MAC y fue cambiado por uno nuevo.

- Baterías dañadas en BAL y MAC, por la constante descarga de las mismas. Este problema fue solucionado en julio de 1995, cuando fue instalada la energía eléctrica.

- El acelerógrafo de la base en la Presa de Sangregado, tenía problemas con la transmisión de los datos hacia el OSIVAM. Se cambió el mars-88-213 que estaba en el observatorio por el mars-88-186 de la base y se solucionó el problema. Aparentemente, el dispositivo de telemetría dentro del equipo, no estaba funcionando correctamente, sin embargo, en el Observatorio, por ser la conexión directa al gateway no tuvo ningún problema.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La red sismológica de Miravalles, necesitaba de una buena calibración de los niveles de disparo del sistema, para obtener un rendimiento óptimo en la detección y grabación de eventos sísmicos. Este fue uno de los principales logros obtenidos a finales del año 1994 y principios del año 1995, donde la red se encontraba trabajando a un 90 % de su capacidad, debido a que dos estaciones (CMU y BAL) se encontraban gran parte del tiempo fuera por falta de suministro de energía eléctrica.

La cercanía de las antenas de transmisión de la central de teléfonos, instaladas cerca de las antenas de recepción/transmisión del OSIVAM, ocasionaron la interferencia de la señal y por ende la pérdida de información. Para

determinar la existencia de pérdida de información durante la transmisión, a inicios de 1995 se instaló, a modo de prueba, la estación portátil Lennartz por un día en las estaciones permanentes LIM y FOR. La estación portátil tenía los mismos parámetros de disparo que las estaciones, permitiéndonos saber con exactitud que fue lo que se registró en un período de cuatro horas en la portátil y que se fue lo que recibió en el OSIVAM. De los datos de la estación LIM, se recibió en el OSIVAM el 100% de lo registrado en la portátil, mientras que de la estación FOR, únicamente se recibió un 10%. Esto podría estar indicándonos tres situaciones: a) que las estaciones con transmisión directa al OSIVAM no tienen pérdida de datos, b) que en existe pérdida de datos cuando la señal debe pasar por un nodo de retransmisión y,

c) podría estar indicando una falla de los programas de interrogación. Para poder identificar la verdadera razón de la pérdida de información, será necesario realizar más estudios.

En fin, la cantidad de datos registrados en ambas redes aumentaron considerablemente, gracias a una mejor calibración de los parámetros de disparo. Para el caso de la red de Arenal, se deben seleccionar las señales que se van a almacenar en la base de datos, debido a la gran cantidad de información generada, en caso contrario, los discos ópticos serán gastados rápidamente. Para ello, solo se archivan aquellas señales que estén registradas como mínimo en tres estaciones. Los sismos tectónicos de ambas redes, son archivados aunque estén registrados solo en una estación. Además, los problemas de índole técnico fueron solucionados, en algunos casos en forma parcial, pero lo importante es que la red no ha dejado de funcionar por falta de recursos.

Definitivamente, es necesario mejorar el modelo de corteza, principalmente en lo referente a la parte que comprende al Campo Geotérmico. Para ello, además de esperar la ocurrencia de más sismos locales, es necesario coordinar algún tipo de actividad con la Oficina de Geofísica, para realizar pruebas con explosiones controladas y modelaje de velocidades de onda en el medio.

En los primeros meses del año 1995, se realizó un estudio de niveles de ruido en cada una de las estaciones de Miravalles, con el fin de determinar las frecuencias naturales predominantes en los sitios. Estos estudios

preliminares de ruido frecuencial han ayudado a poder desarrollar una metodología de estudio, que puede ser utilizado en las investigaciones de microzonificación sísmica, que podrá ser aplicarla en otros proyectos en todo el país. Se recomienda la realización de un estudio similar, pero utilizando una metodología de microzonificación sísmica más depurada en el CGM para obtener más y mejores resultados.

Los trabajos realizados con los registros de la red de Arenal, por parte de nuestros profesionales, aplicando a los registros una serie de metodologías, permitieron conocer las características más importantes de la dinámica interna del volcán Arenal y de las velocidades de la onda P. Además, es de suma importancia realizar con más detalle los análisis estadísticos de los diferentes tipos de señales, como las amplitudes máximas y frecuencias dominantes, para detectar los cambios que se puedan presentar temporalmente, en la actividad normal del volcán, así como para intentar identificar los parámetros que puedan indicar un aumento o disminución en la actividad sísmica. Adicionalmente, deben realizarse las pruebas de comparación entre lo observado visualmente y lo registrado por la estación portátil, lo que nos permitirá identificar en las estaciones, las diferentes señales emitidas por la actividad volcánica.

La elaboración de manuales de usuario para los diferentes equipos utilizados en el OSIVAM, permitieron la optimización de los recursos y un nivel técnico mucho mejor, del que hasta el momento se tenía, por parte de los profesionales y operadores que utilizan diariamente los equipos. La capacitación de las personas relacionadas con

el manejo de los equipos, programas y bases de datos sismológicas, se estará brindando en forma personal, es decir, cada persona podrá entrenarse durante el transcurso de su estadía en el OSIVAM. Sin embargo, se recomienda

la realización de un curso de capacitación para los profesionales, técnicos y operadores para finales de 1997, con el objetivo de actualizar conocimientos sobre los programas y equipos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no sería posible sin la colaboración de las personas encargadas del trabajo de campo y de las múltiples sugerencias y consejos de compañeros de oficina. Nuestros más sincero agradecimiento a todo el personal de la oficina de Sismología y Vulcanología. Extensivo resulta el agradecimiento a Dieter Stoll, Jens Havskov, Conrad Lindholm, Thomas Zenker y a Matthias Ohrnberger, por sus múltiples sugerencias en el procesamiento de la información y uso de los programas.

REFERENCIAS

Alvarado, G. E., Taylor, W. D., Ohrnberger, M., Soto, J. G. & Madrigal, L. A., 1997. First observations of volcanic seismicity at Arenal volcano (Costa Rica) using a new three-component digital network. -Boletín OSIVAM, 8 (15-16): en prensa; 1995.

Taylor W., 1995. Manual de uso de la estación portátil Lennartz. -Informe OSV.94.07.ICE; 32 pp.

Taylor, W. & Ohrnberger, M., 1997. Microzonificación sísmica preliminar del Campo Geotérmico de Miravalles. -Boletín OSIVAM, 7 (13-14): 34-52; 1994.

Boletín OSIVAM	1994	Año 7, No. 13 - 14	34 - 52	San José, Costa Rica, mayo 1997
----------------	------	--------------------	---------	---------------------------------

Microzonificación sísmica preliminar del Complejo Geotérmico de Miravalles

Waldo Taylor¹ & Matthias M. Ohrnberger²

¹Oficina de Sismología y Vulcanología, Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

²Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik, Ludwig-Maximilians-Universität München, Theresienstrasse 41/IV, 80333 München, Alemania. e-mail: mao@maxe.geophysik.uni-muenchen.de

Taylor, W. D. & Ohrnberger, M. M., 1997. Microzonificación sísmica preliminar del Complejo Geotérmico de Miravalles. -Bol. OSIVAM, 7 (13-14): 34 - 52, 1994; San José.

RESUMEN

En los últimos años, los trabajos de microzonificación sísmica han tomado mucha importancia en los estudios de riesgo y amenaza sísmica, con el fin de mitigar los desastres que un terremoto pueda generar. El Complejo Geotérmico de Miravalles (CGM) genera actualmente 55 megavatios de energía, y se espera que para el año de 1998 esté generando el doble de su capacidad. Por esta razón, actualmente se está en un proceso de integración de toda la información geológica, geofísica, sismológica y estructural que se ha obtenido a través de más de 10 años de estudios.

El CGM está construido sobre una zona de peligrosidad intermedia, es decir, la actividad sísmica de los últimos 10 años ha sido baja, entre 70 y 100 microsismos por año. Sin embargo, la presencia de fallas activas sugieren que es posible la generación de sismos locales de magnitudes Richter entre 6,0 y 6,5. En vista que la frecuencia natural del área está entre 2 y 5 Hz (períodos de 0,5 a 0,2 s), sugiere la posibilidad de que en caso de un evento sísmico local (períodos entre 0,3 y 0,8 s), se produzca algún tipo de resonancia entre el sismo y las edificaciones de un solo piso que en la región, por lo general, son construcciones de madera y block. Por otro lado, "Casa de Máquinas" es un edificio de cuatro pisos, sedimentado sobre depósitos volcánico-lásticos (depósitos de avalancha volcánica) de frecuencia natural de 4 Hz, que podría estar afectado en alguna medida por un sismo local, sin embargo, no se han realizado los estudios dinámicos estructurales de la misma.

ABSTRACT

In the last few years, seismic microzonation work has taken much interest for the seismic hazard studies, as a method for mitigation of disasters originated by earthquakes. The Miravalles Geothermal Complex generates 55 megawatts of energy at present and for the year 1998 the capacity will be probably doubled. For this reason, efforts toward the integration of the whole geological, seismological and structural data, obtained after more than 10 years of research, are been carried on.

The CGM was constructed within a zone of intermedius hazard, the seismic activity in the last 10 years has been low, between 70 to 100 micro-earthquakes per year. However, the presence of local active faults suggest the potential for earthquakes with magnitudes of 6,0 or even 6,5. Due to the fact that the natural period of this area is of 0,5 to 0,2 sec., there is probability of some kind of resonance with local earthquakes whose natural periods are between 0,3 and 0,8 sec. On the other hand, the Power House, which is a four story building and constructed over volcanoclastic deposits (volcanic flow deposits) with natural frequency of 4 Hz, could be affected in some way by a local earthquake, but structural dynamic studies for it has not been done yet.

INTRODUCCIÓN

Toda región posee características naturales propias, como las fallas, la geología, los niveles freáticos y los ámbitos de frecuencias generadas por la actividad humana y por las características propias de la naturaleza, como por ejemplo, el viento, los ríos y la actividad subterránea entre otros. El Complejo Geotérmico de Miravalles posee, además de todos estos factores, la actividad de la explotación geotérmica.

Con estudios espectrales del ruido en diferentes áreas, es posible determinar los ámbitos de las frecuencias máximas, promedio y mínimas de las diferentes fuentes, atenuación, etc. Las frecuencias de las fuentes de ruido urbanas y naturales, pueden ser filtradas a las señales sísmicas obtenidas en los diferentes puntos seleccionados, y así determinar curvas de isofrecuencias con las señales provenientes de la corteza superior.

La realización de un mapa de microzonificación sísmica del área,

utilizando la información geológica, geofísica, estructural y sismológica pueden aclarar, en buena medida, cuales zonas son de mayor peligrosidad sísmica. Además, el mapa final puede ser utilizado para explicar algún tipo de comportamiento de los fluidos en las capas subterráneas.

El presente trabajo nace como una inquietud surgida en la Comisión de Modelaje del Complejo Geotérmico de Miravalles, para poder determinar si existe algún patrón de frecuencias, que indique la existencia de alguna estructura geológica, geofísica o geotérmica.

En este trabajo se aplicó y adaptó la metodología de la "Respuesta Básica del Suelo (RBS)" en un área determinada, desarrollada por las Organización de la Naciones Unidas (ONU), dándole énfasis a la metodología de análisis del ruido sísmico natural, como un método rápido y de bajo costo para detectar cambios litológicos y estructurales en el área.

OBJETIVOS

Básicamente son cinco los objetivos ha alcanzar con este estudio:

- a- Determinar los ámbitos de frecuencias de las diferentes fuentes (urbanas y naturales).
- b- Filtrar las frecuencias de las fuentes

naturales y urbanas, que puedan afectar las señales sísmicas obtenidas en diferentes puntos del campo geotérmico. Con ello se pretende determinar las curvas de isofrecuencias con el fin de observar si existe algún patrón preferencial, que nos indique, por ejemplo, la

- dirección de los fluidos en los estratos productores. Lo anterior también puede servir para observar cambios en las frecuencias de un sitio con respecto a CMA, e identificar algún tipo de discontinuidad estructural entre dichos puntos.
- c- Recopilar la información geofísica, geológica, sismológica y hidrológica existente para relacionarla con el mapa de isofrecuencias generado.
 - d- Con la integración de todos los datos y utilizando la fórmula para la obtención de la respuesta total del suelo, recomendada por las Naciones Unidas (Burgos, 1990), se realizará el mapa preliminar de microzonificación sísmica.
 - e- Relacionar el mapa de ruido sísmico natural y el mapa de microzonificación sísmica, para observar si es posible utilizar el análisis frecuencial, como una metodología rápida y de bajo costo económico, para realizar estudios más avanzados, utilizando una base o punto de partida.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

La Oficina de Sismología y Vulcanología (OSV), cuenta con una estación sismológica portátil digital Lennartz, que fácilmente permitió la grabación de señales sísmicas, en las

diferentes estaciones temporales para el estudio. Además, se utilizaron las seis estaciones sismológicas digitales permanentes (Lennartz), como puntos base de auscultación continua (fig. 1).

Debido a ciertas dificultades en el terreno, no fue posible colocar la estación portátil cada 500 metros, por lo que se colocó en los lugares fácilmente accesibles

y en aquellos puntos, que por su importancia, era necesario realizar la medición, sin importar lo difícil del acceso.

