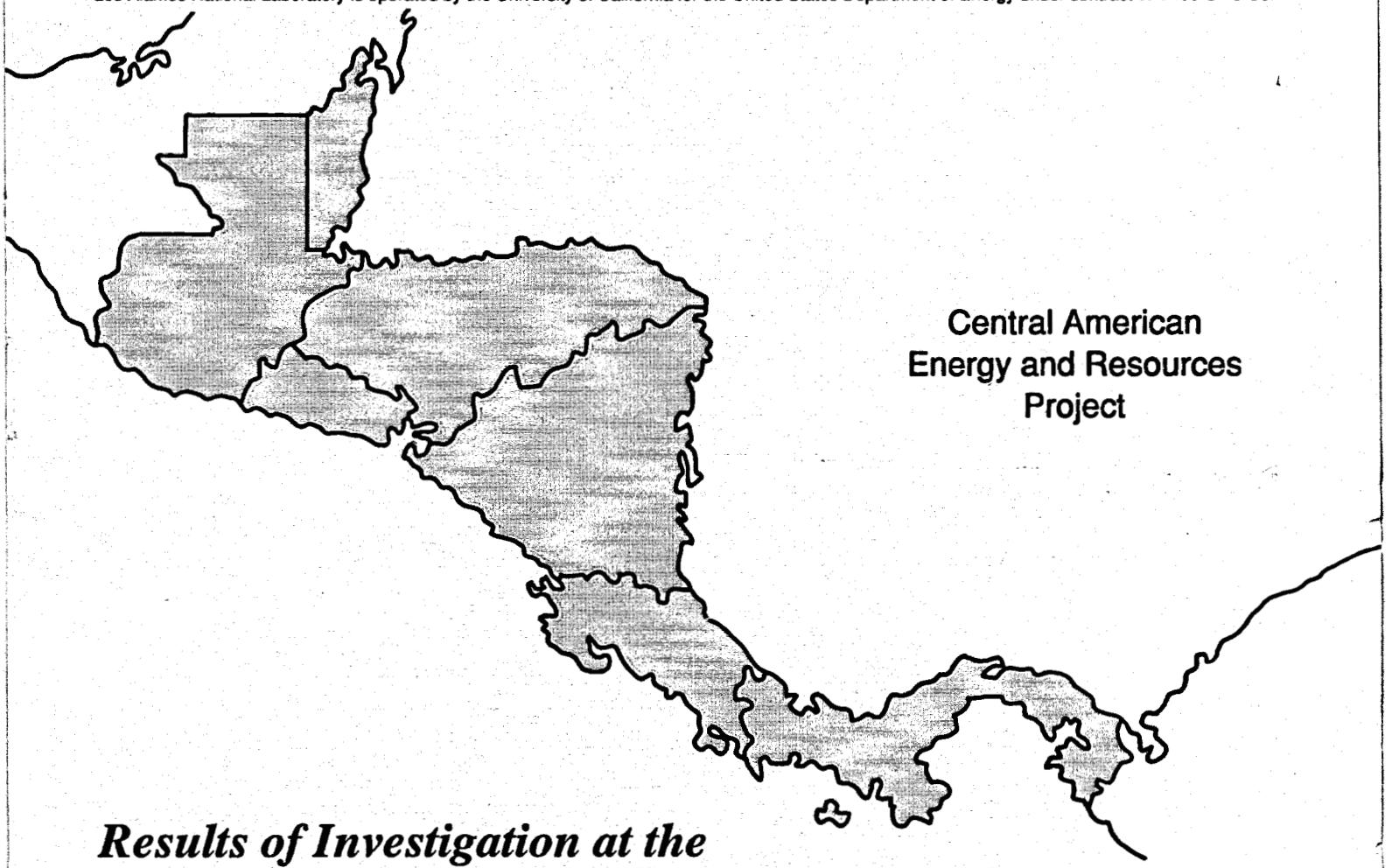
12/11-1-89 85 (1)

LA-11510-MS, Part 2

Los Alamos National Laboratory is operated by the University of California for the United States Department of Energy under contract W-7405-ENG-36.



Central American
Energy and Resources
Project

Results of Investigation at the Miravalles Geothermal Field, Costa Rica Part 2: Downhole Fluid Sampling

DO NOT MICROFILM
COVER

DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED

MASTER

LosAlamos Los Alamos National Laboratory
Los Alamos, New Mexico 87545

DISCLAIMER

This report was prepared as an account of work sponsored by an agency of the United States Government. Neither the United States Government nor any agency Thereof, nor any of their employees, makes any warranty, express or implied, or assumes any legal liability or responsibility for the accuracy, completeness, or usefulness of any information, apparatus, product, or process disclosed, or represents that its use would not infringe privately owned rights. Reference herein to any specific commercial product, process, or service by trade name, trademark, manufacturer, or otherwise does not necessarily constitute or imply its endorsement, recommendation, or favoring by the United States Government or any agency thereof. The views and opinions of authors expressed herein do not necessarily state or reflect those of the United States Government or any agency thereof.

DISCLAIMER

Portions of this document may be illegible in electronic image products. Images are produced from the best available original document.

This work was supported by the U.S. Agency for International Development.

An Affirmative Action/Equal Opportunity Employer

This report was prepared as an account of work sponsored by an agency of the United States Government. Neither the United States Government nor any agency thereof, nor any of their employees, makes any warranty, express or implied, or assumes any legal liability or responsibility for the accuracy, completeness, or usefulness of any information, apparatus, product, or process disclosed, or represents that its use would not infringe privately owned rights. Reference herein to any specific commercial product, process, or service by trade name, trademark, manufacturer, or otherwise, does not necessarily constitute or imply its endorsement, recommendation, or favoring by the United States Government or any agency thereof. The views and opinions of authors expressed herein do not necessarily state or reflect those of the United States Government or any agency thereof.

LA--11510-MS-Pt.2

DE90 001891

Results of Investigation at the Miravalles Geothermal Field, Costa Rica Part 2: Downhole Fluid Sampling

Charles O. Grigsby
Fraser Goff
Pat E. Trujillo, Jr.
Dale A. Counce
Bert Dennis
Jerome Kolar
*Rodrigo Corrales**

**Instituto Costarricense de Electricidad, Proyecto Geotérmico de Miravalles, San José, COSTA RICA*

DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED

MASTER

Los Alamos National Laboratory
Los Alamos, New Mexico 87545

RESULTS OF INVESTIGATION AT THE MIRAVALLES GEOTHERMAL FIELD, COSTA RICA

PART 2: DOWNHOLE FLUID SAMPLING

Charles O. Grigsby, Fraser Goff, Pat E. Trujillo, Jr., Dale A. Counce, Bert Dennis and Jerome Kolar

Earth and Space Sciences Division
Los Alamos National Laboratory
Los Alamos, New Mexico 87545

and

Rodrigo Corrales
Instituto Costarricense de Electricidad
Proyecto Geotérmico de Miravalles
San José, Costa Rica

DO NOT MICROFILM
THIS PAGE

CONTENTS

	Page
LIST OF TABLES	vi
LIST OF FIGURES	vii
EXECUTIVE SUMMARY	ix
ABSTRACT	1
I. INTRODUCTION AND SCOPE	2
II. WELLBORE FLUID SAMPLER---DESCRIPTION AND OPERATION	5
III. OTHER SAMPLES	8
IV. FLUID CHEMISTRY	8
V. WATER-STABLE ISOTOPES	25
VI. TRITIUM	26
VII. GAS COMPOSITIONS	31
VIII. GEOTHERMOMETRY	34
IX. CALCITE SCALING AND RESERVOIR BOILING	37
X. WELLBORE TEMPERATURE PROFILES	39
XI. RECOMMENDATIONS AND DISCUSSION	42
ACKNOWLEDGMENTS	43
REFERENCES	43

LIST OF TABLES

		Page
I.	Samples Collected at Miravalles, Costa Rica, September 1985 and September 1986	9
II.	Major and Trace Element Chemistry of Fluid Samples Collected at Miravalles, Costa Rica	12
III.	Weighted Mean Tritium Values from Precipitation	27
IV.	Analyses of Gas Samples from Miravalles, Costa Rica	32
V.	Equations for Calculating Chemical Geothermometer Temperatures (after Goff et al., 1987b)	35
VI.	Chemical Geothermometer Temperatures for Fluids from Miravalles, Costa Rica	36

LIST OF FIGURES

Page

1. Location map of the Miravalles, Costa Rica, geothermal field showing sample and well locations. Geothermal wells are indicated by PGM numbers, and sample locations other than geothermal wells are indicated by the MRV numbers..... 3

2. Conceptual model of a volcanic geothermal system (adapted from Henley and Ellis, 1983). Meteoric waters percolate deep into the ground where they are heated by an intrusive magmatic body. Magmatic volatiles such as CO_2, H_2O, NaCl, SO_2, H_2S, etc., are also transferred to the meteoric water, which rises buoyantly. Frequently, the hot fluid rises through fractures to the point that a vapor phase containing steam and noncondensable gases forms. When the steam condenses and mixes with shallow meteoric water, the H_2S is oxidized to sulfuric acid, which chemically alters the rock (as at Las Hornillas) and produces acid-sulfate hot springs. Neutral-chloride waters are typically deeper than the acid-sulfate waters, and if the two types of fluid mix, sulfate-chloride waters may result. Because of the topography and the hydrologic gradient, the fluids tend to flow laterally, and the HCO_3^-/SO_4^{-2} ratio increases with distance due to mixing of CO_2-saturated rain water. Features of the Miravalles system (Las Hornillas, PGM-2, PGM-12, and Salitral Bagaces) are shown in their approximate positions in the conceptual model. The heat source for the Miravalles geothermal system appears to be centered beneath Volcán Miravalles but may include residual heat from the pluton that resides beneath the earlier Guayabo caldera..... 4

3. Schematic drawing of the Los Alamos downhole samplers used in Miravalles, Costa Rica. (a) The tool used in 1986 had internal sample bottles. Either a single bottle with a nominal 1-ℓ capacity or two bottles each having a nominal 1/2-ℓ capacity could be used (two bottles are shown in the drawing). (b) The downhole sampler used in 1986 has a simpler clutch arrangement and uses external bottles whose volume depends on the length of the bottle. Both a nominal 2-ℓ bottle and a nominal 4-ℓ bottle were used at Miravalles. This sampler is operated using a seven-conductor cable or a special battery pack/controller on a wireline..... 6

4. Schematic drawing of the gas extraction system..... 7

5. Piper diagram showing the various types of fluids encountered at Miravalles. Mixing lines are described in the text..... 18

6. Chloride variation diagrams showing the mixing of reservoir fluids with dilute surface waters. (a) Sodium, (b) potassium, (c) lithium, (d) calcium, (e) boron, (f) ammonium..... 20

7. Variation of silica concentration with chloride concentration.... 24

8. Graph of δD versus $\delta^{18}O$ for waters of the Miravalles region. The dilute cold waters fall on or near the world meteoric line (Craig, 1961). Reservoir fluids show evidence of oxygen isotope exchange with the rocks..... 25

9. Tritium concentrations in rainfall at various locations for the period from 1961 to 1986 (after Goff et al., 1987b)..... 29

10. Results of model calculations of mean residence time as a function of the tritium concentration in water for the case of piston flow and for well-mixed reservoirs. These curves apply for waters collected in Central America in 1985-86 (after Goff et al., 1987b)..... 29

11. Variation of tritium with chloride for samples from Miravalles. Samples indicated by the stars are data presented by Giggenbach (1986)..... 30

12. Variation of gas composition with CO_2 mole percent. Most samples appear to be mixtures of air with a pure CO_2 gas. The oxygen is depleted relative to nitrogen--probably due to reaction with the rock. (a) CO_2 concentrations in the range 0 to 100 mole %, (b) CO_2 concentrations in the range 92 to 100 mole %..... 33

13. Enthalpy-chloride diagram for the Miravalles system; boiling lines connect data points with the point corresponding to pure steam, and mixing lines are drawn from sample data points to the point representing 21°C dilute waters. The various boiling and mixing lines are discussed in the text..... 38

14. Elevation cross section through the section A-A′ on Figure 1, showing the location of wellbores and isotherms within the reservoir. Important features in this cross section are the definition of the thermal outflow plume and the shallow boiling zone at PGM-10..... 40

EXECUTIVE SUMMARY

Wellbore logging operations and geochemical fluid sampling were conducted by the Los Alamos National Laboratory (LANL) and the Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) at the Miravalles Geothermal Project in the Guanacaste province of Costa Rica to resolve several specific problems related to the development of the Miravalles geothermal system. These problem areas include (a) the precipitation of calcite in the wellbore during production, (b) the origin of the acid fluid encountered when well PGM-2 was deepened, (c) the possible existence of a 300°C aquifer below the present 240°C geothermal reservoir, (d) the recharge to the system, and (e) the potential environmental impact of discharging spent thermal fluids to the surface. Although our main objective is to describe the results of fluid sampling, some of the information in this report was obtained from wellbore logs, including temperature logs, STP (spinner/temperature/pressure) logs, and three-arm caliper (wellbore diameter) logs (see Dennis et al., 1988).

Some of the issues mentioned above--in particular, the origin of the acid fluids and the possible 300°C aquifer at depth--are related to the structure of the hydrothermal reservoir. In a typical geothermal system associated with plate-margin or subduction zone volcanism, for example, Ahuachapán, El Salvador, or Miravalles, Costa Rica, the reservoir fluid is a neutral-chloride-type water; fumaroles, acid alteration of rocks, and acid-sulfate hot springs are found in the near-source region, and neutral-chloride to bicarbonate-rich-chloride hot springs discharge at some distance from the thermal source. Acid-sulfate fluids result from the near-surface condensation of steam and the oxidation of the H_2S, which went into the vapor phase when the reservoir fluid boiled at depth. According to this model of a geothermal system, the acid-sulfate fluids overlie the neutral-chloride reservoir fluids, and there is no pervasive acid aquifer at depth.

The acid fluids reportedly produced from well PGM-2 after it was redrilled were not observed in this study. In fact, the fluid collected downhole from PGM-2 is identical to the reservoir fluids collected from other wells in the field. Similar results were obtained from ICE's downhole sampling of PGM-2 using a Kuster sampler. In the absence of hard evidence to the

contrary, we believe the acid fluids encountered in well PGM-2 are best explained as being shallow acid-sulfate waters or mixed acid-sulfate-chloride fluids that entered the well through holes in the casing or by flowing around the casing shoe through the cement. Such holes may have subsequently been sealed since they were not detected in pressure tests of the casing. Because acid fluids were not encountered in PGM-2 during the LANL-ICE logging, it should be possible to safely run a complete suite of logs (temperature, STP, caliper water sampler) in this well using the standard seven-conductor logging cable to obtain better information.

On the basis of mixing lines and quartz geothermometry, Giggenbach (1986) suggested that a 300°C aquifer may underlie the 240°C reservoir at Miravalles. Using our fluid and gas chemistry data, we have calculated reservoir equilibrium temperatures using a variety of chemical geothermometers (quartz-conductive, Na-K, Na-K-Ca, and two gas geothermometers). These calculated geothermometer temperatures are in excellent agreement with the measured downhole temperatures of 220° to 255°C. Furthermore, temperature profiles in PGM-10 and PGM-11 show distinct temperature reversals that are characteristic of lateral outflow plumes (Goff et al., 1988). We have found no evidence for fluid temperatures in excess of 260°C within reasonable drilling depth.

Calcite scale is deposited in the wellbores as a result of the pH changes that accompany loss of CO_2 to the steam phase when the geothermal fluid boils. At Miravalles, the CO_2 concentration in the reservoir fluid is high; thus the change in pH due to loss of CO_2 to the steam phase is potentially very large. There are several ways to minimize the negative impact of calcite scale deposition within the wellbore. Probably the easiest method is to maintain a higher wellhead pressure during production. This raises the level of the boiling zone and thus the level of the calcite scale in the wellbore. It is particularly important to eliminate or reduce the calcite scale deposition in the slotted liner region of a production well since reaming operations only remove the scale from the inside of a slotted liner, but it may not be possible to raise the boiling zone above the slotted liners while producing at commercial rates. Another option is to continuously inject dilute acids or scale inhibitors below the flashing zone. This would involve hanging a narrow

tube in the wellbore and would require careful control to ensure the proper treatment of the well.

The most important strategy for reducing the impact of calcite scaling is to maintain reservoir pressures by reinjection of spent brine. This has implications far beyond the problem of calcite deposition in wellbores. When the wells produce at the maximum flow rate, the boiling zone in the wellbore is only slightly above the production horizons. For example, the main production zone in PGM-3 is only 3 m below the boiling zone, while in PGM-10 the calcite scale prevented logging below 1158 m, which is only 42 m above the production zone at 1200 m. A shallower production zone (at 1000-1100 m above the calcite scale) was not detected during STP logging, which suggests that this zone was already sealed by calcite scale. (Information about production zones was provided by ICE.) Continuous production of the field without reinjection could result in a decline in the reservoir pressure, leading to extensive boiling within the reservoir itself. This boiling would almost certainly cause calcite precipitation within the fractured reservoir that would reduce the permeability and the production rate from the reservoir. Even without the complication of calcite deposition within the reservoir, a decline in reservoir pressure can seriously reduce the productivity of a geothermal system as is seen in the case of the Ahuachapán field in El Salvador.

Analyzing the data for this report, we looked carefully for evidence of boiling within the reservoir, but we found no suggestion of excess gas or excess enthalpy in any of the wells. However, the hot spring at San Bernardo Abajo appears to be derived from steam condensate mixing with river water in the Río Agua Caliente. Steam-heated hot springs are not an unusual feature of this type of geothermal system (Henley and Ellis, 1983), but they do suggest that boiling is occurring along the outflow of the system.

Knowing the hydrology of the system is important in siting production and reinjection wells, and identifying the recharge to the system is one of the key issues. On the basis of hydrogen isotope analyses from rivers around Volcán Miravalles, Mainieri et al. (1985) and Giggenbach (1986) conclude that the recharge to the system is mainly to the north and east of the volcano. Giggenbach (1986) extends his hydrologic model of the system to the Rincón de la Vieja area, which is 15 to 20 km to the northwest of Miravalles. However,

samples of cold streams representing recent precipitation on Volcán Miravalles as well as the water used on site in the geothermal field have the same hydrogen isotope signatures as the reservoir fluids, suggesting that the recharge to the system is local.

The final problem area discussed above--that of assessing the potential environmental impact of discharging thermal fluids to the surface--is not directly addressed in this report. However, the fluid analyses including trace element analyses are presented for the use of those who wish to perform this assessment.

RESULTS OF INVESTIGATION AT THE MIRAVALLES GEOTHERMAL FIELD, COSTA RICA

Part 2: Downhole Fluid Sampling

by

Charles O. Grigsby, Fraser Goff, Pat E. Trujillo, Jr., Dale A. Counce, Bert Dennis, Jerome Kolar, and Rodrigo Corrales

ABSTRACT

Samples of the geothermal fluids in the Miravalles, Costa Rica, geothermal system were collected from production wellbores using downhole fluid samplers, from flowing wellheads using miniseparators, and from hot springs that discharge in the area. The reservoir fluid at Miravalles is a neutral-chloride-type water, but fumaroles and acid-sulfate springs are present within the main thermal area, and there are bicarbonate-rich hot springs that are clearly related to the neutral-chloride reservoir fluids. Dissolved gases are primarily a mixture of CO_2 with air, but samples collected in the fumarolic areas also contain H_2S. Water-stable isotope analyses suggest local meteoric recharge, and the reservoir fluid shows oxygen isotopic shifts of about 2.5% due to high-temperature oxygen exchange between water and rock. Chemical geothermometer temperatures are consistent with the measured downhole temperature of 220° to 255°C.

This pattern of neutral-chloride reservoir fluids with acid-sulfate springs near the source region and bicarbonate-rich chloride hot springs at the periphery of the system suggests a lateral outflow type of hydrothermal system. In addition to the geochemical evidence, temperature profiles from several of the wells show temperature reversals that are characteristic of lateral outflow plumes. We find no evidence for the underlying, higher temperature (300°C) system, which has been suggested by other investigators.

I. INTRODUCTION AND SCOPE

In September 1985 and again in September 1986, wellbore logging operations were conducted by the Los Alamos National Laboratory (LANL) and the Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) at the Miravalles Geothermal Project (Corrales, 1985) under a program funded by the US Agency for International Development (USAID). As a part of these operations, water and gas samples were collected from wells and hot springs in the Miravalles geothermal field to address questions about the reservoir chemistry and hydrology. A location map showing sample and well locations is presented in Fig. 1.

Specific objectives of this investigation include studying (a) the precipitation of calcite in the wellbores during production, (b) the origin of the acid fluid encountered when well PGM-2 was deepened, (c) the possible existence of a 300°C aquifer below the present 240°C reservoir, and (d) the recharge to the system. A fifth objective, which arose during the course of the study, involves assessment of the environmental impact of discharging spent thermal fluids to the surface. Most of these problem areas are best discussed in the context of a reservoir model. Typically, geothermal systems associated with plate-margin or subduction zone andesitic volcanism have neutral-chloride reservoir fluids; fumaroles, acid alteration of rocks, and acid-sulfate hot springs near the source region; and neutral-chloride to bicarbonate-rich-chloride hot springs that discharge some distance from the thermal source as shown in Fig. 2 (Henley and Ellis, 1983; Henley et al., 1984). Miravalles, Costa Rica, and Ahuachapán, El Salvador, are typical examples of this type of geothermal system associated with plate-margin andesitic volcanism.

Because reservoir fluids separate into vapor and liquid phases when a well is produced, downhole samples are required to preserve the fluid in its unflashed state. This allows the measurement of the gas/liquid ratio as well as the determination of the gas partial pressure in the reservoir fluid, which is important in evaluating the possibility of boiling within the reservoir. Furthermore, with downhole sampling, the major element chemistry does not have to be corrected for steam loss or for loss of chemical species that precipitate when the fluid is flashed. Downhole sampling also allows direct collection of

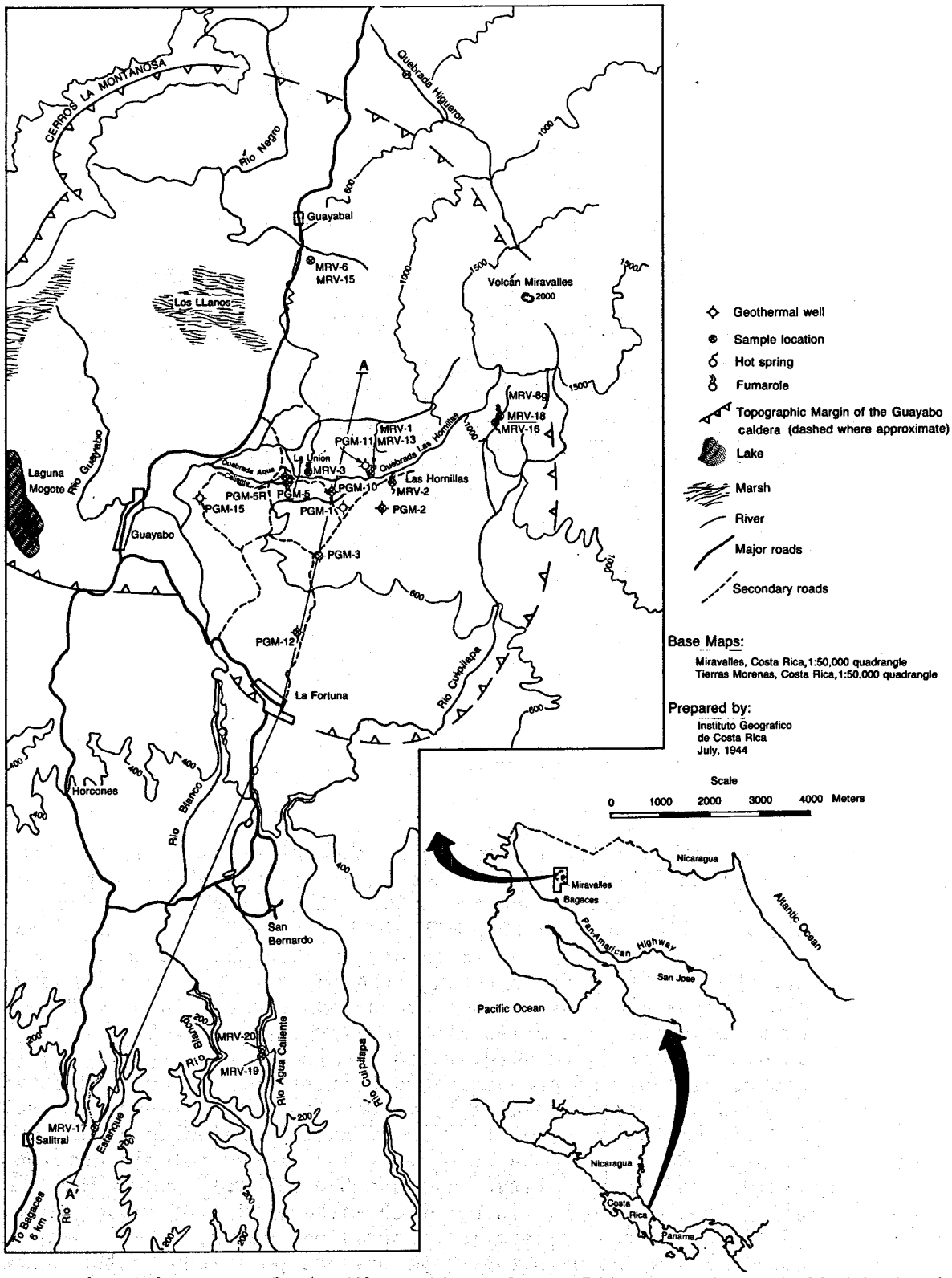


Figure 1. Location map of the Miravalles, Costa Rica, geothermal field showing sample and well locations. Geothermal wells are indicated by PGM numbers, and sample locations other than geothermal wells are indicated by the MRV numbers.

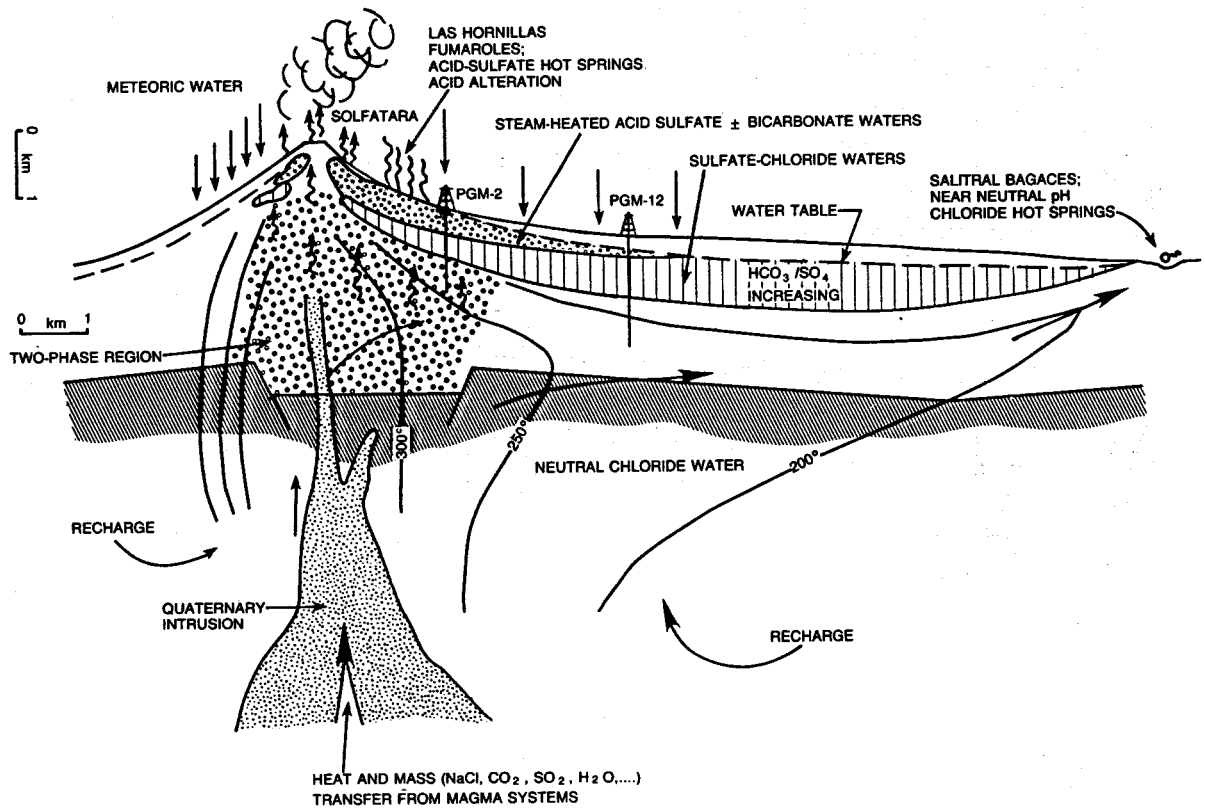


Figure 2. Conceptual model of a volcanic geothermal system (adapted from Henley and Ellis, 1983). Meteoric waters percolate deep into the ground where they are heated by an intrusive magmatic body. Magmatic volatiles such as CO_2, H_2O, NaCl, SO_2, H_2S, etc., are also transferred to the meteoric water, which rises buoyantly. Frequently, the hot fluid rises through fractures to the point that a vapor phase containing steam and noncondensable gases forms. When the steam condenses and mixes with shallow meteoric water, the H_2S is oxidized to sulfuric acid, which chemically alters the rock (as at Las Hornillas) and produces acid-sulfate hot springs. Neutral-chloride waters are typically deeper than the acid-sulfate waters, and if the two types of fluid mix, sulfate-chloride waters may result. Because of the topography and the hydrologic gradient, the fluids tend to flow laterally, and the HCO_3^-/SO_4^{-2} ratio increases with distance due to mixing of CO_2-saturated rain water. Features of the Miravalles system (Las Hornillas, PGM-2, PGM-12, and Salitral Bagaces) are shown in their approximate positions in the conceptual model. The heat source for the Miravalles geothermal system appears to be centered beneath Volcán Miravalles but may include residual heat from the pluton that resides beneath the earlier Guayabo caldera.

fluid from separate horizons in a wellbore, which cannot be obtained during wellhead operations. Thus, downhole samples can provide a better indication of the actual compositions of reservoir fluids than samples collected at the surface can.

II. WELLBORE FLUID SAMPLER--DESCRIPTION AND OPERATION

In 1985, downhole samples were collected from two wells at Miravalles--PGM-3 and PGM-10--using the sampling tool developed by LANL for use in geothermal wells (see Fig. 3a) (Archuleta et al., 1978). This tool contains a stainless steel bottle having an internal volume of 817.5 cm^3 (two smaller bottles are shown in the figure), which is evacuated before being inserted into the tool housing. The sample bottle is opened and closed downhole by a high-temperature motor, actuated from the surface using a seven-conductor logging cable. When the sample valve is opened, the fluid flashes into the evacuated sample bottle; however, because of the flow restriction in the sample valve, there is no loss of volatiles nor exchange of fluid between the interior of the sample bottle and the wellbore. The static pressure in the wellbore is usually high enough to redissolve the noncondensable gases so that, at downhole temperature and pressure conditions, the sample bottle is completely filled with a single liquid phase. When the sample returns to the surface, contraction of the fluid volume due to decrease in temperature causes a head space to form in the sample bottle. The head space is filled with gas that separates from the fluid.

Downhole samples obtained in 1986 were collected using a new tool (Fig. 3b), developed for use in the high-temperature hypersaline brines of the Salton Sea geothermal system in southern California (Goff et al., 1987a; Grigsby et al., in preparation). This new tool is generally operated from the surface using a seven-conductor cable, but it can also be deployed on a slickline using a battery pack/controller developed by Sandia National Laboratories (Wolfenbarger, 1986). This second configuration was used to retrieve samples from the acid well, PGM-2. Another advantage of the new tool is that the sample bottle is larger; downhole sample bottles having a nominal capacity of 2-ℓ or 4-ℓ were used during the second sampling trip. The larger

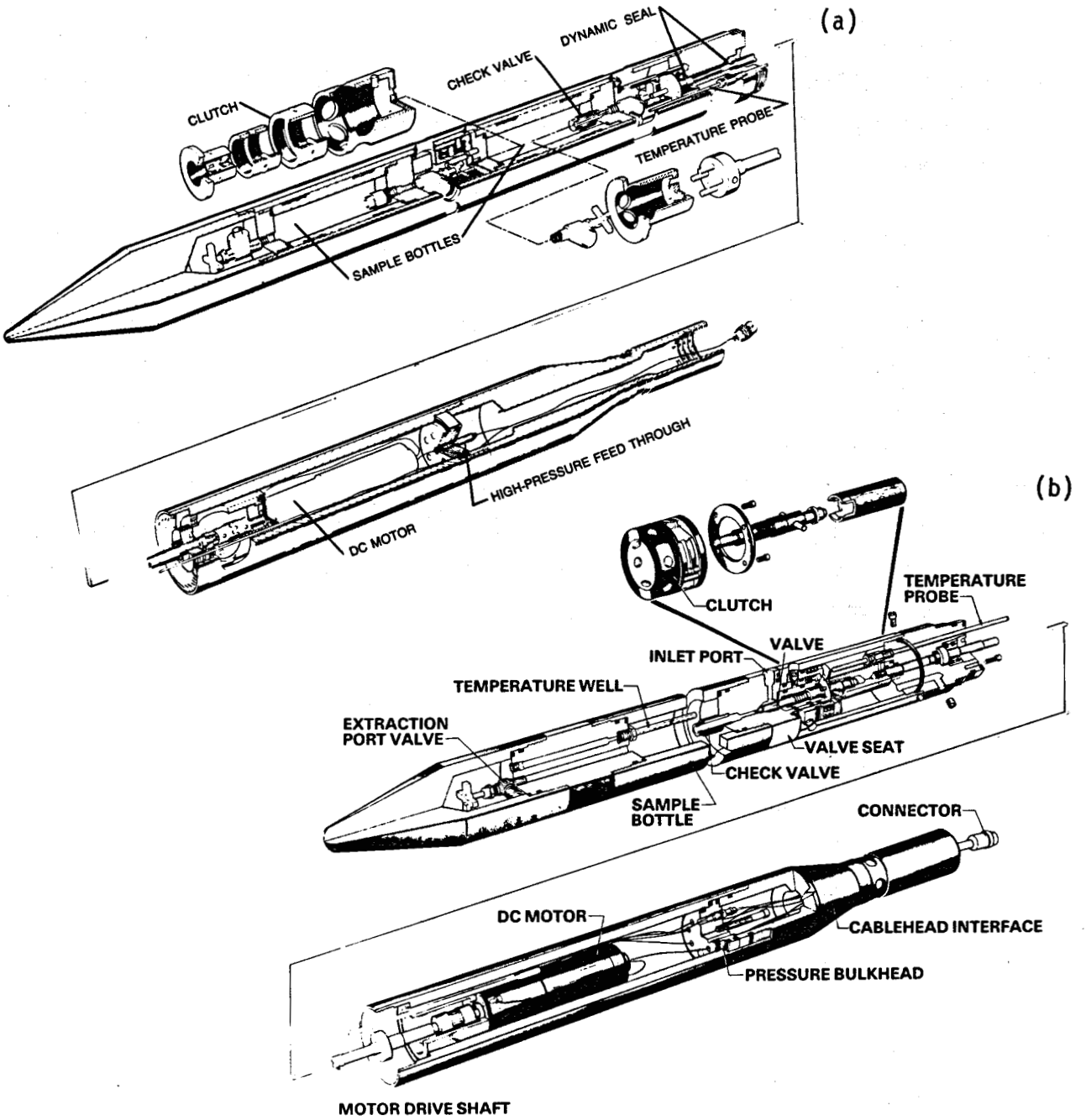


Figure 3. Schematic drawing of the Los Alamos downhole samplers used in Miravalles, Costa Rica. (a) The tool used in 1986 had internal sample bottles. Either a single bottle with a nominal 1-ℓ capacity or two bottles each having a nominal 1/2-ℓ capacity could be used (two bottles are shown in the drawing). (b) The downhole sampler used in 1986 has a simpler clutch arrangement and uses external bottles whose volume depends on the length of the bottle. Both a nominal 2-ℓ bottle and a nominal 4-ℓ bottle were used at Miravalles. This sampler is operated using a seven-conductor cable or a special battery pack/controller on a wireline.

sample volume eliminates the need for repeated trips to the same horizon within a well.

When the sampling tool is returned to the surface after a sampling run, the downhole sample bottle is removed from the tool housing and is cooled (usually ≤70°C) so that the water vapor pressure inside the bottle is low. The sample bottle is then connected to a gas extraction line (Fig. 4) so that gas pressure can be measured and gas samples collected. The collection temperature is measured with a thermocouple placed in the temperature well of the downhole sample bottle (Fig. 4). After gas extraction procedures are finished, the downhole sample bottle is opened and the liquid volume is measured. The difference between the sample bottle volume and the liquid volume is the gas volume in the downhole sample at the surface collection temperature. The liquid sample is then preserved according to standard techniques (filtering, acidification, dilution, etc.) depending on the types of analysis desired. The specific techniques used at Miravalles are described by Trujillo et al. (1987).