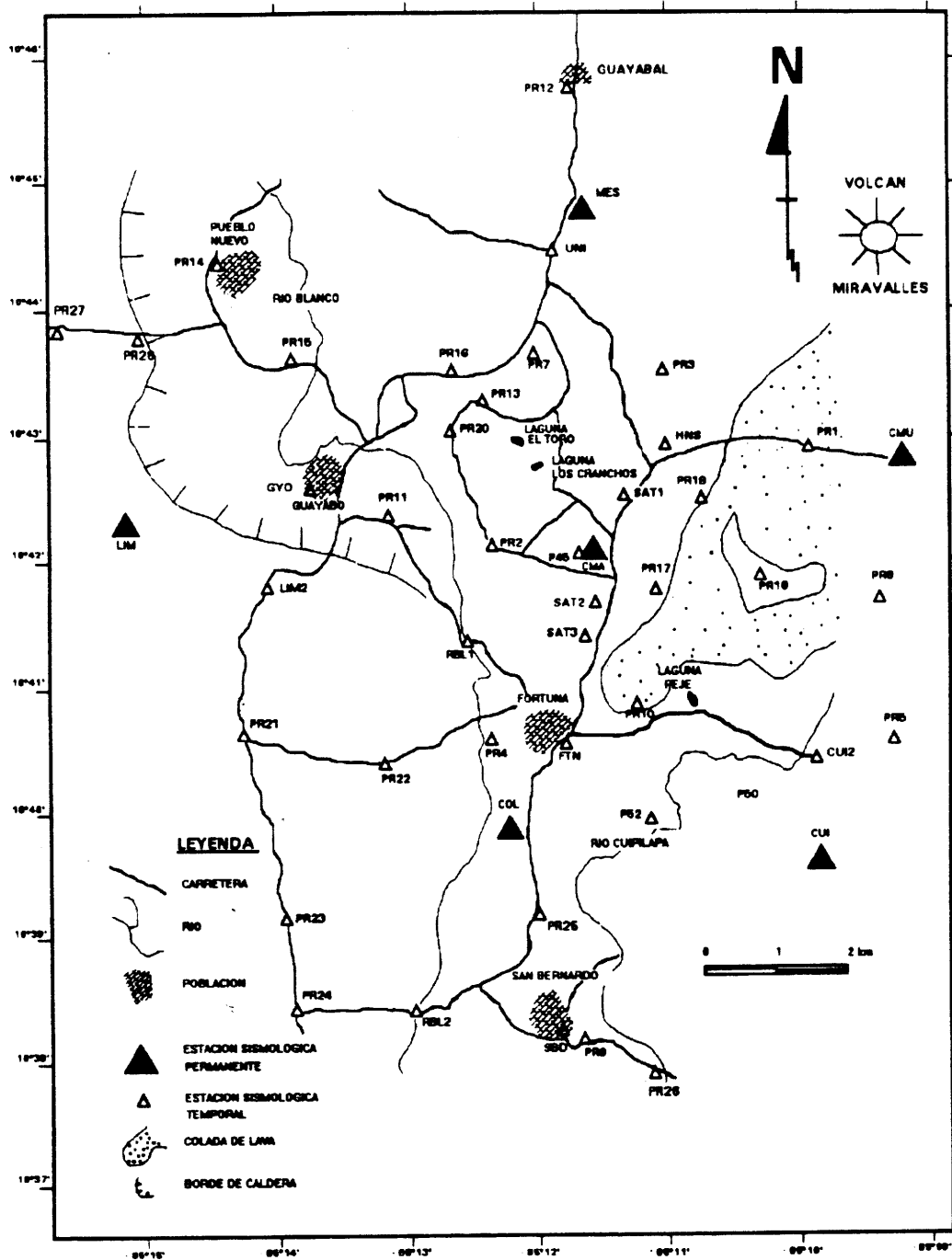


Figura 1: Localización de las estaciones sismológicas temporales y permanentes utilizadas en el estudio de ruido sísmico natural.

Para la detectar las frecuencias más importantes de las fuentes de ruido, se instaló la estación portátil en puntos clave, tales como a la orilla de un río, dentro de un bosque, cerca de la "Casa de Máquinas", a la orilla de la carretera, cerca de un pozo, hornillas, etc., con el propósito de definir claramente, las frecuencias de ruido natural de todas estas actividades.

Se compararon los registros obtenidos en las fuentes naturales, con los obtenidos en las estaciones permanentes, y con las estaciones puestas en puntos escogidos, con el fin de identificar las

diferentes señales en los espectros de frecuencias. Se utilizó también la información geofísica y geológica, generada por la Oficina de Geofísica y por la Oficina de Recursos Geotérmicos.

Los programas utilizados en los análisis de las señales y la realización de los mapas son el **Programmable Interactive Toolbox for Seismological Analysis (PITSA)**, versión 4.0), desarrollado por Schermbaum & Johnson (1993), y el programa **Generic Mapping Tool (GMT)**, hecho por Smith & Wessel (1990).

MARCO TEÓRICO

Realización del mapa de isofrecuencias para el ruido sísmico natural

Los registros de las señales de ruido, representan la señal que se genera en la corteza superior. Generalmente, aún después de filtrar las señales de ruido ambiental (natural y urbano), el origen o la fuente de las mismas resulta desconocida, pues provienen de fuentes localizadas en el subsuelo.

Por ello la mejor manera de realizar un estudio de este tipo, es colocando una estación sismológica en cada punto y analizar un mismo intervalo en todas las estaciones. De esta manera, se analizaría la misma señal en los diferentes lugares y se obtendría un mapa de isofrecuencias de mayor veracidad. Sin embargo, debido a que en nuestro medio esto es imposible,

porque se necesitarían más de 50 estaciones, se utilizó una sola estación que se colocaba en cada punto y se registraba por 20 ó 30 minutos.

Al realizar los análisis correspondientes, se observó que a las señales se les debía realizar corrección de línea base antes de ser analizadas espectralmente, y un filtro pasa-bajo de 10 Hz, para eliminar todas las señales de ruido proveniente de las actividades urbanas.

La aplicación de un filtro pasa-bajo permite eliminar de la traza original, todas las señales que están por arriba del valor seleccionado, en este estudio específico, se decidió utilizar únicamente las señales menores a 10 Hz, debido al alto ruido que se genera de los pozos y de la Casa de Máquinas.

Una de las ventajas de trabajar con señales de baja frecuencia es, que en cierta forma, reflejan el movimiento de los fluidos que viajan a velocidad muy baja. Por otro lado, las señales sísmicas provenientes del subsuelo, por lo general tienen frecuencias naturales inferiores a los 10 Hz. Además, la litología del área presenta rocas, suelos firmes y suelos blandos, rocas densas y menos densas, fallas geológicas y estructuras volcánicas. Estas permiten observar cambios en las bajas frecuencias, relacionados directamente al cambio en la estratigrafía, geología estructural y al movimiento de fluidos por los estratos y estructuras del subsuelo.

Claramente se podían observar dos ámbitos de frecuencias: uno de 2 a 5,5 Hz y otro de 6 a 9 Hz, por lo que se optó calcular el promedio de los picos predominantes para cada ámbito de frecuencias que fueran mayor o igual a la mitad de la amplitud del pico máximo. Dentro del ámbito mayor a los 6 Hz, no se obtuvieron buenos logros, pues resultó en una dispersión concéntrica alrededor de Casa de Máquinas. Sin embargo, con el ámbito entre 2 y 5,5 Hz se generaron los mapas de 150 frecuencias de ruido sísmico natural.

Realización del mapa de microzonificación sísmica

Con los datos de frecuencias naturales, geofísicos, geológicos, sismológicos y hidrológicos se decidió

utilizar la fórmula de las naciones Unidas y que fuera aplicada por Burgos (1990).

Este método de valoración, relaciona los factores físicos que componen el suelo, con los elementos sísmicamente significativos que lo acompañan en presencia del fenómeno. Este valor índice combinado, se presenta como la "respuesta básica del suelo (RBS)" a los efectos de un impacto geológico de orden catastrófico (Burgos, 1990). El valor RBS para el Complejo Geotérmico de Miravalles está definido por la relación:

$$RBS = ts + fa + f + g + as$$

donde "ts" depende del tipo de suelo, "fa" se relaciona con la presencia de fallas, "f" con la frecuencia del ruido sísmico natural, "g" con los máximos o mínimos gravimétricos y "as" con la actividad sísmica asociada a un área. Cada uno de estos términos puede tomar valores, correspondientes con la información de la valoración y con la ponderación combinada que se explicará más adelante.

Según los estudios de amenaza sísmica que se han desarrollado en la región, estos sugieren la posibilidad de ocurrencia de un sismo de moderada magnitud ($M_L = 6,0$). De ahí la importancia de identificar los sitios que podrían producir efectos negativos en la infraestructura existente y futura.

RESULTADOS

Ruido Sísmico Natural

Las fuentes de ruido existentes en el Complejo Geotérmico de Miravalles provienen tanto de fuentes urbanas como de fuentes naturales.

a- Determinación de frecuencias urbanas:

Las fuentes urbanas son aquellas que generan ámbitos de frecuencias producidas por la constante actividad humana, como centros urbanos y carreteras. Dentro de ellas, podemos localizar las fuentes urbano-naturales, producidas por la explotación geotérmica, como son los pozos, los satélites y la "Casa de Máquinas". Generalmente, estas frecuencias superan los

15 Hz, por lo tanto el ruido producido se convierte en ondas sonoras.

Se seleccionaron varias fuentes para tener un amplio ámbito de frecuencias. Se escogieron aquellas que podrían estar introduciendo ruido a las estaciones permanentes y a las que únicamente fueron colocadas para la medición de las frecuencias en un punto específico.

La tabla 1 muestra los ámbitos defrecuencias frecuencias predominantes de cada una de las fuentes estudiadas. Estas fuentes son carreteras, pozos geotérmicos, poblados y el centro de generación eléctrica donde se encuentra el generador (conocido como "Casa de Maquinas").

Tabla 1: Información general de las fuentes urbanas de ruido

Sigla	Nombre	Latitud	Longitud	Frecuencias (Hz)
CMA	Casa de Máquinas	10°42,04'	85°11,57'	10, 7-28
P45	Pozo 45	10°41,92'	85°11,78'	8-11,17-27
GYO	Guayabo	10°42,50'	85°14,07'	5, 8-10
FTN	Fortuna	10°40,50'	85°12,00'	todas
UNI	La Unión	10°44,15'	85°12,11'	3-27
SAT1	Satélite 1	10°42,52'	85°11,35'	7-40
SAT2	Satélite 2	10°41,44'	85°11,52'	9-29
SAT3	Satélite 3	10°41,17'	85°11,58'	7-11, 13-18
SBD	San Bernardo	10°38,27'	85°12,03'	9-29
LIM2	Limonas 2	10°41,66'	85°14,14'	11-28
CUI2	Cuipilapa 2	10°40,30'	85°09,80'	9-29
P52	Pozo 52	10°39,90'	85°11,25'	20
P50	Pozo 50	10°40,10'	85°10,60'	11, 17-25

Las estaciones UNI y LIM2 fueron realizadas sobre la carretera

Las estaciones GYO, CUI2, SBD y FTN fueron realizadas en los poblados correspondientes.

b- Determinación de frecuencias naturales:

Dentro de las fuentes naturales, podemos citar los ríos, el viento y actividad volcánica como las hornillas. Sin embargo, el elemento eólico no influye en los

registros de las estaciones permanentes, porque los sensores se encuentran protegidos.

La tabla 2 muestra la información de las frecuencias dominantes en las fuentes de ruido natural.

Tabla 2: Información general de las fuentes naturales de ruido

Sigla	Nombre	Latitud	Longitud	Frecuencias (Hz)
RBL1	Río Blanco 1	10°41,18'	85°12,63'	1-3
HNS	Hornillas	10°42,83'	85°10,92'	todas
RBL2	Río Blanco 2	10°38,30'	85°13,06'	2-3, 9-27
CMU	Cabro Muco	10°43,06'	85°09,50'	9-29

La estación CMU se tomó como una fuente natural, debido a que se encuentra muy cerca del Río Cuipilapa.

Las tablas 1 y 2 muestran que las frecuencias de ruido generalmente tienen influencia arriba de los 10 Hz, por lo que se decidió filtrar las señales obtenidas en las estaciones permanentes y temporales, utilizando un filtro pasa-bajo de 10 Hz. De esta manera, en los análisis espectrales realizados, se minimiza la influencia de las altas frecuencias, especialmente la señal del generador de Casa de Máquinas (10,5 Hz).

c- Determinación de frecuencias en las estaciones permanentes y en las estaciones temporales:

Para obtener las frecuencias naturales de ruido en cada estación permanente, se utilizaron los registros de muchos falsos disparos, que son producto del ruido ambiental existente. Así, se analizaron las múltiples señales registradas

cada hora, durante una noche completa (de 6 de la tarde a 6 de la mañana), con el objetivo de obtener los espectros representativos de cada una, en el momento que hay menos ruido urbano. Se tomaron tres muestras de dos minutos por hora y para cada estación, esto represento el análisis de más de 100 espectros, obtenidos de seis sismómetros.

Las estaciones temporales fueron ubicadas en sitios estratégicos, para tener una buena cobertura de puntos con datos de frecuencias. El tiempo de registro en cada estación fue de 20 ó 30 minutos, y se hizo el análisis frecuencial en tres muestras seleccionadas de dos minutos de duración cada una. En casos especiales, se hicieron más de cuatro muestras, especialmente en aquellos sitios importantes por su ubicación dentro del área geotérmica. Todo este

trabajo representó el análisis de más de 400 espectros, obtenidos en 45 estaciones diferentes. La localización de todas las estaciones que se utilizaron en el estudio, se muestran en la figura 1.