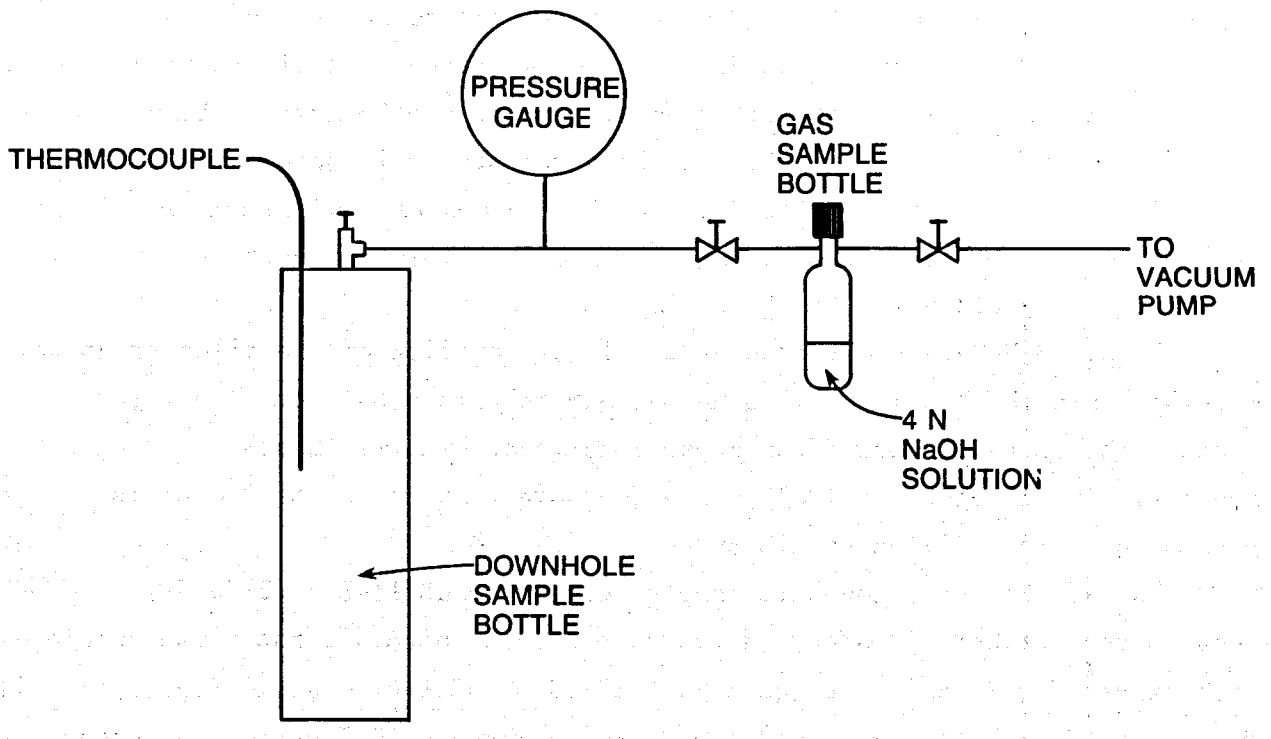


Figure 4. Schematic drawing of the gas extraction system.

III. OTHER SAMPLES

In addition to the downhole sampling, surface liquid and gas samples were collected at wells PGM-5 and PGM-5R using a small steam separator. Additional samples were collected at the liquid outflow of the silencer at well PGM-10, at several fumaroles and hot springs in the area, and at cold springs and streams. The samples collected are listed in Table I.

IV. FLUID CHEMISTRY

Fluid chemical analyses described in this report were performed at the Los Alamos Fenton Hill analytical chemistry laboratory (LANL) according to the methods of Trujillo et al. (1987). Four of the samples collected require reconstruction to restore the measured species concentrations to their preflash values, and the reconstructed analyses are presented in Table II.

Sample MRV-5 was collected at well PGM-5 using a steam separator operating at a separation pressure of 3 kg/cm^2 gauge, which corresponds to a separation temperature of 133°C. Nonvolatile species concentrations were corrected for steam loss (about 22% based on measured downhole temperatures of 240°C in various wells in the field as well as on geothermometer temperatures described later in this report), and the water-stable isotopes were corrected for single-stage flashing at 133°C. The NH_4^+ concentration was corrected for redistribution between steam and aqueous phases. This corrected analysis is presented as sample MRV-5* in Table II.

Sample MRV-8 was collected at the liquid outflow of the silencer at well PGM-10; hence the sample has flashed at atmospheric pressure. The major element chemistry corrected for steam loss (approximately 27.4% assuming a separation temperature of 100°C and a downhole temperature of 240°C) is presented in Table II as sample MRV-8*.

Two of the three downhole samples collected at 1143 m (3750 ft) in PGM-10 require correction. It appeared that the sample valve did not close completely when sample MRV-9 was collected. Only 509.3 mℓ of fluid was collected on this run compared with an average of 583 mℓ for all other 1985 runs. To correct this sample for steam loss, we assume that the sample was collected at 240°C

TABLE I. Samples Collected at Miravalles, Costa Rica, September 1985 and September 1986. The following abbreviations are used to describe the sample types collected: FA = filtered, acidified; FU = filtered, unacidified; SiO_2(1:5) = 1:5 dilution for silica analysis; C, S, H_2O isotope = carbon (bicarbonate/carbonate), sulfur (sulfate), and water-stable isotope samples; ^3H = tritium sample; gas = gas sample.

Sample Number	Date	Description
MRV-1	11 Sept 85	Gas sample[a] at lower Las Hornillas fumarole. Large fumarole area with vigorously bubbling mud pots. Some pools have large amount of gray clay; others are yellow. Fumarole temperature--99.6°C. Total flow <1 ℓ/s. UTM coordinate 299407.
MRV-2	11 Sept 85	Gas sample[a] at upper Las Hornillas fumarole. Large fumarole area in andesite that shows strong chemical alteration. Native sulfur depositing. Pools are clear and not vigorous. Fumarole temperature--99.4°C. Total flow <1 ℓ/s. UTM coordinate 299407.
MRV-3	11 Sept 85	Gas sample[a] at Fumaroles La Unión (about 300 m NNE of well PGM-5). Rocks are much less altered than upper Las Hornillas fumarole, and total area is small. There are no liquid pools here. Fumarole temperature--100.5°C.
MRV-4	12 Sept 85	Gas samples collected from well PGM-5R, a dry steam well 500 m deep. Collected using a miniseparator at a pressure of 3.5 kg/cm^2 gauge. UTM coordinate 299406.
MRV-5	12 Sept 85	Liquid and gas samples collected through a miniseparator (P = 3 kg/cm^2 gauge) from well PGM-5. FA, FU, SiO_2(1:5), ^3H, C isotope, S isotope, H_2O isotope, gas. UTM coordinate 299406.
MRV-6	12 Sept 86	Liquid and gas samples from an acid hot spring near Guayabal that discharges at the base of a thick soil bank. Pool is about 8 m in diameter. pH = 2.0-2.1; T = 58°C; flow = 30 ℓ/min; FA, FU, SiO_2(1:5), ^3H, H_2O isotope, S isotopes, gas. UTM coordinate 304406.
MRV-7	13 Sept 85	Downhole sample at 685.8 m (2250 ft) in well PGM-3. Three successful trips were made with 596 mℓ, 572.1 mℓ, and 586.7 mℓ of water being collected. Gas pressure on first downhole trip was 15 psia. FU, FA, SiO_2(1:5), H_2O isotope, ^3H, gas. UTM coordinate 298406.

[a]Liquid samples were not collected. Because the liquid pools had large volumes and low flow rates, the samples would show strong evaporation effects.

TABLE I. (cont)

Sample Number	Date	Description
MRV-8	18 Sept 85	Liquid sample from weir box at well PGM-10. FU, FA. UTM coordinate 299407.
MRV-9	21 Sept 85	Downhole sample at 1143 m (3750 ft) in well PGM-10. Motor in sampler failed, and whether the sample valve was completely closed was unknown. 509.3 mℓ liquid collected. FU, FA. UTM coordinate 299407.
MRV-10 MRV-10c	22 Sept 85	Downhole sample at 1143 m (3750 ft) in well PGM-10. Pressure in sample bottle exceeded 15 psia; thus, gas pressure was not measured. 113.0 mℓ of liquid was trapped in gas line, and it was preserved as MRV-10c. 546.0 mℓ of sample was collected. FU, FA, SiO_2(1:5). An additional trip was made to 1143 m (3750 ft), and 614.8 mℓ of liquid was collected. This sample was used for ^3H, H_2O isotope, C isotope.
MRV-11	21 Sept 86	Downhole sample at 1600 m (5248 ft) in well PGM-5. Sample collected with the new LANL tool using the 4-ℓ sample bottle. 3267.3 mℓ collected. Gas pressure was 8.6 psia. FU, FA, H_2O isotope, C isotope, S isotope, ^3H, gas. UTM coordinate 299406.
MRV-12	23 Sept 86	Downhole sample collected at 1825 m (5988 ft) in well PGM-2 using the Sandia National Laboratories battery pack/ controller and the ICE wireline. Sample bottle #1. 1722.9 mℓ of fluid collected. Gas pressure was 8.6 psia. FU, FA, ^3H, H_2O isotope, S isotope, gas. UTM coordinate 299407.
MRV-13	23 Sept 86	Lower Las Hornillas fumarole (repeat of MRV-1). Sample from gray bubbling pool about 20 m northwest of large pool. Temperature = 88.9°C. FU, FA, H_2O isotope, ^3H, S isotope, gas. UTM coordinate 299407.
MRV-14	24 Sept 86	Stream sample ~3 km east of Aguas Claras in the Quebrada Higuerón. Temperature = 21.4°C; flow ~1 ℓ/s. FU, FA, ^3H, H_2O isotope. UTM coordinate 307408.
MRV-15	24 Sept 86	Repeat of MRV-6. Temperature = 60.3°C. Flow ~1 ℓ/s. FU, FA, ^3H, H_2O isotope, S isotope, gas. UTM coordinate 304406.

TABLE I. (cont)

Sample Number	Date	Description
MRV-16	24 Sept 86	Manantial Gaveteros. Cold spring on the south side of Volcán Miravalles. ICE location MI-13-10-NPZ. Temperature = 25.5°C; flow ~2 ℓ/s. Depositing sulfur in streambed. FU, FA, ^3H, H_2O isotope, C isotope, S isotope. UTM coordinate 300410.
	NOTE:	Gas sample was collected from this spring by S. Aarnorssen, 13 September 85, for analysis by USGS, Menlo Park.
MRV-17	24 Sept 86	Salitral Bagaces hot springs issuing from travertine mounds in the bed of a creek ~16 km south of Guayabo. Temperature = 67.7°C; flow ~2 ℓ/min. FU, FA, ^3H, H_2O isotope, C isotope, S isotope. UTM coordinate 287401.
MRV-18	24 Sept 86	River sample from above the cold spring at MRV-16 at the base of a large fumarole area where sulfur is depositing. FU, FA, ^3H, H_2O isotope. UTM coordinate 300410.
MRV-19	25 Sept 86	San Bernardo Abajo. Hot spring issues from tuff in the bottom of the canyon of the Río Blanco. ICE location #TM-7-6-NTP-1. Small concrete holding tank with 5-in.-diameter iron pipe. Temperature = 47.5°C; flow ~2 ℓ/s. FU, FA, ^3H, H_2O isotope, C isotope, S isotope. UTM coordinate 288405.
MRV-20	25 Sept 86	River just above the point where outflow of MRV-19 enters the river. Temperature = 21°C. FU, FA, ^3H, H_2O isotope. UTM coordinate 288405.
MRV-21	25 Sept 86	Downhole water sample collected at 580 m in well PGM-12. 3545 mℓ collected. Pressure = 6.6 psia. FU, FA, ^3H, H_2O isotope, C isotope, S isotope. UTM coordinate 296406.
MRV-22	25 Sept 86	Make-up water from the water supply system at the PGM-12 well site. Temperature = 21°C. FU, FA, ^3H, H_2O isotope. UTM coordinate 296406.

Table II. Major and Trace Element Chemistry of Fluid Samples Collected at Miravalles, Costa Rica. Chemical analyses are by P. E. Trujillo and D. A. Counce, Los Alamos National Laboratory, and are reported in milligrams per kilogram except as noted. Water-stable isotope analyses are from the Stable Isotope Laboratory, Southern Methodist University, Dallas, Texas. Tritium analyses are by the Tritium Laboratory, University of Miami, Miami, Florida. Carbon isotope analyses are by the US Geological Survey, Menlo Park, California.

S/N	Date	Grid UTM	Elevation (m)	pH Field	pH Lab	Eh Lab (mv)	Laboratory Conductivity (µmho/cm^2)
MRV-5	09/12/85	299406	575	---	7.19	311	11210
MRV-5*	09/12/85	299406	575	---	---	---	---
MRV-6	09/12/85	304406	630	---	2.01	787	7100
MRV-7	09/13/85	298406	640	---	7.51	437	9960
MRV-8	09/18/85	299407	670	---	7.13	424	11490
MRV-8*	09/18/85	299407	670	---	---	---	---
MRV-9	09/21/85	299407	670	---	7.41	419	11790
MRV-9*	09/21/85	299407	670	---	---	---	---
MRV-10	09/22/85	299407	670	---	8.00	408	10340
MRV-10c	09/22/85	299407	670	---	5.80	502	7250
MRV-10*	09/22/85	299407	670	---	---	---	---
MRV-11	09/21/86	299406	575	6.5	7.33	---	9870
MRV-12	09/23/86	299407	745	6.3	7.28	---	9530
MRV-13	09/23/86	299407	720	3.5	2.76	---	1673
MRV-14	09/24/86	307408	520	6.5	6.52	---	50
MRV-15	09/24/86	304406	630	1.5	2.14	---	7260
MRV-16	09/24/86	300410	1000	5.5	3.22	---	927
MRV-17	09/24/86	287401	160	6.9	7.67	---	10230
MRV-18	09/24/86	300410	1000	---	3.22	---	515
MRV-19	09/25/86	288405	---	6.5	7.99	---	1198
MRV-20	09/25/86	288405	---	---	8.02	---	420
MRV-21	09/25/86	296406	510	---	7.24	---	10540
MRV-22	09/25/86	296406	510	---	6.20	---	71

Table II. (cont)

S/N	SiO_2	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^{+}	K^{+}	Li^{+}	$Fe^{+2,+3}$	NH_4^+	Total[a] NH_4^+	HCO_3^- (note b)	Total[a] Carbonate	SO_4^{-2}
MRV-5	554	68.0	0.14	1920.0	256.0	6.91	0.08	1.20		40.3		36.0
MRV-5*	441	54.1	0.11	1528.9	203.9	5.50	0.06	13.85		32.1		28.7
MRV-6	259	109.0	49.70	64.0	4.0	0.16	64.30	2.80		0.0		2690.0
MRV-7	490	59.0	0.14	1650.0	210.0	5.71	1.02	3.72	7.83	84.2	1775.4	37.9
MRV-8	554	66.0	0.08	2020.0	237.0	6.71	0.00	1.10		40.3		38.4
MRV-8*	403	47.9	0.06	1466.9	172.1	4.87	0.00	15.58		29.3		27.9
MRV-9	586	70.0	<0.02	2150.0	251.0	6.58	0.06	1.00		56.1		60.3
MRV-9*	453	54.1	0.00	1661.5	194.0	5.09	0.05	8.43		43.4		46.6
MRV-10	449	68.0	0.14	1995.0	210.0	5.86	0.14	1.20		51.2		47.5
MRV-10c	158	41.0	0.16	1260.0	156.0	4.00	0.12	<0.10		65.9		35.5
MRV-10*	400	63.4	0.14	1869.2	200.8	5.54	0.14	0.99	20.1	53.7	1386.6	45.4
MRV-11	449	66.4	0.08	1750.0	204.0	5.49	0.51	1.90	2.7	85.4	345.9	27.9
MRV-12	445	50.9	0.21	1755.0	181.0	5.25	3.76	3.71	15.6	61.0	434.9	83.2
MRV-13	223	17.2	7.26	9.5	6.9	0.01	113.00	37.90		0.0		536.0
MRV-14	43	5.1	1.37	4.2	1.9	<0.01	0.02	0.03		40.3		3.0
MRV-15	257	108.0	48.20	57.0	3.5	0.05	62.80	2.60		0.0		2530.0
MRV-16	102	55.1	11.70	19.6	6.0	<0.01	2.55	3.40		0.0		365.0
MRV-17	126	115.0	6.73	2010.0	76.0	3.90	0.39	1.33		964.0		121.0
MRV-18	62	13.5	3.15	7.1	2.9	<0.01	1.77	0.08		0.0		126.0
MRV-19	178	57.8	28.60	140.0	25.6	0.27	0.00	0.04		436.0		23.5
MRV-20	85	37.7	13.60	37.0	8.1	0.06	0.06	0.17		190.0		13.9
MRV-21	398	40.0	1.17	1800.0	249.0	5.95	0.26	17.22	20.5	104.0	989.3	205.0
MRV-22	32	5.2	1.69	4.0	1.4	<0.01	0.03	0.03		28.1		19.3

[a]Ammonium and bicarbonate corrected for CO_2 recovered in the gas phase from the downhole sampler.

[b]Measured bicarbonate concentrations in the aqueous samples. There is no correction for CO_2 loss on flashing, but the analyses are corrected for steam loss where appropriate (5*, 8*, 9*).

Table II. (cont)

S/N	Cl^-	F^-	B	NO^-_3	TDS	Σ cations	Σ anions	Ag	Al	As	Ba
MRV-5	3436.0	1.24	54.00	<0.2	6374	94.53	100.88	<0.001	0.7	7.4	0.28
MRV-5*	2736.1	0.99	43.00	0.0	5078	75.28	80.33	0.000	0.6	5.9	0.22
MRV-6	635.0	1.40	1.84	<0.2	3881	16.05	74.08	<0.001	495.0	1.5	0.02
MRV-7	2806.0	1.10	47.00	<0.2	7171	81.18	142.71	<0.001	0.8	6.2	0.42
MRV-8	3462.0	1.33	57.00	<0.2	6484	98.25	101.80	<0.001	0.8	7.4	0.28
MRV-8*	2514.1	0.97	41.39	0.0	4713	71.35	73.93	0.000	0.6	5.4	0.20
MRV-9	3602.0	1.13	62.00	<0.2	6847	104.44	106.69	<0.001	0.3	2.3	0.37
MRV-9	2783.6	0.87	47.91	0.0	5294	80.71	82.45	0.000	0.2	1.8	0.29
MRV-10	3278.0	1.18	51.00	<0.2	6159	96.47	96.70	<0.001	0.4	8.0	0.32
MRV-10c	2165.0	0.84	32.00	<0.2	3919	61.44	64.40	<0.001	<0.01	7.3	0.21
MRV-10*	3087.5	1.12	47.75	0.0	7162	90.47	91.17	0.000	0.0	7.9	0.30
MRV-11	2835.0	1.10	46.60	<0.2	5820	85.58	95.67	<0.001	<0.1	1.1	0.60
MRV-12	2710.0	1.69	47.30	<0.2	5783	84.69	95.93	<0.001	<0.1	10.2	0.18
MRV-13	3.4	0.11	0.20	5.1	959	10.22	11.35	<0.001	4.1	<0.1	0.06
MRV-14	2.4	0.07	<0.10	<0.1	102	0.60	0.79	<0.001	<0.1	<0.1	0.01
MRV-15	673.0	1.43	1.60	0.9	3746	15.45	71.82	<0.001	389.0	1.7	<0.02
MRV-16	4.7	0.20	<0.10	0.7	571	5.04	7.75	<0.001	17.5	<0.1	0.04
MRV-17	2620.0	0.72	46.20	<0.2	6092	96.32	94.38	<0.001	<0.1	5.6	0.47
MRV-18	1.9	0.31	<0.10	0.9	220	1.42	2.71	<0.001	5.1	<0.1	0.01
MRV-19	163.0	0.24	2.70	0.6	1056	12.02	12.38	<0.001	<0.1	0.4	0.13
MRV-20	34.9	0.22	0.40	<0.1	421	4.84	4.42	<0.001	<0.1	<0.1	0.08
MRV-21	3040.0	1.57	54.80	<0.2	6906	88.58	127.30	<0.001	1.0	6.2	0.20
MRV-22	3.3	0.09	<0.10	<0.1	95	0.61	0.96	<0.001	<0.1	<0.1	0.02

Table II. (cont)

S/N	Br	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Hg	Mn	Mo	Ni	Pb	PO_4
MRV-5	17.5	<0.001	0.003	0.002	0.800	<0.001	<0.2	0.03	<0.2	0.001	0.010	<0.2
MRV-5*	13.9	0.000	0.002	0.002	0.637	0.000	0.0	0.02	0.0	0.001	0.008	0.0
MRV-6	0.5	0.036	<0.001	0.090	<0.100	0.003	<0.2	1.75	<0.2	0.046	0.006	<0.2
MRV-7	16.2	<0.001	<0.001	0.005	0.800	<0.001	<0.2	0.30	<0.2	0.007	<0.001	<0.2
MRV-8	17.6	<0.001	0.005	0.001	0.800	<0.001	<0.2	0.02	<0.2	0.009	<0.001	<0.2
MRV-8*	12.8	0.000	0.004	0.001	0.581	0.000	0.0	0.01	0.0	0.007	0.000	0.0
MRV-9	13.3	0.010	0.002	0.016	0.800	0.018	<0.2	0.09	<0.2	0.004	0.006	<0.2
MRV-9*	10.3	0.008	0.002	0.012	0.618	0.014	0.0	0.07	0.0	0.003	0.005	0.0
MRV-10	11.5	0.004	<0.001	0.003	0.700	0.011	<0.2	0.36	<0.2	0.006	0.040	<0.2
MRV-10c	9.6	0.018	0.002	<0.001	0.500	0.320	<0.2	0.28	<0.2	0.024	0.130	<0.2
MRV-10*	11.2	0.006	0.000	0.000	0.666	0.064	0.0	0.35	0.0	0.009	0.055	0.0
MRV-11	10.2	<0.001	0.003	0.004	0.590	<0.001	<0.1	0.08	<0.1	0.022	0.003	<0.2
MRV-12	9.9	<0.001	0.004	0.017	0.530	<0.001	<0.1	0.36	<0.1	0.056	<0.001	<0.2
MRV-13	<0.1	0.001	0.004	0.028	0.007	0.044	<0.1	0.48	<0.1	0.064	0.011	<0.1
MRV-14	<0.1	<0.001	<0.001	<0.001	0.005	<0.001	<0.1	<0.01	<0.1	0.006	<0.001	<0.1
MRV-15	2.8	0.012	0.003	0.014	0.030	0.047	<0.1	1.75	<0.1	0.023	0.007	<0.2
MRV-16	<0.1	<0.001	0.001	0.002	0.004	<0.001	<0.1	0.85	<0.1	0.023	<0.001	<0.2
MRV-17	7.7	<0.001	0.001	0.004	0.130	0.003	<0.1	0.30	<0.2	0.014	0.002	<0.2
MRV-18	<0.1	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.1	0.09	<0.1	<0.002	<0.001	<0.1
MRV-19	0.7	<0.001	<0.001	<0.001	0.009	<0.001	<0.1	<0.01	<0.1	<0.002	<0.001	0.3
MRV-20	0.2	0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.001	<0.1	0.05	<0.1	<0.002	0.005	<0.1
MRV-21	10.7	<0.001	<0.001	<0.001	0.410	<0.001	<0.1	0.85	<0.1	<0.002	0.003	<0.2
MRV-22	<0.1	0.002	<0.001	<0.001	<0.002	0.998	<0.1	0.03	<0.1	<0.002	<0.001	<0.1

Table II. (cont)

S/N	Rb	Sb	Se	Sr	U	Zn	δD (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	^{3}H (TU)	^{13}C (‰)
MRV-5	1.17	<0.2	<0.2	2.06	<0.2	<0.02	-30.0	-2.77	---	---
MRV-5*	0.93	0.0	0.0	1.64	0.0	0.00	-33.3	-3.57	---	---
MRV-6	0.10	<0.2	<0.2	0.18	<0.2	0.91	-26.1	-4.61	1.36	---
MRV-7	0.96	<0.2	<0.2	1.60	<0.2	0.06	-29.0	-2.86	5.73	---
MRV-8	1.14	<0.2	<0.2	2.06	<0.2	<0.02	---	---	---	---
MRV-8*	0.83	0.0	0.0	1.50	0.0	0.00	---	---	---	---
MRV-9	1.22	<0.2	<0.2	2.18	<0.2	0.04	---	---	---	---
MRV-9*	0.94	0.0	0.0	1.68	0.0	0.03	---	---	---	---
MRV-10	1.05	<0.2	<0.2	1.98	<0.2	0.14	---	---	---	---
MRV-10c	0.71	<0.2	<0.2	1.30	<0.2	2.14	---	---	---	---
MRV-10*	0.99	0.0	0.0	1.86	0.0	0.48	-29.5	3.19	1.29	---
MRV-11	0.93	<0.1	<0.1	1.90	<0.2	0.02	-31.5	-3.15	---	-1.7
MRV-12	0.75	<0.1	<0.1	0.08	<0.2	0.08	-32.6	-2.91	9.43	---
MRV-13	0.04	<0.1	<0.1	0.08	<0.2	0.47	14.1	4.74	1.81	---
MRV-14	0.01	<0.1	<0.1	0.02	<0.1	<0.01	-31.7	-5.23	3.59	---
MRV-15	0.12	<0.1	<0.1	0.05	<0.2	1.14	-29.4	-4.47	2.83	---
MRV-16	0.03	<0.1	<0.1	0.40	<0.1	2.60	-48.0	-7.14	5.74	-4.2
MRV-17	0.28	<0.1	<0.1	10.50	<0.2	<0.01	-37.2	-3.77	0.49	0.5
MRV-18	0.01	<0.1	<0.1	0.07	<0.1	0.45	-41.9	-6.50	4.69	---
MRV-19	0.09	<0.1	<0.1	0.67	<0.1	0.03	-49.2	-7.33	0.34	-4.4
MRV-20	0.03	<0.1	<0.1	0.29	<0.1	<0.01	-53.0	-7.10	3.19	---
MRV-21	0.86	<0.1	<0.1	0.79	<0.2	<0.02	-30.5	-2.53	6.76	-1.5
MRV-22	0.01	<0.1	<0.1	0.03	<0.1	<0.01	-30.5	-5.06	3.61	---

and that it flashed at some unknown temperature, T. As a result of this steam loss, 73.7 mℓ of water (the difference between the volume of water collected during this run and the average volume of water collected in other runs) entered the vapor phase and escaped from the sample bottle. From steam tables, we find that the temperature of separation for a single-stage flash would be 185°C. MRV-9 corrected for flashing at 185°C is listed in Table II as MRV-9*.

The next sample (MRV-10) was also collected downhole in PGM-10. In this case, a small amount of fluid was carried over into the gas extraction system. A trap was installed in the line to collect this fluid, and 113 g of fluid was trapped and preserved for analysis. This sample is labeled MRV-10c. It is apparent from the analysis of MRV-10c that this sample is entrained fluid rather than condensed steam; thus, the true composition of reservoir fluid from well PGM-10 must be reconstructed from the MRV-10 and the MRV-10c analyses according to the relative proportions of these samples. In Table II, this corrected composition is presented as MRV-10*. The isotope analysis reported with MRV-10* was collected on a third trip of the sampling tool into PGM-10. This sample was not flashed.

In addition to the correction for flashing, the downhole samples (MRV-7, MRV-10*, MRV-11, MRV-12, and MRV-21) were corrected for the CO_2 and NH_3, which was measured in the gas phase. The total NH_4^+ and total HCO_3^- are reported in separate columns in Table II.

Figure 5 is a Piper diagram showing the major characteristics of the various fluids sampled in the Miravalles area. Three basic types of water are observed. The reservoir fluids (MRV-5, MRV-7 to MRV-12, MRV-21) are predominantly neutral-chloride-type waters with $Na^+ \gg K^+ > Ca^{+2}$ and $Cl^- \gg HCO_3^- \simeq SO_4^{-2}$. Surface meteoric waters (MRV-14, MRV-20, MRV-22) are very dilute and have $HCO_3^- > Cl^-, SO_4^{-2}$. The third type of water is the acid-sulfate type that occurs in pools at the large fumaroles at Las Hornillas. Acid-sulfate waters usually result from steam condensation and oxidation of H_2S in the surface environment above the vapor zone of a high-temperature geothermal system. The fluid sample from Las Hornillas (MRV-13) is typical of acid-sulfate-type waters. Other waters in the area are mixtures of reservoir fluids with surface meteoric water (MRV-19) or with acid-sulfate water (MRV-6, MRV-15, MRV-17), or are mixtures of acid-sulfate water with surface meteoric water (MRV-16, MRV-18).

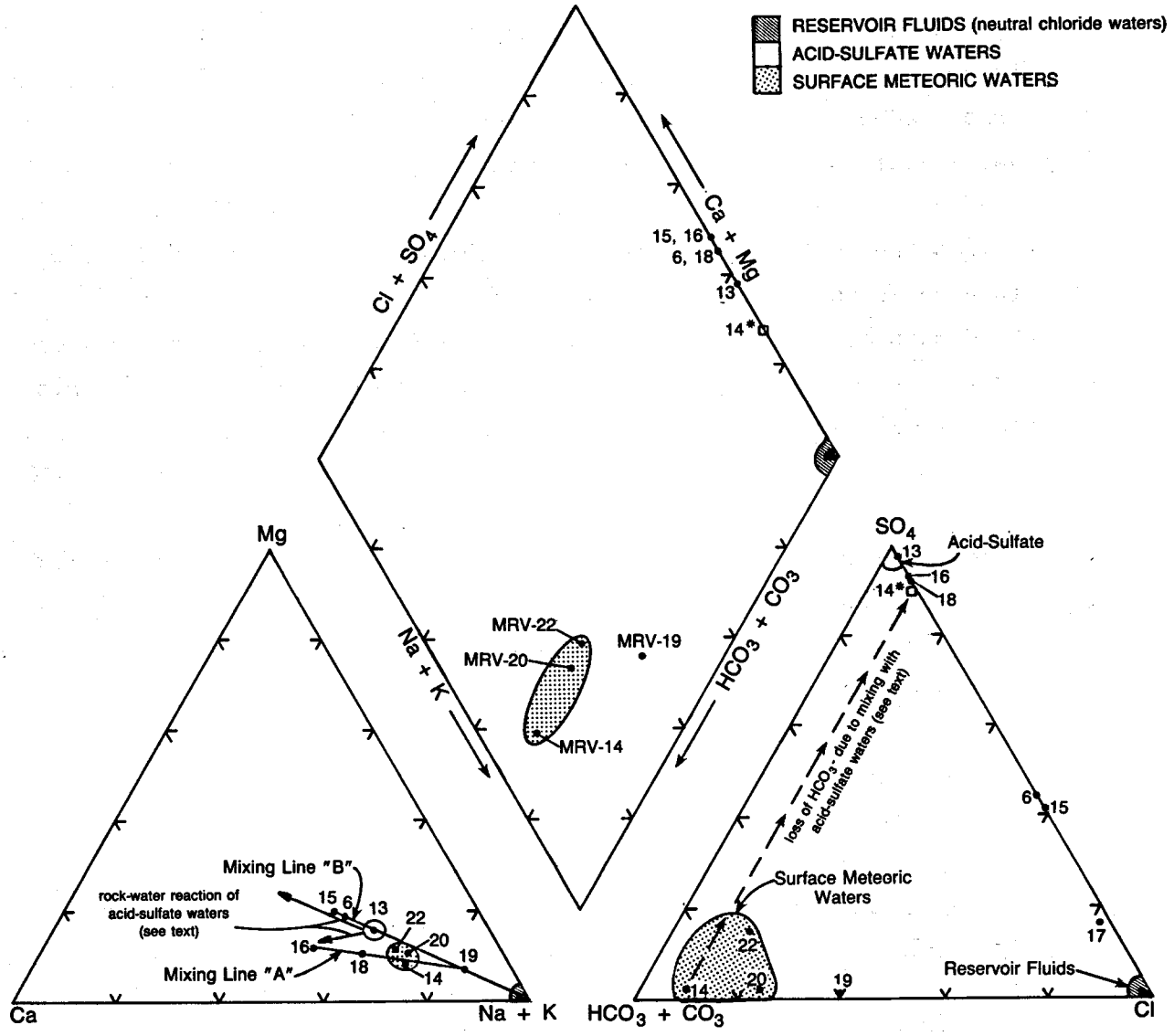


Figure 5. Piper diagram showing the various types of fluids encountered at Miravalles. Mixing lines are described in the text.

The mixed waters involving an acid-sulfate component show evidence of rock-water reaction. For example, samples MRV-6, MRV-15, and MRV-16 all have higher Ca^{+2} + Mg^{+2} than the parent acid-sulfate fluid typified by MRV-13. The MRV-6 (-15) fluid appears to be the result of reaction with rocks having a significant amount of Mg and either leaching of chloride from the rock or mixing with reservoir fluids, while the MRV-16 fluid has reacted with low Mg rocks. (Note that MRV-16 lies on the line connecting MRV-13 with the Ca corner of the cation triangle.) Thus MRV-18 is a mixture of "reacted" acid-sulfate water (MRV-16) with meteoric water (such as MRV-14) as shown by mixing line "A" in Fig. 5, while MRV-6 (-15) appears to be a mixture of "reacted" acid-sulfate water and reservoir fluid (mixing line "B"). At first, the mixing of MRV-16 with MRV-14 appears only on the cation triangle; however, MRV-14 is very dilute and therefore is weakly buffered by HCO_3^-. A drop in pH caused by the addition of a small amount of H_2S to MRV-14 could release the HCO_3^- as $CO_2(g)$ and drive the composition of the sample from the carbonate to the sulfate corner of the Piper diagram (dashed line). The composition of this "acidified" meteoric water is shown as MRV-14* in the Piper diagram. Mixing line "A" now has its counterpart in the anion portion of the Piper diagram.

The interpretation of mixing from a Piper diagram is somewhat tentative since this type of plot only accounts for ratios of selected components. More detailed information about mixing can be derived from chloride variation diagrams where concentrations of various species are plotted versus the chloride concentration. Chloride variation diagrams for various species are presented in Fig. 6. The major feature on all these graphs is the mixing line that portrays the relation between the reservoir fluid and surface meteoric water. One interpretation of these graphs would be that the reservoir fluid represented by a composition similar to that of MRV-10* and MRV-21 is being diluted with surface meteoric water to produce intermediate composition fluids. Another possibility is that the reservoir fluid is better represented by MRV-11 and that samples MRV-10* and MRV-21 have higher species concentrations due to boiling (steam loss) in the reservoir. The issue of mixing versus boiling will be discussed in more detail later in this report.

Samples from two hot springs, which are about 10 km south of the Miravalles field (Salitral Bagaces, MRV-17, and San Bernardo Abajo, MRV-19),

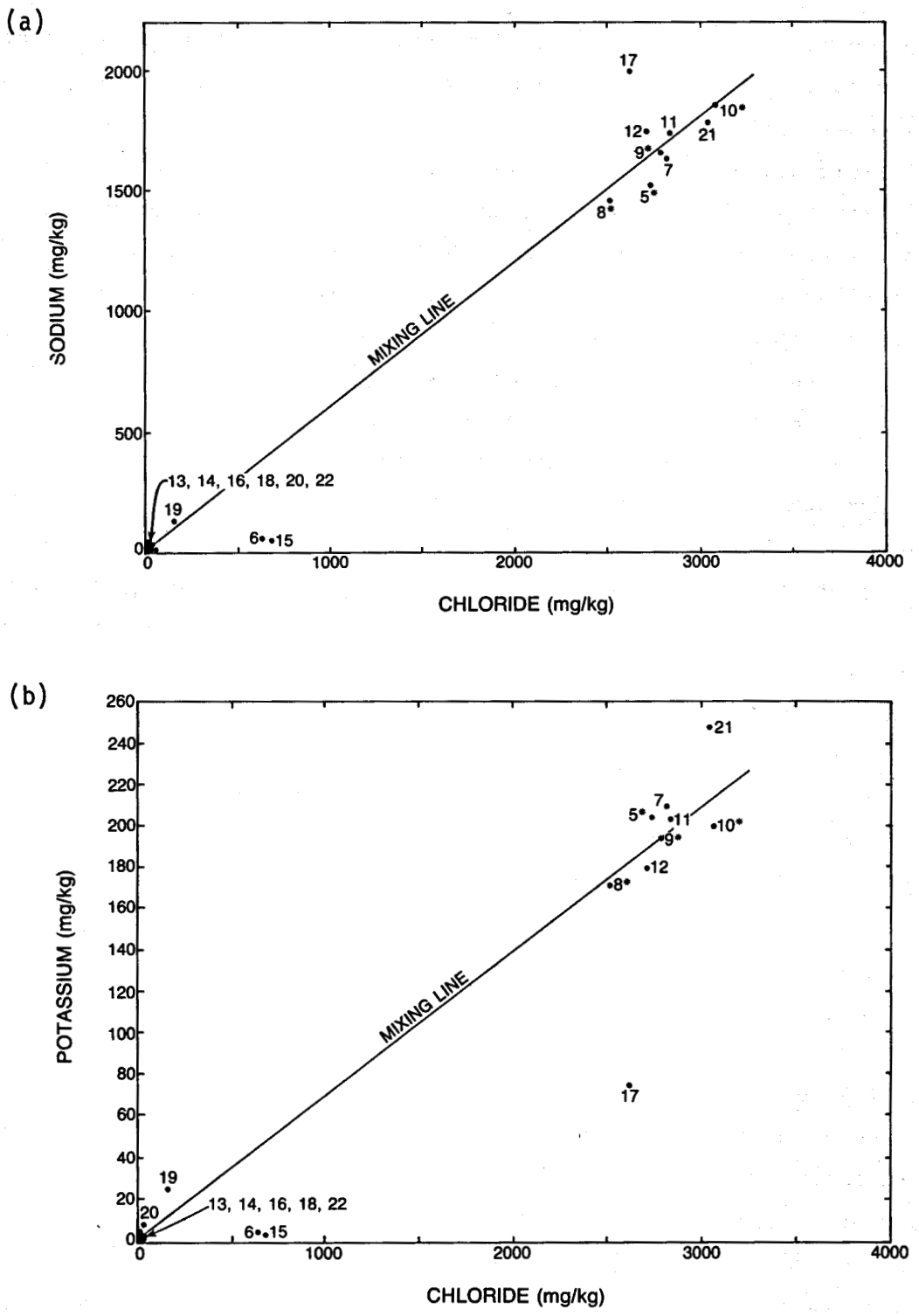
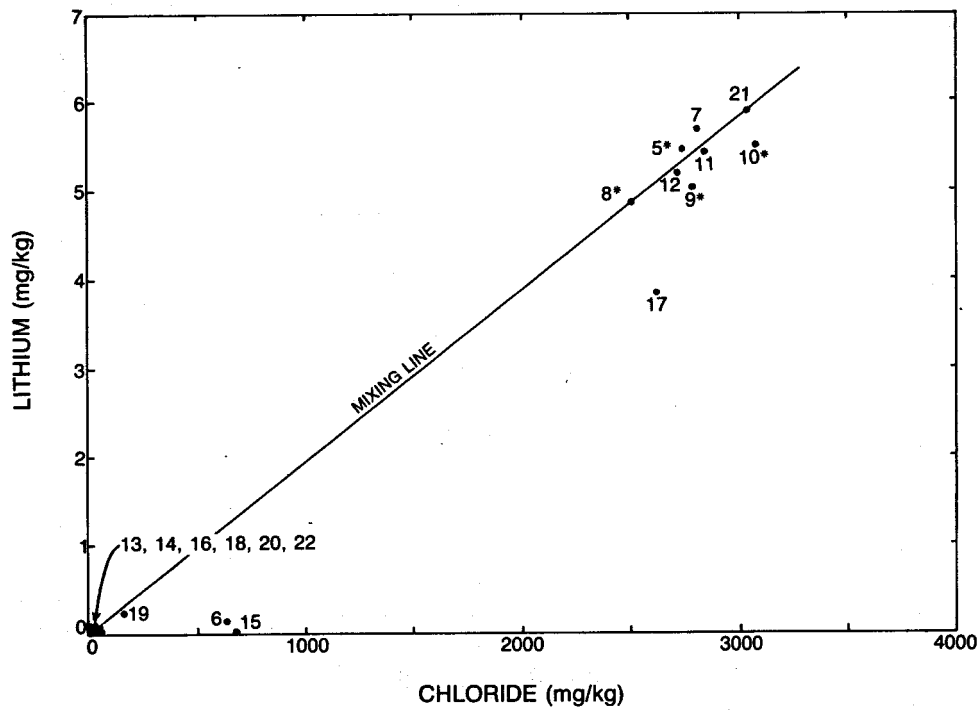


Figure 6. Chloride variation diagrams showing the mixing of reservoir fluids with dilute surface waters. (a) Sodium, (b) potassium, (c) lithium, (d) calcium, (e) boron, (f) ammonium.

(c)



(d)

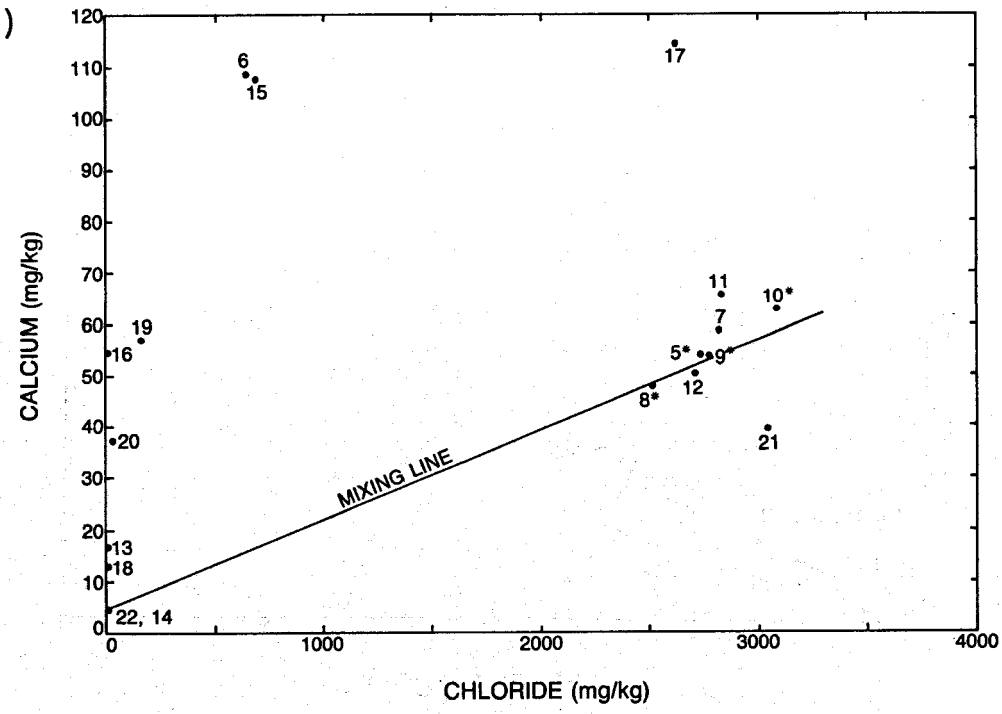
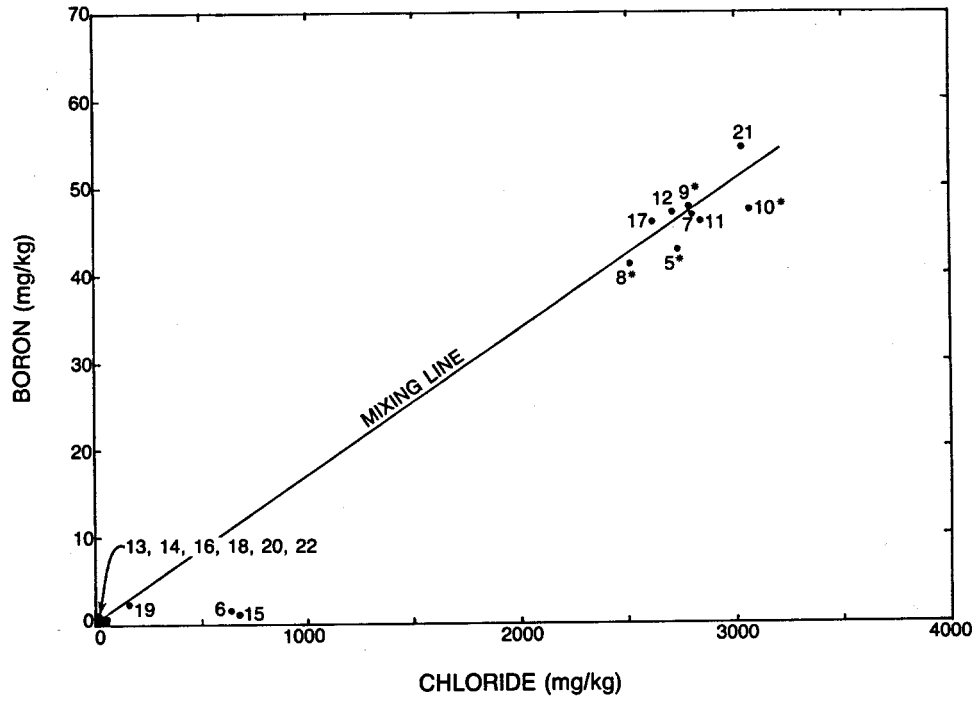


Figure 6. (cont)

(e)



(f)

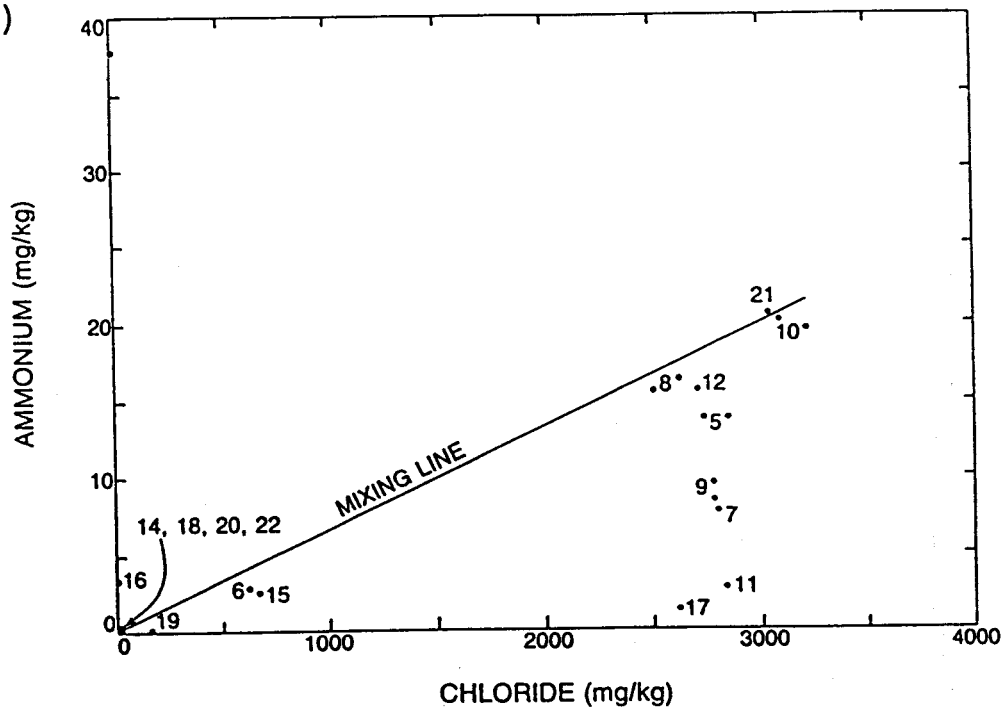


Figure 6. (cont)

also fall on the mixing lines in Fig. 6. Salitral Bagaces is a small area of hot springs that are depositing travertine. The fluid composition is very similar to the reservoir fluids in most respects; however, the Na^+, Ca^{+2}, Mg^{+2}, HCO_3^-, and SO_4^{-2} concentrations are high relative to the reservoir fluids, while K^+, Li^+, and F^- concentrations are low. Apparently, the fluid discharging at this site includes some small amount of acid-sulfate fluid or mixed sulfate-bicarbonate fluid. High Ca^{+2}, Mg^{+2}, and HCO_3^- concentrations suggest that this fluid has reacted with carbonate-bearing rocks or with andesitic rocks in transit to the spring site.

The warm spring at San Bernardo Abajo is similar in many respects to Salitral Bagaces except that there is a much larger component of river water in this spring. Because the Ca^{+2}, Mg^{+2}, and HCO_3^- concentrations in this fluid are somewhat higher than in the river, the fluid discharging at San Bernardo Abajo also appears to have reacted with carbonate-bearing or andesitic rocks.

The contribution of reservoir fluids to the samples from the hot spring at Guayabal (MRV-6 and MRV-15) is less evident in the chloride variation diagrams than in the Piper diagram. Certain species (notably Na^+, K^+, Li^+, and B) are depleted and others (Ca^{+2} and Mg^{+2}) are enriched relative to Cl^- in the samples from this spring. Much of this variation in cation concentration is probably due to reaction between the acid fluid and rock. However, the ammonium concentrations are very close to the mixing line (Fig. 6f).

Because ammonium (NH_4^+) is partitioned between steam and liquid phases on flashing, it is a valuable tracer for detecting boiling within the reservoir. In Fig. 6f, a mixing line is drawn between dilute water and the reservoir fluid (samples MRV-10* and MRV-21, which are corrected for vapor separation within the downhole sample bottle as described earlier). Other samples (MRV-5*, MRV-8*, and MRV-12) lie close to this mixing line, as do the samples from Guayabal (MRV-6 and MRV-15).

Samples MRV-7, MRV-9*, MRV-11, and MRV-17 all appear to be depleted in ammonium. Samples MRV-7, MRV-11, and MRV-21 were all collected using the downhole sampler in wells that had not flowed for some time, so it is possible that there was some vapor-liquid separation within the wellbores. A similar argument could be made for well PGM-2 (MRV-12), but fresh water was being injected into this well until two weeks before the downhole sample was

collected, so separation of this fluid into liquid and vapor phases is unlikely. Although MRV-21 was collected from a stagnant well, it shows no signs of ammonium loss. Sample MRV-11 is a downhole sample collected in well PGM-5, and therefore it should have an ammonium concentration comparable with that for MRV-5*, which was collected at the surface from the same well in 1985. Because sample MRV-9* is already corrected for an unknown loss of water, we can draw no conclusions from the low NH_4^+ concentration in this sample. With the uncertainties in the quality of the NH_4^+ data, we cannot definitely rule out the possibility of extensive boiling within the reservoir, but most of these data suggest a single-phase reservoir.

Samples MRV-13 and MRV-16, which are from fumaroles, show that at least some boiling is occurring. The high NH_4^+ concentrations in these samples are most likely due to absorption of NH_3 gas in the acid pools, which are meteoric water and condensed steam.

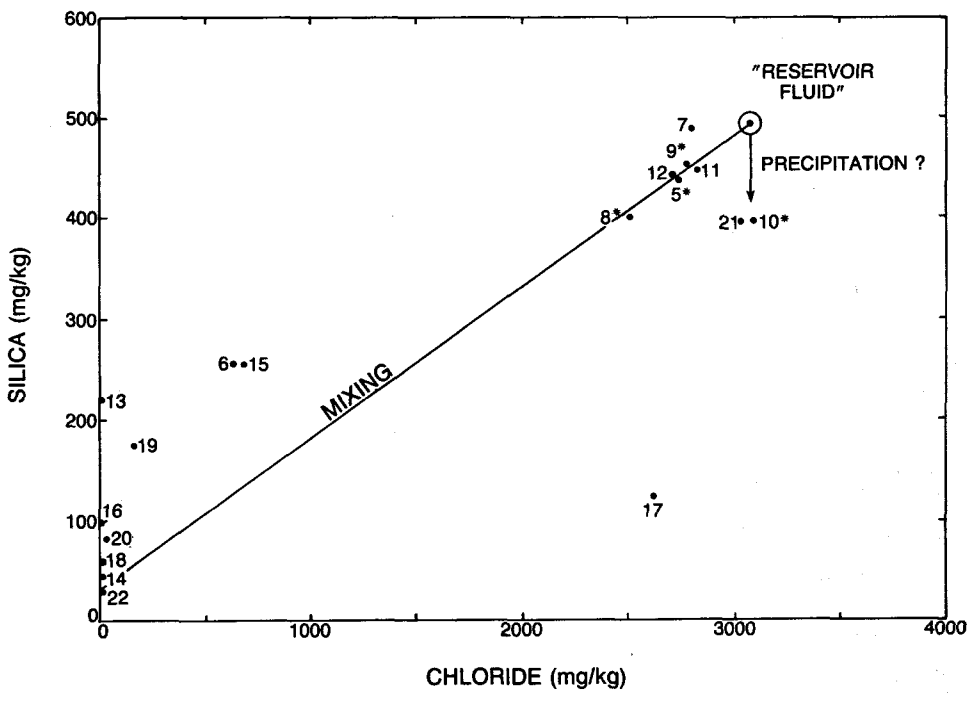


Figure 7. Variation of silica concentration with chloride concentration.

The mixing behavior shown in Fig. 6 for the conservative species is less apparent in the silica versus chloride graph in Fig. 7. In this figure, a mixing line is defined by the silica concentrations of most of the downhole fluid samples. However, samples MRV-10* and MRV-21 have lower silica concentrations than would be expected from mixing of reservoir fluid and recharge water, possibly due to precipitation of silica from solution in these samples. Based on the chloride concentration in samples MRV-10* and MRV-21, the silica concentration in these samples should be about 500 ppm.

V. WATER-STABLE ISOTOPES

Water-stable isotope analyses were performed at the Stable Isotope Laboratory, Southern Methodist University, Dallas, Texas, and are presented in Table II. As described above, the sample from PGM-5 was flashed to 3 kg/cm^2 gauge in a miniseparator. The values of the oxygen and hydrogen isotopic

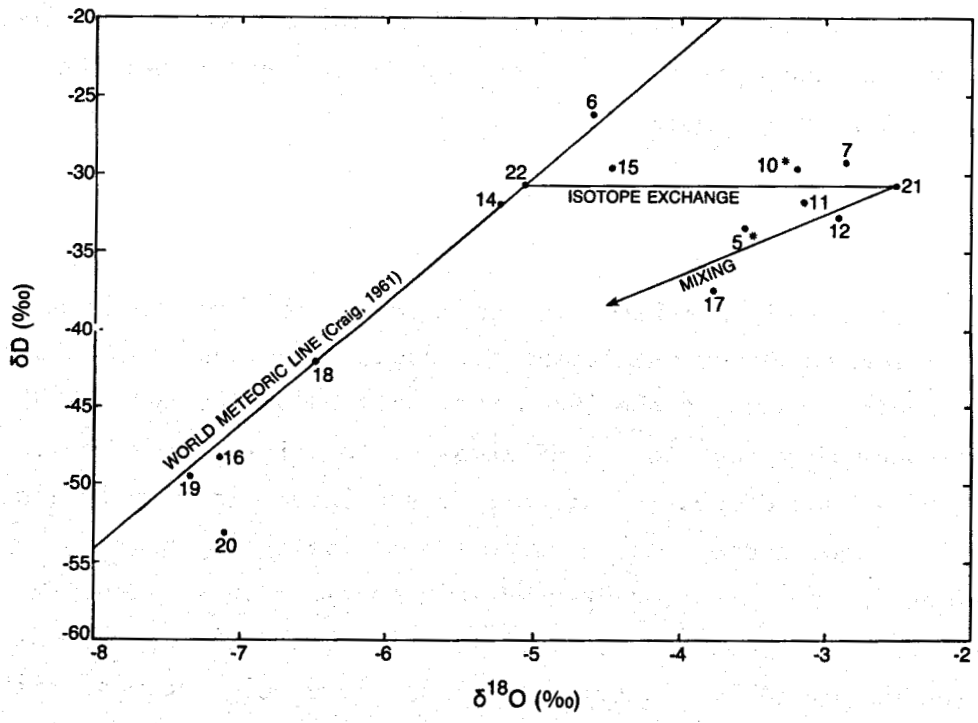


Figure 8. Graph of δD versus $\delta^{18}O$ for waters of the Miravalles region. The dilute cold waters fall on or near the world meteoric line (Craig, 1961). Reservoir fluids show evidence of oxygen isotope exchange with the rocks.

ratios for sample MRV-5 were corrected for fractionation between aqueous and steam phases assuming a single-stage flash from 240°C to 133°C according to procedures described by Henley et al. (1984). The corrected analyses are reported for sample MRV-5*. Isotope analyses are also reported for sample MRV-10*, but as described earlier, these analyses do not require correction for flashing.

A graph of δD versus $\delta^{18}O$ is presented in Fig. 8. The reservoir samples (MRV-5*, MRV-7, MRV-10*, MRV-11, MRV-12, and MRV-21) show a shift in the O isotopes of about 2-2.5°/₀₀ (per mil) to the right of the world meteoric line (Craig, 1961). Surface meteoric water samples were collected on the northern slope of Volcán Miravalles (MRV-14) and from the geothermal site water supply system (MRV-22). Both of these samples fall on the world meteoric line and have the same deuterium concentration as the reservoir fluid.

Based on isotope analyses from two rivers, Mainieri et al. (1985) and Giggenbach (1986) concluded that the recharge to the system was mainly to the north and east of Volcán Miravalles. However, the similarity between the deuterium concentrations in the reservoir fluid and the site water supply suggests that the recharge to the system might actually be more local than these investigators have suggested.

VI. TRITIUM

Tritium is useful in determining groundwater age because it has a half-life of 12.43 years and because it was produced in copious amounts during atmospheric nuclear tests of the 1950s and early 1960s (Fontes, 1980). Our test results show that peak levels of atmospheric tritium occurred in 1963 and that levels have been decreasing steadily ever since. Tritium levels vary greatly by latitude, and by season as well. In Table III, tritium concentrations in precipitation by year from stations in Veracruz (Mexico), San Salvador (El Salvador), Barbados, Miami (Florida), and the southwestern USA are tabulated (data from IAEA reports). These data are weighted mean tritium levels, and the percentage of the annual rainfall that was used to calculate the weighted mean is presented in parentheses.

Table III. Weighted Mean Tritium Values from Precipitation. Numbers in parentheses are the percentage of the rainfall for that year for which tritium data exist (IAEA data in references). Data from southwest USA from Vuataz and Goff (1986).

Year	Veracruz	San Salvador	Barbados	Miami	SW USA
1956					55
1957					108
1958					337
1959			12.86 (75)		975
1960					243
1961					216
1962	41.90 (57)				875
1963					2834
1964			95.36 (97)	167.00 (100)	1747
1965				58.40 (100)	822
1966			32.39 (98)	70.60 (100)	601
1967	30.02 (96)		20.52 (100)	35.68 (100)	366
1968	22.24 (98)	21.96 (76)	20.29 (100)	26.51 (100)	229
1969		19.98 (76)	15.53 (95)	29.52 (100)	253
1970	24.68 (74)	26.50 (98)	14.07 (74)	27.80 (100)	191
1971	19.40 (100)	19.57 (94)	12.62 (94)	24.40 (100)	194
1972	14.50 (74)	14.60 (94)	10.50 (100)	16.40 (100)	77
1973	10.70 (100)	10.20 (76)	7.90 (83)	13.00 (100)	97
1974	12.20 (99)	9.30 (66)	7.10 (72)	13.60 (100)	75
1975	8.60 (100)	9.00 (98)	7.60 (81)	8.90 (100)	73
1976					57
1977					56
1978					75
1979					32
1980					31
1981					41
1982					29
1983					15

There is a paucity of tritium data for Central America before 1968 and after 1975; however, a comparison of data from the slopes of the southwestern USA with data from Veracruz, San Salvador, and Barbados suggests that the Central American tritium values can be extrapolated from the southwestern USA data (see Fig. 9). Samples of local meteoric water (MRV-14 and MRV-21) fall near points for Tegucigalpa (Honduras) rainwater, so this extrapolation should apply to the Miravalles geothermal region.

Exponential curve fits of the existing data suggest that tritium concentrations in precipitation for Central America can be described by

$$C = \begin{cases} 350e^{-0.5161t}, & 1963\text{-}1967 \\ 27.51e^{-0.1535t}, & 1968\text{-present} . \end{cases} \quad (1)$$

These equations represent the tritium input into a groundwater system. Pearson and Truesdell (1978) and Goff et al. (1987b) used two models to describe the mixing behavior in groundwater systems: piston flow and perfectly mixed flow. The piston flow model assumes that there is no mixing of the water in the reservoir from the time of recharge to the time of discharge and that all molecules have the same residence time. The perfectly mixed model assumes that the input to the system is completely mixed with fluid already in the reservoir so that the discharge from the reservoir has the same composition as the fluid in the reservoir. Each model predicts an output tritium concentration for a given mean residence time assuming the input given by Eq. (1). Results of the piston flow and the well-mixed model predictions for samples collected in Central America in 1985 are presented in Fig. 10. Details of the analytical methods used to generate the curves of Fig. 10 are given by Goff et al. (1987b).

One interesting aspect of the analysis is that samples having a tritium concentration greater than 5 TU must have a piston flow component that has a mean residence time between 12 and 22 years. On the other hand, waters with tritium concentrations less than about 1.7 TU must either be derived from well-mixed reservoirs having residence times greater than about 120 years or be derived from poorly mixed reservoirs with mean residence times greater than 25 years. Systems that discharge thermal fluid of relatively uniform

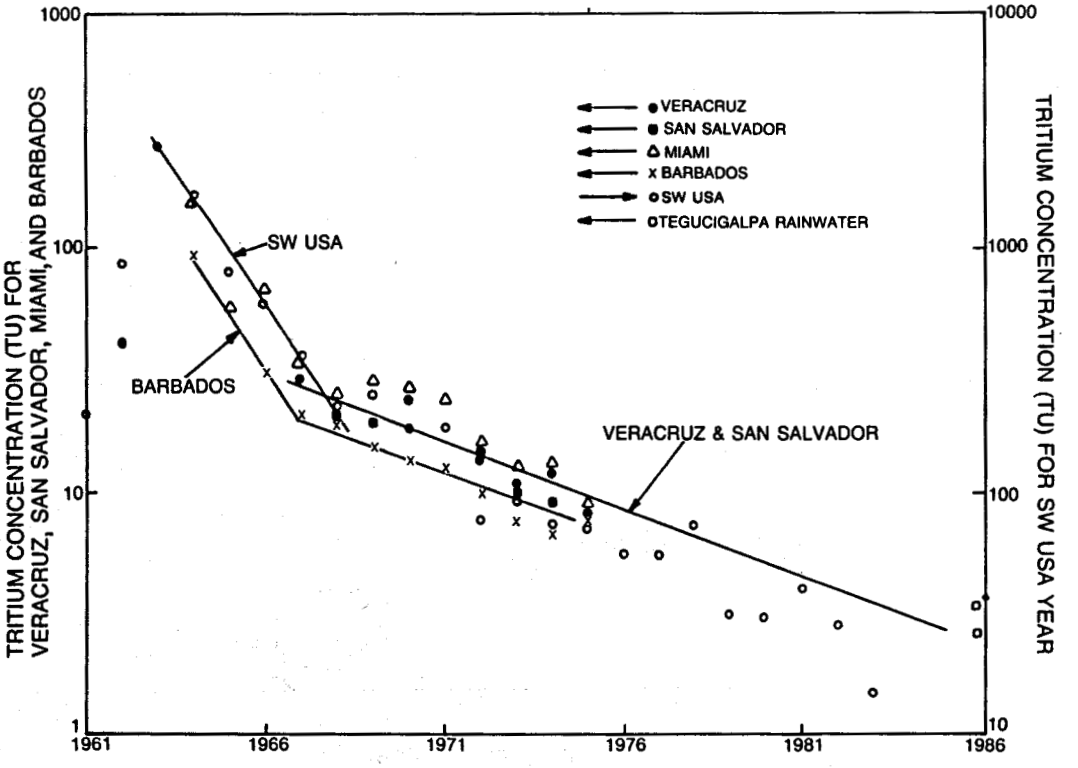


Figure 9. Tritium concentrations in rainfall at various locations for the period from 1961 to 1986 (after Goff et al., 1987b).

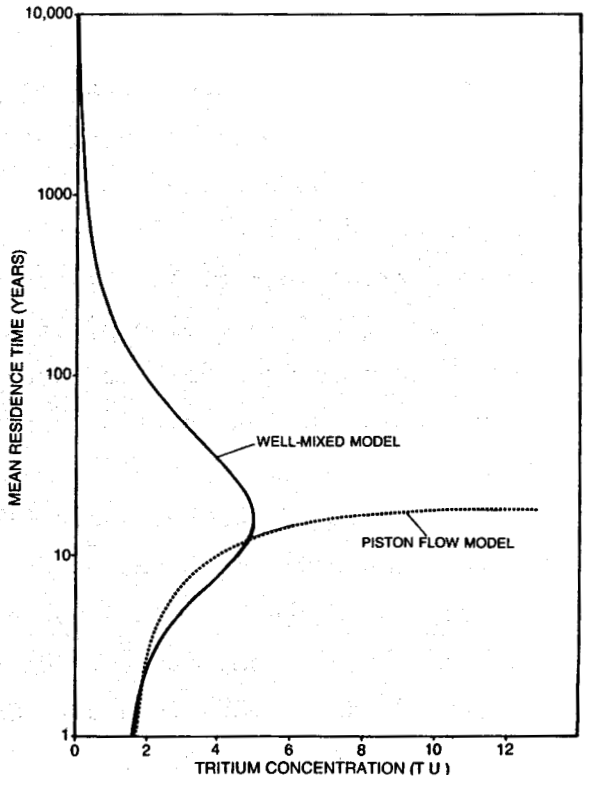


Figure 10. Results of model calculations of mean residence time as a function of the tritium concentration in water for the case of piston flow and for well-mixed reservoirs. These curves apply for waters collected in Central America in 1985-86 (after Goff et al., 1987b).

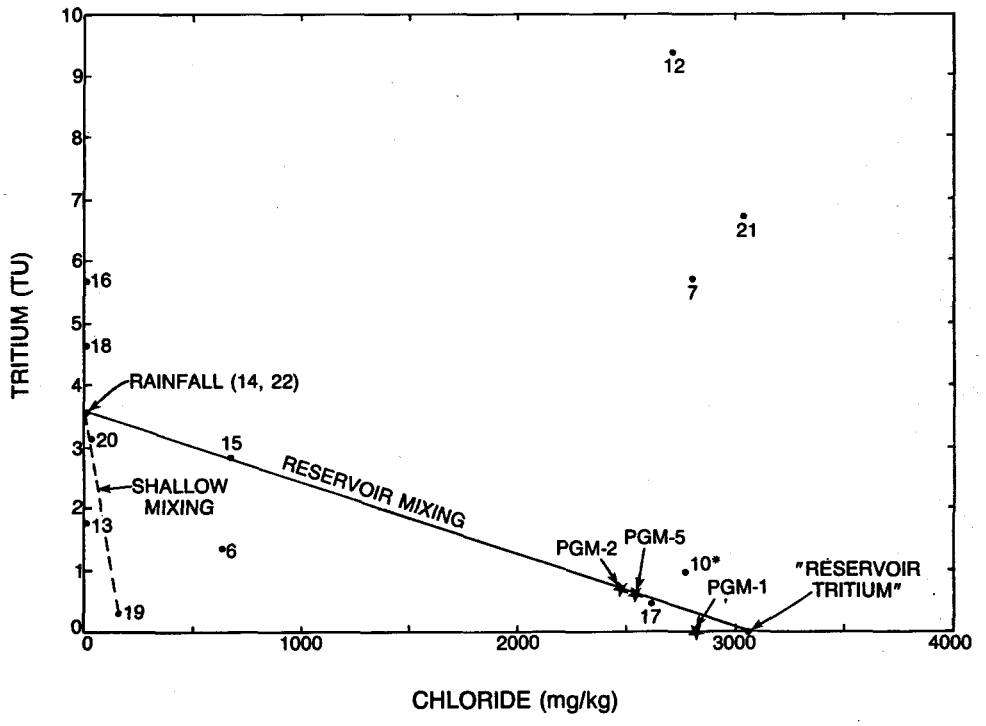


Figure 11. Variation of tritium with chloride for samples from Miravalles. Samples indicated by the stars are data presented by Giggenbach (1986).

composition over a large area are probably better approximated by the well-mixed model. Tritium analyses were performed on geothermal fluid samples at the Tritium Laboratory of the University of Miami, Miami, Florida. The results are presented in Table II. Tritium concentrations are plotted versus chloride concentrations in Fig. 11. Three data points for early reservoir fluids from Giggenbach (1986) are also plotted in this figure. These three samples, along with the sample from Salitral Bagaces and the dilute samples (MRV-14, MRV-27), define a mixing line between reservoir fluid and rainwater as shown in the figure.

Downhole of the reservoir fluid all samples show considerably higher tritium than would be expected from a natural geothermal system in Central America; the higher levels have been traced to contamination of the sample chamber in the United States. Only the samples from the hot springs at Salitral Bagaces (MRV-17) and at San Bernardo Abajo (MRV-19) are in the range expected for long residence time fluids (<0.5 TU). Although samples of

rainfall were not collected, the tritium concentrations in the site water supply (MRV-22) and in the stream in Quebrada Higueron (MRV-14) are remarkably close to tritium in recent rainfall in Tegucigalpa, Honduras (Goff et al., 1987b). On the basis of the tritium mixing line, the reservoir fluid probably has a tritium concentration on the order of 0.0 to 0.3 TU, depending on the reservoir chloride concentration. This suggests a mean fluid residence time of at least 150 years and a maximum mean residence time of roughly 1000 years. The mixing line also sets the maximum chloride concentration for the Miravalles system to about 3100 mg/kg compared with the nearly 4000 mg/kg suggested by Giggenbach (1986).

The measured tritium concentrations in the downhole samples not only are higher than expected but also vary considerably from sample to sample. Except for the downhole sample from well PGM-10 (MRV-10*), the tritium concentrations in the downhole samples are higher than the tritium concentration in the local rivers. While it is possible that these high tritium concentrations are due to some process such as steam loss in the reservoir, it is more likely that the downhole sample bottles themselves were contaminated in the US.

An interesting sidelight in Fig. 11 is the position of sample MRV-19. On the basis of mixing arguments presented earlier, this sample should fall on the reservoir mixing line. However, its tritium concentration is too low for the chloride concentration in the sample. The low tritium and low chloride concentrations of this sample could result from mixing of condensed steam with a small amount of reservoir fluid. Sample MRV-20, from the river just above where the spring (MRV-19) enters the river, shows that the river is a mixture of rainwater with water like MRV-19, which probably discharges in other warm springs along the river.

VII. GAS COMPOSITIONS

Gas analyses were performed at the US Geological Survey at Menlo Park by C. Janik and T. Cheatham. The measured gas compositions in mole percent on a dry gas basis are presented in Table IV. These compositions are also plotted versus CO_2 mole % in Figs. 12a and b. The major components of air are also shown in Fig. 12a along with straight lines that represent the results of

Table IV. Analyses of Gas Samples from Miravalles, Costa Rica. Analyses were performed by C. Janik and T. Cheatham, USGS, Menlo Park, California, and are reported in mole percent on a dry gas basis.

	Pressure (psia)	CO_2	H_2S	NH_3	He	H_2	Ar	O_2	N_2	CH_4	Total	Gas/Liquid Mass/Ratio (g/kg)
MRV-1	3.03	98.89	0.398	0.06522	0.000121	0.2184	0.0020	0.0003	0.273	0.145	99.9925	---
MRV-2	2.8	98.48	0.878	0.00052	0.000117	0.1276	0.0013	0.0002	0.221	0.278	99.9865	---
MRV-3	2.9	99.58	0.028	0.03152	0.000131	0.0469	0.0025	0.0081	0.258	0.042	99.9967	---
MRV-4	1.19	99.06	0.405	0.06040	0.000244	0.0384	0.0038	0.0005	0.369	0.058	99.9954	---
MRV-5	5.34	94.83	0.963	0.62170	0.000000	0.0234	0.0424	0.0014	3.509	0.033	100.0237	---
MRV-6	2.12	98.32	0.182	0.00161	0.000061	0.0000	0.0298	0.1254	1.187	0.128	99.9738	---
MRV-7	0.78	96.93	0.345	0.00440	0.000000	0.8089	0.0269	0.0094	1.754	0.042	99.9200	2.282
MRV-10	8.86	75.54	0.000	0.01818	0.000000	0.5223	0.2919	0.0482	21.790	0.032	98.2430	2.567
MRV-11	1.34	94.34	0.447	0.00503	0.000000	1.2230	0.0488	0.0050	3.715	0.088	99.8721	0.392
MRV-12	2.98	85.02	0.481	0.00985	0.000000	0.9501	0.1480	1.5010	11.640	0.064	99.8138	2.949
MRV-13	3.21	98.77	0.217	0.00036	0.000116	0.1764	0.0123	0.0000	0.684	0.133	99.9933	---
MRV-15	4.16	98.41	0.035	0.00035	0.000000	0.0000	0.0301	0.2095	1.218	0.094	99.9975	---
MRV-16	0.5	96.26	3.078	0.00254	0.000889	0.0034	0.0080	0.0053	0.582	0.050	99.9899	---
MRV-21	1.32	92.06	1.016	0.00720	0.000000	0.1836	0.0095	0.0129	6.363	0.120	99.7720	0.347
Air		0.03					0.9340	20.9460	78.084			

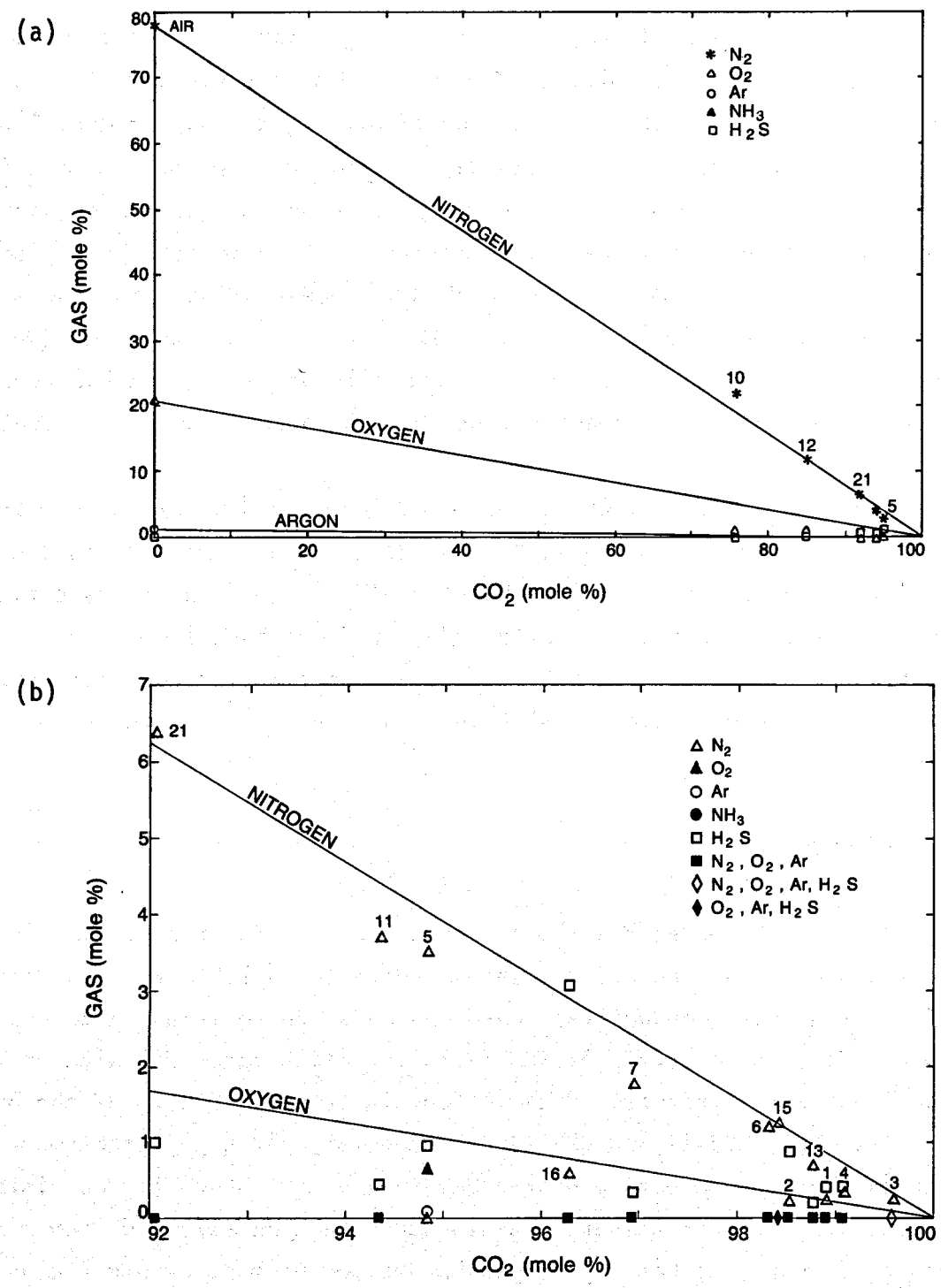


Figure 12. Variation of gas composition with CO_2 mole %. Most samples appear to be mixtures of air with a pure CO_2 gas. The oxygen is depleted relative to nitrogen--probably due to reaction with the rock. (a) CO_2 concentrations in the range 0 to 100 mole %, (b) CO_2 concentrations in the range 92 to 100 mole %.

mixing air with pure CO_2. Notice that the nitrogen compositions of most samples fall on the nitrogen mixing line, but the oxygen concentration is depleted relative to nitrogen for the case of air-CO_2 mixing. Figure 12b is an expanded portion of Fig. 12a and shows gas compositions for the 92 to 100 mole % CO_2 range. As in Fig. 12a, the analyses shown in Fig. 12b suggest mixing of air with CO_2 and depletion of oxygen relative to nitrogen. Some samples (MRV-1, -2, -4, and -16) have high H_2S concentrations, and these samples are either from fumaroles (MRV-1, -2, -16) or near fumaroles (MRV-4). One exception to the high H_2S content in fumarolic areas is from the fumaroles near La Unión (MRV-3), which appear to be CO_2 dominated with minor amounts of air.