Tanto a estas señales, como a las obtenidas en las estaciones permanentes, se les aplicó una corrección de línea base y un filtro pasa-bajo de 10 Hz, con el fin de atenuar las señales generadoras de ruido, analizar las señales limpias provenientes del subsuelo, y generar los mapas de

isofrecuencias requeridos para observar los patrones predominantes.

Para el ámbito de frecuencias entre 2 y 5,5 Hz, se obtuvieron los resultados de los promedios de las amplitudes máximas de las frecuencias, provenientes posiblemente de las fuentes ubicadas tanto en superficie como bajo esta, y que están influenciadas por las condiciones geológicas de la región. La tabla 3 muestra la frecuencia promedio obtenida en cada estación.

Tabla 3: Recurrencias promedio en las estaciones permanentes y temporales

Sigla	Nombre	Latitud	Longitud	Frecuencia (Hz)
MES	Mesas	10°44,44'	85°11,67'	3,0
LIM	Limonal	10°41,85'	85°15,15'	3,7
COL	Colonia	10°39,95'	85°12,23'	3,3
CUI	Cuipilapa	10°39,44'	85°09,82'	3,5
CMU	Cabro Muco	10°42,85'	85°09,18'	2,7
CMA	Casa Máquinas	10°42,04'	85°11,57'	4,0
PR1	Prueba 1	10°42,90'	85°10,01'	4,0
PR2	Prueba 2	10°42,03'	85°12,50'	4,7
PR3	Prueba 3	10°43,47'	85°11,04'	3,5
PR4	Prueba 4	10°40,68'	85°12,66'	4,0
PR5	Prueba 5	10°40,59'	85°09,22'	2,3
PR6	Prueba 6	10°40,67'	85°08,76'	3,0
PR7	Prueba 7	10°43,48'	85°12,20'	2,7
PR8	Prueba 8	10°41,52'	85°09,41'	3,4
PR9	Prueba 9	10°38,18'	85°11,65'	3,0
PR10	Prueba 10	10°40,61'	85°10,95'	2,8
PR11	Prueba 11	10°42,16'	85°13,35'	2,5
PR12	Prueba 12	10°45,97'	85°11,80'	3,3
PR13	Prueba 13	10°42,96'	85°12,48'	3,5
PR14	Prueba 14	10°43,95'	85°14,48'	2,6
PR15	Prueba 15	10°43,25'	85°14,05'	3,1
PR16	Prueba 16	10°43,17'	85°12,63'	3,5
PR17	Prueba 17	10°41,56'	85°11,11'	3,3
PR18	Prueba 18	10°41,61'	85°10,59'	2,9
PR19	Prueba 19	10°42,54'	85°10,75'	2,5
PR20	Prueba 20	10°42,66'	85°12,64'	2,3
PR21	Prueba 21	10°40,65'	85°14,35'	2,7

Tabla 3 (continuación): Frecuencias promedio en las estaciones permanentes y temporales

Sigla	Nombre	Latitud	Longitud	Frecuencia (Hz)
PR22	Prueba 22	10°40,51'	85°13,43'	2,8
PR23	Prueba 23	10°38,94'	85°14,02'	3,7
PR24	Prueba 24	10°38,22'	85°13,77'	2,8
PR25	Prueba 25	10°39,15'	85°12,17'	2,8
PR26	Prueba 26	10°37,75'	10°11,26'	3,1
PR27	Prueba 27	10°43,51'	85°15,68'	2,5
PR28	Prueba 28	10°43,45'	85°15,28'	2,6

Para tener más puntos con frecuencias promedio, se decidió utilizar las pruebas que se habían realizado en las fuentes de ruido naturales y urbanas, y

sacar las frecuencia promedio entre el ámbito de 2,0 y 5,0 Hz, los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4: Frecuencias promedio en las fuentes urbanas y naturales de ruido

Sigla	Nombre	Frecuencia (Hz)
P45	Pozo 45	5
GYO	Guayabo	2,9
FTN	Fortuna	todas
UNI	La Unión	3
SAT1	Satélite 1	4,7
SAT2	Satélite 2	todas
SAT3	Satélite 3	3,5
SBD	San Bernardo	3,8
LIM2	Limonal 2	3,2
CUI2	Cuipilapa 2	3,0
P52	Pozo 52	4,5
P50	Pozo 50	3,5
RBL1	Río Blanco 1	4,0
RBL2	Río Blanco 2	2,6
HNS	Hornillas	3,8

ANÁLISIS DEL MAPA DE LAS FRECUENCIAS DEL RUIDO SÍSMICO NATURAL

Con toda la información de las estaciones, se procedió a crear el mapa de las frecuencias del ruido sísmico natural, para el ámbito entre 2 y 5. La figura 2, realizada con el programa GMT (Smith & Wessel, 1990), representa el comportamiento del ruido sísmico natural en la superficie. Claramente puede verse hacia el centro de la figura, una zona con un ámbito de frecuencias entre 3,2 y 5 Hz, que forman una herradura. Esta zona está rodeada por zonas de mas baja frecuencia (de 2 a 3,1 Hz). Adicionalmente, podemos mencionar que las pruebas hidráulicas con trazadores en el manto productor, sugirieron una forma similar. Sin embargo, faltan algunos pozos por perforar en zonas estratégicas, por lo que no se puede asegurar la dirección de los fluidos, es por esto que estas pruebas no se incluyen en este estudio.

a. Relación entre el mapa de ruido sísmico natural y el mapa geológico:

Al comparar el mapa geológico del área (fig. 3), realizado por Fernández (1984), con el mapa de isofrecuencias obtenido, se ve claramente que la distribución de frecuencias está altamente influenciado por las condiciones geológicas existentes.

Los lahares y depósitos de avalancha volcánica, que ocupan gran parte del área central en forma de herradura, lo cual fácilmente puede relacionarse con la herradura que forma la zona de frecuencias entre 3 y 5 Hz. Además, la prolongación de

esta zona hacia el noreste podría estar asociada con la alineación de los cráteres volcánicos y la falla regional existente.

Las frecuencias que presentan las lavas, las tobas, los depósitos lacustres y los rellenos aluviales, no pueden ser diferenciados entre sí, debido a que sus frecuencias son similares (entre 2 y 3 Hz), pero si evidencian formas claramente relacionados con la forma de las litologías.

b. Relación entre el mapa de ruido sísmico natural y el mapa residual de anomalías de Bouguer:

Este mapa microgravimétrico residual (ICE, 1995) calculado con una poligonal de orden 3, fue realizado por la Oficina de Geofísica en agosto de 1995 (el mapa no se incluyó en el presente trabajo). A pesar de que no existe una relación entre un valor gravimétrico y un valor de frecuencia, en general, si es posible observar relaciones con máximos y mínimos gravimétricos y concentraciones de frecuencias en algunos puntos. En otras palabras, generalmente cuando hay un cambio de un máximo a un mínimo gravimétrico, se puede ver también un cambio frecuencial, aunque no en una coincidencia perfecta pero si con cierto grado de relación.

Como por ejemplo, en la parte sur del área estudiada, existen dos zonas que son consideradas como máximos y mínimos gravimétricos, una al suroeste y otra al sureste del poblado de San Bernardo, con

valores que van desde -9 a 11 miligales. En el mapa de ruido sísmico aparecen dos concentraciones de frecuencias entre 2 y 2,5 Hz, más o menos localizadas en la misma región. Otro ejemplo puede verse al

suroeste de la Laguna Mogote, donde hay un máximo gravimétrico con valores entre -1 y 6 miligales, y en la figura 2 aparece una concentración de frecuencias con valores entre 3,3 y 3,7 Hz.

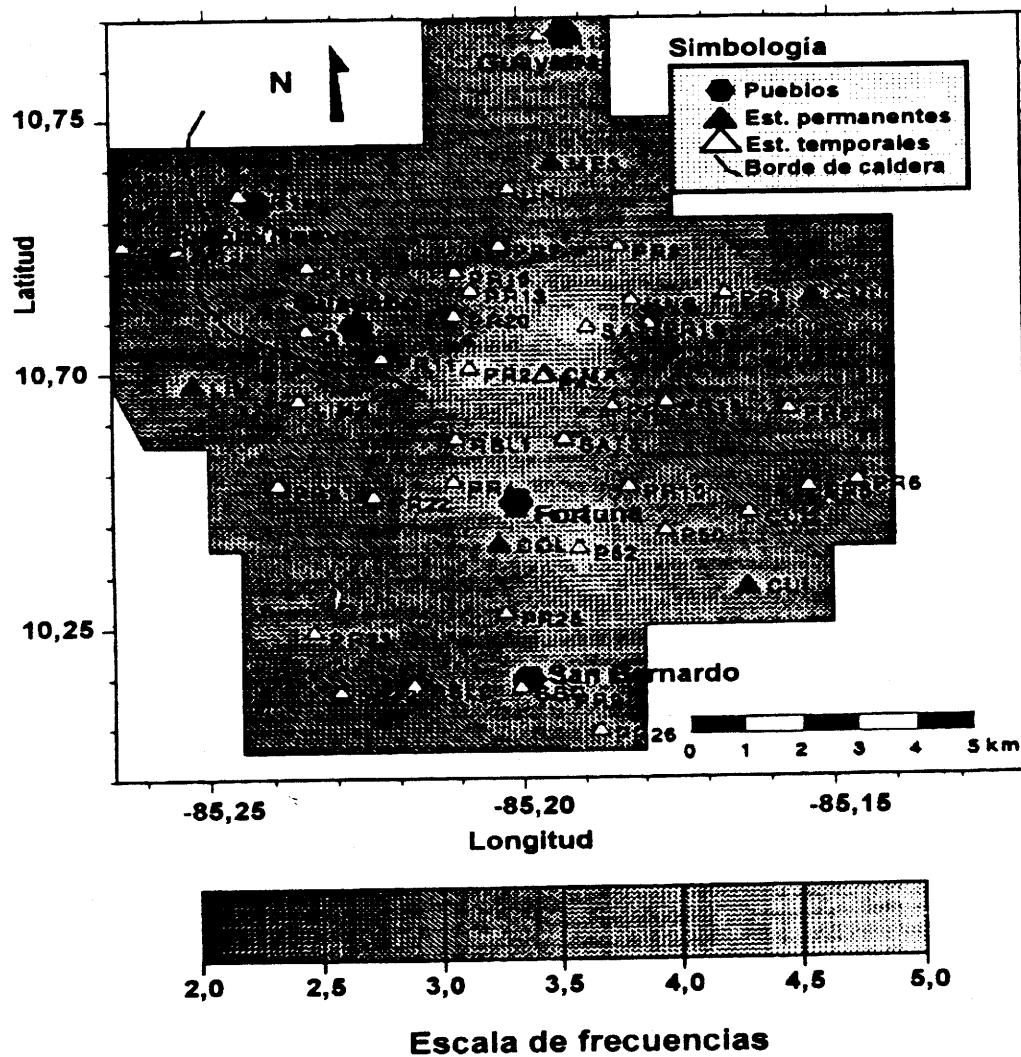


Figura 2: Mapa de frecuencias del ruido sísmico en el Complejo Geotérmico de Miravalles.

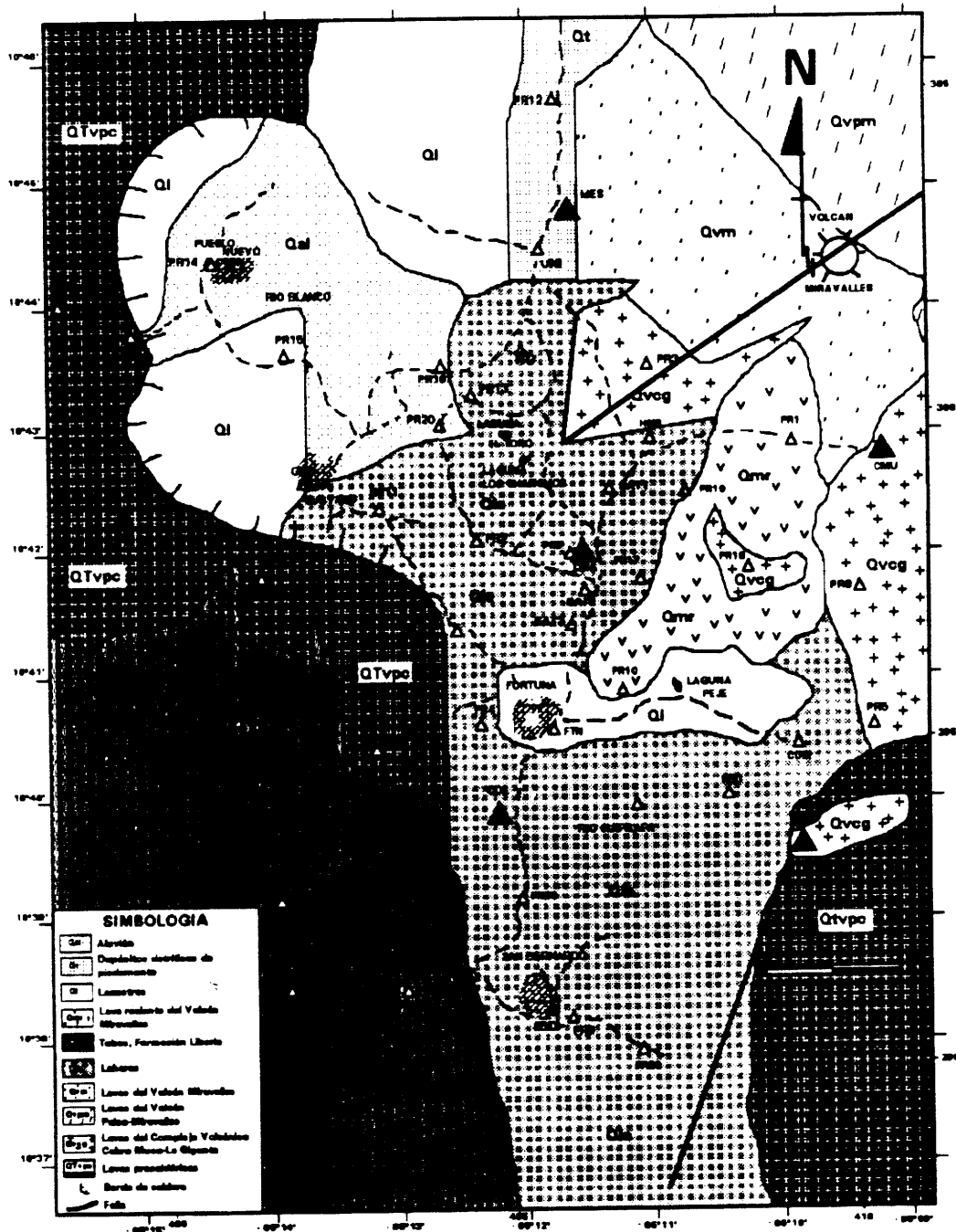


Figura 3: Mapa de la geología del área sobre la cual se desarrolló el Complejo Geotérmico de Miravalles, según Fernández (1984).