For downhole samples, the gas collected from the downhole sample bottle is evolved from a known mass of fluid, and the gas/liquid mass ratio (in grams per kilogram) is given in Table IV. Samples MRV-7, -10, and -12 have high gas concentrations (~2.5 ± 0.5 g/kg) while MRV-11 and -21 have lower gas concentrations (~0.35 to 0.40 g/kg). The gas mass fraction does not appear to correlate with gas composition or with any other measured parameter and thus is unexplained.

VIII. GEOTHERMOMETRY

Chemical geothermometer temperatures calculated for the Miravalles geothermal system using the relationships presented in Table V are presented in Table VI. The quartz (conductive), Na-K, Na-K-Ca, and gas geothermometer temperatures for the reservoir fluid are in excellent agreement with the measured downhole temperatures of 240°C (Dennis et al., 1988). Of the other fluid samples, only MRV-17 and MRV-19 have consistently high geothermometer temperatures, but the temperatures for MRV-19 are not internally consistent. MRV-19 preserves a higher temperature signature than MRV-17, and from mixing arguments given earlier, both appear to be derived from reservoir fluids. The tritium concentrations in MRV-19 suggest that this fluid may be partly derived from condensed steam rather than from mixed reservoir liquids.

Table V. Equations for Calculating Chemical Geothermometer Temperatures (after Goff et al., 1987b).

Geothermometer	Equations (Dissolved Components in mg/ℓ)	Restrictions
a. Quartz (no steam loss)	$T°C = \frac{1309}{5.19 - \log SiO_2} - 273.15$	T = 0-250°C
b. Quartz (max. steam loss)	$T°C = \frac{1522}{5.75 - \log SiO_2} - 273.15$	T = 0-250°C
c. Na/K (Fournier, 1981)	$T°C = \frac{1217}{\log (Na/K) + 1.483} - 273.15$	T ≥ 150°C
d. Na-K-Ca	$T°C = \frac{1647}{\log (Na/K) + \beta [\log (\sqrt{Ca}/Na) + 2.06] + 2.47} - 273.15$	T < 100°C, β = 4/3 T ≥ 100°C, β = 1/3
e. Gas (CO_2-H_2S-CH_4-H_2)	$T°C = \frac{24775}{\alpha + \beta + 36.05} - 273.15$	T = 100°-300°C
	$\alpha = 2 \log \frac{CH_4}{CO_2} - 6 \log \frac{H_2}{CO_2} - 3 \log \frac{H_2S}{CO_2}$ and	
	$\beta \begin{cases} = 7 & \text{if } CO_2 < 75 \text{ vol \%} \\ = 0 & \text{if } CO_2 > 75 \text{ vol \%} \\ = -7 & \text{if } CO_2 > 75 \text{ vol \%; } CH_4 > 2H_2 \text{ and } H_2S > 2H_2 \end{cases}$	
f. Gas (CO_2-CH_4)	$T°C = \frac{\log \frac{CH_2}{CH_4} - 0.237}{0.012}$	T = 0-300°C(?)

log = logarithm to base ten.

Table VI. Chemical Geothermometer Temperatures for Fluids from Miravalles, Costa Rica.

S/N	$T_{measured}$	Quartz (no steam loss) °C	Quartz [a] (max. steam loss)	Na-K [b]	Gas Na-K-Ca	Gas (CO_2-H_2S-H_2-CH_4)	(CO_2-CH_4)
Reservoir Fluids							
MRV-4	—	—	—	—	—	159.8(220.2)	249.6
MRV-5*	235[c]	241.6	—	243.0	258.3	163.3(224.7)	268.5
MRV-7	239[d]	250.5	—	238.6	229.8	231.0	260.5
MRV-8*	240[e]	233.2	—	231.1	224.1	—	—
MRV-9*	240[e]	243.4	—	230.6	228.0	—	—
MRV-10*	240[e]	232.6	—	223.2	220.6	—	261.3
MRV-11	235[f]	242.7	—	230.5	224.0	239.9	232.8
MRV-12	—	241.9	—	219.6	219.0	240.3	240.5
MRV-21	212[g]	232.2		246.5	241.9	200.1	220.7
Mean	—	236.4		232.9	230.7		
St. Dev.	—	10.92		9.29	13.22		
Other fluids							
MRV-3	—	—	—	—	—	189.9	216.4
MRV-2	—	—	—	—	—	249.2	192.7
RV-3	—	—	—	—	—	140.4(195.1)	261.5
MRV-6	58.0	198.3	183.0	179.8	33.5	—	230.7
MRV-13	88.9	187.4	174.2	477.2	64.7	179.2	219.5
MRV-14	21.4	95.1	96.8	392.8	43.5	—	—
MRV-15	60.3	197.6	182.5	178.5	29.4	—	231.9
MRV-16	25.5	138.2	133.6	336.2	45.5	188.4	259.0
MRV-17	67.7	150.6	144.0	145.7	157.8	—	—
MRV-18	21.0	112.5	110.8	377.0	42.1	—	—
MRV-19	47.5	172.2	161.8	274.8	201.1	—	—
MRV-20	21.0	128.0	125.0	294.8	67.4	—	—
MRV-22	21.0	81.7	85.0	354.5	34.9	—	—

a Quartz (max. steam loss) temperatures are not calculated for reservoir fluids because these samples are corrected for flashing.
b The Na-K geothermometer gives erroneously high temperatures for low-temperature (<150°C) fluids.
c $T_{measured}$ from 9/20/86 temperature log (Dennis et al., 1988).
d $T_{measured}$ from 9/9/86 temperature log (Dennis et al., 1988).
e $T_{measured}$ from 9/17/86 temperature log (Dennis et al., 1988).
f $T_{measured}$ from 9/20/86 temperature log (Dennis et al., 1988).
g $T_{measured}$ from 9/25/86 temperature log (Dennis et al., 1988).

IX. CALCITE SCALING AND RESERVOIR BOILING

The thermal fluids from the geothermal system at Ahuachapán, El Salvador, have higher Ca^{+2} concentrations (about 400 ppm) and HCO_3^- concentrations (30-45 ppm) that are roughly equivalent to the thermal fluids at Miravalles (concentrations from Ahuachapán are from DiPippo, 1980, and Fournier, 1981). Yet, the fluids at Ahuachapán do not precipitate calcite on flashing, while calcite scale forms easily at Miravalles. The reservoir at Ahuachapán has very low gas content compared with the Miravalles system, which contains significant amounts of CO_2. Loss of CO_2 during flashing raises the pH of the residual fluid, and if the pH goes above about 8.4 (at 25°C; a lower pH at higher temperature), calcite will precipitate from solution. The actual change in pH due to loss of CO_2 depends upon the amount of CO_2 leaving the liquid phase, and at Miravalles, it appears that this amount is significant. Thus, at Ahuachapán, a lower reservoir pH and a smaller loss of CO_2 on flashing result in a post-flash pH that is low enough to preclude calcite scale formation. At Miravalles, the post-flash pH is high enough for scale to form in the flashing zone of the wellbores.

Because the depth of the flashing zone is close to that of the production zone, lowering of the reservoir pressure by production of the field could lead to extensive boiling and calcite precipitation in the reservoir and to a decline in reservoir productivity. Boiling in a reservoir can often be detected in an enthalpy-chloride diagram such as Fig. 13. In this figure, the enthalpy of saturated liquid at the measured temperature of collection is plotted versus the measured chloride concentration for each sample. A boiling line is drawn from this point to the enthalpy of saturated steam at atmospheric pressure (2676 kJ/kg). Finally, the enthalpy corresponding to the Na-K-Ca geothermometer temperature for that sample gives the position along the boiling line that corresponds to the original, unboiled fluid composition.

A second set of lines corresponding to mixing of reservoir fluids with dilute, cold waters is also shown in Fig. 13. Most of the reservoir fluids form a cluster at a chloride concentration of around 2800 mg/kg, but MRV-10* and MRV-21 have higher chloride (~3100 mg/kg, which is very close to the maximum chloride concentration allowed by the tritium versus chloride graph in

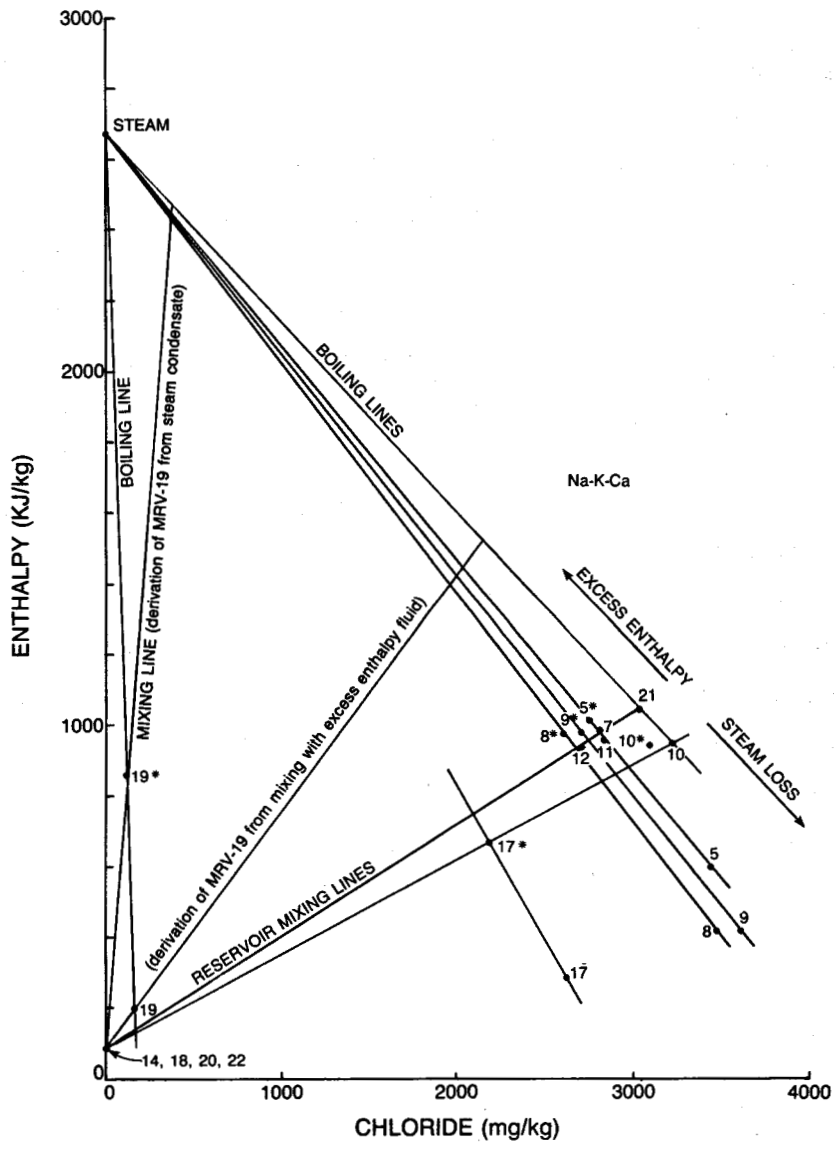


Figure 13. Enthalpy-chloride diagram for the Miravalles system; boiling lines connect data points with the point corresponding to pure steam, and mixing lines are drawn from sample data points to the point representing 21°C dilute waters. The various boiling and mixing lines are discussed in the text.

Fig. 11). It appears that MRV-21 most closely represents reservoir fluid and that other fluids are derived by mixing of cold water within the reservoir. MRV-10* may show some effects of steam loss, but this interpretation is tenuous since there were problems in the collection of this sample.

A second mixing line through MRV-17* (the asterisk indicates only the position of the "original" fluid before steam loss) passes close to MRV-10*, and this suggests mixing of cold water with reservoir fluid that has lost some steam and noncondensable gases. On the other hand, the sample from San Bernardo Abajo (MRV-19) is clearly derived from steam condensate or from mixing of cold water with an excess enthalpy fluid as is suggested by the tritium discussion.

Thus, the following processes appear to be operating in the Miravalles reservoir:

1) deep mixing of surface meteoric water with the parent reservoir fluid (MRV-21),
2) minor boiling to produce a liquid like MRV-10* and steam,
3) mixing of the boiled liquid with cold water to produce a composition like MRV-17*,
4) boiling of MRV-17* to produce fluids discharging at Salitral Bagaces, and
5) steam condensation and dilution with cold water to produce MRV-19.

While the evidence from most of the samples does not support extensive reservoir boiling, the discussion above suggests that local reservoir boiling may be occurring. Widespread distribution of fumaroles in the northwestern edges of the Miravalles geothermal field lends support to this conclusion.

X. WELLBORE TEMPERATURE PROFILES

Temperature profiles were measured in wells PGM-3, PGM-5, PGM-10, PGM-11, and PGM-12 (Dennis et al., 1988). A cross section along line A-A′ in Fig. 1 is shown in Fig. 14. This profile passes through wells PGM-10, PGM-3, and PGM-12, and well PGM-11 is projected onto the section. Wells PGM-2 and PGM-5 project onto the cross section at about the location of well PGM-10. The line of

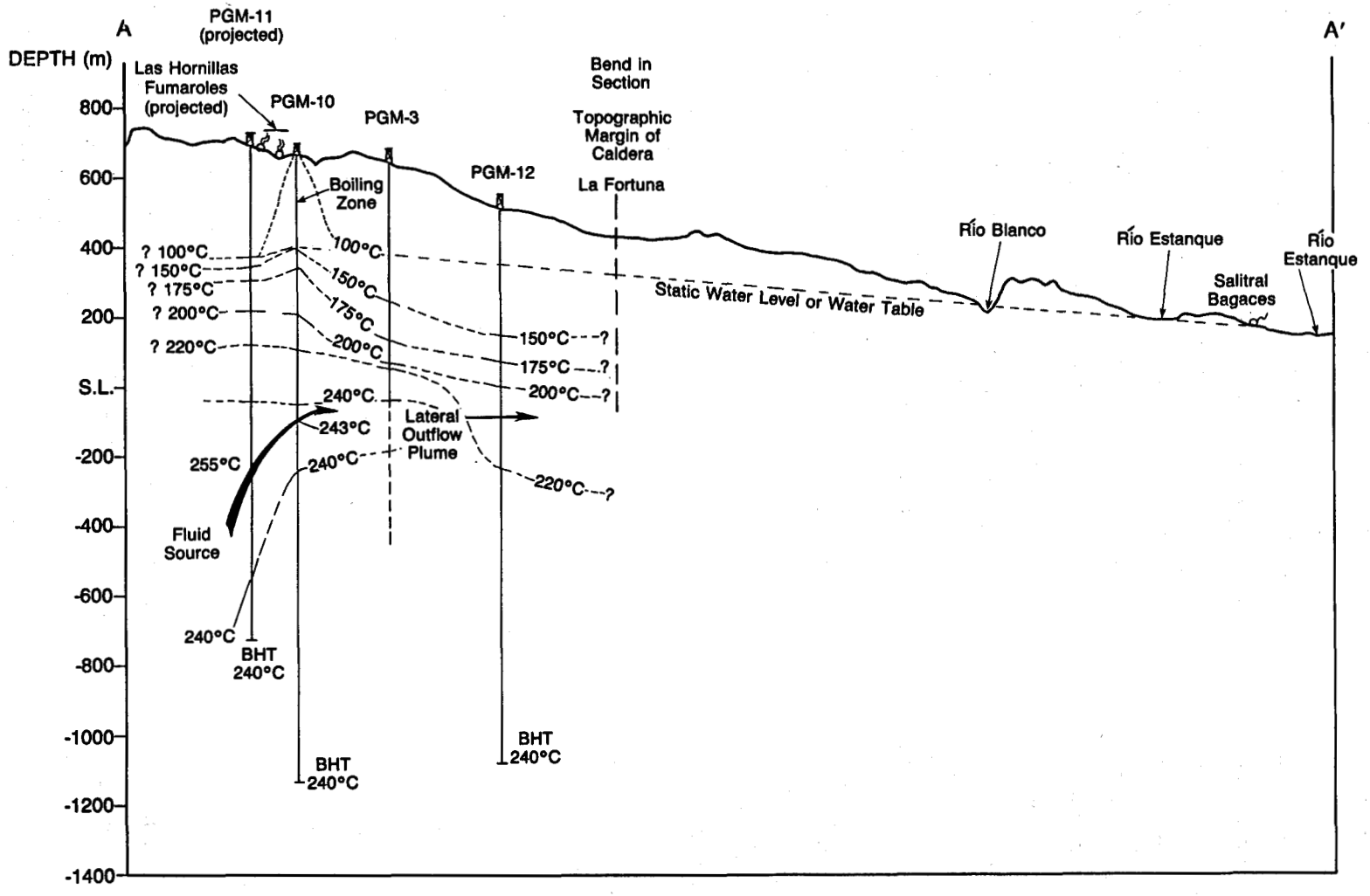


Figure 14. Elevation cross section through the section A-A′ in Fig. 1, showing the locations of wellbores and isotherms within the reservoir. Important features in this cross section are the definition of the thermal outflow plume and the shallow boiling zone at PGM-10.

fumaroles from Las Hornillas to La Unión projects onto the section between PGM-11 and PGM-10.

Downhole-measured temperature profiles for these wells are also shown in Fig. 14 (dashed where inferred). Several interesting features are evident. First, temperature reversals are clearly present in the logs of wells PGM-11 and PGM-10. The maximum temperature recorded is 255°C in PGM-11, but the most representative temperature for these wells (that is, the model temperature) is 240°C--in excellent agreement with the chemical geothermometer temperatures.

Another interesting feature is that the water level in wells PGM-11, PGM-10, PGM-3, and PGM-12 is fairly horizontal. In PGM-11, PGM-3, and PGM-12, the water level coincides with the 100°C isotherm, but in PGM-10 it is at 150°C. A straight line drawn through the water level in wells PGM-3 and PGM-12 intersects the surface in the Río Blanco, in the Río Estanque, and at Salitral Bagaces. A number of hot springs discharge along the Río Blanco and the Río Agua Caliente, which were not sampled, and the coincidence of the water levels and the elevations of the hot springs to the south suggest that the water table may be as shown in Fig. 14.

The 100°C isotherm in PGM-10 and in PGM-5 (Dennis et al., 1988) becomes very shallow, probably because it is close to fractures that control the location of the fumaroles. This line of fumaroles closely parallels the line from PGM-5 through PGM-10 to PGM-2. Boiling in these fractures elevates the temperature profiles in nearby wells such as PGM-10, PGM-5, and PGM-5R, a shallow well near PGM-5. PGM-5R was drilled as a reinjection well but it produces dry steam. From the similarities in the locations of the wells vis-à-vis the line of fumaroles and from the temperature profiles in wells PGM-5 and PGM-10, we expect that the temperature profile in well PGM-2 will be similar to the profiles in PGM-5 and PGM-10.

In addition to being conduits for steam, these fractures could also conduct cold waters downward. Perhaps the acid fluids encountered in PGM-2 are the result of reaction between rising steam, which contains H_2S, and oxygen-saturated cold water, which is percolating to depth along these fractures. With current data, this suggestion is no more than speculation.

Now consider the 240°C isotherm. Apparently, hot fluids rise from depth near but slightly north (or northeast) of PGM-11 and flow horizontally to the

south. This profile is a classic example of a hydrothermal outflow plume as shown in Fig. 2 (Goff et al., 1988). The bottom hole temperature (BHT) in wells PGM-11, PGM-10, and PGM-12 is 240°C, and in fact, the wells are isothermal at 240°C below the 240°C isotherm. Because of collapsed casing in PGM-3, the BHT was not measured in this well. The sudden change in elevation of the 220°C isotherm between wells PGM-3 and PGM-12 suggests that there is conductive cooling of the lateral outflow plume between these wells. There is no suggestion in Fig. 14 of Giggenbach's (1986) 300°C deep fluid. The temperature profiles shown indicate that higher temperature fluids will more likely be found to the north of PGM-11 and no deeper than an elevation of about 200 m below sea level.

XI. RECOMMENDATIONS AND DISCUSSION

The reservoir model developed in this report, based on the fluid and gas geochemistry and supported by the temperature logging of the wellbores, differs significantly from Giggenbach's (1986) model of the Miravalles system. The implications of these differences are important to further development of the reservoir. Our model suggests that future production drilling should be located north of well PGM-11 to take advantage of the higher temperatures in the upflow zone and east of PGM-2 to determine the eastern extent of the outflow plume. A new well to the west of PGM-5 (PGM-15) has been completed and may be useful in determining the western margin of the plume. Reinjection of spent brines along the margins of the plume can help maintain reservoir pressures. Wells PGM-2 and PGM-15 should be logged under static and flowing conditions. Future drilling south of PGM-12 should be limited to bottom hole elevations of about 200 m below sea level.

Two important aspects of the reservoir analysis that are not shown on the cross section in Fig. 14 are the locations of the major production zones of the calcite scale deposits within the wellbores. The two major production zones in PGM-10 are at elevations of 330 to 430 m and 530 to 630 m below sea level (information provided by ICE). Calcite scale was observed in caliper logs between 397 and 488 m below sea level (Dennis et al., 1988). These production and calcite deposition zones are below the thermal plume. There was no

indication of fluid entry from the upper production zone (330 to 430 m) in the STP logs, so this zone may already have been sealed by calcite deposition in the fractures. Relating the production and the calcite deposition zones to the reservoir pressure profiles and to the outflow plume would provide important insight into the appropriate production strategy for each well and also the reinjection strategy for the entire field.

ACKNOWLEDGMENTS

A number of people have contributed to this work. Srs. Alexis Alvarado and Leonel Vaca (ICE) helped the logging operations with their insight and with valuable discussions. Bob Hanold (LANL) provided encouragement, ideas, and motivation to finish this report. Cathy J. Janik and Terri Cheatham, US Geological Survey, Menlo Park, California, provided gas analyses as well as comments to the report. Margaret Findley, Regina Johnson, and Pita Valencia typed the manuscript, and Anthony Garcia, Sharon Dominguez, and James Archuleta drafted the figures. Pete Chavez, Richard Maestas, Benny Garcia, Ray Jermance, Joe Kurtenbach, Lynn Brewer, Dave Anderson, and Tracy Grant made this work a true joy. The help of all these people is much appreciated.

REFERENCES

Archuleta, J. R., C. F. Fink, and J. Kurtenbach, 1978, Equipment development report: Borehole fluid sampling tool, Los Alamos National Laboratory report LA-7152-MS.

Corrales, M., 1985, Costa Rica: Country update report, 1985 International Symposium on Geothermal Energy, *Trans. Geoth. Res. Counc.*, pp. 57-63.

Craig, H., 1961, Isotope variations in meteoric waters, *Science*, 133: 1702-1703.

Dennis, B. R., R. G. Lawton, and J. D. Kolar, 1988, Los Alamos National Laboratory geothermal well-logging program, Miravalles, Costa Rica.

DiPippo, R., 1980, *Geothermal Energy as a Source of Electricity*, US Govt. Printing Office, Washington, DC, 370 pp.

Fontes, J. C., 1980, Environmental isotopes in groundwater hydrology, in *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Vol. 1A: The [Brrestrial Environment,* Elsevier, Amsterdam, pp. 75-140.

Fournier, R., 1981, Application of water geochemistry to geothermal exploration and reservoir engineering, in Ryback and Muffler, eds., *Geothermal Systems: Principles and Case Histories,* John Wiley and Sons, New York, pp. 109-143.

Giggenbach, W. F., 1986, IAEA coordinated research programme on the applications of isotopic and chemical techniques to geothermal exploration in Latin America: The isotopic and chemical composition of water and stream discharges from the Guanacaste geothermal province, Costa Rica, Unpublished IAEA report, 32 pp.

Goff, F., L. Shevenell, C. O. Grigsby, and B. Dennis, eds., 1987a, Downhole fluid sampling at the SSSDP California State 2-14 Well, Salton Sea, California, Los Alamos National Laboratory report LA-11052-OBES, 32 pp.

Goff, F., A. H. Truesdell, C. O. Grigsby, C. J. Janik, L. Shevenell, J. R. Paredes, J. Gutierrez, P. Trujillo, and D. Counce, 1987b, Hydrogeochemical investigations of six geothermal sites, Honduras, Central America, Los Alamos National Laboratory report LA-10785-MS, 170 pp.

Goff, F., L. Shevenell, J. Gardner, F.-D. Vuataz, and C. O. Grigsby, 1988, The hydrothermal outflow plume of Valles caldera, New Mexico and a comparison with other outflow plumes, *J. Geophys. Res.,* 93 B6: 6041-6058.

Grigsby, C. O., F. Goff, L. Shevenell, P. E. Trujillo, D. A. Counce, C. J. Janik, B. M. Kennedy, and A. F. White (in preparation), Results of downhole fluid sampling at the California State 2-14 well, Salton Sea, California.

Henley, R. W., A. H. Truesdell, and P. B. Barton, 1984, *Fluid-Mineral Equilibria in Hydrothermal Systems, Reviews in Economic Geology,* Vol. 1, Society of Economic Geologists, 267 pp.

Henley, R. W., and A. J. Ellis, 1983, Geothermal systems ancient and modern: A geochemical review, *Earth-Sci. Rev.,* 19: 1-50.

International Atomic Energy Agency, 1969, Environmental isotope data no. 1: World survey of isotope concentration in precipitation (1953-1963): Tech. Rep. Ser. No. 96, IAEA, Vienna.

International Atomic Energy Agency, 1971, Environmental isotope data no. 3: World survey of isotope concentration in precipitation (1966-1967): Tech. Rep. Ser. No. 129, IAEA, Vienna.

International Atomic Energy Agency, 1973, Environmental isotope data no. 4: World survey of isotope concentration in precipitation (1968-1969): Tech. Rep. Ser. No. 147, IAEA, Vienna.

International Atomic Energy Agency, 1975, Environmental isotope data no. 5: World survey of isotope concentration in precipitation (1970-1971): Tech. Rep. Ser. No. 165, IAEA, Vienna.

International Atomic Energy Agency, 1979, Environmental isotope data no. 6: World survey of isotope concentration in precipitation (1972-1975): Tech. Rep. Ser. No. 192, IAEA, Vienna.

Mainieri, A., E. Granados, R. Corrales, and L. Vaca, 1985, Miravalles geothermal field, Costa Rica, technical report, *Trans. Geoth. Res. Counc.*, 9: 279-283.

Pearson, F. J., and A. H. Truesdell, 1978, Tritium in the waters of Yellowstone National Park, US Geol. Survey Open-File report 78-701.

Trujillo, P., D. Counce, C. O. Grigsby, F. Goff, and L. Shevenell, 1987, Chemical analysis and sampling techniques for geothermal fluids and gases at the Fenton Hill laboratory, Los Alamos National Laboratory report LA-11006-MS, 84 pp.

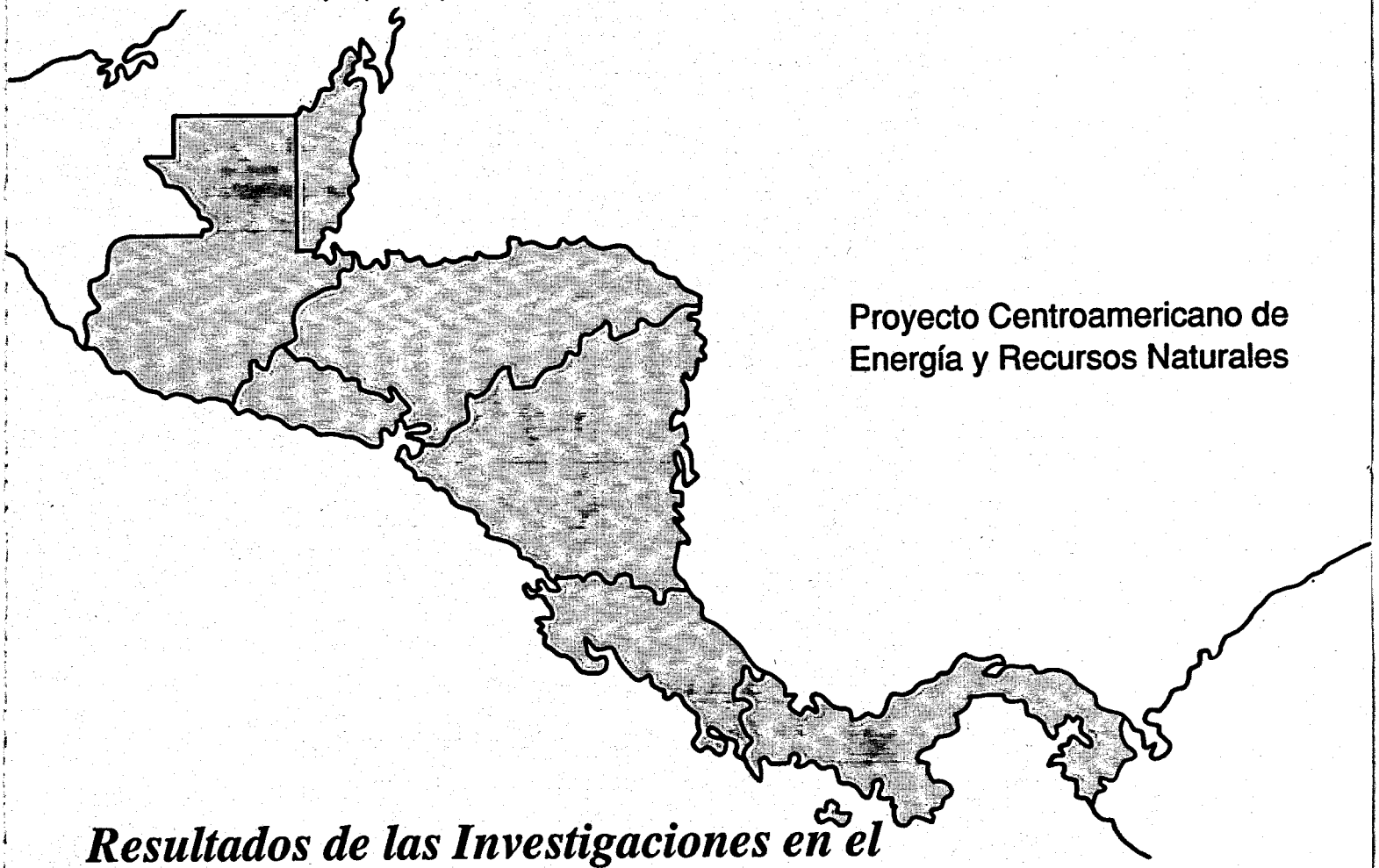
Vuataz, F.-D., and F. Goff, 1986, Isotope geochemistry of thermal and nonthermal waters in the Valles caldera, Jemez Mountains, northern New Mexico, *J. Geophys. Res.*, 91 B2: 1835-1854.

Wolfenbarger, F. M., 1986, Battery pack/controller for higher-temperature applications, *Trans. Geoth. Res. Counc.*, 10: 485-489.

☆U.S. GOVERNMENT PRINTING OFFICE: 1989- 673-034/00200

LA-11510-MS, Part 2

Los Alamos National Laboratory is operated by the University of California for the United States Department of Energy under contract W-7405-ENG-36.



Proyecto Centroamericano de
Energía y Recursos Naturales

Resultados de las Investigaciones en el Campo Geotérmico de Miravalles, Costa Rica Parte 2: Muestreo de Fluidos Pozo Abajo

DO NOT MICROFILM
COVER

LosAlamos Los Alamos National Laboratory
Los Alamos,New Mexico 87545

This work was supported by the U.S. Agency for International Development

An Affirmative Action/Equal Opportunity Employer

This report was prepared as an account of work sponsored by an agency of the United States Government. Neither the United States Government nor any agency thereof, nor any of their employees, makes any warranty, express or implied, or assumes any legal liability or responsibility for the accuracy, completeness, or usefulness of any information, apparatus, product, or process disclosed, or represents that its use would not infringe privately owned rights. Reference herein to any specific commercial product, process, or service by trade name, trademark, manufacturer, or otherwise, does not necessarily constitute or imply its endorsement, recommendation, or favoring by the United States Government or any agency thereof. The views and opinions of authors expressed herein do not necessarily state or reflect those of the United States Government or any agency thereof.

LA-11510-MS, Part 2

UC-000
Issued: October 1989

Resultados de las Investigaciones en el Campo Geotérmico de Miravalles, Costa Rica Parte 2: Muestreo de Fluidos Pozo Abajo

Charles O. Grigsby
Fraser Goff
Pat E. Trujillo, Jr.
Dale A. Counce
Bert Dennis
Jerome Kolar
*Rodrigo Corrales**

**Instituto Costarricense de Electricidad, Proyecto Geotérmico de Miravalles, San José, COSTA RICA*

Los Alamos National Laboratory
Los Alamos, New Mexico 87545

RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES EN EL CAMPO GEOTERMICO DE MIRAVALLES, COSTA RICA
PARTE 2: MUESTREO DE FLUIDOS POZO ABAJO

Charles O. Grigsby, Fraser Goff, Pat E. Trujillo, Jr., Dale A. Counce, Bert Dennis, Jerome Kolar y Rodrigo Corrales*

División de Ciencias de la Tierra y el Espacio
Laboratorio Nacional de Los Alamos
Los Alamos, Nuevo México 87545

*Instituto Costarricense de Electricidad
Proyecto Geotérmico de Miravalles
San José, Costa Rica

CONTENIDO

		Página
LISTA DE TABLAS		vii
LISTA DE FIGURAS		ix
RESUMEN EJECUTIVO		xiii
RESUMEN		1
I.	INTRODUCCION Y ALCANCE	2
II.	MUESTREADOR DE FLUIDO DE PERFORACION - DESCRIPCION Y OPERACION	4
III.	OTRAS MUESTRAS	9
IV.	QUIMICA DE FLUIDOS	9
V.	ISOTOPOS HIDROESTABLES	28
VI.	TRITIO	30
VII.	COMPOSICION DE GAS	36
VIII.	GEOTERMOMETRIA	39
IX.	INCRUSTACION DE CALCITA Y EBULLICION DE RESERVORIO	39
X.	PERFILES DE TEMPERATURA DE PERFORACIONES	44
XI.	RECOMENDACIONES Y EVALUACION	47
RECONOCIMIENTOS		49
REFERENCIAS		49

LISTA DE TABLAS

Página

I. Muestras Obtenidas en Miravalles, Costa Rica, Septiembre de 1985 y Septiembre de 1986 10

I. Química de Elementos Principales y de Traza de Muestras de Fluidos Obtenidas en Miravalles, Costa Rica. 14

III. Valores Medios Ponderados de Tritio Procedente de Lluvia 31

IV. Análisis de Muestras de Gas de Miravalles, Costa Rica 37

V. Ecuaciones para el Cálculo de Temperaturas de Geotermómetro Químico (Basándose en Goff y otros, 1987b). 40

VI. Temperaturas de Geotermómetro Químico para Fluidos de Miravalles, Costa Rica 41

LISTA DE FIGURAS

Página

1. Mapa de localización del campo geotérmico de Miravalles, Costa Rica, mostrando la localización de muestras y pozos. Los pozos geotérmicos son representados por números PGM y las localizaciones de muestras que no sean pozos geotérmicos están indicadas por números MRV 3

2. Modelo conceptual de un sistema geotérmico volcánico (adaptado de Henley y Ellis, 1983). Las aguas meteóricas infiltran a profundidad en la tierra, donde son calentadas por un cuerpo magmático intrusivo. Los volátiles magmáticos tales como CO_2, H_2O, NaCl, SO_2, H_2S, etc., también son transferidos al agua meteórica, la cual asciende por flotación. Frecuentemente, los fluidos calientes ascienden a través de fracturas al punto que se forma una fase de vapor que contiene vapor de agua y gases no condensables. Al condensarse el vapor de agua y combinarse con agua meteórica poco profunda, se oxida el H_2S convirtiéndose en ácido sulfúrico, el cual altera químicamente las rocas (como en Las Hornillas) y produce manantiales calientes sulfato-ácidos. Las aguas cloruro-neutras típicamente están más profundas que las aguas sulfato-ácidas y si se mezclan los dos tipos de fluidos, pueden resultar aguas con sulfato y cloruro. Debido a la topografía y al gradiente hidrológico, los fluidos tienden a desplazarse lateralmente y el factor HCO_3^-/SO_4^{-2} aumenta con la distancia, debido al mezclado con agua de lluvia saturada con CO_2. Las características del sistema de Miravalles (Las Hornillas, PGM-2, PGM-12 y Salitral Bagaces) se muestran en sus posiciones aproximadas en el modelo conceptual. La fuente de calor para el sistema geotérmico de Miravalles parece centrarse abajo del volcán de Miravalles, pero tal vez incluya calor residual del plutón que reside abajo de la caldera Guayabo más antigua 5

3. Diagrama esquemático de los muestreadores de Los Alamos usados pozo abajo en Miravalles, Costa Rica. (a) La sonda usada en 1986 tenía botellas internas de muestreo; podía usarse ya sea una sola botella de 1 litro de capacidad, o dos botellas de 1/2 litro cada una (en el dibujo se muestran dos botellas). (b) El muestreador pozo abajo usado en 1986 tiene un mecanismo de embrague más sencillo y usa botellas

externas cuyo volumen depende del largo de las mismas; en Miravalles se usaron botellas de 2 litros y 4 litros nominales. Este muestreador se opera a través de un cable de siete conductores o por medio de una unidad controladora/paquete de baterías montada en una línea guía 6

4. Diagrama esquemático del sistema de extracción de gas 8

5. Diagrama de Piper mostrando los diversos tipos de fluidos encontrados en Miravalles. Las líneas de mezcla se describen en el texto 21

6. Diagramas de variación de cloruro mostrando la mezcla de fluidos del reservorio con aguas superficiales diluidas. (a) sodio, (b) potasio, (c) litio, (d) calcio, (e) boro, (f) amonio 23

7. Variación de la concentración de sílice en función de la concentración de cloruro 28

8. Gráfica de δD comparado con $\delta^{18}O$ para aguas de la región de Miravalles. Las diluidas aguas frías caen sobre o cerca de la línea meteórica mundial (Craig, 1961). Los fluidos del reservorio presentan evidencia de intercambio de isótopo de oxígeno con las rocas 29

9. Concentraciones de tritio en lluvia de varias localizaciones para el período de 1961 a 1986 (basándose en Goff y otros, 1978b) 32

10. Resultados de cálculos de modelo para tiempos medios de residencia en función de la concentración de tritio en agua, para el caso de reservorios tipo flujo de pistón y bien mezclado. Estas curvas se aplican para aguas recolectadas en Centroamérica durante 1985 a 1986 (basándose en Goff y otros, 1987b) 32

11. Variación de tritio en función del cloruro para muestras de Miravalles. Las muestras representadas con estrellas son datos presentados por Giggenbach (1986) 34

12. Variación de composición gaseosa en función del mol % de CO_2. La mayoría de las muestras parecen ser mezclas de aire con gas puro de CO_2. El oxígeno está agotado relativo al nitrógeno, probablemente debido a reacción con la roca. (a) concentraciones de CO_2 desde 0 a 100 mol %, (b) concentraciones de CO_2 desde 92 a 100 mol % 38

13. Diagrama de entalpía-cloruro para el sistema de Miravalles; las líneas de ebullición conectan puntos de datos con los puntos correspondientes a vapor puro y las líneas de mezcla se dibujan desde puntos de datos de muestras, hacia el punto que representa las aguas diluidas a 21°C. Las diversas líneas de ebullición y mezcla se describen en el texto 42

14. Vista transversal de elevación a través de la sección A-A′ de Figura 1, mostrando la localización de perforaciones e isotermas dentro del reservorio. Los rasgos importantes de esta vista son la definición de la pluma de la descarga termal y la zona de ebullición poco profunda en PGM-10 45

RESUMEN EJECUTIVO

Las operaciones de registro de perforaciones y muestreo de fluido geotérmico fueron efectuadas por el Laboratorio Nacional de Los Alamos (LANL) y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) en el Proyecto Geotérmico de Miravalles, en la provincia Guanacaste de Costa Rica, para resolver varios problemas específicos asociados con el desarrollo del sistema geotérmico de Miravalles. Estos problemas incluyen: (a) precipitación de calcita en la perforación durante la producción, (b) origen del fluido ácido encontrado al incrementar la profundidad del pozo PGM-2, (c) la posible existencia de un manto acuífero de 300°C abajo del actual reservorio geotérmico de 240°C, (d) la recarga del sistema y (e) el impacto ambiental potencial de la descarga en la superficie de fluidos termales no aprovechables. Si bien nuestro objetivo principal es el describir los resultados del muestreo de fluidos, parte de la información de este informe fue obtenida de registros de perforaciones, incluyendo registros de temperatura, registro de RTP (rotor/temperatura/presión) y registros del diámetro de la perforación con un calibrador de tres brazos (Dennis y otros, 1988).

Algunos de los problemas mencionados anteriormente -- en particular el origen de los fluidos ácidos y el posible manto acuífero de 300°C a profundidad -- están relacionados con la estructura del reservorio hidrotérmico. En un sistema geotérmico típico asociado con perímetro de placas o volcanismo de zona de subducción, como por ejemplo, Ahuachapán en El Salvador o Miravalles en Costa Rica, el líquido del reservorio es un agua tipo cloruro-neutral; las fumarolas, la alteración ácida de las rocas y los manantiales calientes sulfato-ácidos se encuentran en la región cercana a la fuente termal y los manantiales calientes desde cloruro-neutros hasta cloruro-ricos en bicarbonato, descargan a cierta distancia de la fuente termal. Los fluidos sulfato-ácidos resultan de la condensación cercana a la superficie del vapor y la oxidación del H_2S, el cual pasó a la fase de vapor cuando el fluido del reservorio hirvió a gran profundidad. De acuerdo con este modelo de un sistema geotérmico,

los fluidos sulfato-ácidos suprayacen a los fluidos cloruro-neutros del reservorio y a gran profundidad no existe un considerable manto acuífero ácido.

En este estudio no se detectaron los fluidos ácidos supuestamente producidos despúes de aumentar la profundidad de PGM-2. De hecho, el fluido obtenido pozo abajo de PGM-2 es idéntico al fluido de reservorio obtenido de otros pozos en el campo. En el muestreo pozo abajo del PGM-2 por parte del ICE, también se obtuvieron resultados similares usando un muestreador Kuster. Ante la falta de evidencia irrefutable que indicara lo contrario, opinamos que los fluidos ácidos detectados en el pozo PGM-2 pueden ser interpretados mejor como aguas sulfato-ácidas poco profundas, o fluidos mixtos de ácido-sulfato y cloruro que penetraron al pozo a través de hoyos en la camisa o por flujo de líquido alrededor de la zapata de la camisa y a través del cemento. Tales hoyos pudieron haberse sellado posteriormente, de tal forma que no se detectaron durante las pruebas de presión de la camisa. Como no se detectaron fluidos ácidos durante los registros de LANL-ICE, no debe haber problema para obtener un juego completo de registros (temperatura, RTP, muestreador de agua tipo calibrador) en este pozo, usando el cable estándar de registro de siete conductores y así disponer de mejor información.

Basándose en las líneas de mezcla y la geotermometría de cuarzo, Giggenbach (1986) sugirió la posibilidad de un manto acuífero de 300°C subyacente al reservorio de 240°C de Miravalles. Empleando nuestros datos de química de líquidos y gases, hemos calculado la temperatura de equilibrio del reservorio por medio de un número de geotermómetros químicos (cuarzo-conductivo, Na-K, Na-K-Ca y dos geotermómetros de gas). Estas temperaturas calculadas por geotermómetro coinciden exactamente con las temperaturas medidas pozo abajo de 220° a 255°C. Además, los perfiles de temperatura en PGM-10 y PGM-11 muestran claras inversiones de temperatura, características de las plumas de flujo de descarga lateral (Goff y otros, 1988). A una profundidad de perforación razonable, no hemos encontrado evidencia de temperaturas mayores de 260°C.

Al hervir el fluido geotérmico las escamas de calcita son depositadas en las perforaciones como resultado de los cambios en pH asociados con la pérdida de CO_2 en la fase de vapor. En Miravalles es alta la concentración de CO_2 en el fluido del reservorio; por lo tanto, es potencialmente muy alto el cambio en pH asociado con la pérdida de CO_2 a la fase de vapor. Existen varias maneras de reducir a un mínimo el impacto negativo causado por el depósito de calcita en la perforación; probablemente el método más fácil consiste en mantener en el cabezal una presión más alta durante la producción. Esto eleva el nivel de la zona de ebullición y por lo tanto el nivel de la acumulación de calcita en la perforación. Es de vital importancia reducir o eliminar los depósitos de calcita en la parte ranurada de la camisa de un pozo en producción, ya que las operaciones de abocardado sólo eliminan los depósitos del interior de la camisa ranurada, pero puede que sea imposible elevar la zona de ebullición arriba de la sección ranurada mientras que el pozo esté en producción a niveles comerciales. Otra opción es la inyección continua de ácidos diluidos o inhibidores de escamas abajo de la zona de evaporación espontánea. Esto implicaría colgar un tubo angosto dentro de la perforación y requeriría un cuidadoso control para asegurar el tratamiento adecuado del pozo.

La estrategia más importante para reducir el impacto de las acumulaciones de calcita consiste en mantener las presiones del reservorio a través de la reinyección de salmuera agotada; esto implica consecuencias mucho más allá del problema de acumulaciones de calcita en las perforaciones. Cuando se operan los pozos a su gasto máximo, la zona de ebullición dentro de la perforación está a un nivel un poco más arriba de los niveles de producción. Por ejemplo, la principal zona de producción en PGM-3 está solamente 3 m abajo de la zona de ebullición, mientras que en PGM-10 las acumulaciones de calcita impidieron el registro abajo de los 1.158 m, nivel que está únicamente a 42 m arriba de la zona de producción a los 1.200 m. Una zona de producción menos profunda (de 1.000 a 1.100 m arriba de la acumulación de calcita) no fue detectada durante el registro RTP, lo cual sugiere que esta zona ya estaba obstruida por depósitos de

calcita. (La información sobre zonas de producción fue proporcionada por el ICE). La continua operación del campo sin reinyección podría tener como resultado una disminución de la presión del reservorio, lo cual a su vez causaría una creciente ebullición dentro del mismo reservorio. Sería casi seguro que esta ebullición causaría el depósito de calcita dentro del reservorio fracturado, lo cual reduciría la permeabilidad y el nivel de producción del reservorio. Aun sin la complicación del depósito de calcita dentro del reservorio, una disminución en la presión del reservorio puede disminuir seriamente la producción de un sistema geotérmico, como sucedió en el caso del campo de Ahuachapán en El Salvador.

Al analizar los datos para este informe, los revisamos cuidadosamente para detectar cualquier evidencia de ebullición dentro del reservorio, pero no encontramos nada que indicara un exceso de gas o entalpía en cualquiera de los pozos. Sin embargo, parece que el manantial caliente en San Bernardo Abajo es producto de la mezcla de vapor condensado con agua de río, en el Río Agua Caliente. Los manantiales calentados por vapor son un rasgo común de este tipo de sistema geotérmico (Henley y Ellis, 1983), pero ellos sugieren que la ebullición está sucediendo a lo largo de las descargas del sistema.

El conocimiento de la hidrología del sistema es importante para la ubicación de los pozos de producción y reinyección y uno de los problemas fundamentales es la identificación de la recarga del sistema. Basándose en los análisis de isótopo de hidrógeno de ríos alrededor del Volcán Miravalles, Mainieri y otros (1985) y Giggenbach (1986) concluyen que la recarga del sistema está fundamentalmente al norte y este del volcán; Giggenbach (1986) extiende su modelo hidrológico del sistema hasta el área del Rincón de la Vieja, la cual está de 15 a 20 km al noroeste de Miravalles. Sin embargo, las muestras de arroyos fríos representantes de precipitación reciente sobre el Volcán Miravalles, así como del agua usada en el campo geotérmico tienen características de isótopo de hidrógeno iguales a las de los fluidos del reservorio, sugiriendo que la recarga del sistema es local.

El último tema problemático mencionado anteriormente -- o sea, la evalucación del impacto ambiental de la descarga de los fluidos termales en la superficie -- no es tratado directamente en este informe. Sin embargo, se presentan los análisis de fluidos, incluyendo los de elemento traza, para el uso de aquellas personas que deseen preparar esta evaluación.

RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES EN EL CAMPO GEOTERMICO DE MIRAVALLES, COSTA RICA

PARTE 2: MUESTREO DE FLUIDOS POZO ABAJO

por

Charles O. Grigsby, Fraser Goff, Pat E. Trujillo, Jr., Dale A. Counce, Bert Dennis, Jerome Kolar y Rodrigo Corrales

RESUMEN

En el campo geotérmico de Miravalles, Costa Rica, se obtuvieron muestras de fluidos geotérmicos de los pozos de producción por medio de muestreadores de fluido pozo abajo, de los cabezales de pozo por medio de miniseparadores y de los manantiales calientes que descargan en el área. El líquido del reservorio en Miravalles es un agua tipo cloruro-neutral, pero existen fumarolas y manantiales sulfato-ácidos dentro del área térmica principal y existen manantiales calientes ricos en bicarbonato que están claramente asociados con los fluidos cloruro-neutros del reservorio. Los gases disueltos son principalmente una mezcla de CO_2 con aire, pero las muestras obtenidas en las áreas fumarólicas también contienen H_2S. Los análisis de isótopo estable del agua sugieren una recarga de tipo meteórico local y el fluido del reservorio muestra desplazamientos en el isótopo de oxígeno de alrededor de 2.5%, debido al intercambio de oxígeno a alta temperatura entre el agua y la roca. Las temperaturas del geotermómetro químico son consistentes con las temperaturas de 220° a 255°C medidas pozo abajo.

Esta combinación de fluidos de reservorio cloruro-neutrales con manantiales sulfato-ácidos cercanos a la fuente termal y manantiales calientes

con cloruro y ricos en bicarbonato en la periferia del sistema, sugieren un sistema hidrotérmico de tipo descarga lateral. Además de la evidencia geoquímica, los perfiles de temperatura de varios de los pozos muestran inversiones de temperatura características de plumas de descargas laterales. No encontramos ninguna evidencia de un sistema subyacente de alta temperatura (300°C) como han sugerido otros investigadores.

I. INTRODUCCION Y ALCANCE

Durante septiembre de 1985 y de nuevo durante septiembre de 1986, el Laboratorio Nacional de Los Alamos (LANL) y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) efectuaron operaciones de registro de pozos en el Proyecto Geotérmico de Miravalles (Corrales, 1985) bajo un programa patrocinado por la Agencia Internacional de Desarrollo de los Estados Unidos (USAID). Como parte de estas operaciones se obtuvieron muestras de agua y gas de estos pozos y manantiales calientes del campo geotérmico de Miravalles, para tratar de contestar las dudas sobre la química e hidrología del reservorio. En la Figura 1 aparece un mapa que identifica las muestras y pozos.

Los objetivos específicos de esta investigacion incluyen el estudio de (a) la precipitación de calcita en los pozos durante la producción, (b) el origen del fluido ácido detectado al aumentar la profundidad del pozo PGM-2, (c) las posible existencia de un manto acuífero de 300°C abajo del reservorio de 240°C y (d) la recarga del sistema. Un quinto objetivo, presentado durante el transcurso del estudio, involucra la evaluación del impacto ambiental de la descarga en la superficie de fluidos termales no aprovechables. La mayoría de estos problemas pueden tratarse en forma óptima dentro del contexto de un modelo del reservorio. Típicamente, los sistemas geotérmicos asociados con volcanismo andesítico de perímetro de placa o zona de subducción tienen

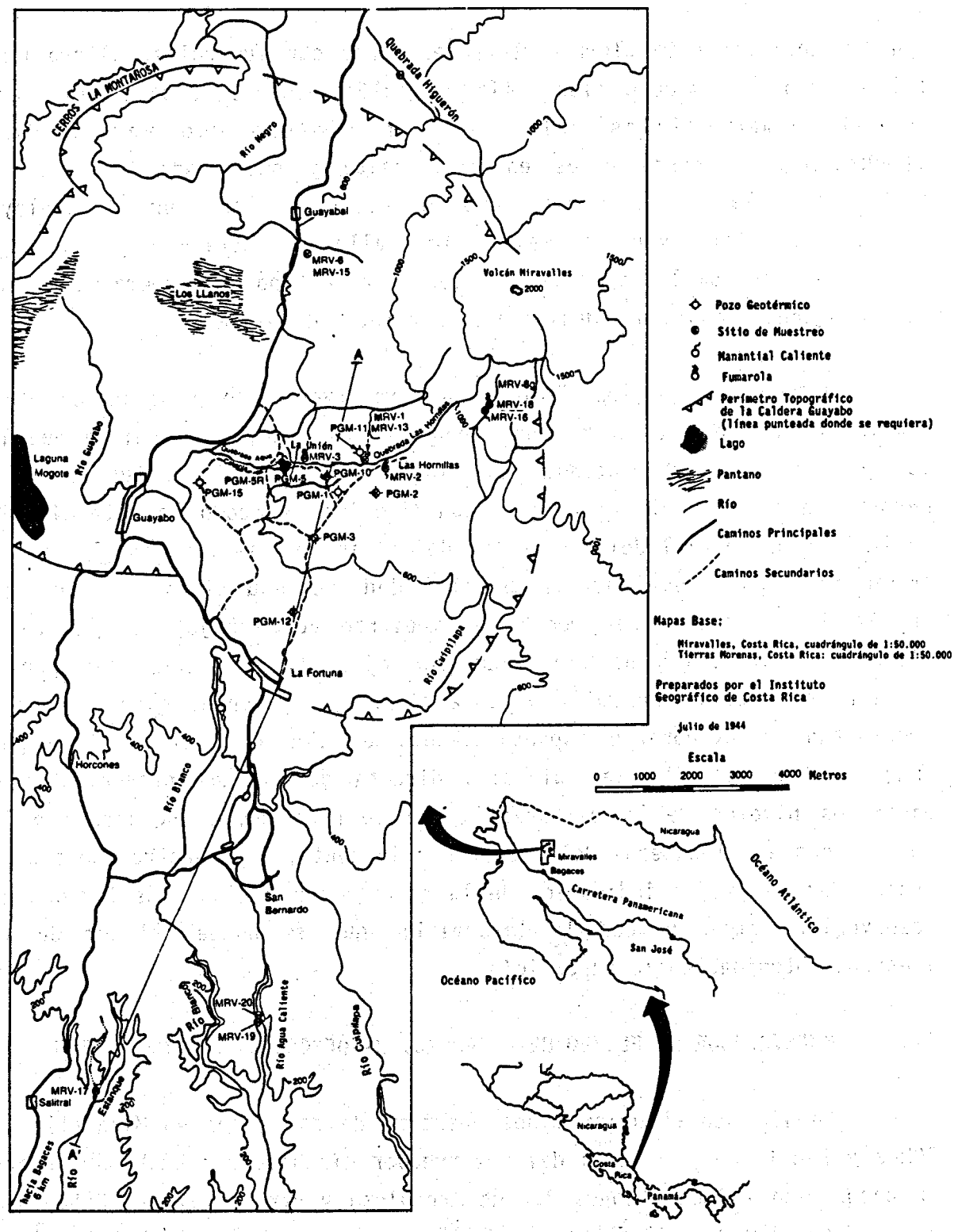


Figura 1. Mapa de localización del campo geotérmico de Miravalles, Costa Rica, mostrando la localización de muestras y pozos. Los pozos geotérmicos son representados por números PGM y las localizaciones de muestras que no sean de pozos geotérmicos están indicadas por números MRV.

fluidos de reservorio cloruro-neutrales junto con fumarolas, alteraciones ácidas de rocas, manantiales calientes sulfato-ácidos cerca de la fuente termal y manantiales calientes con cloruro que varían desde cloruro-neutros hasta ricos en bicarbonato y que descargan a cierta distancia de la fuente termal, como se muestra en la Figura 2 (Henley y Ellis, 1983; Henley y otros, 1984). Miravalles en Costa Rica y Ahuachapán en El Salvador son los ejemplos típicos de este tipo de sistema geotérmico asociado con volcanismo andesítico de perímetro de placa.

Debido a que los fluidos del reservorio se separan en fases líquida y de vapor al entrar en producción el pozo, se requiere que las muestras pozo abajo mantengan el fluido en su estado natural. Esto permite la medición de la relación gas/líquido así como la determinación de la presión parcial del gas dentro del fluido del reservorio, la cual es importante para evaluar la posibilidad de ebullición dentro del reservorio. Además, por medio del muestreo pozo abajo, la química de elementos principales no tiene que ser ajustada para compensar por la pérdida de vapor o por la pérdida de ciertos componentes químicos que se precipitan al evaporarse espontáneamente el fluido. El muestreo pozo abajo también permite la colección directa de fluidos provenientes de distintos niveles de la perforación, lo cual no puede lograrse con las operaciones en el cabezal del pozo. Por lo tanto, las muestras pozo abajo pueden dar una mejor indicación de la composición real de los fluidos del reservorio, comparado con la información que se puede obtener de las muestras obtenidas en la superficie.

II. MUESTREADOR DE FLUIDO DE PERFORACION--DESCRIPCION Y OPERACION

En 1985 se obtuvieron dos muestras de dos pozos en Miravalles -- PGM-3 y PGM-10 -- por medio del muestreador diseñado por LANL para usarse en pozos geotérmicos (Figura 3a, de Archuleta y otros, 1978). Esta sonda incluye una botella de acero inoxidable, con un volumen de 817,5 cm^3 (en la figura se muestran dos botellas más chicas), la cual vacía antes de ser instalada en la funda de la sonda. Durante el descenso, la botella abre y

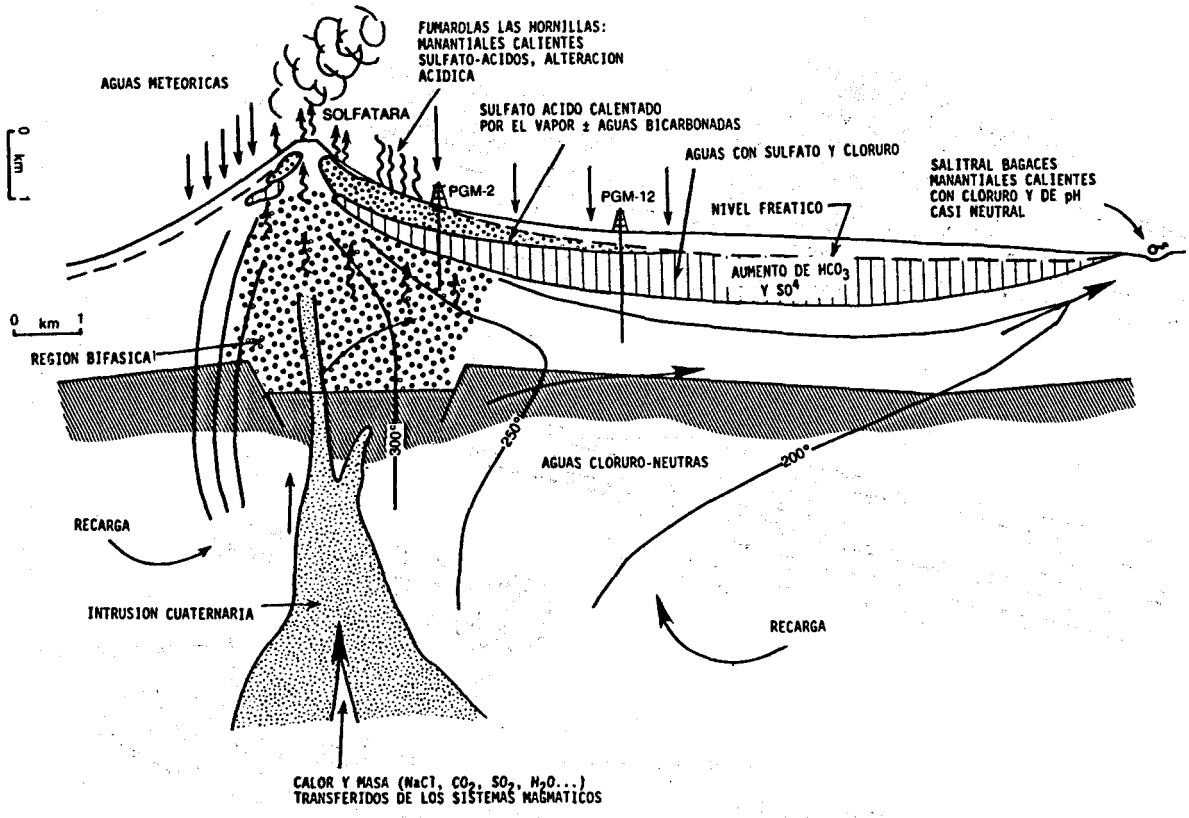


Figura 2. Modelo conceptual de un sistema geotérmico volcánico (adaptado de Henley y Ellis, 1983). Las aguas meteóricas se infiltran a profundidad en la tierra, donde son calentadas por un cuerpo magmático intrusivo. Los volátiles magmáticos tales como CO_2, H_2O, NaCl, SO_2, H_2S, etc., también son transferidos al agua meteórica, la cual asciende por flotación. Frecuentemente, los fluidos calientes ascienden a través de fracturas al punto que se forma una fase de vapor que contiene vapor de agua y gases no condensables. Al condensarse el vapor de agua y combinarse con agua meteórica poco profunda, se oxida el H_2S convirtiéndose en ácido sulfúrico, el cual altera químicamente las rocas (como en Las Hornillas) y produce manantiales calientes sulfato-ácidos. Las aguas cloruro-neutras típicamente están más profundas que las aguas sulfato-ácidas y si se mezclan los dos tipos de fluidos, pueden resultar aguas con sulfato y cloruro. Debido a la topografía y el gradiente hidrológico, los fluidos tienden a desplazarse lateralmente y el factor HCO_3^-/SO_4^{-2} aumenta con la distancia, debido al mezclado con agua de lluvia saturada con CO_2. Las características del sistema de Miravalles (Las Hornillas, PGM-2, PGM-12 Y Salitral Bagaces) se muestran en sus posiciones aproximadas en el modelo conceptual. La fuente de calor para el sistema geotérmico de Miravalles parece centrarse abajo del Volcán de Miravalles, pero tal vez incluya calor residual del plutón que reside abajo de la caldera Guayabo más antigua.

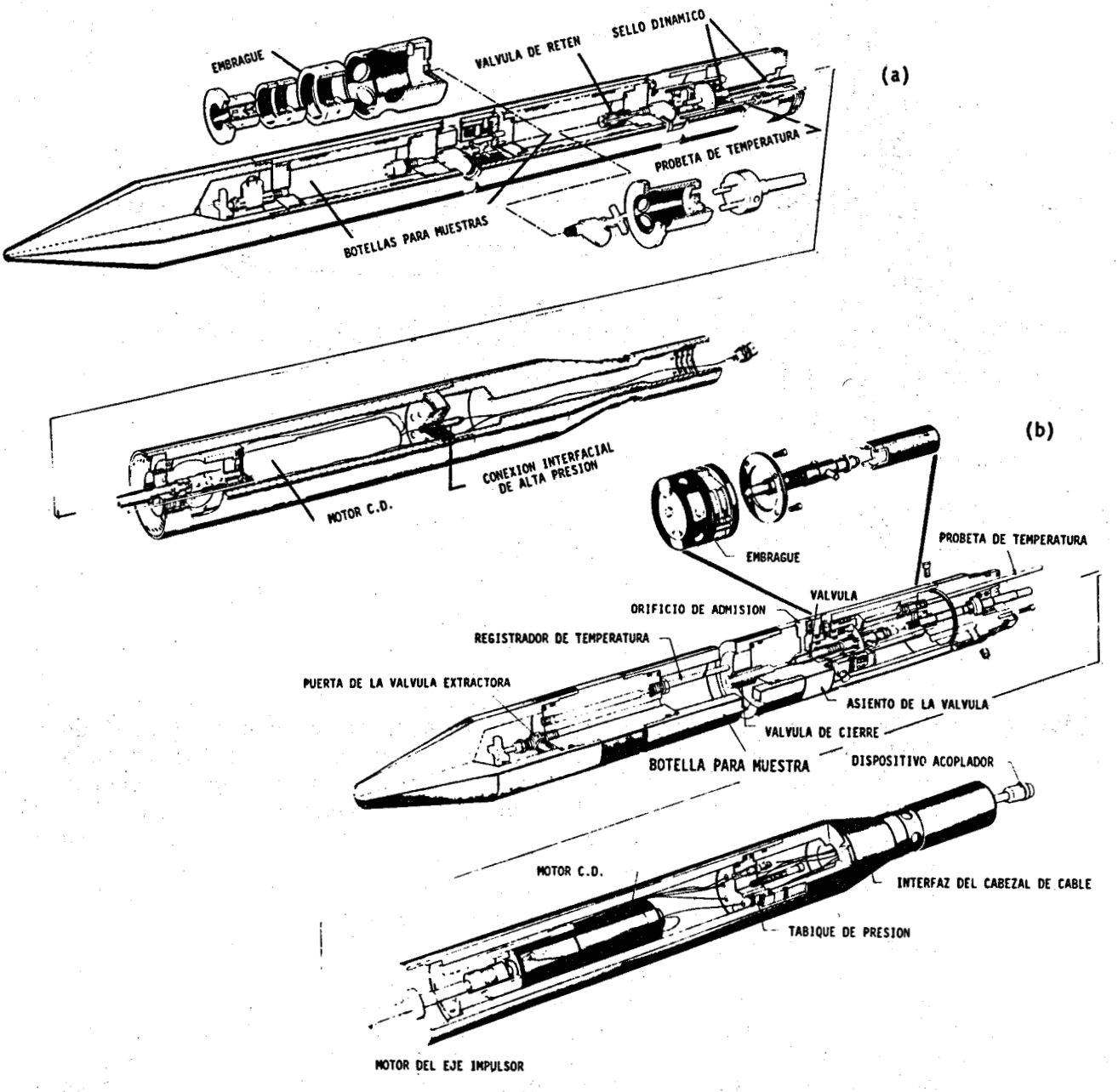


Figura 3. Diagrama esquemático de los muestreadores de Los Alamos usados pozo abajo en Miravalles, Costa Rica. (a) La sonda usada en 1986 tenía botellas internas de muestreo; podía usarse, ya sea una sola botella de 1 litro de capacidad, o dos botellas de 1/2 litro cada una (en el dibujo se muestran dos botellas). (b) El muestreador pozo abajo usado en 1986 tiene un mecanismo de embrague más sencillo y usa botellas externas cuyo volumen depende del largo de las mismas; en Miravalles se usaron botellas de 2 litros y 4 litros nominales. Este muestreador se opera a través de un cable de siete conductores o por medio de una unidad controladora/paquete de baterías montada en una línea guía.

cierra por medio de un motor de alta temperatura que es activado desde la superficie a través de un cable de siete conductores para registros. Al abrir la válvula de muestreo, el fluido experimenta una evaporación espontánea al entrar a la botella, pero debido a la restricción de flujo de la válvula de muestreo, no hay pérdida de gases ni intercambio de fluidos entre el interior de la botella y el pozo. Generalmente, la presión estática dentro del pozo es lo suficientemente alta para volver a disolver los gases no condensables de tal forma que, bajo las condiciones de temperatura y presión dentro del pozo, la botella se llena completamente con líquido de una sola fase. Al salir la muestra a la superficie, la contracción en el volumen del fluido a causa de una baja en temperatura ocasiona que se forme una burbuja en la botella. Esta burbuja está ocupada por el gas que se separa del fluido.

Las muestras recolectadas pozo abajo en 1986 fueron obtenidas con una nueva sonda (Figura 3b), desarrollada para usarse en la salmuera hipersalobre de alta temperatura del sistema geotérmico del Salton Sea, en el sur de California (Goff y otros, 1987a; Grigsby y otros, en elaboración). Esta nueva sonda generalmente es operada desde la superficie por medio de un cable de siete conductores, pero también puede ser instalada en una línea guía y operada a través de una unidad controladora/paquete de baterías diseñado por el Laboratorio Nacional de Sandía (Wolfenbarger, 1986); esta segunda sonda fue usada para obtener muestras del pozo ácido PGM-2. Otra ventaja de la nueva sonda es que la botella de muestreo es más grande; durante el segundo viaje de muestreo se usaron botellas de 2 y 4 litros de capacidad. El mayor volumen de muestreo elimina la necesidad de hacer varios viajes al mismo nivel dentro de un pozo.

Cuando el muestreador es sacado a la superficie después de una corrida de muestreo, se saca la botella de su funda y se enfría (generalmente a $\leq$70°C) para que la presión de vapor del agua dentro de la misma sea baja. Luego la botella es conectada a una línea de extracción de gas (Figura 4), para medir la presión y sacar muestras del

gas. La temperatura de recolección es medida con una termocupla montada en el termopozo de la botella de muestreo (Figura 4). Al finalizar la extracción del gas, se abre la botella y se mide el volumen del líquido. La diferencia entre el volumen de la botella y el volumen del líquido es el volumen del gas de la muestra pozo abajo, a la temperatura de recolección de la superficie. La muestra líquida es conservada de acuerdo a técnicas estándar (filtrado, acidificación, dilución, etc.), de acuerdo con los tipos de análisis deseados. Las técnicas específicas usadas en Miravalles son descritas por Trujillo y otros, (1987).

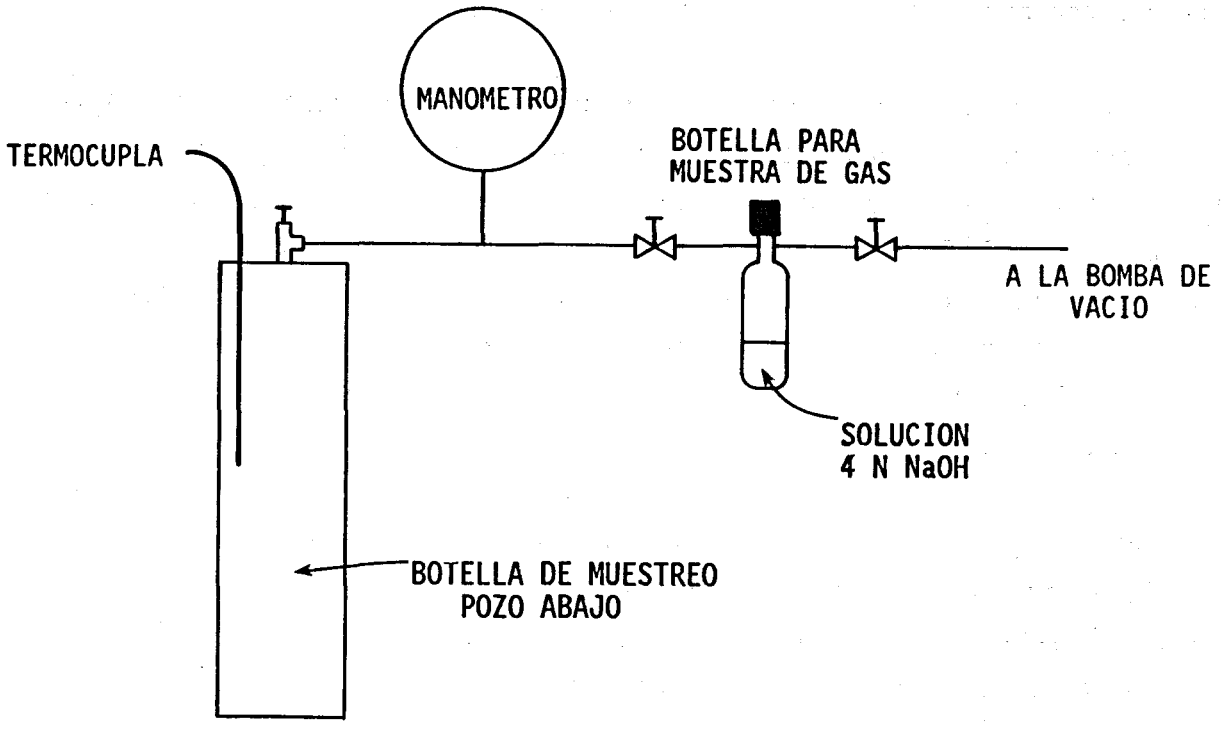


Figura 4. Diagrama esquemático del sistema de extracción de gas.

III. OTRAS MUESTRAS

Además del muestreo pozo abajo, se obtuvieron muestras de líquido superficial y gas de los pozos PGM-5 y PGM-5R por medio de un miniseparador de vapor. Se obtuvieron muestras adicionales de la descarga de líquido del silenciador del pozo PGM-10, de varias fumarolas y manantiales calientes en el área y de manantiales fríos y arroyos. Las muestras obtenidas están enumeradas en la Tabla I.

IV. QUIMICA DE FLUIDOS

Los análisis químicos de fluidos descritos en este informe fueron hechos en el Laboratorio de Química Analítica Fenton Hill de Los Alamos (LANL), conforme a los métodos de Trujillo y otros (1987). Cuatro de las muestras obtenidas requirieron reconstrucción para restaurar las concentraciones medidas de los componentes a sus valores previos a la evaporacion espontánea. Estos análisis son presentados en la Tabla II.

La muestra MRV-5 fue obtenida del pozo PGM-5 por medio de un separador de vapor operando a una presión de separación de 3 kg/cm^2 de manómetro, la cual corresponde a una temperatura de separación de 133°C. Las concentraciones de los componentes no volátiles fueron compensadas por la pérdida de vapor (cerca de 22%, basándose en temperaturas en el interior de la perforación de 240°C, medidas en varios pozos del campo, así como en temperaturas de geotermómetro descritas posteriormente en este informe) y los isótopos hidroestables fueron compensados por evaporación espontánea de etapa sencilla a los 133°C. La concentración de NH_4^+ fue compensada por la redistribución entre las fases gaseosa y líquida. En la Tabla II se presenta como la muestra MRV-5I* este análisis corregido.