Por otro lado, si se analiza el mapa gravimétrico residual en un sentido amplio y simplista, se puede pensar en la posibilidad de que el área central del campo geotérmico (con dirección N-S), se caracteriza por tener valores entre -3 y 3 miligales; los máximos y mínimos que se observan, podrían ser el reflejo de la gran cantidad de tuberías y construcciones.

Esta tendencia toma un sentido E-W en la parte sur del área. El mapa de ruido sísmico aparentemente, presenta esta misma tendencia con las frecuencias que van entre 3 y 5 Hz, lo que podría estar indicando algún tipo de estructura en este mismo sentido.

MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

Con la recolección de todos los datos disponibles es posible realizar la valoración y la ponderación combinada, para lo cual se

dividió el área en cuadrículas de 500 m x 500 m. La valoración utilizada puede resumirse en la tabla 5.

Tabla 5: Tabla de valoración

Indicador	Clasificación	Valoración Parcial	Valoración Ponderada
Tipo de suelo (ts)	Lavas	muy densas	0
	Tobas	densas	1
	Lahares	depósitos de avalancha	2
	Lacustres y aluviales	rellenos en los valles	3
Fallas geológicas (fa)	Inexistencia	nula	0
	Existencia	inferidas o reales	2
Frecuencia sísmica (f)	Muy baja frecuencia	2,0 a 3,0 Hz	1
	Baja frecuencia	3,1 a 5,0 Hz	2
Gravimetría (g)	Mínimo gravimétrico	-11 a -4 miligales	1
	Gravimetría normal	-3 a 3 miligales	0
	Máximo gravimétrico	4 a 11 miligales	-1
Actividad (as) sísmica	Con nula o poca actividad	0 a 3 sismos/km ² /año	0
	Con actividad	4 o más sismos/km ² /año	1

Cada cuadrícula es analizada junto con el mapa geológico, el mapa residual de anomalías de Bouguer, el mapa de ruido sísmico natural, el mapa de actividad sísmica, el mapa de geología estructural y la información de las perforaciones.

De esta forma el máximo valor posible de obtener en un área será de 9. La figura 4 muestra el valor de ponderación combinada para cada cuadro.

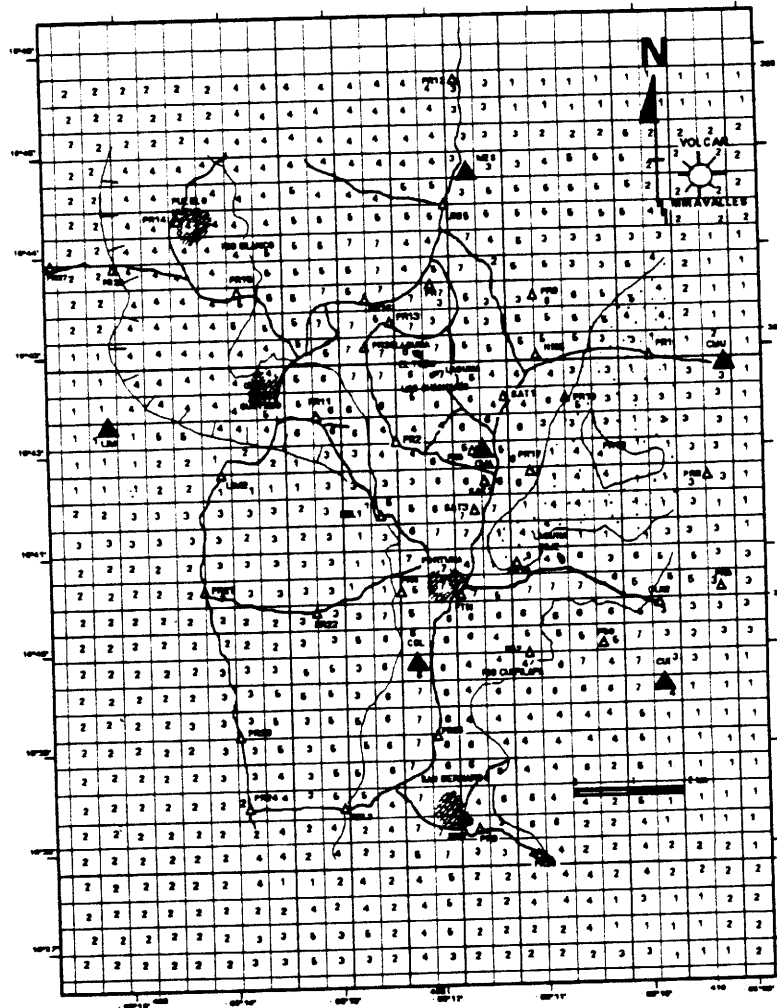


Figura 4: Mapa de ponderación combinada para cuadrículas de 500 m X 500 m realizada para la microzonificación sísmica, utilizando la "RBS".

A este conjunto de valores se le aplicó el programa GMT para el mapa de

microzonificación sísmica, dando como resultado el mapa mostrado en la figura 5.

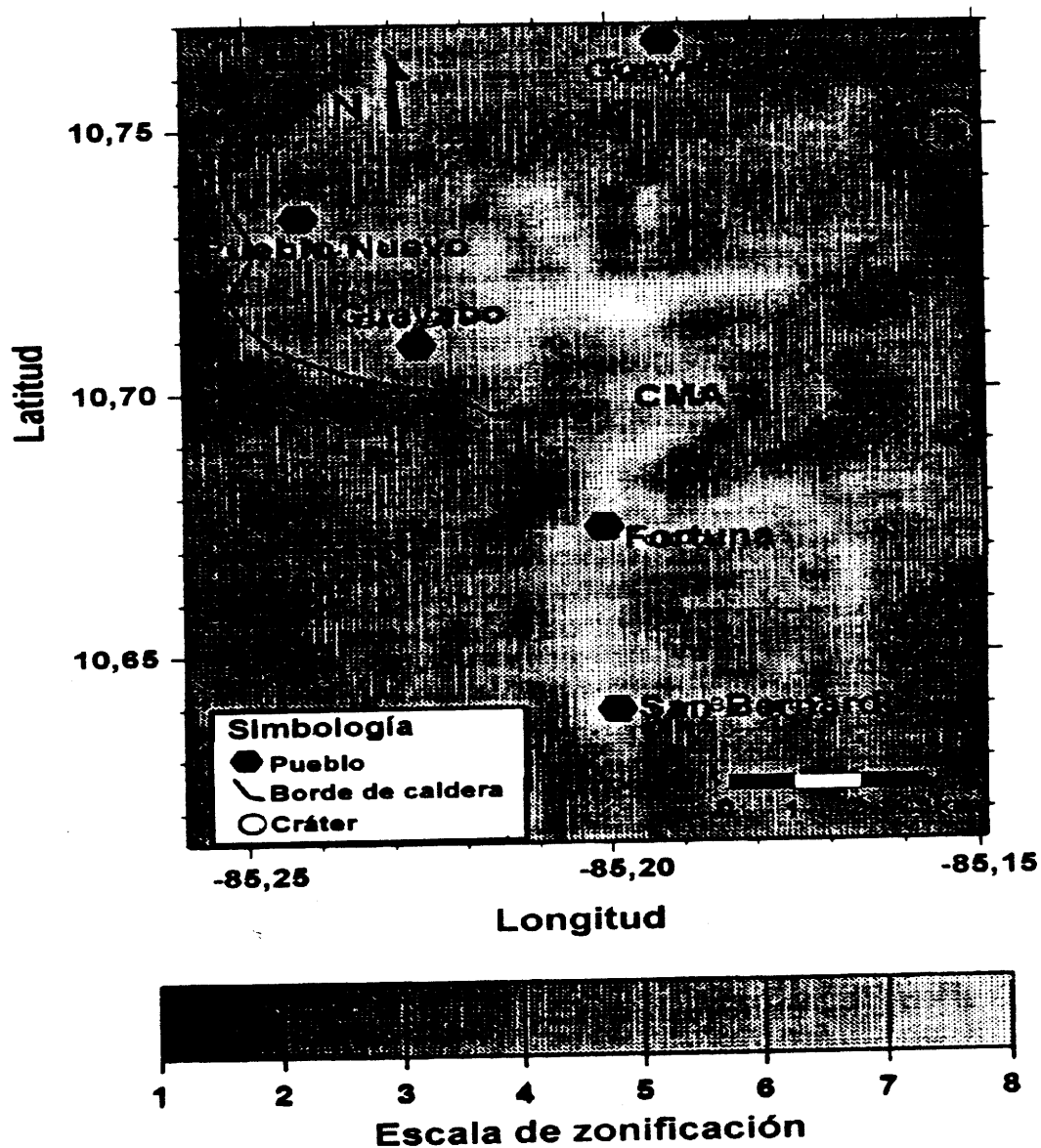


Figura 5: Mapa de zonificación sísmica del Complejo Geotérmico Miravalles.

Si existe realmente una relación o es válida una posible comparación entre el mapa de microzonificación obtenido con el mapa de ruido sísmico natural, se observa claramente que la forma de herradura, en el fondo sigue manteniéndose, aunque claro está, el mapa de microzonificación sísmica define con un sentido más amplio, las diferentes zonas de peligrosidad, y refleja las condiciones geológicas.

Es importante considerar el método de ruido sísmico, como una metodología rápida y de bajo costo económico, para definir un área con posibilidad de presentar gran vulnerabilidad y reacción ante los eventos sísmicos, sirviendo como guía para realización de los estudios más complejos y significativos.

La principal conclusión que se puede rescatar de este mapa, es que la región geológicamente más activa y peligrosa, se localiza justamente en las áreas donde se desarrollan las perforaciones de los pozos y donde se localiza la Casa de Máquinas.

Las zonas de mayor peligrosidad (tonos más claros), están relacionados con la presencia de materiales aluvionales o lacustres y la presencia de fallas acompañadas de actividad sísmica. Las zonas más seguras son las que están compuestas por rocas densas y menos densas (lavas y tobas), con presencia de máximos gravimétricos, precisamente debido a su densidad, con pocas fallas y poca actividad sísmica y con niveles freáticos superiores a los cuatro metros de profundidad.

CONCLUSIONES

La metodología aplicada para la realización del mapa de ruido sísmico natural, a pesar de que no es la mejor o única, demostró ser funcional, especialmente cuando únicamente se tiene para trabajar una sola estación sismológica digital. Es una forma rápida, económica y confiable para los estudios geológicos preliminares de una región, que ayudará en los trabajos de geología de campo y en la microgravimetría.

La metodología de la "Respuesta Básica del Suelo", sugerida por la Organización de las Naciones Unidas, es aplicable en todas las regiones de intereses socio-económicos, por ello se decidió

aplicarla en el Complejo Geotérmico de Miravalles (CGM), cuyos resultados serán aplicados en estudios posteriores de mayor tecnología.

Los estudios de microzonificación sísmica, realizados en el área en la que se desarrolló el CGM, sugieren y comprueban lo que estudios anteriores habían demostrado. Se trata de un área con una zona central, compuesta de depósitos aluvionales, sedimentos lacustres, laháricos y de avalancha, con baja actividad sísmica, pero capaz de producir un sismo de moderada magnitud ($M_L = 6,0$). En dicha zona es muy posible que se produzcan pocos daños en las edificaciones de una

planta. Los posibles daños y efectos que se produzcan en las tuberías de los pozos productores y de inyección (pozos de 1,5 y 2,0 kilómetros de profundidad) y en el edificio de cuatro pisos de "Casa de Máquinas", serán estudiados en el futuro por los ingenieros estructurales del ICE, debido a que estos se localizan justamente

sobre las áreas de mayor peligro.