La muestra MRV-8 fue obtenida de la descarga líquida del silenciador del pozo PGM-10; por lo tanto, la muestra había experimentado evaporación espontánea a la presión atmosférica. En la Tabla II y como

TABLA I. Muestras obtenidas en Miravalles, Costa Rica, durante septiembre de 1985 y septiembre de 1986. Se usan las siguientes abreviaciones para describir los tipos de muestras obtenidas: FA = filtrada, acidificada; FU = filtrada, no acidificada; SiO_2(1:5) = dilución 1:5 para análisis de sílice; isótopo de C, S, H_2O = muestras de carbón (bicarbonato/carbonato), azufre (sulfato) e isótopos estables de agua; ^3H = muestra de tritio; gas = muestra de gas.

Número de Muestra	Fecha	Descripción
MRV-1	11 de sep. de 1985	Muestra de gas[a] de la fumarola inferior de Las Hornillas. Area grande de fumarolas con manantiales de lodo en ebullición. Algunas albercas contienen grandes cantidades de arcilla; otras son amarillas. La temperatura de las fumarolas -- 99,6°C. El flujo total <1 ℓ/s. Coordenada 299407 del UTM.
MRV-2	11 de sep. de 1985	Muestra de gas[a] de la fumarola superior de Las Hornillas. Area grande de fumarolas en andesita con fuerte alteración química. Depósitos de azufre indígeno. Las albercas son transparentes y tranquilos. La temperatura de las fumarolas -- 99,4°C. Flujo total <1 ℓ/s. Coordenada 299407 del UTM.
MRV-3	11 de sep. de 1985	Muestra de gas[a] de las Fumarolas de La Unión (alrededor de 300 m al nornordeste del pozo PGM-5). Las rocas son mucho menos alteradas que las de la fumarola superior de Las Hornillas y el área total es pequeña. No hay albercas líquidas aquí. La temperatura de las fumarolas -- 100,5°C.
MRV-4	12 de sep. de 1985	Muestras de gas obtenidas del pozo PGM-5R, un pozo de vapor seco de 500 m de profundidad. El muestreo se hizo con un miniseparador a una presión de 3.5 kg/cm^2 de manómetro. Coordenada 299406 del UTM.
MRV-5	12 de sep. de 1985	Muestras de gas y líquido obtenidas con un miniseparador (P = 3 kg/cm^2 de manómetro) del pozo PGM-5. FA, FU, SiO_2(1:5), ^3H, isótopo de C, isótopo de S, isótopo de H_2O, gas. Coordenada 299406 del UTM.

[a]No se recogieron muestras líquidas. Debido a los flujos bajos y volumen grande de las albercas líquidas, las muestras demostrarían efectos fuertes de evaporación.

Número de Muestra	Fecha	Descripción
MRV-6	12 de sep. de 1985	Muestras de gas y líquido de un manantial caliente acídico cerca de Guayabal que descarga de la parte inferior de un banco grueso de tierra. La alberca tiene alrededor de 8 m de diámetro. pH = 2,0 a 2,1; T = 58°C; flujo = 30 ℓ/min; FA, FU, SiO_2(1:5), ^3H, isótopo de H_2O, isótopos de S, gas. Coordenada 304406 del UTM.
MRV-7	13 de sep. de 1985	Muestra pozo abajo a los 685,8 m (2.250 pies) en el pozo PGM-3. En tres corridas exitosas se recogieron muestras de agua de 596 mℓ, 572,1 mℓ y 586,7 mℓ. La presión de gas en la primera corrida pozo abajo fue de 15 psia. FU, FA, SiO_2(1:5), isótopo de H_2O, ^3H, gas. Coordenada 298406 del UTM.
MRV-8	18 de sep. de 1985	Muestra líquida de la caja vertedora (weir) del pozo PGM-10. FU, FA. Coordenada 299407 del UTM.
MRV-9	21 de sep. de 1985	Muestra pozo abajo a los 1.143 m (3.750 pies) en el pozo PGM-10. Falló el motor del muestreador y se desconoce si la válvula del muestreador estaba completamente cerrada o no. Se recogieron 509,3 mℓ de líquido. FU, FA. Coordenada 299407 del UTM.
MRV-10 MRV-10c	22 de sep. de 1985	Muestra pozo abajo a los 1.143 m (3.750 pies) en el pozo PGM-10. La presión de la botella de muestra pasó de 15 psia; por este motivo, la presión de gas no se midió. Se atraparon 113,0 mℓ de líquido en la línea de gas y se guardó como MRV-10c. Se recogieron 546,0 mℓ de muestra. FU, FA, SiO_2(1:5). Se hizo otra corrida hasta los 1.143 m (3.750 pies) y se recogieron 614,8 mℓ de líquido. Esta muestra se usó para medir el ^3H, el isótopo de H_2O y el isótopo de C.
MRV-11	21 de sep. de 1986	Muestra pozo abajo a los 1.600 m (5.248 pies) en pozo PGM-5. Se recogió la muestra con la sonda nueva de LANL y la botella de muestra de 4 ℓ. Se recogieron 3.267,3 mℓ. La presión de gas era de 8,6 psia. FU, FA, isótopo de H_2O, isótopo de S, ^3H, gas. Coordenada 299406 del UTM.

Número de Muestra	Fecha	Descripción
MRV-12	23 de sep. de 1986	Muestra pozo abajo obtenida a los 1.825 m (5.988 pies) en el pozo PGM-2 con la unidad controladora/bloque de baterías del Laboratorio Nacional de Sandía, la línea de guía del ICE y la botella de muestra #1. Se recogieron 1.722,9 mℓ de fluido. La presión del gas era de 8,6 psia. FU, FA, ^3H, isótopo de H_2O, isótopo de S, gas. Coordenada 299407 del UTM.
MRV-13	23 de sep. de 1986	Fumarola de Las Hornillas inferior (repetición de MRV-1). Muestra sacada de la alberca gris en ebullición alrededor de 20 m al noroeste de la alberca grande. T = 88,9°C. FU, FA, isótopo de H_2O, ^3H, isótopo de S, gas. Coordenada 299407 del UTM.
MRV-14	24 de sep. de 1986	Muestra del río obtenida alrededor de 3 km al este de Aguas Claras en la Quebrada Higuerón. Temperatura = 21,4°C; flujo ~1 ℓ/s. FU, FA, ^3H, isótopo de H_2O. Coordenada 307408 del UTM.
MRV-15	24 de sep. de 1986	Repetición de MRV-6. Temperatura = 60,3°C. Flujo ~1 ℓ/s. FU, FA, ^3H, isótopo de H_2O, isótopo de S, gas. Coordenada 304406 del UTM.
MRV-16	24 de sep. de 1986	Manantial Gaveteros. Manantial frío en el lado sur del Volcán Miravalles. Localización según el ICE -- MI-13-10-NPZ. Temperatura = 25,5°C; flujo ~2 ℓ/s. Deposita azufre en el lecho fluvial. FU, FA, ^3H, isótopo de H_2O, isótopo de C, isótopo de S. Coordenada 300410 del UTM.

NOTE: Una muestra de gas fue recolectada de este manantial por S. Aarnorssen, el 13 de septiembre de 1985, para que el USGS en Menlo Park la analizara.

MRV-17	24 de sep. de 1986	Manantiales de agua caliente de Salitral Bagaces, brotan de montículos de travertino en el lecho fluvial de un arroyo alrededor de 16 km al sur de Guayabo. Temperatura = 67,7°C; flujo ~2 ℓ/min. Fu, FA, ^3H, isótopo de H_2O, isótopo de C, isótopo de S. Coordenada 287401 del UTM.
MRV-18	24 de sep. de 1986	Muestra del río arriba del manantial de agua fría en MRV-16 localizado en la parte inferior de un área grande de fumarolas donde se deposita azufre. FU, FA, ^3H, isótopo de H_2O. Coordenada 300410 del UTM.

Número de Muestra	Fecha	Descripción
MRV-19	24 de sep. de 1986	San Bernardo Abajo. Un manantial de agua caliente brota de tobas en el fondo del cañon de Río Blanco. Localización ICE #TM-7-6-NTP-1. Un represa pequeña con tubería de hierro de 5" de diámetro. Temperatura = 47,5°C; flujo ~2 ℓ/s. FU, FA, ^3H, isótopo de H_2O, isótopo de C, isótopo de S. Coordenada 288405 del UTM.
MRV-20	25 de sep. de 1986	El punto en el río justo arriba del punto donde el agua de MRV-29 brota al río. Temperatura = 21°C. FU, FA, ^3H, isótopo de H_2O. Coordenada 288405 del UTM.
MRV-21	25 de sep.	Muestra de agua pozo abajo recolectada a los 580 m en el pozo PGM-12. Se recogieron 3.545 mℓ. Presión = 6,6 psia. FU, FA, ^3H, isótopo de H_2O, isótopo de C, isótopo de S. Coordenada 296406 del UTM.
MRV-22	25 de sep.	Agua recogida del sistema local de suministro de agua localizado en el sitio del pozo PGM-12. Temperatura = 21°C. FU, FA, ^3H, isótopo de H_2O. Coordenada 296406 del UTM.

TABLA II. Química de elementos principales y de traza de muestras de fluidos obtenidas en Miravalles, Costa Rica. Los análisis químicos fueron hechos por P. E. Trujillo y D. A. Counce del Laboratorio Nacional de Los Alamos y se reportan en mg/kg, excepto cuando se indique lo contrario. Los análisis de isótopos hidroestables fueron hechos en el Laboratorio de Isótopo Estable, Universidad Metodista del Sur en Dallas, Texas. Los análisis de tritio fueron hechos por el Laboratorio de Tritio, Universidad de Miami, Miami, Florida. Los análisis de isótopo de carbón fueron hechos por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, Menlo Park, California.

S/N	Fecha	Cuadrícula del UTM	Nivel Sobre el Mar (m)	pH en el Campo	pH en el Laboratorio	Eh en el Laboratorio	Conductividad en el Laboratorio (μmho/cm^2)
MRV-5	09/12/85	299406	575	---	7,19	311	11.210
MRV-5*	09/12/85	299406	575	---	---	---	---
MRV-6	09/12/85	304406	630	---	2,01	787	7.100
MRV-7	09/13/85	298406	640	---	7,51	437	9.960
MRV-8	09/18/85	299407	670	---	7,13	424	11.490
MRV-8*	09/18/85	299407	670	---	---	---	---
MRV-9	09/21/85	299407	670	---	7,41	419	11.790
MRV-9*	09/21/85	299407	670	---	---	---	---
MRV-10	09/22/85	299407	670	---	8,00	408	10.340
MRV-10c	09/22/85	299407	670	---	5,80	502	7.250
MRV-10*	09/22/85	299407	670	---	---	---	---
MRV-11	09/21/86	299406	575	6,5	7,33	---	9.870
MRV-12	09/23/86	299407	745	6,3	7,28	---	9.530
MRV-13	09/23/86	299407	720	3,5	2,76	---	1.673
MRV-14	09/24/86	307408	520	6,5	6,52	---	50
MRV-15	09/24/86	304406	630	1,5	2,14	---	7.260
MRV-16	09/24/86	300410	1.000	5,5	3,22	---	927
MRV-17	09/24/86	287401	160	6,9	7,67	---	10.230
MRV-18	09/24/86	300410	1.000	---	3,22	---	515
MRV-19	09/25/86	288405	---	6,5	7,99	---	1.198
MRV-20	09/25/86	288405	---	---	8,02	---	420
MRV-21	09/25/86	296406	510	---	7,24	---	10.540
MRV-22	09/25/86	296406	510	---	6,20	---	71

TABLA II. (Continuación)

S/N	SiO_2	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^{+}	K^{+}	Li^{+}	$Fe^{+2,+3}$	NH_4^{+}	Total[a] NH_4^{+}	HCO_3 (Nota b)	Total[a] Carbonato	SO_4^{-2}
MRV-5	554	68,0	0,14	1.920,0	256,0	6,91	0,08	1,20		40,3		36,0
MRV-5*	441	54,1	0,11	1.528,9	203,9	5,50	0,06	13,85		32,1		28,7
MRV-6	259	109,0	49,70	64,0	4,0	0,16	64,30	2,80		0,0		2.690,0
MRV-7	490	59,0	0,14	1.650,0	210,0	5,71	1,02	3,72	7,83	84,2	1.775,4	37,9
MRV-8	554	66,0	0,08	2.020,0	237,0	6,71	0,00	1,10		40,3		38,4
MRV-8*	403	47,9	0,06	1.466,9	172,1	4,87	0,00	15,58		29,3		27,9
MRV-9	586	70,0	<0,02	2.150,0	251,0	6,58	0,06	1,00		56,1		60,3
MRV-9*	453	54,1	0,00	1.661,5	194,0	5,09	0,05	8,43		43,4		46,6
MRV-10	449	68,0	0,14	1.995,0	210,0	5,86	0,14	1,20		51,2		47,5
MRV-10c	158	41,0	0,16	1.260,0	156,0	4,00	0,12	<0,10		65,9		35,5
MRV-10*	400	63,4	0,14	1.869,2	200,8	5,54	0,14	0,99	20,1	53,7	1.386,6	45,4
MRV-11	449	66,4	0,08	1.750,0	204,0	5,49	0,51	1,90	2,7	85,4	345,9	27,9
MRV-12	445	50,9	0,21	1.755,0	181,0	5,25	3,76	3,71	15,6	61,0	434,9	83,2
MRV-13	223	17,2	7,26	9,5	6,9	0,01	113,00	37,90		0,0		536,0
MRV-14	43	5,1	1,37	4,2	1,9	<0,01	0,02	0,03		40,3		3,0
MRV-15	257	108,0	48,20	57,0	3,5	0,05	62,80	2,60		0,0		2.530,0
MRV-16	102	55,1	11,70	19,6	6,0	<0,01	2,55	3,40		0,0		365,0
MRV-17	126	115,0	6,73	2.010,0	76,0	3,90	0,39	1,33		964,0		121,0
MRV-18	62	13,5	3,15	7,1	2,9	<0,01	1,77	0,08		0,0		126,0
MRV-19	178	57,8	28,60	140,0	25,6	0,27	0,00	0,04		436,0		23,5
MRV-20	85	37,7	13,60	37,0	8,1	0,06	0,06	0,17		190,0		13,9
MRV-21	398	40,0	1,17	1.800,0	249,0	5,95	0,26	17,22	20,5	104,0	989,3	205,0
MRV-22	32	5,2	1,69	4,0	1,4	<0,01	0,03	0,03		28,1		19,3

[a]Amonio y bicarbonato corregidos para el CO_2 recobrado durante la fase de gas del muestreador pozo abajo.

[b]Concentraciones medidas de bicarbonato en las muestras acuosas. No hay compensación por la pérdida de CO_2 al evaporarse espontáneamente, pero los análisis se han corregido para la pérdida de vapor cuando se requiera (5*, 8*, 9*).

TABLA II. (Continuación)

S/N	Cl^-	F^-	B	NO^-_3	TDS	Σ cationes	Σ aniones	Ag	Al	As	Ba
MRV-5	3.436,0	1,24	54,00	<0,2	6.374	94,53	100,88	<0,001	0,7	7,4	0,28
MRV-5*	2.736,1	0,99	43,00	0,0	5.078	75,28	80,33	0,000	0,6	5,9	0,22
MRV-6	635,0	1,40	1,84	<0,2	3.881	16,05	74,08	<0,001	495,0	1,5	0,02
MRV-7	2.806,0	1,10	47,00	<0,2	7.171	81,18	142,71	<0,001	0,8	6,2	0,42
MRV-8	3.462,0	1,33	57,00	<0,2	6.484	98,25	101,80	<0,001	0,8	7,4	0,28
MRV-8*	2.514,1	0,97	41,39	0,0	4.713	71,35	73,93	0,000	0,6	5,4	0,20
MRV-9	3.602,0	1,13	62,00	<0,2	6.847	104,44	106,69	<0,001	0,3	2,3	0,37
MRV-9	2.783,6	0,87	47,91	0,0	5.294	80,71	82,45	0,000	0,2	1,8	0,29
MRV-10	3.278,0	1,18	51,00	<0,2	6.159	96,47	96,70	<0,001	0,4	8,0	0,32
MRV-10c	2.165,0	0,84	32,00	<0,2	3.919	61,44	64,40	<0,001	<0,01	7,3	0,21
MRV-10*	3.087,5	1,12	47,75	0,0	7.162	90,47	91,17	0,000	0,0	7,9	0,30
MRV-11	2.835,0	1,10	46,60	<0,2	5.820	85,58	95,67	<0,001	<0,1	1,1	0,60
MRV-12	2.710,0	1,69	47,30	<0,2	5.783	84,69	95,93	<0,001	<0,1	10,2	0,18
MRV-13	3,4	0,11	0,20	5,1	959	10,22	11,35	<0,001	4,1	<0,1	0,06
MRV-14	2,4	0,07	<0,10	<0,1	102	0,60	0,79	<0,001	<0,1	<0,1	0,01
MRV-15	673,0	1,43	1,60	0,9	3.746	15,45	71,82	<0,001	389,0	1,7	<0,02
MRV-16	4,7	0,20	<0,10	0,7	571	5,04	7,75	<0,001	17,5	<0,1	0,04
MRV-17	2.620,0	0,72	46,20	<0,2	6.092	96,32	94,38	<0,001	<0,1	5,6	0,47
MRV-18	1,9	0,31	<0,10	0,9	220	1,42	2,71	<0,001	5,1	<0,1	0,01
MRV-19	163,0	0,24	2,70	0,6	1056	12,02	12,38	<0,001	<0,1	0,4	0,13
MRV-20	34,9	0,22	0,40	<0,1	421	4,84	4,42	<0,001	<0,1	<0,1	0,08
MRV-21	3.040,0	1,57	54,80	<0,2	6.906	88,58	127,30	<0,001	1,0	6,2	0,20
MRV-22	3,3	0,09	<0,10	<0,1	95	0,61	0,96	<0,001	<0,1	<0,1	0,02

TABLA II. (Continuación)

S/N	Br	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Hg	Mn	Mo	Ni	Pb	PO_4
MRV-5	17,5	<0,001	0,003	0,002	0,800	<0,001	<0,2	0,03	<0,2	0,001	0,010	<0,2
MRV-5*	13,9	0,000	0,002	0,002	0,637	0,000	0,0	0,02	0,0	0,001	0,008	0,0
MRV-6	0,5	0,036	<0,001	0,090	<0,100	0,003	<0,2	1,75	<0,2	0,046	0,006	<0,2
MRV-7	16,2	<0,001	<0,001	0,005	0,800	<0,001	<0,2	0,30	<0,2	0,007	<0,001	<0,2
MRV-8	17,6	<0,001	0,005	0,001	0,800	<0,001	<0,2	0,02	<0,2	0,009	<0,001	<0,2
MRV-8*	12,8	0,000	0,004	0,001	0,581	0,000	0,0	0,01	0,0	0,007	0,000	0,0
MRV-9	13,3	0,010	0,002	0,016	0,800	0,018	<0,2	0,09	<0,2	0,004	0,006	<0,2
MRV-9*	10,3	0,008	0,002	0,012	0,618	0,014	0,0	0,07	0,0	0,003	0,005	0,0
MRV-10	11,5	0,004	<0,001	0,003	0,700	0,011	<0,2	0,36	<0,2	0,006	0,040	<0,2
MRV-10c	9,6	0,018	0,002	<0,001	0,500	0,320	<0,2	0,28	<0,2	0,024	0,130	<0,2
MRV-10*	11,2	0,006	0,000	0,000	0,666	0,064	0,0	0,35	0,0	0,009	0,055	0,0
MRV-11	10,2	<0,001	0,003	0,004	0,590	<0,001	<0,1	0,08	<0,1	0,022	0,003	<0,2
MRV-12	9,9	<0,001	0,004	0,017	0,530	<0,001	<0,1	0,36	<0,1	0,056	<0,001	<0,2
MRV-13	<0,1	0,001	0,004	0,028	0,007	0,044	<0,1	0,48	<0,1	0,064	0,011	<0,1
MRV-14	<0,1	<0,001	<0,001	<0,001	0,005	<0,001	<0,1	<0,01	<0,1	0,006	<0,001	<0,1
MRV-15	2,8	0,012	0,003	0,014	0,030	0,047	<0,1	1,75	<0,1	0,023	0,007	<0,2
MRV-16	<0,1	<0,001	0,001	0,002	0,004	<0,001	<0,1	0,85	<0,1	0,023	<0,001	<0,2
MRV-17	7,7	<0,001	0,001	0,004	0,130	0,003	<0,1	0,30	<0,2	0,014	0,002	<0,2
MRV-18	<0,1	<0,001	<0,001	<0,001	<0,002	<0,001	<0,1	0,09	<0,1	<0,002	<0,001	<0,1
MRV-19	0,7	<0,001	<0,001	<0,001	0,009	<0,001	<0,1	<0,01	<0,1	<0,002	<0,001	0,3
MRV-20	0,2	0,001	<0,001	<0,001	<0,002	<0,001	<0,1	0,05	<0,1	<0,002	0,005	<0,1
MRV-21	10,7	<0,001	<0,001	<0,001	0,410	<0,001	<0,1	0,85	<0,1	<0,002	0,003	<0,2
MRV-22	<0,1	0,002	<0,001	<0,001	<0,002	0,998	<0,1	0,03	<0,1	<0,002	<0,001	<0,1

TABLA II. (Continuación)

S/N	Rb	Sb	Se	Sr	U	Zn	δD (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	^{3}H (TU)	^{13}C (‰)
MRV-5	1,17	<0,2	<0,2	2,06	<0,2	<0,02	-30,0	-2,77	---	---
MRV-5*	0,93	0,0	0,0	1,64	0,0	0,00	-33,3	-3,57	---	---
MRV-6	0,10	<0,2	<0,2	0,18	<0,2	0,91	-26,1	-4,61	1,36	---
MRV-7	0,96	<0,2	<0,2	1,60	<0,2	0,06	-29,0	-2,86	5,73	---
MRV-8	1,14	<0,2	<0,2	2,06	<0,2	<0,02	---	---	---	---
MRV-8*	0,83	0,0	0,0	1,50	0,0	0,00	---	---	---	---
MRV-9	1,22	<0,2	<0,2	2,18	<0,2	0,04	---	---	---	---
MRV-9*	0,94	0,0	0,0	1,68	0,0	0,03	---	---	---	---
MRV-10	1,05	<0,2	<0,2	1,98	<0,2	0,14	---	---	---	---
MRV-10c	0,71	<0,2	<0,2	1,30	<0,2	2,14	---	---	---	---
MRV-10*	0,99	0,0	0,0	1,86	0,0	0,48	-29,5	3,19	1,29	---
MRV-11	0,93	<0,1	<0,1	1,90	<0,2	0,02	-31,5	-3,15	---	-1,7
MRV-12	0,75	<0,1	<0,1	0,08	<0,2	0,08	-32,6	-2,91	9,43	---
MRV-13	0,04	<0,1	<0,1	0,08	<0,2	0,47	14,1	4,74	1,81	---
MRV-14	0,01	<0,1	<0,1	0,02	<0,1	<0,01	-31,7	-5,23	3,59	---
MRV-15	0,12	<0,1	<0,1	0,05	<0,2	1,14	-29,4	-4,47	2,83	---
MRV-16	0,03	<0,1	<0,1	0,40	<0,1	2,60	-48,0	-7,14	5,74	-4,2
MRV-17	0,28	<0,1	<0,1	10,50	<0,2	<0,01	-37,2	-3,77	0,49	0,5
MRV-18	0,01	<0,1	<0,1	0,07	<0,1	0,45	-41,9	-6,50	4,69	---
MRV-19	0,09	<0,1	<0,1	0,67	<0,1	0,03	-49,2	-7,33	0,34	-4,4
MRV-20	0,03	<0,1	<0,1	0,29	<0,1	<0,01	-53,0	-7,10	3,19	---
MRV-21	0,86	<0,1	<0,1	0,79	<0,2	<0,02	-30,5	-2,53	6,76	-1,5
MRV-22	0,01	<0,1	<0,1	0,03	<0,1	<0,01	-30,5	-5,06	3,61	---

muestra MRV-8*, se presenta la química de elementos principales compensadapor la pérdida de vapor (aproximadamente 27,4%, suponiendo una temperatura de separación de 100°C y una temperatura dentro de la perforación de 240°C).

Dos de las tres muestras obtenidas pozo abajo en PGM-10 a los 1.143 m (3.750 pies) requieren corrección; parece que la válvula de muestreo no cerró totalmente cuando se obtuvo la muestra MRV-9, pues solo se recolectaron 509,3 mℓ de fluido, comparado con los 583 mℓ de todas las otras corridas durante 1985. Para compensar esta muestra por la pérdida de vapor, suponemos que la muestra se obtuvo a los 240°C y que sufrió evaporación espontánea a cierta temperatura desconocida, T. Como resultado de esta pérdida de vapor, 73,7 mℓ de agua (la diferencia entre el volumen de agua obtenido durante esta corrida y el volumen de agua promedio obtenido en otras corridas) pasaron a la fase de vapor y se escaparon de la botella de muestra. En las tablas de vapor vemos que la temperatura de separación sería de 185°C para una evaporación espontánea de etapa sencilla. En la Table II e identificada como MRV-9*, aparece MRV-9 compensada por evaporación espontánea a los 185°C.

La siguiente muestra (MRV-10) también fue obtenida pozo abajo en PGM-10. En este caso, se introdujo una pequeña cantidad de fluido en el sistema de extracción de gas. Se instaló una trampa en la línea para recolectar este fluido y se obtuvieron 113 g de fluido para análisis; esta muestra se identifica como MRV-10c. Partiendo del análisis de MRV-10c, es aparente que esta muestra consiste de fluido arrastrado, en vez de ser vapor condensado; por lo tanto, la composición verdadera del fluido de reservorio proveniente del pozo PGM-10 debe ser reconstruida a partir de los análisis de MRV-10 y MRV-10c y de acuerdo con las proporciones de estas muestras. En la Tabla II, esta composición corregida aparece como MRV-10*. El análisis de isótopos reportado con MRV-10* fue obtenido durante un tercer viaje de la sonda de muestreo dentro del pozo PGM-10; esta muestra no fue sometida a evaporación espontánea.

Además de la compensación por la evaporación espontánea, las muestras pozo abajo (MRV-7, MRV-10*, MRV-11, MRV-12 y MRV-21) fueron compensadas por el CO_2 y NH_3 medidos en la fase gaseosa. En la Tabla II se reportan en columnas distintas el total de NH_4^+ y de HCO_3^-.

En la Figura 5 aparece un diagrama de Piper que presenta las características principales de los diversos fluidos obtenidos en el área de Miravalles. Se observan tres tipos básicos de agua. Los fluidos de reservorio (MRV-5, MRV-7 a MRV-12, MRV-21) son aguas de tipo predominantemente cloruro-neutral con $Na^+ >> K^+ > Ca^{+2}$ y $CL^- >> HCO_3^- \simeq SO_4^{-2}$. Las aguas meteóricas de la superficie (MRV-14, MRV-20, MRV-22) están muy diluidas y contienen $HCO_3^- > Cl^-$, SO_4^{-2}. El tercer tipo de agua es sulfato-ácido y existente en albercas en el área de grandes fumarolas de Las Hornillas. Las aguas sulfato-ácidas generalmente resultan de la condensación de vapor y la oxidación de H_2S en el ambiente de la superficie que yace sobre la zona de vapor de un sistema geotérmico de alta temperatura. La muestra de fluido de Las Hornillas (MRV-13) es típica de las aguas sulfato-ácidas. Otras aguas en el área consisten de la mezcla de fluidos del reservorio con aguas meteóricas de la superficie (MRV-19) o con aguas sulfato-ácidas (MRV-6, MRV-15, MRV-17), o son mezclas de agua sulfato-ácida con agua meteórica de la superficie (MRV-16, MRV-18).

Las aguas mezcladas que incluyen un componente sulfato-ácido muestran evidencia de reacción entre rocas y agua. Por ejemplo, las muestras MRV-6, MRV-15 y MRV-16 son más ricas en $Ca^{+2} + Mg^{+2}$ que el fluido sulfato-ácido sin mezclar representado por MRV-13. El fluido MRV-6 y MRV-15 parece ser el resultado de reacción con rocas que tienen un considerable contenido de Mg y ya sea la lixiviación del cloruro de la roca o la mezcla con fluidos del reservorio, mientras que el fluido MRV-16 ha reaccionado con rocas pobres en Mg. (Note que MRV-16 cae sobre la línea que une MRV-13 con la esquina de Ca del triángulo de cationes.) Por lo tanto, MRV-18 consiste de agua sulfato-ácida "reaccionada" (MRV-16) y

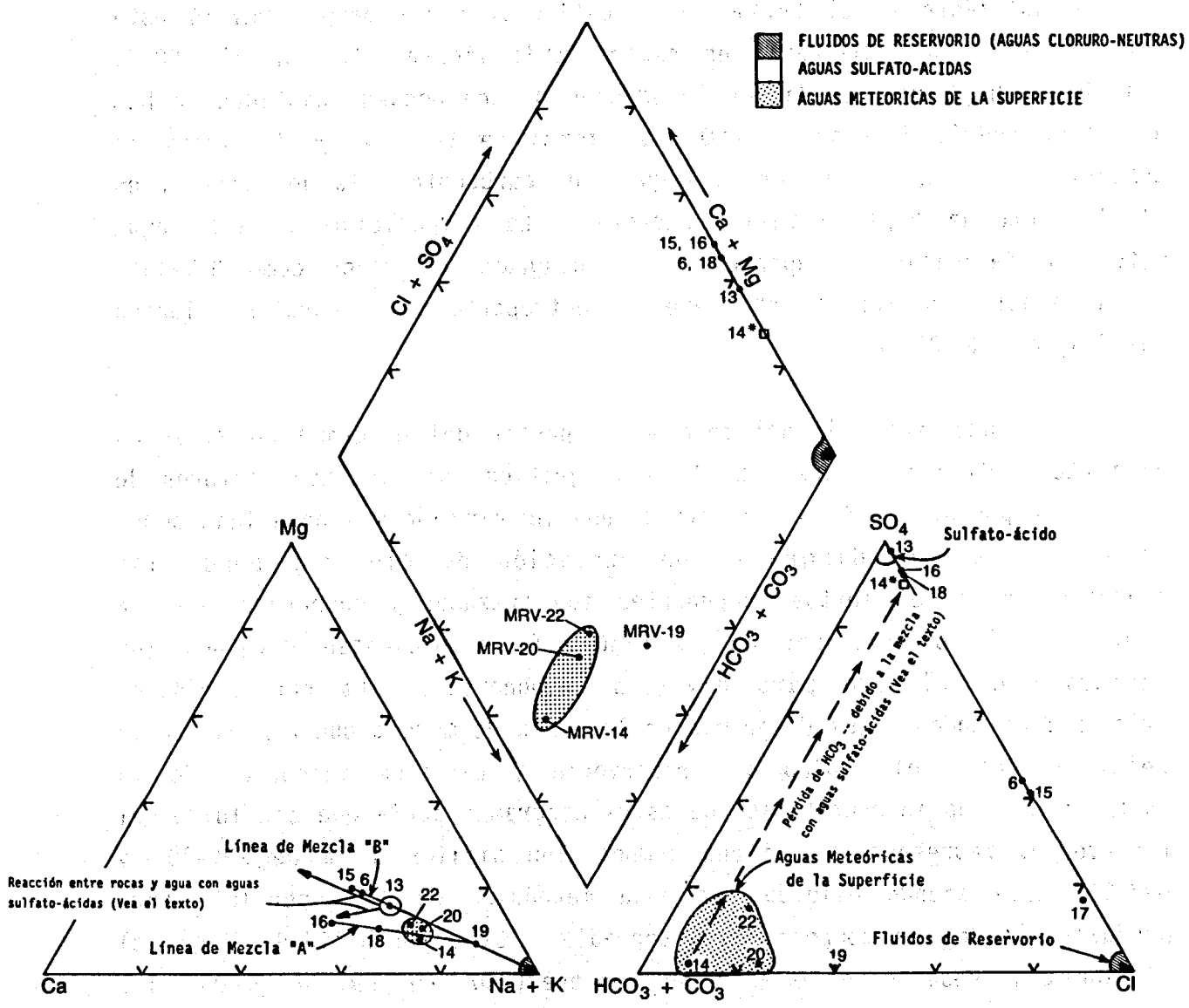
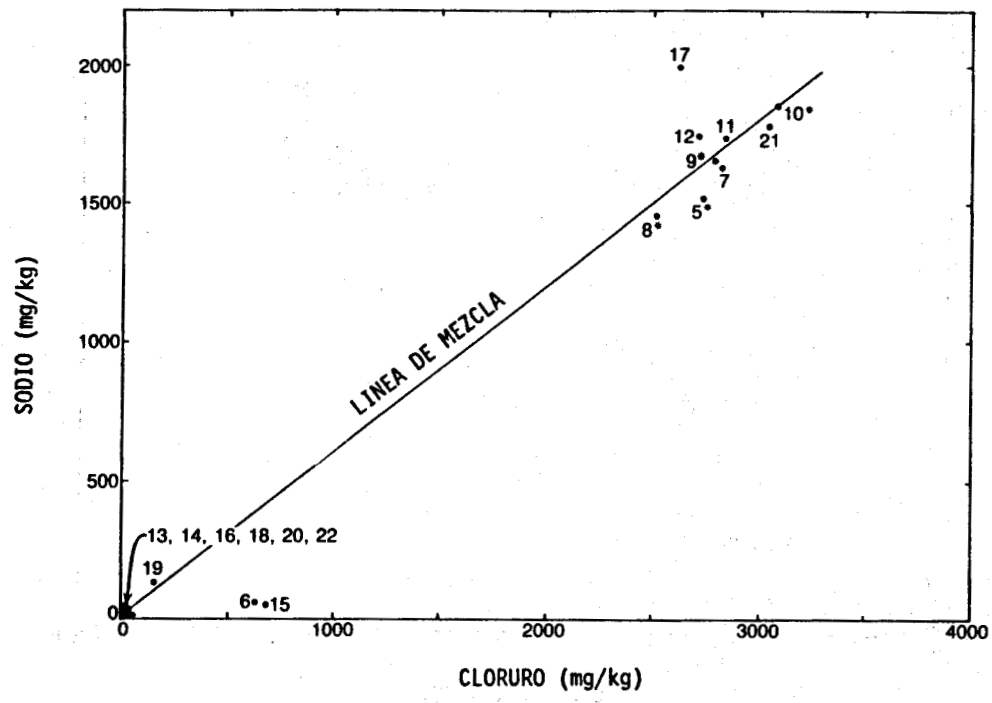


Figura 5. Diagrama de Piper mostrando los diversos tipos de fluidos encontrados en Miravalles. Las líneas de mezcla se describen en el texto.

mezclada con agua meteórica (como MRV-14), como se muestra en la línea de mezcla "A" de la Figura 5, mientras que MRV-6 y MRV-15 parecen consistir de agua sulfato-ácida "reaccionada" y mezclada con fluido del reservorio (línea de mezcla "B"). Inicialmente, la mezcla de MRV-16 con MRV-14 aparece solamente en el triángulo de cationes; sin embargo, MRV-14 está muy diluida y por lo tanto es neutralizada ligeramente por el HCO_3^-. Una caida en pH ocasionada por la adición de una pequeña cantidad de H_2S a MRV-14 podría liberar el HCO_3^- en forma de CO_2 (g) y desplazar la composición de la muestra de la esquina de carbonato a la de sulfato, en el diagrama de Piper (línea punteada). La composición de esta agua meteórica "acidificada" aparece en el diagrama de Piper como MRV-14*. Ahora la línea de mezcla "A" tiene su contraparte en la porción aniónica del diagrama de Piper.

La interpretación del mezclado a partir del diagrama de Piper es un tanto tentativa ya que este tipo de gráfica sólo incluye factores de ciertos componentes. Se puede obtener una información más detallada sobre el mismo de los diagramas de variación de cloruro, donde las concentraciones de ciertos componentes son trazadas y comparadas con la concentración de cloruro; en la Figura 6 se presentan diagramas de variación de cloruro para diversos componentes. La característica principal en todos estos diagramas es la línea de mezcla que representa la relación entre el fluido del reservorio y el agua meteórica de la superficie. Una interpretación de estos diagramas sería que el fluido del reservorio, representado por una composición similar a la de MRV-10* y MRV-21, está siendo diluido por agua meteórica de la superficie para producir fluidos de composición intermedia. Otra posibilidad es que el fluido del reservorio está mejor representado por MRV-11 y que las muestras MRV-10* y MRV-21 tienen más altas concentraciones de componentes debido a ebullición (pérdida de vapor) dentro del reservorio. Posteriormente en este mismo informe se examinará más detalladamente el dilema del mezclado comparado con la ebullición.

(a)



(b)

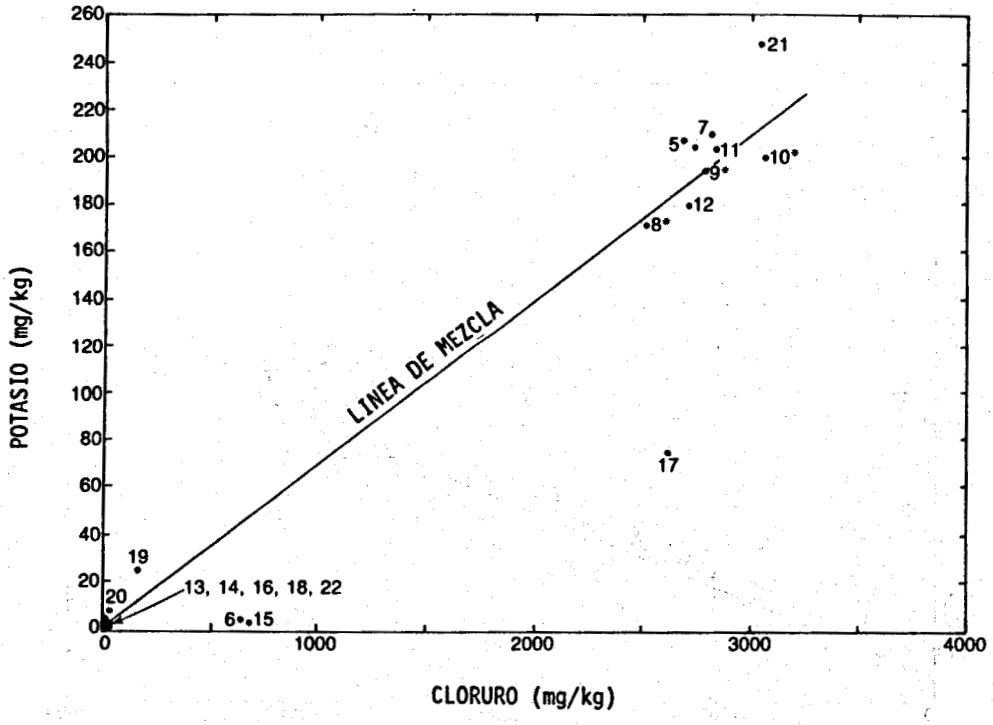
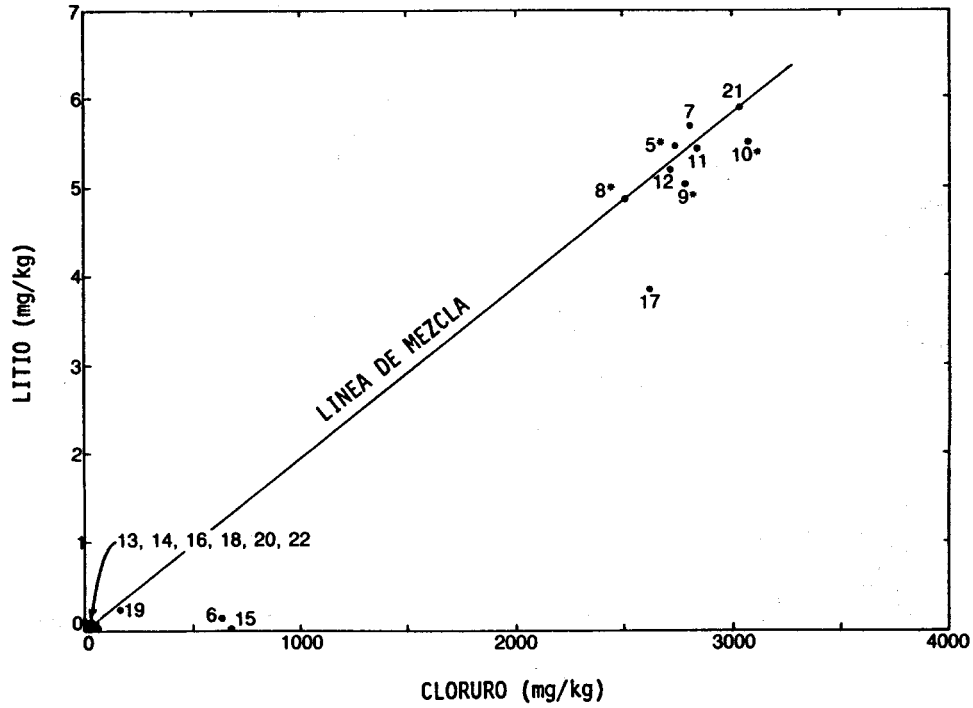


Figura 6. Diagramas de variación de cloruro mostrando la mezcla de fluidos del reservorio con aguas superficiales diluidas. (a) sodio, (b) potasio, (c) litio, (d) calcio, (e) boro, (f) amonio.

(c)



(d)

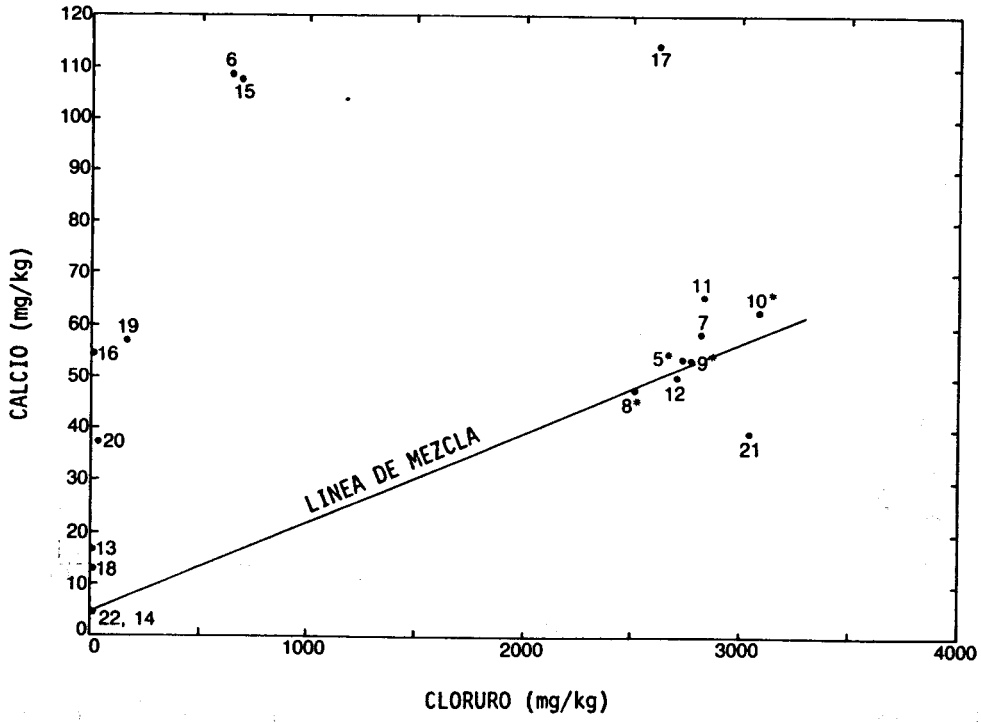
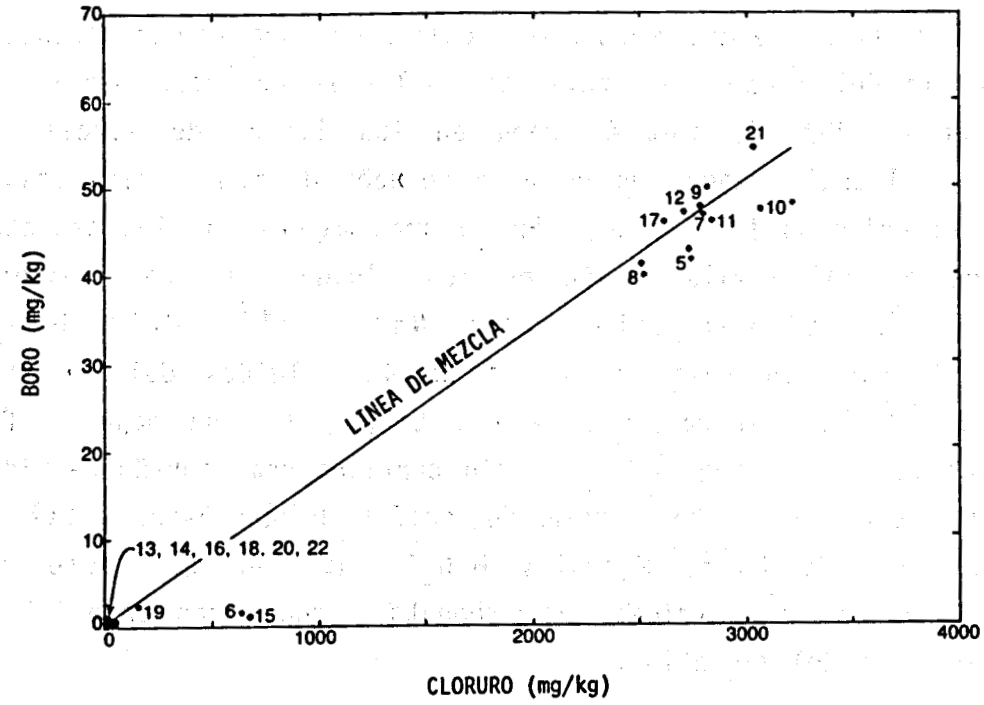


Figura 6. (Continuación)

(e)



(f)

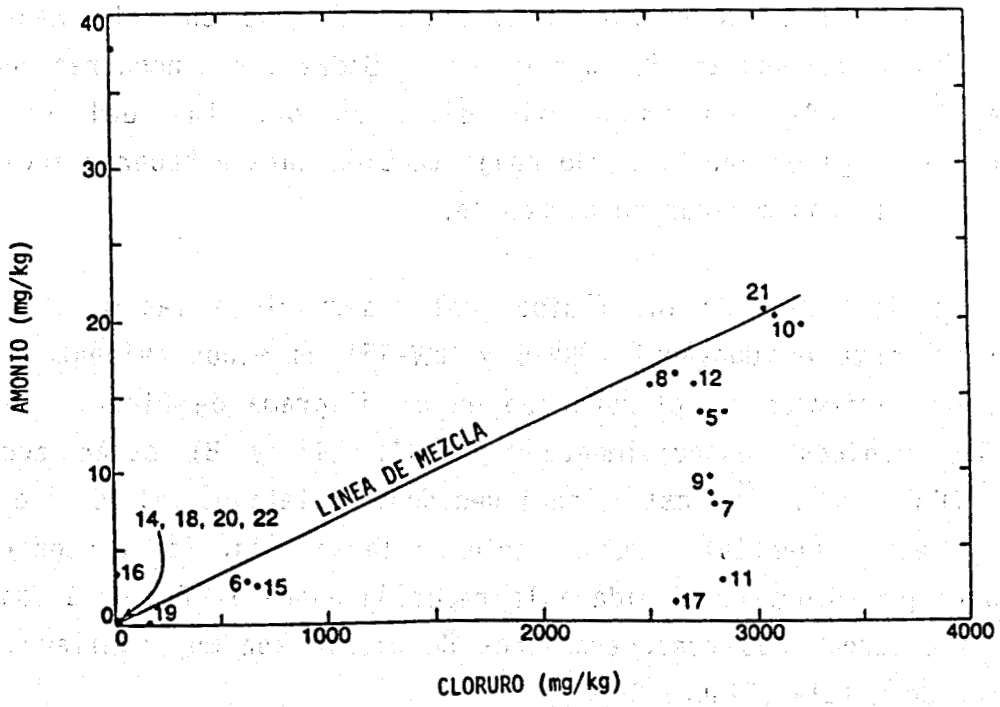


Figura 6. (Continuación)

Las muestras de dos manantiales calientes localizados alrededor de 10 km al sur del campo de Miravalles (Salitral Bagaces, MRV-17 y San Bernardo Abajo, MRV-19) también caen en las líneas de mezcla de la Figura 6. Salitral Bagaces es un area pequeña de manantiales calientes que están depositando travertino. En la gran mayoría de los aspectos su composición es muy similar a la de los fluidos del reservorio; sin embargo, las concentraciones de Na^+, Ca^{+2}, Mg^{+2} HCO_3^- y SO_4^{-2} son altas con relación a las de los fluidos del reservorio, mientras que las concentraciones de K^+, Li^+, y F^- son bajas. Parece que el fluido que descarga en este sitio contiene una pequeña cantidad de fluido sulfato-ácido o una mezcla de sulfato-bicarbonato. Las altas concentraciones de Ca^{+2}, Mg^{+2}, y HCO_3^- sugieren que este fluido ha reaccionado con rocas ricas en carbonato o con rocas andesíticas en tránsito al sitio del manantial.

En muchos aspectos el manantial tibio en San Bernardo Abajo es similar a Salitral Bagaces con la excepción de que en este manantial existe una mayor proporción de agua de río. Dadas las concentraciones de Ca^{+2}, Mg^{+2} y HCO_3^- un tanto más elevadas que las del río, el fluido que descarga en San Bernardo Abajo también parece haber reaccionado con rocas andesíticas o ricas en carbonato.

La contribución de los fluidos del reservorio a las muestras del manantial caliente en Guayabal (MRV-6 y MRV-15) es menos evidente en los diagramas de variación de cloruro que en el diagrama de Piper. Ciertos componentes iónicos (especialmente Na^+, K^+, Li^+ y B) están agotados y otros (Ca^{+2} y Mg^{+2}) están enriquecidos, relativos al Cl^- en las muestras de este manantial. Buena parte de la variación en concentración de catión es probablemente debida a la reacción entre al fluido ácido y la roca. Sin embargo, las concentraciones de amonio son muy similares a la de la línea de mezcla (Figura 6f).

Debido a que el amonio (NH_4^+) se fracciona entre las fases gaseosa y líquida al ocurrir la evaporación espontánea, es una valiosa

traza para detectar ebullición dentro del reservorio. En la Figura 6f se traza una línea de mezcla entre el agua diluida y el fluido del reservorio (muestras MRV-10* y MRV-21, las cuales están ajustadas por la separación de vapor dentro de la botella de muestreo descrita anteriormente). Otras muestras (MRV-5*, MRV-8* y MRV-12) caen cerca de esta línea de mezcla, al igual que las muestras de Guayabal (MRV-6 y MRV-15).

Las muestras MRV-7, MRV-9*, MRV-11 y MRV-17 parecen estar agotadas de amonio. Las muestras MRV-7, MRV-11 y MRV-21 fueron obtenidas con el muestreador en pozos donde no había flujo durante algún tiempo, así que es posible que haya habido cierta separación de vapor y liquido dentro de las perforaciones. Podría usarse la misma explicación para el pozo PGM-2 (MRV-12), pero a este pozo se le estuvo inyectando agua fresca hasta dos semanas antes de obtener la muestra de pozo abajo, por lo que es poco probable la separación de este fluido en fases líquida y gaseosa. A pesar de que MRV-21 fue obtenida de un pozo estancado, no muestra señas de pérdida de amonio. La muestra de pozo abajo, MRV-11, fue obtenida del pozo PGM-5 y por lo tanto debe tener una concentración de amonio comparable con la de MRV-5*, la cual fue obtenida de la superficie de este mismo pozo en 1985. Como la muestra MRV-9* ya está compensada por la pérdida de cierta cantidad desconocida de agua, no podemos derivar ninguna conclusión de la baja concentración de NH_4^+ en esta muestra. Dadas las incertidumbres sobre la calidad de los datos de NH_4^+, no podemos eliminar totalmente la posibilidad de una considerable ebullición dentro del reservorio, pero la mayoría de estos datos sugieren un reservorio de fase sencilla.

Las muestras MRV-13 y MRV-16, las cuales provienen de fumarolas, demuestran que al menos está ocurriendo cierta ebullición. La causa más probable de las altas concentraciones de NH_4^+ en estas muestras es la absorción del gas NH_3 en las albercas ácidas, las cuales consisten de agua meteórica y vapor condensado.

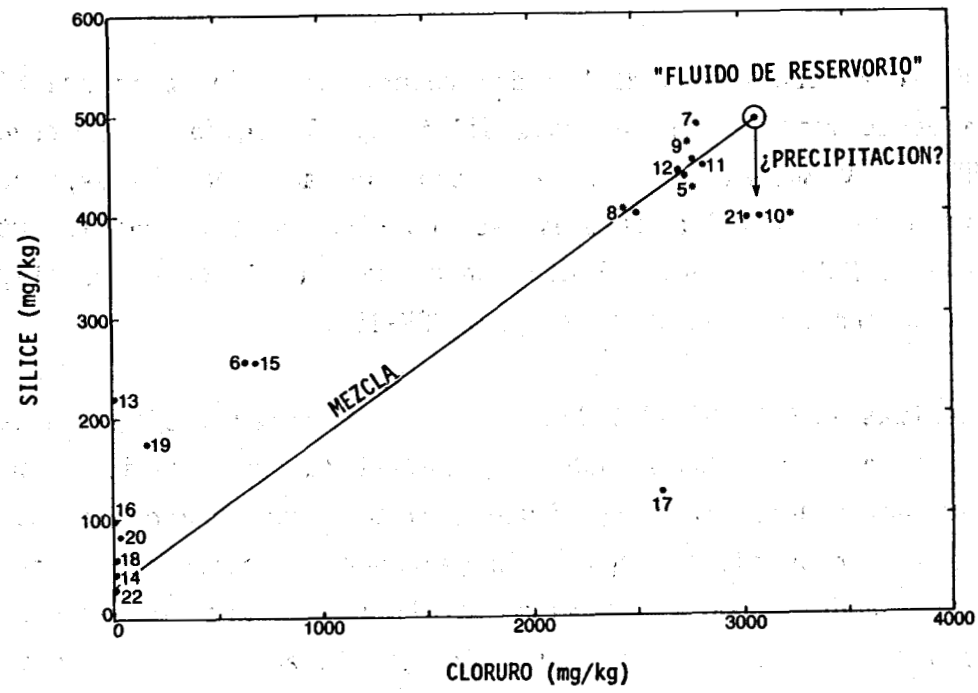


Figura 7. Variación de la concentración de sílice en función de la concentración de cloruro.

El comportamiento de mezcla indicado en la Figura 6 para los componentes conservativos es menos aparente en la gráfica de sílice comparado con cloruro de la Figura 7. En esta figura se define una línea de mezcla por medio de las concentraciones de sílice de la mayoría de las muestras de fluido pozo abajo. Sin embargo, las muestras MRV-10* y MRV-21 tienen concentraciones de sílice más bajas de lo que se esperaría de la mezcla de agua del reservorio y agua de recarga, posiblemente a causa de la precipitación de sílice disuelto en estas muestras. Basándose en la concentración de cloruro en las muestras MRV-10* y MRV-21, su concentración de sílice debe ser alrededor de 500 ppm.

V. ISOTOPOS HIDROESTABLES

Los análisis de isótopo hidroestable fueron efectuados en el Laboratorio de Isótopo Estable, Universidad Metodista del Sur, Dallas, Texas y se presentan en la Tabla II. Como se mencionó anteriormente, la muestra de PGM-5 fue sujeta a evaporación espontánea hasta una presión de 3 kg/cm^3 de manómetro, dentro de un miniseparador. Los valores de los factores isotópicos de oxígeno e hidrógeno para la muestra MRV-5 fueron

compensados por la fraccionación entre fases líquida y gaseosa, suponiendo una evaporación espontánea sencilla de 240°C a 133°C y de acuerdo con procedimientos descritos por Henley y otros (1984). Se incluyen los análisis corregidos para la muestra MRV-5*. Se incluyen también análisis isotópicos para la muestra MRV-10*, pero como se dijo anteriormente, estos análisis no requieren ajuste por evaporación espontánea.

En la Figura 8 se presenta una gráfica de δD versus $\delta^{18}O$. Las muestras del reservorio (MRV-5*, MRV-7, MRV-10*, MRV-11, MRV-12 y MRV-21) indican un desplazamiento en los isótopos de O de alrededor de 2 a 2.5 ‰ (por mil) hacia la derecha de la línea meteórica mundial (Craig, 1961). Se obtuvieron muestras de agua meteórica en la superficie de la ladera norte del Volcán Miravalles (MRV-14) y del sistema de abastecimiento de agua al sitio geotérmico (MRV-22). Ambas

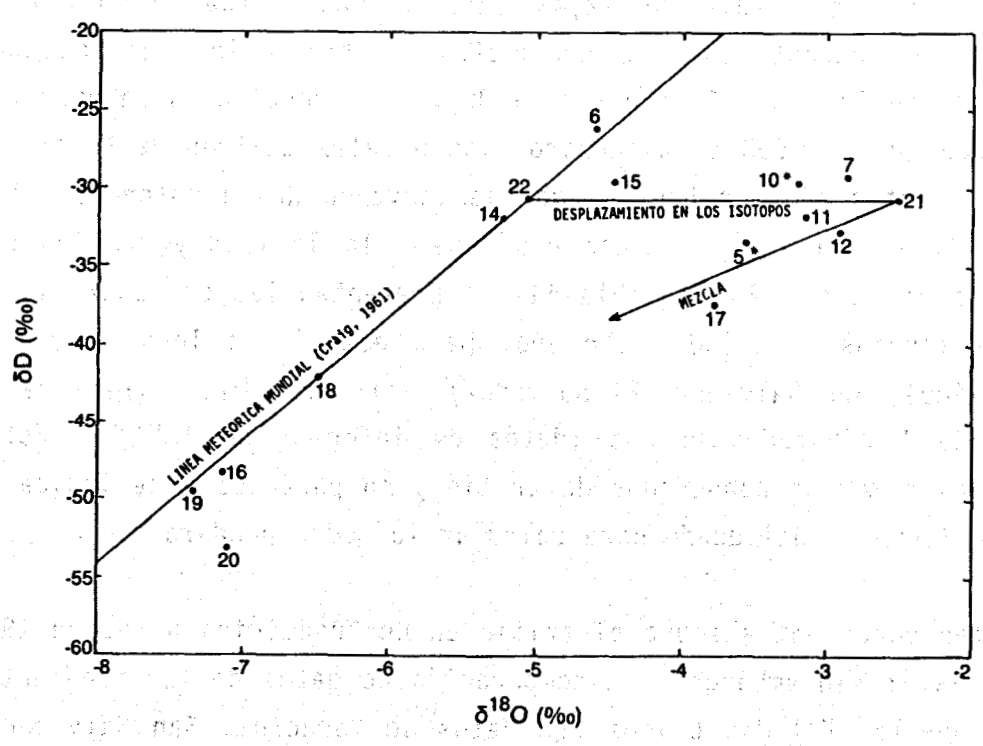


Figura 8. Grafica de δD comparada con $\delta^{18}O$ para aguas de la región de Miravalles. Las diluidas aguas frías caen sobre o cerca de la línea meteórica mundial (Craig, 1961). Los fluidos del reservorio presentan evidencia de intercambio de isótopo de oxígeno con las rocas.

muestras caen sobre la línea meteórica mundial y tienen la misma concentración de deuterio que el fluido del reservorio.

Basándose en los análisis de isótopo de dos ríos, Manieri y otros (1985) y Giggenbach (1986) concluyeron que la recarga del sistema se encontraba esencialmente al norte y este del Volcán Miravalles. Sin embargo, la similitud entre las concentraciones de deuterio del fluido del reservorio y del abastecimiento de agua del sitio sugieren que la recarga del sistema tal vez sea más local de lo propuesto por estos investigadores.

VI. TRITIO

El tritio es útil para determinar la edad del agua subterránea porque tiene una vida media de 12,43 años y porque fue producido en grandes cantidades durante las pruebas nucleares atmosféricas de los años 50 y principios de los años 60 (Fontes, 1980). Los resultados de nuestras pruebas indican que en 1963 se alcanzaron los niveles máximos de tritio en la atmósfera y estos niveles han estado disminuyendo desde entonces. Los niveles de tritio varían enormemente conforme a la latitud y también con las estaciones del año. En la Tabla III se presentan las concentraciones de tritio en lluvias, tabuladas por año, para estaciones localizadas en Veracruz (México), San Salvador (El Salvador), Barbados, Miami (Florida) y el suroeste de los Estados Unidos (datos de informes de IAEA). Estos datos son niveles medios ponderados de tritio y en paréntesis se indica el porcentaje de lluvia anual usado para calcular la media ponderada.

Existen pocos datos sobre el tritio en Centroamérica antes de 1968 y después de 1975; sin embargo, una comparación de datos de las pendientes del suroeste de los Estados Unidos con datos de Veracruz, San Salvador y Barbados sugiere que los valores de tritio para Centroamérica pueden ser extrapolados de los datos del suroeste de los Estados Unidos (Figura 9). Las muestras de agua meteórica local (MRV-14 y MRV-21) caen cerca de puntos para agua de lluvia en Tegucigalpa (Honduras), así que esta extrapolación debe servir para la región geotérmica de Miravalles.

Tabla III. Valores Medios Ponderados de Tritio Procedente de Lluvia. Los números en paréntesis indican el porcentaje de lluvia en ese año para el cual existen datos de tritio (datos de IAEA en referencias). Los datos del suroeste de los Estados Unidos por Vuataz y Goff (1986).

AÑO	Veracruz	San Salvador	Barbados	Miami	Suroeste de los EE.UU.
1956					55
1957					108
1958					337
1959			12,86 (75)		975
1960					243
1961					216
1962	41,90 (57)				875
1963					2.834
1964			95,36 (97)	167,00 (100)	1.747
1965				58,40 (100)	822
1966			32,39 (98)	70,60 (100)	601
1967	30,02 (96)		20,52 (100)	35,68 (100)	366
1968	22,24 (98)	21,96 (76)	20,29 (100)	26,51 (100)	229
1969		19,98 (76)	15,53 (95)	29,52 (100)	253
1970	24,68 (74)	26,50 (98)	14,07 (74)	27,80 (100)	191
1971	19,40 (100)	19,57 (94)	12,62 (94)	24,40 (100)	194
1972	14,50 (74)	14,60 (94)	10,50 (100)	16,40 (100)	77
1973	10,70 (100)	10,20 (76)	7,90 (83)	13,00 (100)	97
1974	12,20 (99)	9,30 (66)	7,10 (72)	13,60 (100)	75
1975	8,60 (100)	9,00 (98)	7,60 (81)	8,90 (100)	73
1976					57
1977					56
1978					75
1979					32
1980					31
1981					41
1982					29
1983					15

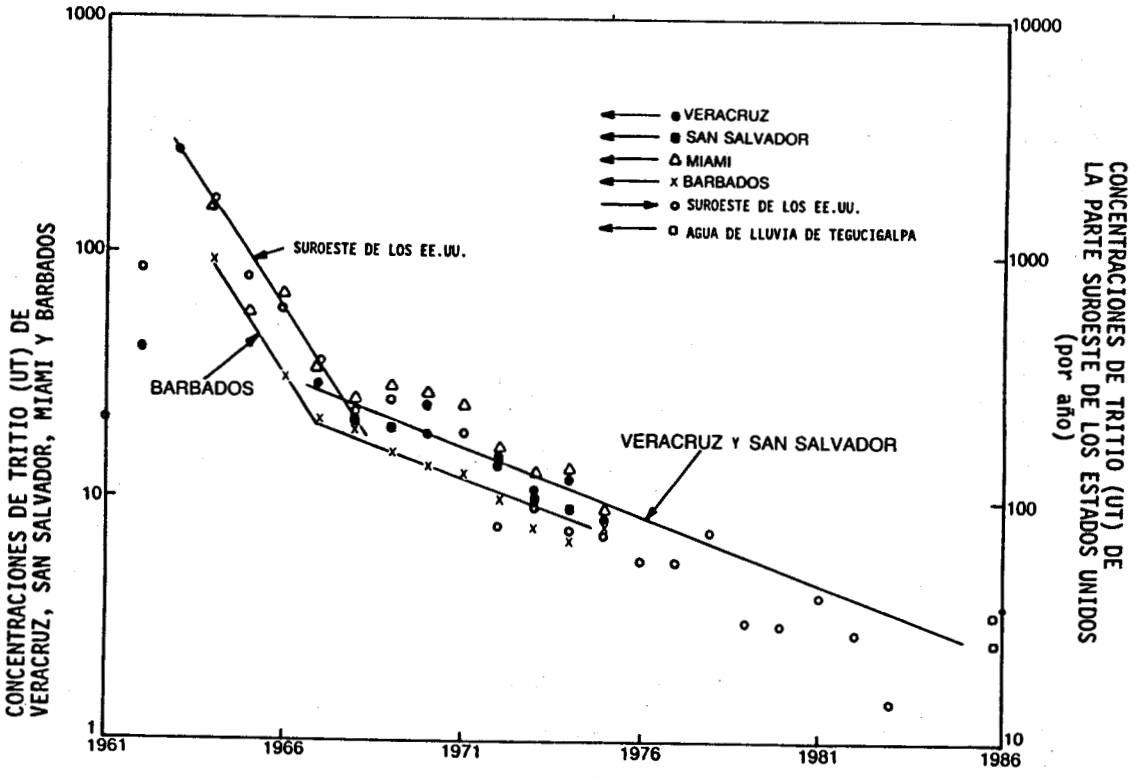


Figura 9. Concentraciones de tritio en lluvia de varias localizaciones para el período de 1961 a 1986 (basándose en Goff y otros, 1987b)

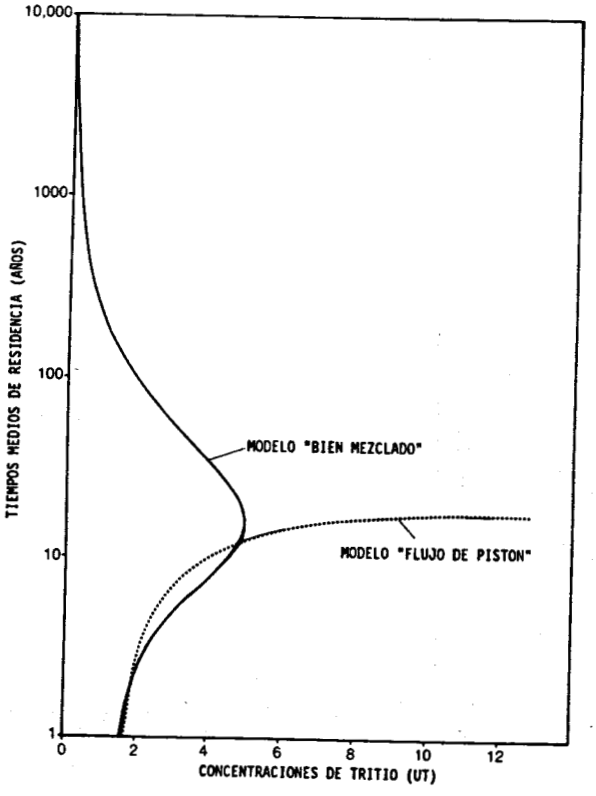


Figura 10. Resultados de cálculos de modelo para tiempos medios de residencia en función de la concentración de tritio en agua, para el caso de reservorios tipo flujo de pistón y bien mezclado. Estas curvas se aplican para aguas recolectadas en Centroamérica durante 1985-86 (basándose en Goff y otros, 1987b)

La representación de los datos existentes con curvas exponenciales sugiere que la concentraciones de tritio en la lluvia de Centroamérica puede ser descrita por

$$(1) \qquad C = \begin{cases} 350e^{-0,5161t}, & \text{de 1963 a 1967} \\ 27,51e^{-0,1535t}, & \text{de 1968 al presente.} \end{cases}$$

Estas ecuaciones representan la entrada de tritio al sistema de agua subterránea. Pearson y Truesdell (1978) y Goff y otros (1987b) emplearon dos modelos para describir el comportamiento de mezcla en los sistemas de agua subterráneos: flujo de pistón y flujo perfectamente mezclado. El modelo de flujo de pistón supone que no existe mezclado del agua en el reservorio, desde el momento de la recarga hasta el momento de la descarga y que todas las moléculas tienen el mismo tiempo de residencia. El modelo perfectamente mezclado supone que la recarga al sistema está completamente mezclada con el fluido del reservorio, de tal forma que la descarga tiene la misma composición que el fluido en el reservorio. Cada modelo pronostica una concentración de tritio para la descarga, suponiendo cierto tiempo medio de residencia y suponiendo la entrada dada por la ecuación (1). En la Figura 10 se presentan los resultados de las predicciones de los dos modelos, tipo flujo de pistón y de bien mezclado, para muestras obtenidas en Centroamérica en 1985; los detalles de los métodos analíticos usados para generar estas curvas aparecen en Goff y otros (1987b).

Un aspecto interesante del análisis es que las muestras que tienen concentraciones de tritio mayores de 5 UT, deben de tener un componente de flujo de pistón con un tiempo medio de residencia entre 12 y 22 años. Por otra parte, las aguas con concentraciones de tritio inferiores a 1.7 UT deben de proceder ya sea de reservorios bien mezclados y tiempos de residencia mayores de más o menos 120 años, o ser derivados de reservorios mal mezclados con tiempos medios de residencia mayores de 25 años. Los sistemas que descargan fluidos termales de composiciones relativamente

uniformes dentro de un área extensa son probablemente mejor aproximados por el modelo bien mezclado. Los análisis de tritio de las muestras de fluido geotérmico fueron hechos en el Laboratorio de Tritio de la Universidad de Miami en Miami, Florida; los resultados se presentan en la Tabla II. En la Figura 11 se grafican las concentraciones de tritio comparadas con las concentraciones de cloruro; en esta figura también aparecen tres puntos para fluidos de reservorios presentados en Giggenbach (1986). Como se indica en la figura, estas tres muestras, junto con la muestra de Salitral Bagaces y las muestras diluidas (MRV-14, MRV-27), definen una línea de mezcla entre el fluido del reservorio y el agua de lluvia.

Más abajo del fluido del reservorio todas las muestras presentan niveles de tritio considerablemente más elevados de lo que se esperaría de un sistema geotérmico natural en Centroamérica; se determinó que estos niveles más elevados se deben a la contaminación de la cámara de muestreo en los Estados Unidos. Sólo las muestras de los manantiales calientes

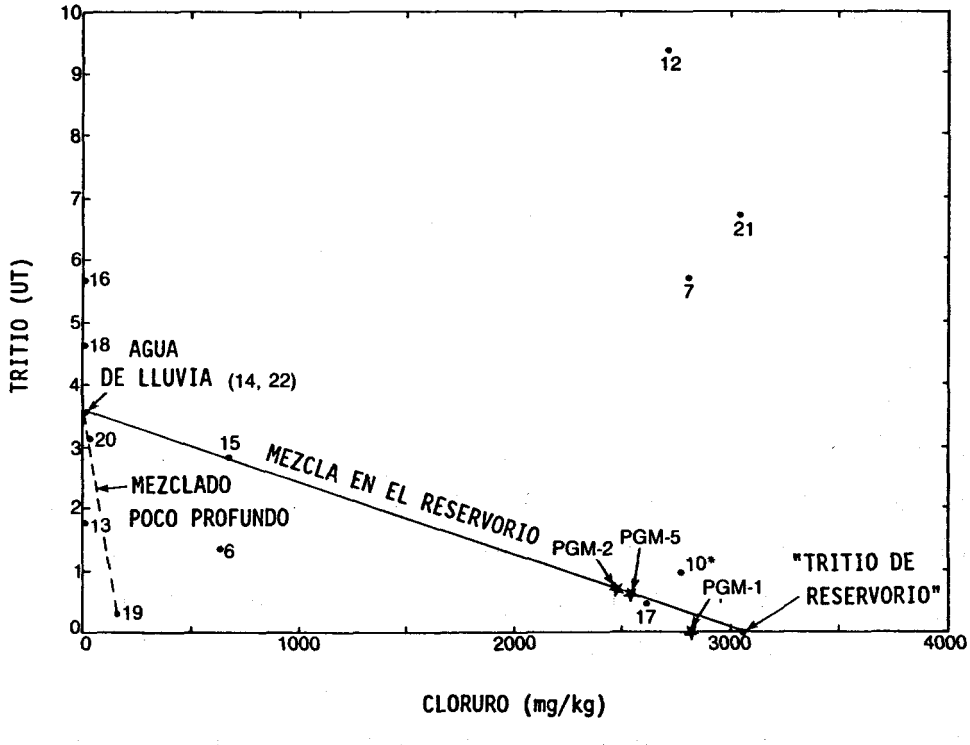


Figura 11. Variación de tritio en función del cloruro para muestras de Miravalles. Las muestras representadas con estrellas son datos presentados por Giggenbach (1986).

en Salitral Bagaces (MRV-17) y en San Bernardo Abajo (MRV-19) se encuentran dentro de la variación esperada para fluidos con largo tiempo de residencia (<0.5 UT). Si bien no se obtuvieron muestras del agua de lluvia, las concentraciones de tritio en el abastecimiento de agua del sitio (MRV-22) y en el arroyo de la Quebrada Higuerón (MRV-14) son sorprendentemente cercanas a las del tritio detectado en muestras de lluvia en Tegucigalpa, Honduras (Goff y otros, 1987b). De acuerdo con la línea de mezclado de tritio, el fluido del reservorio probablemente tiene una concentración de tritio que varía entre 0.0 y 0.3 UT, dependiendo de la concentración de cloruro del reservorio; esto sugiere un tiempo medio de residencia del fluido de al menos 150 años y un tiempo medio máximo de residencia de aproximadamente 1.000 años. Para el sistema de Miravalles la línea de mezclado también establece una concentración máxima de cloruro de aproximadamente 3.100 mg/kg, el cual contrasta con los 4.000 mg/kg sugeridos por Giggenbach (1986).

Las concentraciones de tritio medidas en las muestras del interior de las perforaciones son no solamente mayores a lo esperado, sino que también varían considerablemente de muestra a muestra. Con excepción de la muestra pozo abajo del PGM-10 (MRV-10*), las concentraciones de tritio de estas muestras pozo abajo son más altas que las concentraciones en los ríos locales. Si bien es posible que estas altas concentraciones de tritio se deban a cierto proceso tal como pérdida de vapor en el reservorio, es más probable que las botellas de muestreo utilizadas fueron contaminadas en los Estados Unidos.

Un aspecto interesante de la Figura 11 es la posición de la muestra MRV-19. De acuerdo con los comentarios sobre la línea de mezclado presentados anteriormente, esta muestra debe caer sobre la línea de mezclado del reservorio, pero su concentración de tritio es demasiado baja para la concentración de cloruro en la muestra. Las bajas concentraciones de tritio y cloruro de esta muestra podrían ser resultado de la mezcla de vapor condensado con una pequeña cantidad de fluido de reservorio. La muestra MRV-20, de la parte del río justo antes del punto donde el

manantial (MRV-19) se une al río, hace ver que el río es una mezcla de agua de lluvia y agua como MRV-19, la cual probablemente descarga en otros manantiales tibios a lo largo del río.