Por las características geológicas, geofísicas, estructurales y sismológicas, claramente se nota que la región de mayor peligrosidad está formada por las zonas con los depósitos lacustres, aluvionales y laháricos.

Agradecimientos: El presente trabajo fue revisado varias veces en sus diferentes etapas de avance por el Dr. Guillermo Alvarado, a quien expresamos nuestro agradecimiento.

BIBLIOGRAFÍA

Burgos, M., 1990. Primera aproximación a una microzonificación sísmica del Gran Mendoza. -Seminario Internacional de Microzonificación y de Seguridad de Sistemas de Servicios Públicos vitales. 23 de agosto-7 de setiembre de 1990, Lima-Perú, 16 pp.

Fernández, E., 1984. Mapa Geológico del Proyecto Geotérmico de Miravalles.- Tesis de Licenciatura, Escuela Centroamericana de Geología, x + 106 pp. San José, Costa Rica.

ICE, 1995. Proyecto Geotérmico Miravalles. Informe Geofísico. Actualización No. 2. Dpto. Recursos Geotérmicos, Dpto. Ing. Geológica y Of. Geofísica Aplicada. 56 pp + 4 mapas.

Scherbaum, F. & Johnson J., 1993. PITSA, Programmable Interactive Toolbox for Seismological Analysis.- IASPEI Software Library, 210 pp.

Smith, W. H. F. & Wessel, P., 1990. GMT, Generic Mapping Tool.- Geophysics, 3: 293-305.

Boletín OSIVAM	1994	Año 7, No. 13 - 14	53 - 57	San José, Costa Rica, mayo 1997
----------------	------	--------------------	---------	---------------------------------

La actividad del volcán Arenal durante 1994

Gerardo J. Soto, Oficina de Sismología y Vulcanología, Instituto Costarricense de Electricidad, Apdo. 10032-1000, Costa Rica.

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

INTRODUCCIÓN

Durante 1994, el Arenal mantuvo su característica actividad presentada durante las dos últimas décadas: exhalativa, estromboliana y efusiva de lavas blocosas. Hubo además derrumbes de los frentes de lavas, que causaron pequeños flujos calientes de escombros durante setiembre. Después del 28 de agosto de 1993, cuando se desprendió parte de la pared WNW del cráter activo y se evacuó el lago de lava (véase Soto

et al., 1996), éste se reinstaló como alimentador de las coladas de lava desprendidas hacia el valle de Tabacón, durante todo el año 1994. Se caracterizan eventos colaterales como la caída de cenizas y la actividad sismovolcánica. No se registraron, durante los muestreos del año, cambios significativos en los manantiales calientes y fríos alrededor del volcán.

ACTIVIDAD EXHALATIVA

Las fumarolas de la cúspide (cráteres C y D, incluyendo zonas periféricas) continuaron exhalando gases sulfurados, clorurados y vapor de agua durante todo el año, que fueron mayoritariamente orientados eólicamente hacia el flanco oeste del volcán

(bisectriz dirigida hacia el WSW). La actividad era bastante vigorosa, principalmente desde un punto cercano al de emisión de la lava, en la parte norte del lago de lava del cráter C.

ACTIVIDAD EXPLOSIVA

Durante el año se caracterizó por explosiones estrombolianas moderadas, con penachos de ceniza de hasta 1200 m sobre el cráter, acompañadas por desgasificaciones menores y eventos de salida súbita de gases, o bien emisiones de cenizas sin onda sonora (eventos "mudos"). Basados en la cantidad de ceniza caída y en el tamaño de grano en el flanco oeste (tabla 1), podemos afirmar que

las explosiones eran discretas. En marzo se inició la construcción de conitos piroclásticos en la salida de lava desde el anfiteatro de la avalancha de agosto de 1993. Dos conos pequeños fueron bien observados en octubre (fig. 1): uno de tipo compuesto al norte, desde donde se evacuaba la lava, y uno al sur dentro del cráter, eminentemente piroclástico.

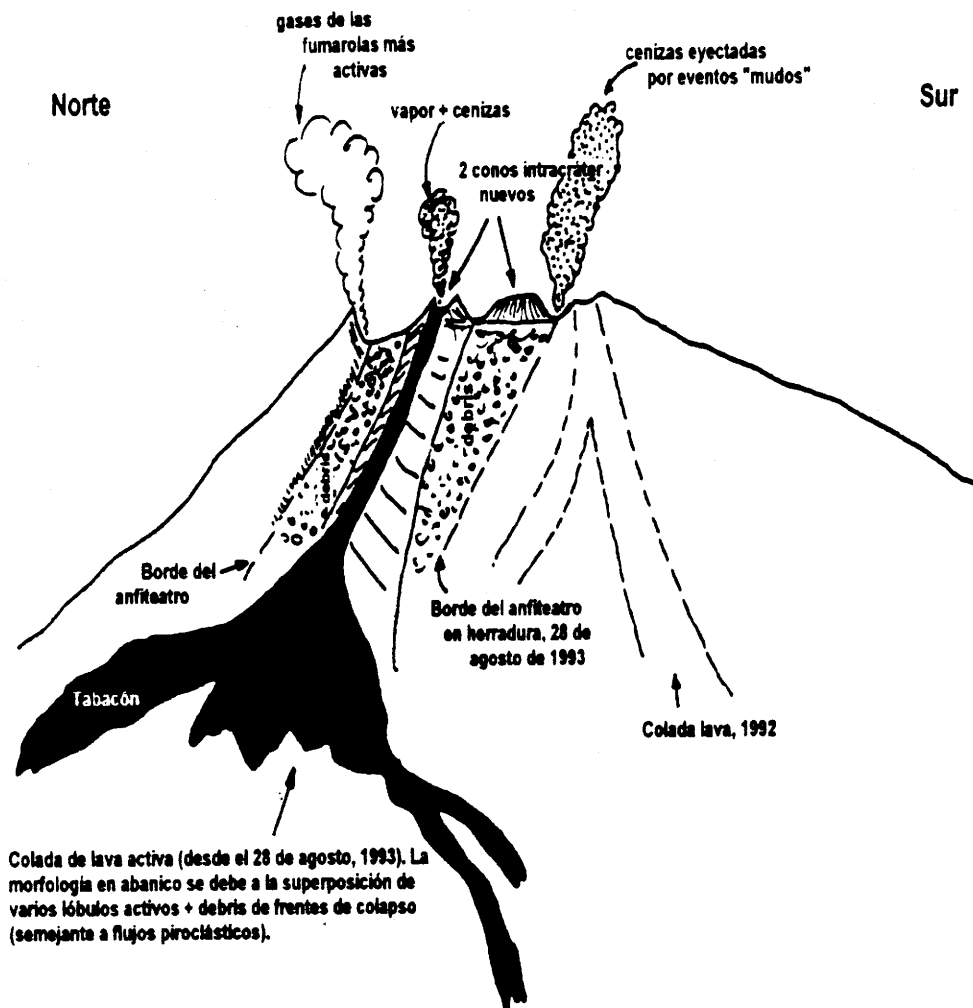


Figura 1: Vista del volcán Arenal por el flanco oeste, octubre de 1994.

Tabla 1: Sismicidad registrada en la estación Fortuna, 3,5 km al este del cráter activo, y ceniza recolectada 1,8 km al oeste del cráter activo en 1994.

MES	PDSR	PDHT	(g/m ²)/día	% > 300 μ m	% < 300 μ m
Enero	36	5,65	ND	ND	ND
Febrero	55	2,98	ND	ND	ND
Marzo	47	2,14	ND	ND	ND
Abril	48	4,54	14,06	40,3	59,7
Mayo	62	2,01	14,06	40,3	59,7
Junio	77	1,24	8,12	28,5	71,5
Julio	104	1,30	5,96	24,2	75,8
Agosto	82	1,40	4,01	36,0	64,0
Setiembre	55	0,94	3,64	38,3	61,7
Octubre	53	1,10	5,16	38,2	61,8
Noviembre	56	0,24	7,56	38,0	62,0
Diciembre	38	0,75	7,56	38,0	62,0

PDSR: Promedio diario de sismos registrados, PDHT: Promedio diario de horas tremor, ND: Datos no disponibles

ACTIVIDAD EFUSIVA

La actividad efusiva continuó a lo largo de la colada de lava activa desde finales de agosto de 1993 en el valle de Tabacón (ver Soto *et al.*, 1996; fig. 2). El lóbulo de lava que se había iniciado en noviembre en la parte alta del volcán, avanzó por el centro del valle de Tabacón, ubicándose a principio del año en los 650 m s.n.m., para una longitud total de 2,1 km. En marzo, el lóbulo alcanzó la cota de 620 m, y se detuvo (longitud total de 2,4 km). Un obstáculo en el canal de lava alimentador principal, cerca de los 850 m s.n.m., en marzo provocó un nuevo lóbulo. Otros dos lóbulos se formaron en agosto, cerca de los 1200 m, uno de los cuales alcanzó los 595 m s.n.m. en octubre (unos 2,7 km de longitud).

Se observaron varios flujos de detritos calientes producidos por el colapso de los frentes de lava, en setiembre, el mayor de los cuales produjo una columna de cenizas de 0,5 km de altura.

En algunos sectores las lavas blocosas alcanzan espesores de hasta 30 m y unos 100 m de ancho. El volumen de lava emitido durante el año se estima en $12,3 \times 10^6$ m³ (los cálculos incluyen $\pm 20\%$), muy similar a los $11,1 \times 10^6$ m³ de 1993 (Soto *et al.*, 1996) y a los 15×10^6 m³ de 1992 (Soto *et al.*, 1993). Esto nos vendría a dar una tasa de producción global de 0,4 m³/s durante el trienio 1992-94.

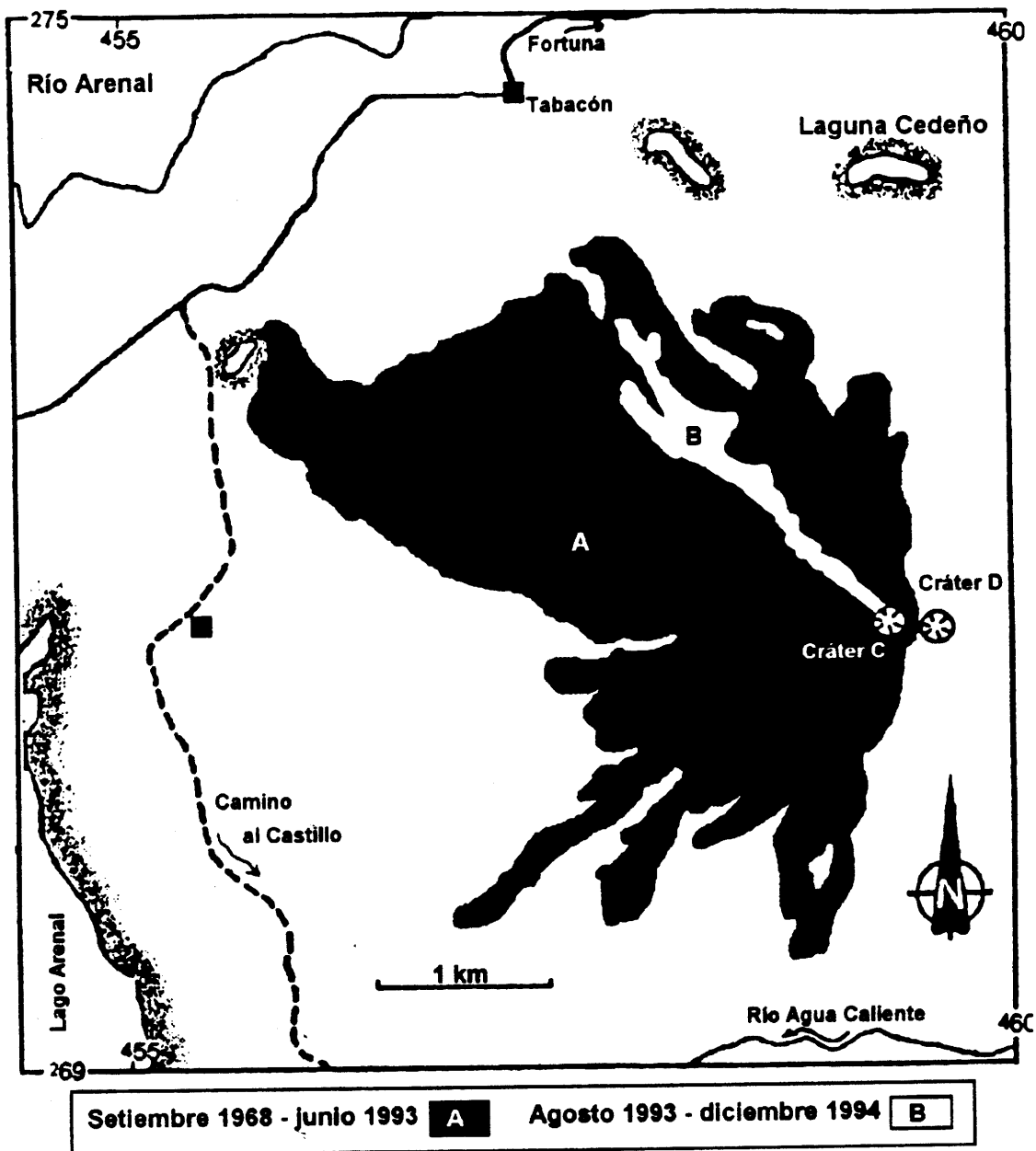


Figura 2: Mapa esquemático del Arenal y áreas vecinas donde se muestra la distribución de los principales flujos de lava de 1968 a 1994. B = Campo de lavas de agosto 1993 - diciembre 1994, el cual continuó activo hasta abril de 1995.

ACTIVIDAD SISMOVOLCÁNICA REGISTRADA

La actividad sismovolcánica se registra en la estación Fortuna, localizada 3,5 km al este del cráter activo. Se caracteriza principalmente por eventos explosivos, sismos de baja frecuencia y tremores. En la tabla 1 se consignan el número promedio diario mensual de eventos explosivos y de

baja frecuencia en conjunto, así como las horas diarias de tremor registradas por mes. La cantidad de sismos registrados durante el año, supera ostensiblemente a la de 1993. Comparado con la cantidad de ceniza depositada en el flanco oeste, nos dice que las explosiones eran discretas.

CONCLUSIONES

Durante 1994 el Arenal mantuvo su actividad exhalativa, estromboliana y efusiva. Algunos derrumbes de los frentes de lavas causaron flujos calientes de escombros. Las fumarolas cuspidales exhalaban gases sulfurados, clorurados y vapor de agua, que fueron orientados eólicamente hacia el WSW. Las explosiones estrombolianas fueron moderadas (penachos de ceniza < 1200 m), acompañadas por desgasificaciones menores. Se observaron conitos piroclásticos en la salida de lava

desde el anfiteatro de la avalancha de 1993. La actividad efusiva continuó con la colada activa desde 1993 en el valle de Tabacón. El volumen de lava emitido durante el año se calcula en $12,3 \times 10^6 \text{ m}^3$, para una tasa de producción de $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ durante el trienio 1992-94. La actividad sismovolcánica se caracterizó principalmente por eventos explosivos, sismos de baja frecuencia y tremores. La cantidad de sismos registrados supera ostensiblemente a la de 1993.

REFERENCIAS

- Soto, G.J., Arias, F. & Barquero, R., 1993. Resumen de la actividad del Volcán Arenal durante 1992. Summary of Arenal's volcanic activity during 1992. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 5(9-10):7-23; San José.
- Soto, G.J., Arias, F., Alvarado, G.E., Madrigal, L.A. & Barquero, R., 1996. Resumen de la actividad del Volcán Arenal durante 1993. Summary of Arenal's volcanic activity during 1993. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 6 (11-12):5-22, 1993; San José.

Boletín OSIVAM	1994	Año 7, No. 13-14	58 - 72	San José, Costa Rica, mayo 1997
----------------	------	------------------	---------	---------------------------------

Aspectos Petrológicos de las Tefras del Arenal a la Luz de Nuevos Datos Geoquímicos y Cronoestratigráficos

Guillermo E. Alvarado & Gerardo J. Soto. Oficina de Sismología y Vulcanología, ICE, Apdo. 10032-100, San José, Costa Rica.

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; San José.

RESUMEN

Nuevos análisis químicos de algunos depósitos de tefra recientes y composición isotópicas del Sr de lavas y de rocas piroclásticas fueron determinadas. Un modelo petrológico nuevo y preliminar fue propuesto para estas rocas calco-alcalinas, a pesar que la fuente generadora de magma ha sido la misma en los últimos siglos.

ABSTRACT

New chemical analysis of some recent tephra deposits and Sr-isotope compositions of lava and piroclastic rocks have been determined. A new and preliminary petrological trend is expoused for this calc-alkaline rocks, although the source of the magma generation is the same in the lasts centuries.

INTRODUCCIÓN

En 1991-92 y en 1994-95, se realizó una intensa campaña de campo en los alrededores del embalse de Arenal, con el fin de estudiar con detalle la secuencia de productos explosivos (tefras o rocas piroclásticas) del volcán Arenal, cuyos resultados están incluidos en los trabajos de Ghigliotti *et al.* (1991, 1992) y en Soto *et al.* (1996). Sin embargo, se evidenció que los aspectos geoquímicos de los productos explosivos entre los niveles ET-6 y ET-9 no estaban debidamente muestreados, o existían dudas referente a qué niveles efectivamente fueron analizados por Melson (1982) y Borgia *et al.* (1988). Más recientemente, incluso se evidenció que no

se tenían muestras de ningún nivel bajo ET-9. Es por ello, que nuevos análisis químicos de los niveles faltantes entre ET-6 y ET-9 fueron efectuados en Rutgers University, en el mismo laboratorio en donde fueron realizados la mayoría de los análisis químicos utilizados por Borgia *et al.* (1988). En la tabla 1, se incluyen los análisis químicos usados en el presente informe, en la tabla 2 se ubican éstos en posición cronológica y petrográfica. El presente trabajo aporta nuevas líneas hacia la interpretación geoquímica de la evolución petrológica del Arenal, dejando planteado una serie de metas abiertas aún por resolverse.

Tabla 1: Análisis químicos del Arenal. De ET6 a ET9 son nuevos análisis de las tefras recolectadas durante la campaña de campo de 1992. Los otros análisis químicos han sido previamente publicados en Melson (1982) y Borgia *et al.* (1988), y sido tomados como referencia para la secuencia estratigráfica. Para los diagramas de las figuras, los datos fueron normalizados a 100% libres de volátiles

Ejemplo	A1	A2	A3	A4	LA	ET2B	ET3	ET4D	ET5A	ET5B
J	15	15	15	15	15	2	3	4	5	5
K	7	8	12	5	3	11	16	15	13	13
SiO ₂	53,82	54,64	54,97	54,2	54,06	61,01	50,74	58,35	62,42	56,94
TiO ₂	0,6	0,57	0,54	0,65	0,67	0,4	0,58	0,58	0,4	0,55
Al ₂ O ₃	19,18	21,06	18,33	20,95	18,55	17,41	20,72	17,87	17,21	18
FeO	7,22	6,22	7,54	6,39	8,22	5,73	7,47	6,36	5,01	7,82
MnO	0,15	0,13	0,2	0,14	0,17	0,21	0,14	0,17	0,19	0,21
MgO	4,81	2,7	4,43	2,55	4,67	2,24	4,7	2,49	1,77	3,35
CaO	9,25	9,49	9,25	9,36	8,82	6,67	10,82	6,57	5,63	8,01
Na ₂ O	2,99	3,3	2,84	3,25	3,02	3,72	2,44	3,48	4,19	3,29
K ₂ O	0,59	0,63	0,52	0,63	0,61	0,76	0,39	0,97	0,88	0,58
P ₂ O ₅	0,17	0,2	0,2	0,21	0,17	0,23	0,13	0,26	0,25	0,21
Total	98,78	98,94	98,82	98,33	98,96	98,38	98,13	97,10	97,95	98,96
Rb	10	11	9	8	12	15	9	20	18	10
Ba	505	539	399	588	451	628	324	789	745	497
Sr	713	756	655	749	542	668	695	734	672	683
V	193	142	155	176	225	61	212	116	57	122
Cr	54	17	37	9	26	9	45	17	9	15
Ni	54	17	17	7	42	4	29	8	1	6
Zr	57	51	51	54	54	65	46	77	70	61
Sc	23	17	20	20	26	10	23	16	10	16
Cu	52	84	55	125	96	12	87	45	14	27

Tabla 1: Análisis químicos del Arenal (continuación)

Ejemplo	ET6	ET7	ET8B	ET8M	ET9A	ET9B	ET9N	ET9	ET1	ET2A
J	6	7	8	10	11	13	14	9	1	2
K	6	17	18	14	2	6	1	10	0	11
SiO ₂	51,2	57,7	50,8	52,4	49,4	52,4	61,8	55,8	55,82	61,7
TiO ₂	0,67	0,54	0,69	0,67	0,75	0,57	0,38	0,57	0,54	0,38
Al ₂ O ₃	19,5	18,3	19,10	19,2	20,8	19,3	17,9	19,5	20,19	16,7
FeO	8,59	7,2	9,51	8,81	9,85	8,55	5,34	8,03	5,94	5,05
MnO	0,17	0,21	0,18	0,18	0,15	0,19	0,21	0,2	0,14	0,21
MgO	5,32	2,94	6,26	5,75	5,65	4,63	1,95	3,51	2,64	1,87
CaO	10,24	7,74	10,34	10	10,3	9,55	6,25	7,82	9,22	5,69
Na ₂ O	2,47	3,35	2,19	2,47	1,89	2,7	3,71	2,94	3,3	3,96
K ₂ O	0,44	0,62	0,32	0,38	0,23	0,52	0,74	0,47	0,67	0,83
P ₂ O ₅	0,16	0,23	0,13	0,17	0,13	0,17	0,24	0,17	0,18	0,26
H ₂ O	0,25	0,23	0,07	0,13	0,23	0,21	0,1	0,17	0,0	0,0
Total	99,01	99,06	99,59	100,16	99,38	98,79	98,62	99,18	98,64	96,72
Rb	7	8	4	6	5	8	11	7	14	16
Ba	361	553	315	364	311	658	619	389	555	437
Sr	651	668	586	677	588	641	624	573	747	662
V	238	83	247	239	273	186	43	121	137	41
Cr	39	3	42	63	26	14	6	8	12	8
Ni	23	17	28	31	30	7	0	0	11	5
Zr	30	57	41	41	41	54	54	49	57	72
Sc	25	13	30	28	30	22	8	16	16	9
Cu	105	26	99	113	102	77	18	37	75	22

Tabla 2: Simbología de las muestras en los diagramas acorde con su composición estratigráfica, siendo LA las rocas más antiguas y ET1 la secuencia eruptiva más reciente

Muestra	Simbología
ET1	•
ET2	×
ET3	✕
ET4	⊗
ET5	↑
ET6	+
ET7	◇
ET8B	◆
ET8M	⊕
ET9N	△
ET9A	▲
ET9B	◆
ET9	⊛
A1	○
A2	●
A3	Υ
A4	◇
LA	□

SERIE GEOQUÍMICA

Una de las preguntas que todavía mantiene eco referente a los magmas del Arenal, pese a todos los trabajos realizados, es si son rocas toleíticas de arco (Th) o calco-alcalinas (CA). Aunque diversos autores exponen que se tratan de rocas calcoalcalinas (p. ej., Malavassi, 1979; Kussmaul *et al.*, 1982; Tournon, 1984), también ellos han resaltado sus características petroquímicas anómalas con respecto a otros volcanes Cuaternarios de Costa Rica. A la luz de los nuevos datos geoquímicos, en particular de los miembros básicos, consideramos justificada una revisión de los diferentes criterios sobre el carácter o serie geoquímica a la cual pertenecen las rocas del Arenal.

a) Geoquímica

Kuno (1968), Gill (1970) y Jakes & Gill (1979) proponen que rocas con bajos contenidos en álcalis (Na_2O y K_2O) o potasio pertenecen a la serie Th (fig. 1).

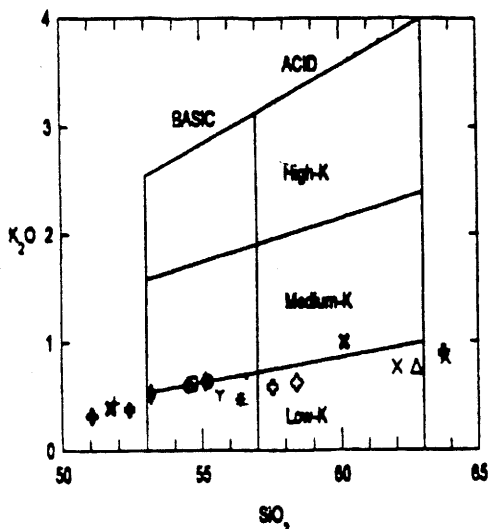


Figura 1: Diagrama de andesitas orogénicas para las rocas del Arenal.

Sin embargo, aunque parece establecido que este es un criterio indicador, no es exclusivo de esta serie, sino que igualmente puede presentarse en rocas de la serie CA (Miyashiro, 1974). La relación $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ es superior a 3, al parecer característico de la serie Th (Coulon & Thorpe, 1981).

El contenido de TiO_2 y P_2O_5 en las rocas del Arenal es inferior a 0,7 y a 0,26, respectivamente, lo cual la ubica dentro de las toleitas de arco de islas y las rocas calcoalcalinas (Miyashiro, 1974; Mullen, 1983).

b) Diagrama de Miyashiro (1974)

En este diagrama una buena parte de las rocas del Arenal se ubican en el campo Th o cerca de la línea divisoria de dichos campos (fig. 2).

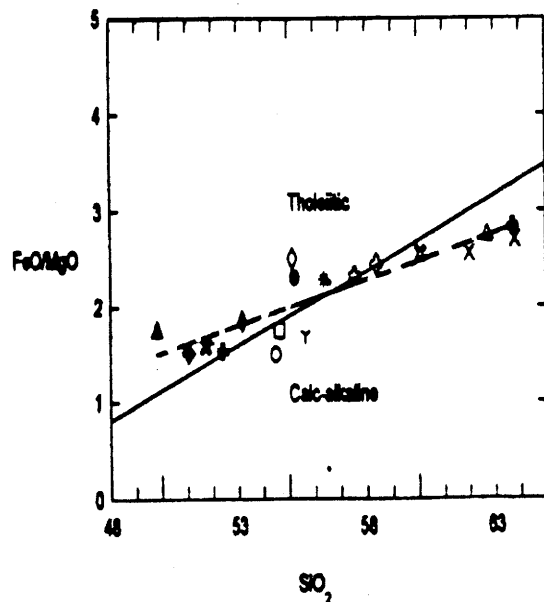


Figura 2: Diagrama de Miyashiro para las series CA-Th.