VII. COMPOSICION DE GAS

Los análisis de gas fueron hechos en el Servicio Geológico de los Estados Unidos en Menlo Park, por C. Janik y T. Cheatham; en la Tabla IV se presentan las composiciones de gas medidas en porciento de mol y en términos de un gas seco. En las Figuras 12a y 12b se presentan gráficas de estas composiciones comparadas con CO_2, en mol %. En la Figura 12a también se presentan los componentes principales del aire, junto con líneas rectas que representan los resultados de mezclar aire con CO_2 puro. Note que las composiciones de nitrógeno de la mayoría de las muestras caen sobre la línea de mezcla de nitrógeno, pero para el caso de mezclado de aire con CO_2 la concentración de oxígeno está agotada relativa al nitrógeno. La Figura 12b presenta con mayor detalle una porción de la Figura 12a y presenta las composiciones de gas que varían de 92 a 100 mol % de CO_2. Al igual que la Figura 12a, los análisis de la Figura 12b sugieren mezcla de aire con CO_2 y agotamiento de oxígeno, relativo al nitrógeno. Algunas muestras (MRV-1, -2, -4 y -16) tienen altas concentraciones de H_2S y estas muestras son ya sea de fumarolas (MRV-1, -2, -16) o cercanas a fumarolas (MRV-4). Una excepción a las altas concentraciones de H_2S en áreas de fumarolas son las de las fumarolas cercanas a La Unión (MRV-3), las cuales parecen estar dominadas por CO_2 con la adición de pequeñas cantidades de aire.

Para muestras pozo abajo, se determina el gas obtenido de la botella de muestreo a partir de una masa conocida de fluido y en la Tabla IV se presenta la relación de la masa de gas/líquido (en gramos por kilogramo). Las muestras MRV-7, MRV-10 y MRV-12 tienen altas concentraciones de gas (~2.5 ± 0.5 g/kg), mientras que las muestras MRV-11 y MRV-21 tiene concentraciones más bajas (~0.35 a 0.40 g/kg). La fracción de masa gaseosa no parece corresponder con la composición de gas o con cualquier otro parámetro medido y por lo tanto es inexplicable.

Tabla IV. Análisis de Muestras de Gas de Miravalles, Costa Rica. Los análisis fueron hechos por C. Janik y T. Cheatham, USGS, Menlo Park, California y se reportan en mol %, en términos de un gas seco.

	Presión (psia)	CO_2	H_2S	NH_3	He	H_2	Ar	O_2	N	CH_4	Total	Gas/Líquido Razón/Masa (g/kg)
MRV-1	3,03	98,89	0,398	0,06522	0,000121	0,2184	0,0020	0,0003	0,273	0,145	99,9925	—
MRV-2	2,8	98,48	0,878	0,00052	0,000117	0,1276	0,0013	0,0002	0,221	0,278	99,9865	—
MRV-3	2,9	99,58	0,028	0,03152	0,000131	0,0469	0,0025	0,0081	0,258	0,042	99,9967	—
MRV-4	1,19	99,06	0,405	0,06040	0,000244	0,0384	0,0038	0,0005	0,369	0,058	99,9954	—
MRV-5	5,34	94,83	0,963	0,62170	0,000000	0,0234	0,0424	0,0014	3,509	0,033	100,0237	—
MRV-6	2,12	98,32	0,182	0,00161	0,000061	0,0000	0,0298	0,1254	1,187	0,128	99,9738	—
MRV-7	0,78	96,93	0,345	0,00440	0,000000	0,8089	0,0269	0,0094	1,754	0,042	99,9200	2,282
MRV-10	8,86	75,54	0,000	0,01818	0,000000	0,5223	0,2919	0,0482	21,790	0,032	98,2430	2,567
MRV-11	1,34	94,34	0,447	0,00503	0,000000	1,2230	0,0488	0,0050	3,715	0,088	99,8721	0,392
MRV-12	2,98	85,02	0,481	0,00985	0,000000	0,9501	0,1480	1,5010	11,640	0,064	99,8138	2,949
MRV-13	3,21	98,77	0,217	0,00036	0,000116	0,1764	0,0123	0,0000	0,684	0,133	99,9933	—
MRV-15	4,16	98,41	0,035	0,00035	0,000000	0,0000	0,0301	0,2095	1,218	0,094	99,9975	—
MRV-16	0,5	96,26	3,078	0,00254	0,000889	0,0034	0,0080	0,0053	0,582	0,050	99,9899	—
MRV-21	1,32	92,06	1,016	0,00720	0,000000	0,1836	0,0095	0,0129	6,363	0,120	99,7720	0,347
Aire		0,03					0,9340	20,9460	78,084			

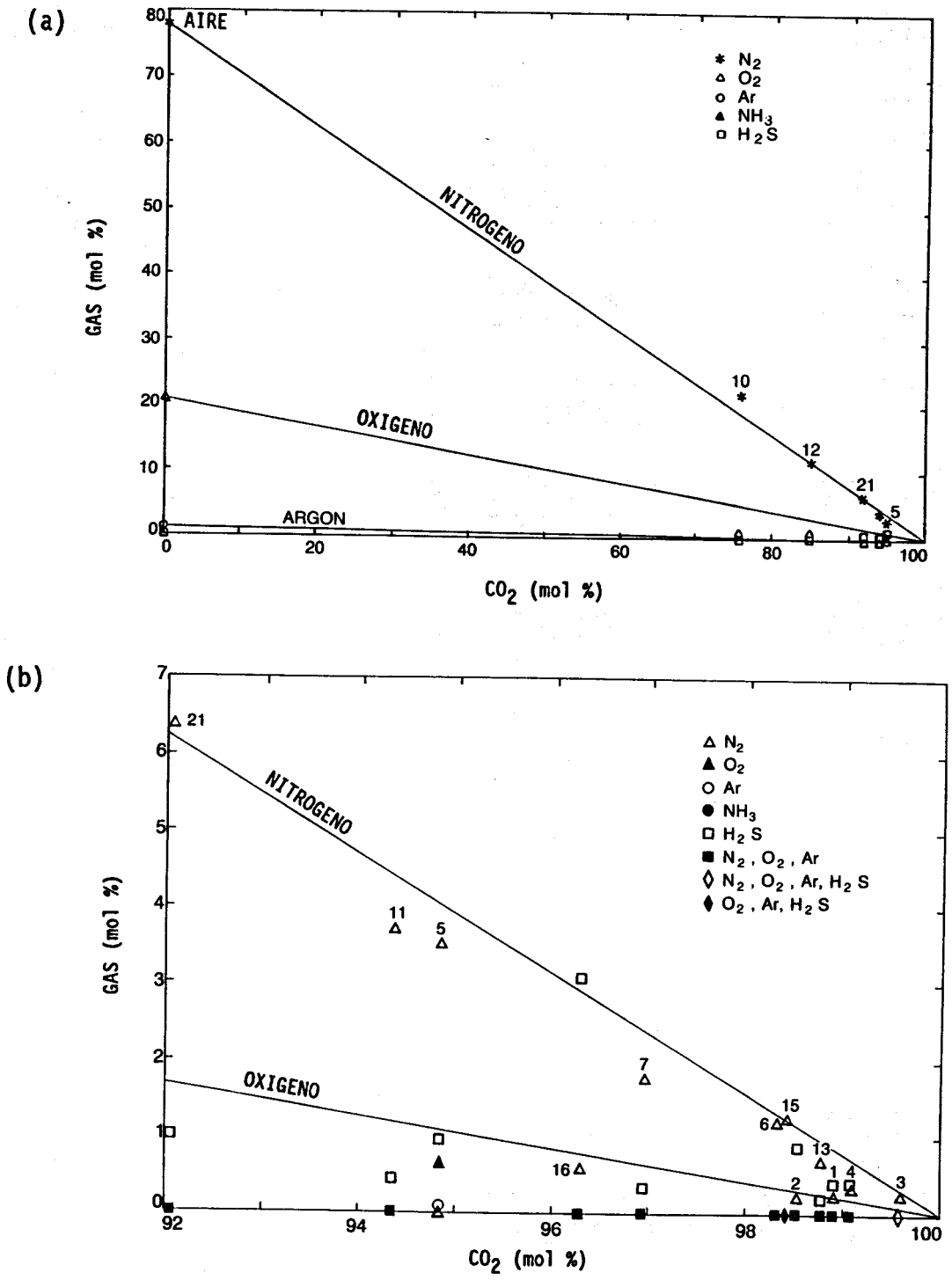


Figura 12. Variación de composición gaseosa en función del mol % de CO_2. La mayoría de las muestras parecen ser mezclas de aire con gas puro de CO_2. El oxígeno está agotado, relativo al nitrógeno; probablemente debido a reacción con la roca. (a) concentraciones de CO_2 desde 0 a 100 mol %, (b) concentraciones desde 92 a 100 mol %.

VIII. GEOTERMOMETRIA

Usando las relaciones presentadas en la Tabla V, se presentan en la Tabla VI las temperaturas de geotermómetro químico calculadas para el sistema geotérmico de Miravalles . Las temperaturas de geotermómetro de cuarzo (conductivo), NA-K, NA-K-Ca y gas para el fluido del reservorio concuerdan excelentemente con las temperaturas de 240°C medidas pozo abajo (Dennis y otros, 1988). En cuanto a las otras muestras de fluido, solamente MRV-17 y MRV-19 tienen temperaturas de geotermómetro consistentemente altas, pero las temperaturas para MRV-19 no son consistentes internamente. El pozo MRV-19 mantiene un patrón de temperatura más elevado que MRV-17 y partiendo de los argumentos de mezclado presentados anteriormente, ambas parecen ser derivadas de fluido de reservorio. Las concentraciones de tritio en MRV-19 sugieren que este fluido puede estar parcialmente derivado de vapor condensado, en vez de fluidos mezclados de reservorio.

IX. INCRUSTRACION DE CALCITA Y EBULLICION DE RESERVORIO

Los fluidos termales del sistema geotérmico de Ahuachapán, El Salvador, tienen más altas concentraciones de CA^{+2} (alrededor de 400 ppm) y concentraciones de HCO_3^- (30 a 45 ppm) aproximadamente equivalentes a las de los fluidos termales de Miravalles (las concentraciones de Ahuachapán son de los informes de DiPippo, 1980 y Fournier, 1981). A pesar de lo anterior, los fluidos en Ahuachapán no precipitan calcita al evaporarse espontáneamente, mientras que en Miravalles fácilmente se forman escamas de calcita. El reservorio en Ahuachapán tiene muy bajo contenido de gas, comparado con el sistema de Miravalles, el cual contiene cantidades considerables de CO_2. La pérdida de CO_2 durante la evaporación espontánea eleva el pH del fluido restante y si el pH sube más allá de alrededor de 8,4 (a 25°C; un pH más bajo a mayor temperatura), la calcita se precipitará de la solución. El cambio real de pH debido a la pérdida de CO_2 depende de la cantidad de CO_2 que pasa a la fase de gas y en Miravalles parece que esta cantidad

Tabla V. Ecuaciones para el Cálculo de Temperaturas de Geotermómetro Químico (basándose en Goff y otros, 1987b).

Geotermómetro	Ecuaciones (Componentes disueltos en mg/ℓ)	Restricciones
a. Cuarzo (sin pérdida de vapor)	$T°C = \frac{1309}{5{,}19 - \log SiO_2} - 273{,}15$	T = 0-250°C
b. Cuarzo (pérdida máxima de vapor)	$T°C = \frac{1522}{5{,}75 - \log SiO_2} - 273{,}15$	T = 0-250°C
c. Na/K (Fournier, 1981)	$T°C = \frac{1217}{\log (Na/K) + 1{,}483} - 273{,}15$	T ≥ 150°C
d. Na-K-Ca	$T°C = \frac{1647}{\log (Na/K) + \beta [\log (\sqrt{Ca}/Na) + 2{,}06] + 2{,}47} - 273{,}15$	T < 100°C, β = 4/3 T ≥ 100°C, β = 1/3
e. Gas (CO_2-H_2S-CH_4-H_2)	$T°C = \frac{24775}{\alpha + \beta + 36{,}05} - 273{,}15$ $\alpha = 2 \log \frac{CH_4}{CO_2} - 6 \log \frac{H_2}{CO_2} - 3 \log \frac{H_2S}{CO_2}$ y $\beta = 7$ si $CO_2 < 75$ vol % $= 0$ si $CO_2 > 75$ vol % $= -7$ si $CO_2 > 75$ vol %; $CH_4 > 2H_2$ y $H_2S > 2H_2$	T = 100°-300°C
f. Gas (CO_2-CH_4)	$T°C = \frac{\log \frac{CH_2}{CH_4} - 0{,}237}{0{,}012}$	T = 0-300°C(?)

log = logaritmo base 10

Tabla VI. Temperaturas de Geotermómetro Químico para Fluidos de Miravalles, Costa Rica.

S/N	T_{medida}	Cuarzo (sin pérdida de vapor) C°	Cuarzo[a] (Pérdida máxima de vapor)	Na-K[b]	Gas Na-K-Ca	Gas (CO_2-H_2S-H_2-CH_4)	(CO_2-CH_4)
Fluidos de Reservorio							
MRV-4	—	—	—	—	—	159,8(220,2)	249,6
MRV-5*	235[c]	241,6	—	243,0	258,3	163,3(224,7)	268,5
MRV-7	239[d]	250,5	—	238,6	229,8	231,0	260,5
MRV-8*	240[e]	233,2	—	231,1	224,1	—	—
MRV-9*	240[e]	243,4	—	230,6	228,0	—	—
MRV-10*	240[e]	232,6	—	223,2	220,6	—	261,3
MRV-11	235[f]	242,7	—	230,5	224,0	239,9	232,8
MRV-12	—	241,9	—	219,6	219,0	240,3	240,5
MRV-21	212[g]	232,2		246,5	241,9	200,1	220,7
Mean	—	236,4		232,9	230,7		
St. Dev.	—	10,92		9,29	13,22		
Otros Fluidos							
MRV-3	—	—	—	—	—	189,9	216,4
MRV-2	—	—	—	—	—	249,2	192,7
RV-3	—	—	—	—	—	140,4(195,1)	261,5
MRV-6	58,0	198,3	183,0	179,8	33,5	—	230,7
MRV-13	88,9	187,4	174,2	477,2	64,7	179,2	219,5
MRV-14	21,4	95,1	96,8	392,8	43,5	—	—
MRV-15	60,3	197,6	182,5	178,5	29,4	—	231,9
MRV-16	25,5	138,2	133,6	336,2	45,5	188,4	259,0
MRV-17	67,7	150,6	144,0	145,7	157,8	—	—
MRV-18	21,0	112,5	110,8	377,0	42,1	—	—
MRV-19	47,5	172,2	161,8	274,8	201,1	—	—
MRV-20	21,0	128,0	125,0	294,8	67,4	—	—
MRV-22	21,0	81,7	85,0	354,5	34,9	—	—

[a]Cuarzo (pérdida máxima de vapor) No se calcularon las temperaturas para los fluidos de reservorio debido a que estas muestras se corrigieron en cuanto se refiere a la evaporación instantánea.

[b]El geotermómetro para Na-K erróneamente indica temperaturas altas para fluidos de bajas temperaturas (<150°C).

[c]T_{medida} del registro de temperatura en 9/20/86 (Dennis y otros, 1988)

[d]T_{medida} del registro de temperatura en 9/9/86 (Dennis y otros, 1988)

[e]T_{medida} del registro de temperatura en 9/17/86 (Dennis y otros, 1988)

[f]T_{medida} del registro de temperatura en 9/20/ 6 (Dennis y otros, 1988)

[g]T_{medida} del registro de temperatura en 9/25/86 (Dennis y otros, 1988)

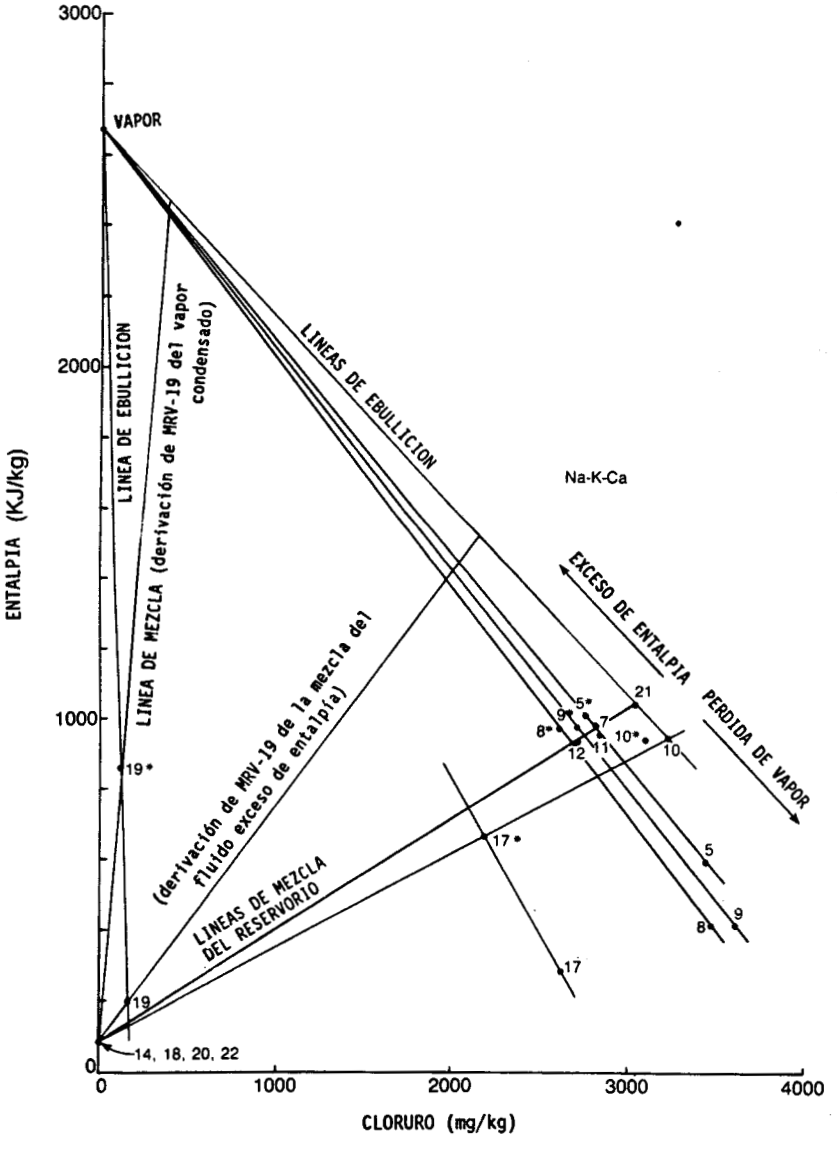


Figura 13. Diagrama de entalpía-cloruro para el sistema de Miravalles; las líneas de ebullición conectan puntos de datos con los puntos correspondientes a vapor puro y las líneas de mezcla se dibujan desde puntos de datos de muestras, hacia el punto que representa las aguas diluidas a 21°C. Las diversas líneas de ebullición y mezcla son analizadas en el texto.

es considerable. Así que en Ahuachapán, con un pH de reservorio más bajo y una menor pérdida de CO_2 durante la evaporación espontánea, resulta en un pH posterior a la evaporación espontánea lo suficientemente bajo para evitar la precipitación de calcita. En Miravalles, el pH posterior a la evaporación espontánea es lo suficientemente elevado para permitir la formación de acumulaciones de calcita en la zona de evaporación espontánea de las perforaciones.

Como la profundidad de la zona de evaporación espontánea está cercana a la zona de producción, la baja de presión del reservorio a causa de la producción del campo podría causar una considerable ebullición y precipitación de calcita en el reservorio y por lo tanto ocasionar una caída en la productividad del reservorio. La ebullición dentro de un reservorio puede ser descubierta frecuentemente en un diagrama de entalpía-cloruro, como el de la Figura 13. En esta figura, se grafica la entalpía de líquido saturado a la temperatura de recolección medida, comparada con la concentración de cloruro medida para cada muestra. Se traza una línea de ebullición de este punto a la entalpía del vapor saturado y a presión atmosférica (2.676 kJ/kg). Finalmente, la entalpía correspondiente a la temperatura del geotermómetro de Na-K-Ca para esa muestra nos da la posición, a lo largo de la línea de ebullición, que corresponde a la composición original del fluido sin hervir.

En la Figura 13 también se muestra un segundo juego de líneas correspondientes al mezclado de fluido de reservorio con aguas frías diluidas. La mayoría de los fluidos del reservorio forman una concentración de cloruro de alrededor de 2.800 mg/kg, pero MRV-10* y MRV-21 tienen una concentración de cloruro más alta (~3.100 mg/kg, la cual está muy cerca de la máxima concentración de cloruro permitida por la gráfica de tritio comparado con cloruro de la Figura 11). Parece que MRV-21 es la que mejor representa al fluido del reservorio y que los otros fluidos se derivan de la mezcla de agua fría dentro del reservorio. Puede que MRV-10* exhiba algunos efectos de pérdida de vapor, pero esta interpretación carece de peso ya que se tuvieron problemas con la recolección de esta muestra.

Una segunda línea de mezclado a través de MRV-17* (el asterisco sólo indica la posición del fluido "original" antes de la pérdida de vapor) pasa cerca de MRV-10* y esto sugiere la mezcla de agua fría con fluido del reservorio que ha perdido algo de vapor y gases no condensables. Por otra parte, la muestra de San Bernardo Abajo (MRV-19) claramente se deriva de condensado de vapor o de la mezcla de agua fría con un fluido con exceso de entalpía, como es sugerido por la sección sobre el tritio.

Por lo tanto, los siguientes procesos parecen estar operando en el reservorio de Miravalles:

1) mezclado profundo de agua meteórica de la superficie con el fluido virgen del reservorio (MRV-21),
2) poca ebullición para producir un líquido como MRV-10* y vapor,
3) mezclado del líquido hervido con agua fría para producir una composición como MRV-17*,
4) Ebullición de MRV-17* para producir fluidos que descargan en Salitral Bagaces y
5) condensación de vapor y dilución con agua fría para producir MRV-19.

A pesar de que la evidencia de la mayorá de las muestras no garantiza la presencia de considerable ebullición del reservorio, la evaluación anterior sugiere la existencia de ebullición local en el reservorio. La extensa distribución de fumarolas en el extremo noroeste del campo geotérmico de Miravalles apoya esta conclusión.

X. PERFILES DE TEMPERATURA DE PERFORACIONES

Se obtuvieron perfiles de temperatura de los pozos PGM-3, PGM-5, PGM-10, PGM-11 y PGM-12 (Dennis y otros, 1988); en la Figura 14 se muestra una vista transversal a lo largo de la línea A-A′ de la Figura 1. Este perfil pasa a través de los pozos PGM-10, PGM-3 y PGM-12 y el pozo PGM-11

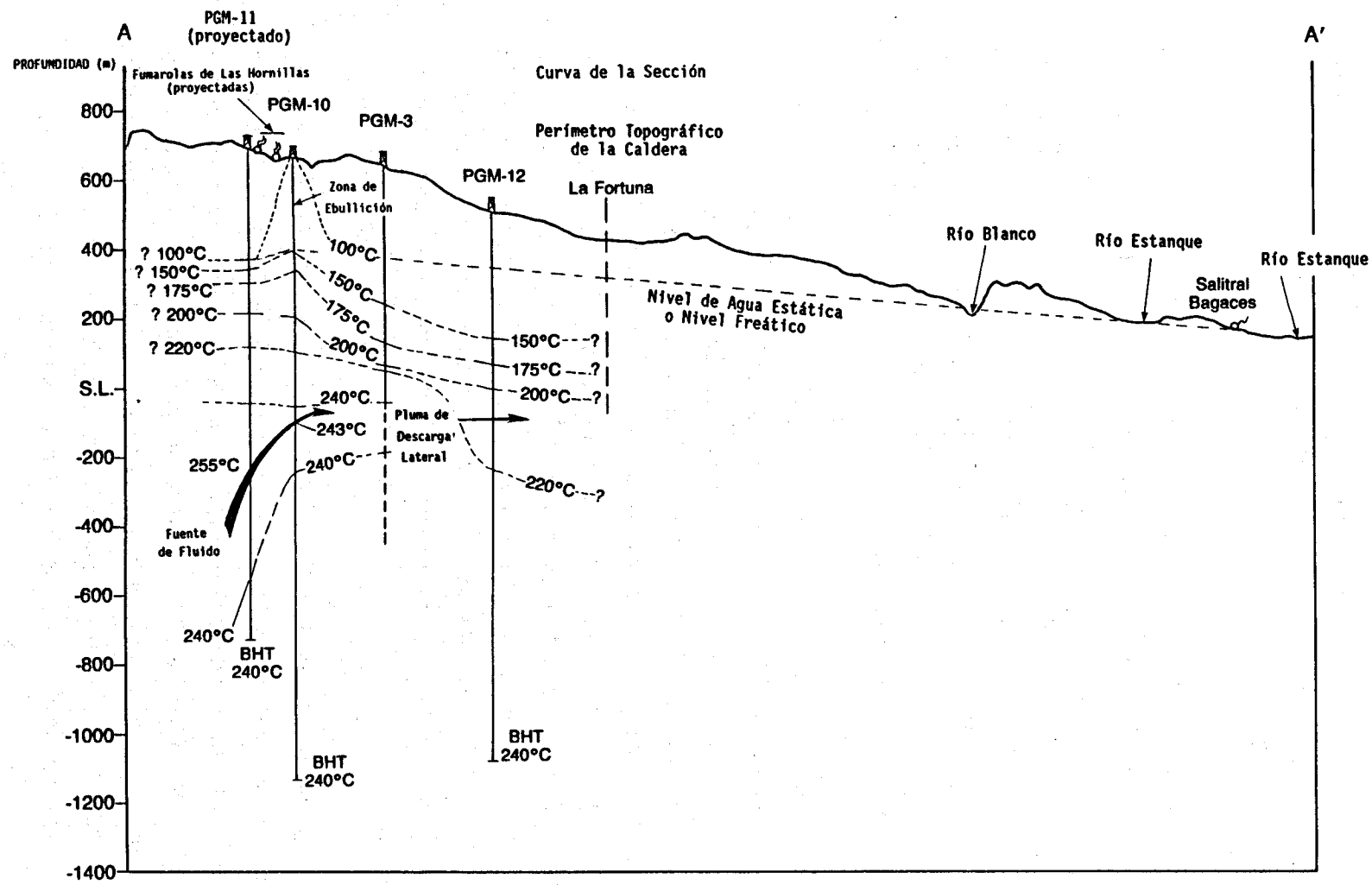


Figura 14. Vista transversal de elevación a través de la sección A-A' de Figura 1, mostrando las localizaciones de perforaciones e isotermas dentro del reservorio. Los rasgos importantes de esta vista son la definición de la pluma de la descarga termal y la zona de ebullición poco profunda en PGM-10.

está proyectado sobre la sección. Los pozos PGM-2 y PGM-5 se proyectan sobre la vista transversal aproximadamente en la localización del pozo PGM-10. La línea de fumarolas de Las Hornillas a La Unión se proyecta sobre la sección entre PGM-11 y PGM-10.

En la Figura 14 también se muestran los perfiles de temperatura medidos durante el descenso en estos pozos (las líneas punteadas fueron deducidas). Varios rasgos interesantes son evidentes. Primero, las inversiones de temperatura son claramente evidentes en los registros de los pozos PGM-11 y PGM-10. La temperatura máxima registrada fue de 255°C en PGM-11, pero la temperatura más representativa para estos pozos (o sea, la temperatura del modelo) es de 240°C -- de excelente acuerdo con las temperaturas del geotermómetro químico.

Otro rasgo interesante es que los niveles de agua de los pozos PGM-11, PGM-10, PGM-3 y PGM-12 caen aproximadamente en una línea horizontal. En los pozos PGM-11, PGM-3 y PGM-12 el nivel del agua coincide con la isoterma de 100°C, pero en PGM-10 es la de 150°C. Una línea recta trazada a través de los niveles de agua en los pozos PGM-3 y PGM-12 intersecta las superficies del Río Blanco, del Río Estanque y en Salitral Bagaces. Varios manantiales calientes que descargan a lo largo de los ríos Blanco y Agua Caliente no fueron muestreados, pero la coincidencia de los niveles freáticos y las elevaciones de los manantiales calientes hacia el sur sugiere que el nivel freático puede ser como se indica en la Figura 14.

La isoterma de 100°C de los pozos PGM-10 y PGM-5 (Dennis y otros, 1988) resulta muy poco profunda, tal vez porque está cercana a fracturas que controlan la localización de fumarolas. Esta línea de fumarolas corre paralela a la línea de PGM-5 a PGM-2 y pasando por PGM-10. La ebullición en estas fracturas eleva los perfiles de temperatura de los pozos cercanos, tales como PGM-10, PGM-5 y PGM-5R, un pozo poco profundo cercano a PGM-5; PGM-5R fue perforado como pozo de reinyección pero éste produce vapor seco. Partiendo de las similitudes en la localización de los pozos

y la línea de fumarolas y de los perfiles de temperatura de los pozos PGM-5 y PGM-10, esperamos que el perfil de temperatura del pozo PGM-2 sea similar a los de PGM-5 y PGM-10.

Además de ser conductos para el vapor, estas fracturas también podrían servir de conducto para el descenso de agua fría. Tal vez los fluidos ácidos encontrados en PGM-2 sean el resultado de la reacción entre el vapor ascendente (el cual contiene H_2S) y el agua fría saturada de oxígeno, la cual se filtra profundamente a través de estas fracturas. Basándose en los datos actuales, esto no es más que una especulación.

Consideremos ahora la isoterma de 240°C. Aparentemente, fluidos calientes ascienden desde gran profundidad cerca de, pero un poco al norte (o noreste) de PGM-11 y fluyen horizontalmente hacia el sur; este perfil es un ejemplo clásico de una pluma de descarga hidrotermal, como se muestra en la Figura 2 (Goff y otros, 1988). La temperatura al fondo de los pozos PGM-11, PGM-10 y PGM-12 es de 240°C y de hecho, todos estos pozos son isotermales abajo de la isoterma de 240°C. Debido a la presencia de camisa derrumbada dentro del pozo PGM-3 no se pudo medir la temperatura al fondo de este pozo. El cambio repentino en la elevación de la isoterma de 220°C entre PGM-13 y PGM-12, sugiere el enfriamiento conductivo de la pluma de descarga lateral entre estos dos pozos. En la Figura 14 no hay evidencia del fluido profundo de 300°C mencionado por Giggenbach (1986). Los perfiles de temperatura presentados indican que los fluidos de mayor temperatura se encuentran más probablemente al norte de PGM-11 y no más profundo que una elevación de alrededor de 200 m abajo del nivel del mar.

XI. RECOMENDACIONES Y EVALUACION

El modelo del reservorio desarrollado en este informe, basándose en la geoquímica de fluido y gas y apoyado por los registros de temperatura de los pozos difiere considerablemente del modelo de Giggenbach (1986) para el sistema de Miravalles. Las consecuencias de

estas diferencias son importantes para el desarrollo futuro del reservorio para su producción. Nuestro modelo sugiere que los pozos de producción futuros deben ser ubicados al norte del pozo PGM-11 para aprovechar de las temperaturas más elevadas en la zona de ascenso y al este de PGM-2 para determinar la extensión hacia el este de la pluma de descarga. Se haterminado un pozo nuevo al oeste de PGM-5 (PGM-15) y puede ser útil para determinar la extensión hacia el oeste de la pluma. La inyección de salmuera agotada a lo largo de las márgenes de la pluma puede ayudar a mantener la presión del reservorio. Los pozos PGM-2 y PGM-15 deben ser registrados bajo condiciones estáticas y de flujo. Las perforaciones futuras al sur de PGM-12 deben limitarse a profundidades de más o menos 200 m abajo del nivel del mar.

Dos aspectos importantes del análisis del reservorio que no se muestran en la vista transversal de la Figura 14 son la localización de las zonas más importantes de la producción de acumulaciones de calcita dentro de las perforaciones. Las dos zonas principales de producción dentro de PGM-10 son a los niveles de 330 a 430 m y 530 a 630 m abajo del nivel del mar (información proporcionada por el ICE). Los depósitos de calcita fueron detectados en los registros de calibrador entre 397 y 488 m abajo del nivel del mar (Dennis y otros, 1988). Estas zonas de producción y de acumulación de calcita están abajo de la pluma termal. En los registros RTP no hubo evidencia de entrada de fluido proveniente de la zona de producción superior (330 a 430 m), por lo que tal vez esta zona ya haya sido sellada por los depósitos de calcita en las fracturas. Si se hiciera una correlación entre las zonas de producción y de acumulación de calcita, con los perfiles de presión del reservorio y la pluma de descarga, se obtendría información útil para preparar la estrategia de producción conveniente para cada pozo y también la estrategia de reinyección para todo el campo.

RECONOCIMIENTOS

Varias personas contribuyeron a este trabajo. Los señores Alexis Alvarado y Leonel Vaca (ICE) contribuyeron a las operaciones de registro con su experiencia y con valiosas aportaciones. Bob Hanold (LANL) nos proporcionó estímulos, ideas y motivación para terminar este informe. Cathy J. Janik y Terry Cheatham, USGS, de Menlo Park, California, proporcionaron los análisis de gas así como comentarios a este informe. Margaret Findley, Regina Johnson y Pita Valencia pasaron en limpio el manuscrito y Anthony García, Sharon Domínguez y James Archuleta dibujaron las figuras. Pete Chávez, Richard Maestas, Benny García, Ray Jermance, Joe Kurtenbach, Lynn Brewer, Dave Anderson y Tracy Grant hicieron este trabajo un verdadero placer. Se agradece enormemente la ayuda de todas estas personas.

REFERENCIAS

Archuleta, J. R., C. F. Fink, and J. Kurtenbach, 1978, Equipment development report: Borehole fluid sampling tool, Los Alamos National Laboratory report LA-7152-MS.

Corrales, M., 1985, Costa Rica: Country update report, 1985 International Symposium on Geothermal Energy, Trans. Geoth. Res. Counc., pp. 57-63.

Craig, H., 1961, Isotope variations in meteoric waters, Science, 133:1702-1703.

Dennis, B. R., R. G. Lawton, and J. D. Kolar, 1988, Los Alamos National Laboratory geothermal well-logging program, Miravalles, Costa Rica.

DiPippo, R., 1980, Geothermal Energy as a Source of Electricity, US Govt. Printing Office, Washington, DC, 370 pp.

Fontes, J. C., 1980, Environmental isotopes in groundwater hydrology, in Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Vol. 1A: The Terrestrial Environment, Elsevier, Amsterdam, pp. 75-140.

Fournier, R., 1981, Application of water geochemistry to geothermal exploration and reservoir engineering, in Ryback and Muffler, eds., Geothermal Systems: Principles and Case Histories, John Wiley and Sons, New York, pp. 109-143.

Giggenbach, W. F., 1986, IAEA coordinated research programme on the applications of isotopic and chemical techniques to geothermal exploration in Latin America: The isotopic and chemical composition of water and stream discharges from the Guanacaste geothermal province, Costa Rica, Unpublished IAEA report, 32 pp.

Goff, F., L. Shevenell, C. O. Grigsby, and B. Dennis, eds., 1987a, Downhole fluid sampling at the SSSDP California State 2-14 Well, Salton Sea, California, Los Alamos National Laboratory report LA-11052-OBES, 32 pp.

Goff, F., A. H. Truesdell, C. O. Grigsby, C. J. Janik, L. Shevenell, J. R. Paredes, J. Gutiérrez, P. Trujillo, and D. Counce, 1987b, Hydrogeochemical investigations of six geothermal sites, Honduras, Central America, Los Alamos National Laboratory report LA-10785-MS, 170 pp.

Goff, F., L. Shevenell, J. Gardner, F. D. Vuataz, and C. O. Grigsby, 1988, The hydrothermal outflow plume of Valle Caldera, New Mexico, and a comparison with other outflow plumes, J. Geophys. Res., 93 B6: 6041-6058.

Grigsby, C. O., F. Goff, L. Shevenell, P. E. Trujillo, D. A. Counce, C. J. Janik, B. M. Kennedy, and A. F. White (in preparation), Results of downhole fluid sampling at the California State 2-14 well, Salton Sea, California.

Henley, R. W., A. H. Truesdell, and P. B. Barton, 1984, Fluid-Mineral Equilibria in Hydrothermal Systems, Reviews in Economic Geology, Vol. 1, Society of Economic Geologists, 267 pp.

Henley, R. W., and A. J. Ellis, 1983, Geothermal systems ancient and modern: A geochemical review, Earth-Sci. Rev., 19: 1-50.

International Atomic Energy Agency, 1969, Environmental isotope data no. 1: World survey of isotope concentration in precipitation (1953-1963): Tech. Rep. Ser. No. 96, IAEA, Vienna.

International Atomic Energy Agency, 1971, Environmental isotope data no. 3: World survey of isotope concentration in precipitation (1966-1967): Tech. Rep. Ser. No. 129, IAEA, Vienna.

International Atomic Energy Agency, 1973, Environmental isotope data no. 4: World survey of isotope concentration in precipitation (1968-1969): Tech. Rep. Ser. No. 147, IAEA, Vienna.

International Atomic Energy Agency, 1975, Environmental isotope data no. 5: World Survey of isotope concentration in precipitation (1970-1971): Tech. Rep. Ser. No. 165, IAEA, Vienna.

International Atomic Energy Agency, 1979, Environmental isotope data no. 6: World survey of isotope concentration in precipitation (1972-1975): Tech. Rep. Ser. No. 192, IAEA, Vienna.

Mainieri, A., E. Granados, R. Corrales, and L. Vaca, 1985, Miravalles geothermal field, Costa Rica, technical report, Trans. Geoth. Res. Counc., 9: 279-283.

Pearson, F. J., and A. H. Truesdell, 1978, Tritium in the waters of Yellowstone National Park, US Geol. Survey Open-File Report 78-701.

Trujillo, P., D. Counce, C. O. Grigsby, F. Goff and L. Shevenell, 1987, Chemical analysis and sampling techniques for geothermal fluids and gases at the Fenton Hill laboratory, Los Alamos National Laboratory report LA-11006-MS, 84 pp.

Vuataz, F. D., and F. Goff, 1986, Isotope geochemistry of thermal and nonthermal waters in the Valle caldera, Jemez Mountains, northern New Mexico, J. Geophys. Res., 91 B2: 1835-1854.

Wolfenbarger, F. M., 1986, Battery pack/controller for higher temperature applications, Trans. Geoth. Res. Counc., 10: 485-489.