Sin embargo, la pendiente de la curva es subhorizontal, lo cual sugiere una tendencia hacia la serie CA (Miyashiro, 1974). Miyashiro restringe la ventana calcoalcalina para rocas con $2,0 < (\text{FeO}^*/\text{MgO}) < 5,0$. En este caso, los términos básicos quedan excluidos, ubicándose sólo las lavas andesíticas y dacíticas en el campo Th para el análisis.

c) Diagrama alúmina vs. plagioclasa normativa (Irvine & Baragar, 1971)

Este diagrama confeccionado preferentemente para rocas básicas, ya fue con anterioridad utilizado por Kussmaul *et al.* (1982) para las rocas analizadas del Arenal, evidenciándose un claro carácter CA (fig. 3).

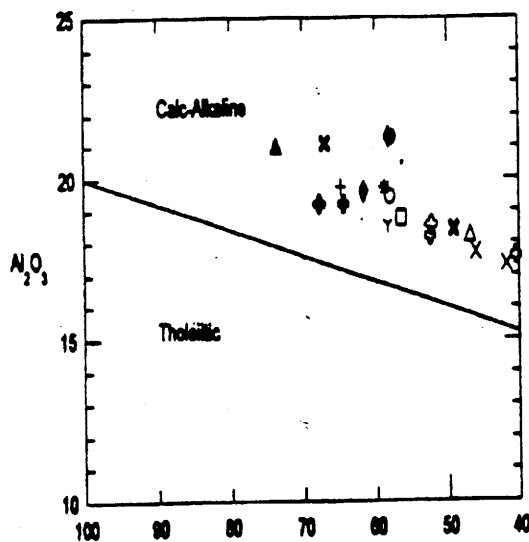


Figura 3: Diagrama alúmina vs. Plagioclasa normativa.

d) Diagrama AFM (Irvine & Baragar, 1971)

En dicho diagrama, aunque confeccionado preferentemente para rocas félsicas, las rocas básicas del Arenal ($\text{SiO}_2 < 53\%$) se ubican en el campo Th (fig. 4).

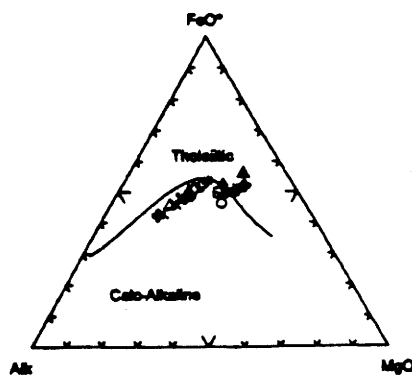


Figura 4: Diagrama AFM.

Sin embargo, presentan un pobre enriquecimiento en hierro (y en magnesio) desde los primeros estadios de la diferenciación y posteriormente un brusco enriquecimiento en álcalis, propio de la serie CA.

e) Diagramas tectonomagmáticos discriminativos

En otros diagramas triangulares (figs. 5 y 6, *sensu* Pearce *et al.*, 1977 y Mullen, 1983, respectivamente) se observa cómo la mayoría de los análisis químicos de Arenal se ubican en el campo de las andesitas orogénicas calcoalcalinas y no en las toleítas de arco de islas.

f) Mineralogía

La presencia de pigeonita y de ortopiroxeno en la masa de fondo fue detectado por Tournon (1984), lo que sugiere una dualidad entre las características mineralógicas de las rocas de la serie Th con la CA, respectivamente. La común ocurrencia de anfíbol en las lavas andesítico-basálticas y en las tefras dacíticas es común en rocas CA (ver Kuno, 1968).

Conclusión sobre el tipo de serie

Referente al tipo de serie, dichas rocas son definitivamente calcoalcalinas con una cierta tendencia o afinidad toleítica.

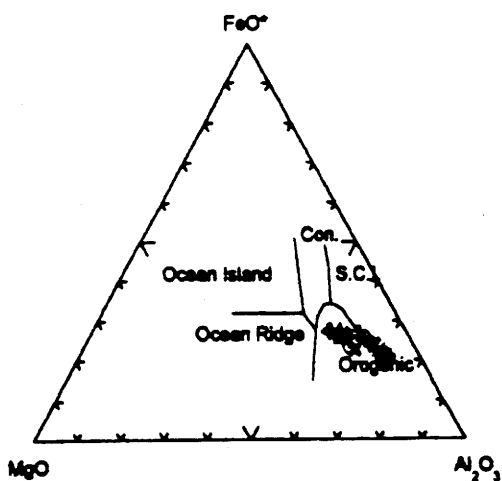


Figura 5: Diagrama de Pearce *et al.* (1977) Mg-Al-Fe.

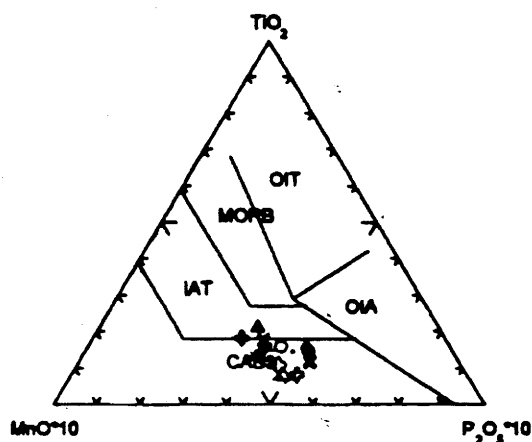


Figura 6: Diagrama de Mullen (1983) Mn-Ti-P.

CICLOS ERUPTIVOS

Borgia *et al.* (1988), con base en ciertas modificaciones a la estratigrafía propuesta por Melson (1982), establece un modelo petrológico para el Arenal. Ghigliotti *et al.* (1992) definieron con mayor precisión las secuencias eruptivas y efusivas, incluyendo nuevos datos cronológicos. Ellos habían establecido 4 ciclos eruptivos en el Arenal en los últimos 3000 años, cada uno de unos 800 años de duración, definiéndose un ciclo eruptivo como aquel que inicia con una erupción dacítica importante y concluye con otra erupción dacítica pliniana (véase Ghigliotti *et al.*, 1992). Los recientes análisis químicos y la re-evaluación de la secuencia estratigráfica, dejan entrever una nueva perspectiva de los ciclos eruptivos y de pausa, pudiéndose re-interpretar mejor, tanto la evolución petrogenética, como los ciclos eruptivos mayores de la siguiente manera:

a) Existen 4 pausas explosivas extensas, que se presentan generalmente después de una erupción pliniana grande. Dichas fases con sus lapsos de duración se establecen aproximadamente entre:

- (i) ET-9 y A4 (550 años),
- (ii) ET-9N y ET-8B (520 años),
- (iii) ET-5 y ET-4 (300 años) y
- (iv) ET-2 y A2 (unos 300 años).

b) Las erupciones plinianas grandes y de composición dacítica (ET-9, ET-5, ET-2), que cierran los ciclos explosivos para dar inicio a las pausas, son siempre precedidas por explosiones básicas (ET-9A, ET-8M, ET-6, ET-3). Sin embargo, entre la erupción básica y la pliniana suele haber un lapso de calma que varía entre 150 y 270 años.

c) Desde el punto de vista de un geólogo

del futuro, que analizara las recientes fases efusivas correspondientes con los campos de lavas A2 y A1, con seguridad enmarcaría ambas fases como una sola y excluiría las pequeñas explosiones andesíticas y andesítico basálticas UN10 y/o ET-1, que son depósitos explosivos proximales y fácilmente erosionables.

d) Los ciclos explosivos se definen como la secuencia:

(andesítica y andesítico basáltica?) $\pm$ lava + básica + pliniana dacítica de cierre.

Se han podido definir claramente cuatro ciclos entre los siguientes niveles:

- (i) A4-ET9N (200 años),
- (ii) ET8B y ET5 (600 años),
- (iii) ET4 y ET2 (350 años) y finalmente
- (iv) el último y aún incompleto que se ubicaría entre A2 y la próxima pliniana de cierre (250 años al momento).

e) Sin embargo, un problema que se desprende del trabajo de Ghigliotti y colaboradores, es el de explicar: ¿cómo podemos, después de la fase efusiva A3, generar rocas básicas por simple fraccionación? A3 está claramente ubicado bajo ET6 pero no es seguro si se ubica sobre ET7, dado que este contacto nunca se observó. Por ello, con el fin de darle un sentido petrológico a la evolución magmatológica, preferimos ubicar cronológicamente A3 entre ET8M y ET7. La posición cronoestratigráfica de A4 y LA es igualmente estimada, especialmente para su edad máxima.

f) Con base en las premisas anteriores, y dado que se asume que todavía falta una erupción básica, seguida por un lapso de

inactividad entre 150 y 270 años, hasta que finalmente se desarrolle la erupción pliniana de cierre (próximos 250 años), tendríamos que: nos encontramos en la

antesala de la próxima erupción básica, para que el lapso de inactividad básica-pliniana de cierre se cumpla.

PETROLOGÍA

Teniendo una nueva y más adecuada visión sobre la estratigrafía, edades, así como nuevos análisis químicos de la secuencia infrayacente a ET-7, se puede tratar de realizar una evolución petrológica de los magmas del Arenal. Aunque varios autores han propuesto que los productos de Arenal son comagmáticos (Kussmaul *et al.*, 1982; Tournon, 1984; Borgia *et al.*, 1988), para otros ha habido coexistencia de dos magmas y mezcla de los mismos (Reagan *et al.*, 1987), y aún hasta cierta contaminación (Cigolmi & Kudo, 1987; Villemant & Boudon, 1997). Ghigliotti *et al.* (1992) encontraron evidencias de coexistencia de magmas, por lo que la mezcla de los mismos sería plausible.

Basándose en lo anteriormente expuesto, se pueden establecer la secuencias eruptivas de los ciclos explosivos con pequeños hiatos, con el fin de establecer un nuevo panorama:

Ciclo I: ?-A4-ET9B-ET9A//ET9N

Ciclo II: ET8B-ET-8M-A3//ET7-ET6//ET5

Ciclo III: ET4-ET3//ET2

Ciclo IV: UN10-A2-ET1-A1-¿-?

Al realizar el diagrama de K_2O versus SiO_2 , Na_2O/K_2O vs. SiO_2 , y Ba/Rb vs. Ni/Cr (figs. 7, 8 y 9) se desprende que existen dos posibles series ligeramente diferentes, cada una con unidades específicas asociadas, no necesariamente correspondientes con los ciclos mencionados. La explicación de ello, aunque no muy clara, es que puedan

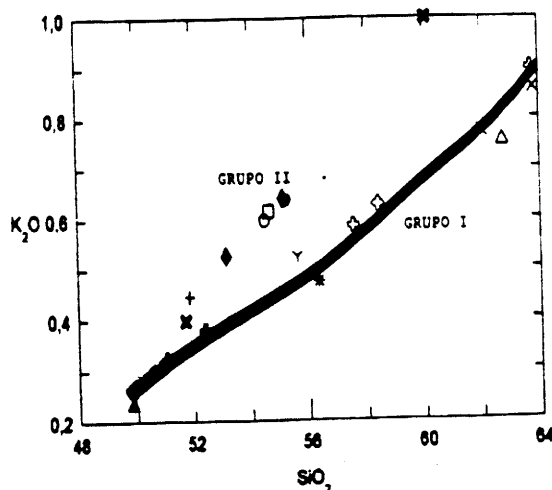


Figura 7: Diagrama K_2O vs SiO_2 : identificación de grupos.

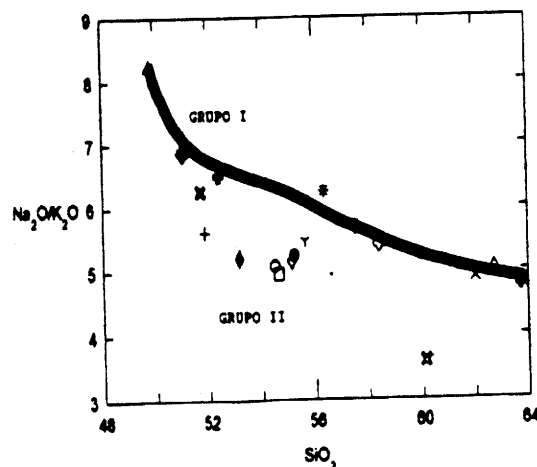


Figura 8: Diagrama Na_2O/K_2O vs SiO_2 : identificación de grupos.

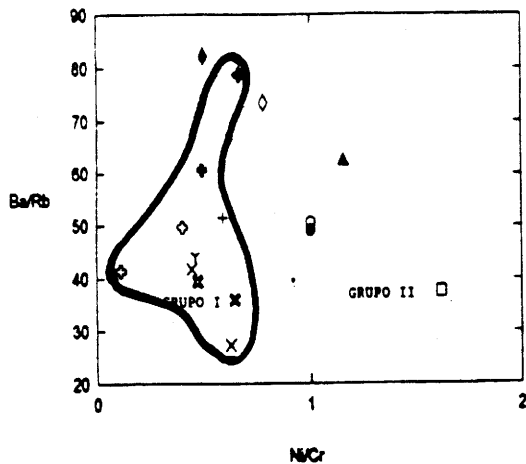


Figura 9: Diagrama Ba/Rb/ vs. Ni/Cr: identificación de grupos.

representar dos magmas ligeramente diferentes. Sin embargo, esto no necesariamente implica magmas no comagmáticos, dado que podrían ser leves diferencias producto de la distribución cristales-líquidos, tal y como lo argumentan Borgia *et al.* (1988).

Basándonos en la secuencia cronológica intraciclos podemos concluir:

a) A partir de los magmas que generaron explosiones básicas del Grupo I, se pueden generar lavas andesíticas por cristalización fraccionada, seguidas por una pausa para generar dacitas plinianas pertenecientes al mismo grupo.

b) Los magmas de las explosiones básicas del Grupo II necesitan un tiempo considerable (unos 100 años) para generar plinianas dacíticas de cierre por simple fraccionación, o bien la inyección de un magma diferente del Grupo I.

c) ET4 pertenece petrológicamente al mismo grupo que ET3 (Grupo II) por simple fraccionación, justificando el corto lapso entre ambos eventos, así como la larga pausa previa a ET4.

d) Actualmente nos encontramos en un ciclo perteneciente al Grupo II.

e) Para determinar la mezcla de magmas habría que realizar estudios petrológicos (por ejemplo, mineralógicos) específicos y para concluir definitivamente sobre el arribo de magmas ligeramente diferentes, lo deseable sería comparar los resultados isotópicos de las rocas de los grupos I y II.

ANÁLISIS ISOTÓPICOS DE LAS ROCAS

Para dilucidar mejor el patrón anterior, se recomendó profundizar los conocimientos geoquímicos de las rocas, mediante relaciones isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de los productos del Arenal, por lo menos a lo que se refiere los últimos dos ciclos lávicos. Para cumplir con este objetivo, se seleccionaron tres muestras del ciclo lávico más reciente (A-1) y una de otro ciclo lávico (A-2) para la comparación entre los dos ciclos. Dos muestras pertenecen a la fase inicial del ciclo A-1, es decir un

bloque juvenil encontrado en las tefras de erupción 1968 y una muestra lávica eruptada durante las primeras fases de la erupción. La tercera muestra es un clasto juvenil de edad reciente asociado con el evento eruptivo de agosto de 1993. Varios autores de igual modo han realizado estudios isotópicos en el Arenal, tales como Thorpe *et al.* (1979), Bennett (1990), y Cigolini *et al.* (1991). Feigenson & Carr (1986) habían realizado un análisis para el Arenal, cuya muestra AR82 es la misma

que la presentada posteriormente por Bennett, con la única diferencia que en este

último trabajo se incluyen los elementos trazas (tabla 3).

Tabla 3: Análisis isotópicos utilizados en el presente informe

Muestra	Nivel	$^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$	Referencia
AR1	A1	$0,70417 \pm 0,00008$	Thorpe <i>et al.</i> (1979)
AR2	A1	$0,70392 \pm 0,00008$	Thorpe <i>et al.</i> (1979)
AR3	A1	$0,70389 \pm 0,00008$	Thorpe <i>et al.</i> (1979)
AR4	A1	$0,70380 \pm 0,00005$	Thorpe <i>et al.</i> (1979)
AR82	A2	0,70389	Bennett (1990)
AXM-1	Gabro/Norita	0,70461	Cigolini <i>et al.</i> (1991)
AX-2	Gabro/Norita	0,70382	Cigolini <i>et al.</i> (1991)
AX-3	Gabro/Norita	0,70380	Cigolini <i>et al.</i> (1991)
AX-4	Plagioclase en gabro	0,70381	Cigolini <i>et al.</i> (1991)
An	Megacrystal de anortita	0,70430	Cigolini <i>et al.</i> (1991)
ARE-FP-68	Tefra 1968	$0,70394 \pm 0,00011$	Presente trabajo
ARE-LAV-A1	Lava A-1	$0,70385 \pm 0,00006$	Presente trabajo
ARE-LA-A2	Lava A-2	$0,70369 \pm 0,00014$	Presente trabajo
ARE-FP-93	Tefra 1993	$0,70377 \pm 0,00008$	Presente trabajo

Generalidades del método

El Sr común, presente en cantidades variables al momento de la formación de cada mineral contiene Rb, está formado por aprox. 7% del isótopo ^{87}Sr . Es necesario distinguir esta cantidad de la generada por el decaimiento del ^{87}Rb . En otras palabras, es necesario conocer la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, en la cual el ^{86}Sr está presente en cantidad constante al no ser producido por el decaimiento radiactivo, mientras varía el ^{87}Sr en función del ^{87}Rb .

Listado de las nuevas muestras

ARE-FP-68

- Ubicación: Falda occidental del volcán;

coordenadas 272,0 N - 456, 0 E: 600 m s.n.m. (Hoja Fortuna 3247 II).

- Material: bloque juvenil del evento de julio de 1968 (inicio de la actividad eruptiva actual)

$$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} (n) = 0,70394 \pm 0,00011.$$

ARE-LV-A1

- Ubicación: Falda occidental del volcán; coordenadas 272,5 N - 456,2 E., 620 m s.n.m. (Hoja Fortuna 33247 II).

- Material: Flujo de lava emitido alrededor de 1968

$$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} (n) = 0,70385 \pm 0,00008.$$

ARE-LV-A2

- Ubicación: flanco norte - occidental del volcán; coordenadas 275,0 N - 457,6 E; El. 520 m s.n.m. (Hoja Fortuna 3247 II).
- Material: Flujo lávico relacionado con el A-2, de edad desconocida (tentativamente siglo XVI).
- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} (n) = 0,70369 \pm 0,00014$.

ARE-FP-93

- Ubicación: falda occidental del volcán; coordenadas 271,5 N - 457,4 E; El. 735 m s.n.m. (Hoja Fortuna 3247 II).
- Material: Bloque juvenil en el flujo piroclástico de agosto de 1993
- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} (n) = 0,70377 \pm 0,00006$.

INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS

Los análisis isotópicos realizados se pueden agrupar en tres grupos: 1) 0,70380-0,70417 (Thorpe *et al.*, 1979; Bennett, 1990) en correspondencia con lavas recientes; 2) 0,70369-0,70377 (presente trabajo) en correspondencia con productos recientes (últimos 400 años); y 3) 0,70380-0,70461 (Cigolini *et al.*, 1991) asociados con gabros y plagioclasas. De estos datos se desprende que los datos de Thorpe y colaboradores se encuentran dentro del amplio ámbito de los datos reportados por Cigolini y su grupo; mientras que nuestros resultados son muy restringidos y ligeramente inferiores a los existentes Cigolini *et al.* (1991) argumentan que los gabros y minerales por ellos analizados isotópicamente son xenolitos y xenocritales productos de la corteza inferior y, por lo tanto, fuente contaminante en el caso de ser asimilados. Thorpe *et al.* (1979) proponen, en cambio, que sus resultados no muestran contaminación alguna, en vista que ellos concluyen que la fuente de donde las andesitas son derivadas debe de tener un

contenido de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre 0,7035 y 0,7045, muy similar al reportado por Cigolini (op. cit.). Por ello, una contaminación con material cortical, isotópicamente diferente, resulta poco plausible a la luz de la presente información.

El análisis de los datos ha evidenciado que no se notan variaciones sensibles entre las muestras analizadas. Así, las tres nuevas muestras ARE-FP-68, ARE-LV-A1 y ARE-FP-93 asociados con el mismo ciclo lávico reciente (A-1) exhiben variaciones mínimas, ubicándose dentro del error del método. Lo mismo se puede decir si se comparan estas muestras con la ARE-LV-A2 relativa a otro ciclo lávico (A-2). Los datos isotópicos de las tres lavas del ciclo A-1 y la del ciclo A-2, indican que el volcán no ha sufrido cambios en el régimen de alimentación (tipo de magma) y/o contaminaciones con material de la corteza, durante su ciclo de actividad reciente.

CONCLUSIÓN

Un nuevo esquema petrológico a probar fue dado, no sólo a la interpretación de la historia reciente de las rocas calcoalcalinas del Arenal (últimos 2500 años), pese a que se desprende que su comportamiento es bastante aleatorio o que posee megaciclos todavía poco conocidos. Sin embargo, algunas conclusiones se pueden dar, en particular referente al problema inmediato que nos interesa, que es el de la amenaza volcánica a corto plazo. Así, parece establecido un modelo con su amenaza implícita: *El hecho de que todavía falta una erupción básica en una escala aparente de decenas de años, la cual será seguida por un lapso de inactividad relativa entre un siglo a un máximo de tres centenas de años, hasta que se desarrolle la erupción pliniana de cierre.*

Sin embargo, dado que actualmente nos encontramos en un ciclo efusivo y explosivo de baja magnitud, perteneciente

al Grupo II, es casi imposible imaginarse que una fase básica ocurra a partir de una andesítica, más teniendo en cuenta que el conducto es abierto, continuo y con pocos cambios petroquímicos durante 28 años, o que por fraccionación se presente una erupción pliniana dacítica en un corto intervalo. Por ello, para el primer caso (la básica) requeriríamos probablemente de una corta pausa (décadas) y/o la llegada de nuevo magma (semanas a décadas), mientras que para la segunda, necesitaríamos un período de más de un siglo para fraccionar y generar un magma dacítico. Lo primero es más difícil de preveer, aún llevándose un frecuente monitoreo petrológico. Finalmente y sin lugar a dudas las lavas del Arenal son, en ciertos aspectos, químicamente diferentes con respecto a la del resto de los estratovolcanes Cuaternarios, pero la causa de ello es todavía tema abierto de discusión.

Agradecimientos:

Los análisis químicos y el programa IGPET fueron gentilmente donados por el Prof. Michael J. Carr (Rutgers University, Nueva Jersey).

REFERENCIAS

Bennett, E., 1990. Niobium Contents of Central American Lavas. Tesis M.Sc., Univ. de Rutgers, viii + 80 pp.

Borgia, A., Poore, C., Carr, M.J., Melson, W.G. & Alvarado, G.E., 1988. Structural, stratigraphic and petrological aspects of the Arenal-Chato volcanic system: Evolution of a young stratovolcanic complex. -Bull. Vulcanol., 50: 86-105.

Cigolini, C. & Kudo, A. M., 1987. Xenoliths in recent basaltic andesite flows from Arenal Volcano, Costa Rica: inference on the composition of the lower crust. -Contrib. Mineral. Petrol., 96: 381-390.

Cigolini, C., Kudo, A.M., Brookins, D.G. & Ward, D., 1991. The petrology of Poás Volcano lavas: basalt-andesite relationship and their petrogenesis within the magmatic arc of Costa Rica. -J. Volcanol. Geotherm. Res., 48: 367-384.

Coulon, C. & Thorpe, R.S., 1981. Role of continental crust in petrogenesis of orogenic volcanic associations. -Tectonophysics, 77: 79-93.

Feigenson, M.D. & Carr, M.J., 1986. Positively correlated Nd and Sr isotope ratios of lavas from the Central American volcanic front. -Geology, 14: 79-82.

Ghigliotti, M., Frullani, A., Alvarado, G.E. & Soto, G.J., 1991. 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., 1992. Tefroestratigrafía, historia y ciclos eruptivos del volcán Arenal. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 5 (9-10): 52-96.

Gill, J.B., 1970. Geochemistry of Viti Levu, Fiji, and its evolution as an island arc. -Contrib. Min. Petrol., 27: 179-203.

Irvine, T. N. & Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. -Can. J. Earth. Sci., 8: 523-548.

Jakes, P. & Gill, J., 1970. Rare earth elements and the island arc tholeiitic series. -Earth Planet. Sci. Letters, 9: 17-28.

Kuno, H., 1968. Origin of andesite and its bearing on the island arc structure. -Bull. Vulcanol., ser. 2 (32): 141-176.

Kussmaul, S., Paniagua, S. & Gaínza, J., 1982. Recopilación, clasificación e interpretación petroquímica de las rocas ígneas de Costa Rica. -Inf. Semestral Julio-Dic., Inst. Geográfico Nacional, 17-79.

Malavassi, E., 1979. Geology and Petrology of Arenal Volcano, Costa Rica. -M.Sc. Tesis, Univ. Hawii, xii + 111 pp.

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

Miyashiro, A., 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. -Am. J. Sci., 274: 321-355.

Mullen, E.D., 1983. MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. -Earth Planet. Sci. Lett., 63: 53-62.

Pearce, T.H, Gorman, B.E. & Birikett, T.C., 1977. The relationship between major element chemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks. -Earth Planet. Sci. Lett., 36: 121-132.

Reagan, K.M., Gill, J.B. Malavassi, E., García, M.C., 1987. Changes in magma compositions at Arenal volcano, Costa Rica: 1968-1985: Relative monitoring of open-system differentiation. -Bull. Volcanol., 49:415-434.

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. Vulc. Arenal, 6 (11-12): 5-22, 1993; San José.

Thorpe, R.S., Francis, P.W., Moor bath, S., 1979. Strontium isotope evidence for petrogenesis of Central American andesites. Nature, 277:44-45.

Tournon, J., 1984. Magmatismes du mesozoïque à l'actuel en Amérique Centrale: L'exemple de Costa Rica, des ophiolites aux andesites. -Tesis, Mém. Sc. Terre, Univ. Pierre et Marie Curie, París, 84-49. iix + 335 pp.

Villemant, B. & Boudon, G., 1997. The 1968 explosive eruption of Arenal volcano, Costa Rica: stratigraphy, vesicularity and geochemistry of the products. Volcanic activity and the environment, IAVCEI, General Assembly, Puerto Vallarta. Abstracts, p. 132.