LA--10864-MS

DE88 000999

LA-10864-MS

UC-66b
Issued: September 1987

Geology of the Pavana Geothermal Area Departamento de Choluteca, Honduras, Central America

Field Report

The Pavana Area Geology Team

D. B. Eppler
G. Heiken
K. Wohletz
W. Flores*
J. R. Paredes*
W. A. Duffield**

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.

*Official Visitor at Los Alamos. Empresa Nacional de Energía Eléctrica, Apartado 99, Tegucigalpa, HONDURAS.
**Official Visitor at Los Alamos. U.S. Geological Survey, 2255 North Gemini Drive, Flagstaff, AZ 86001.

MASTER

Los Alamos
Los Alamos National Laboratory
Los Alamos, New Mexico 87545

DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED

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

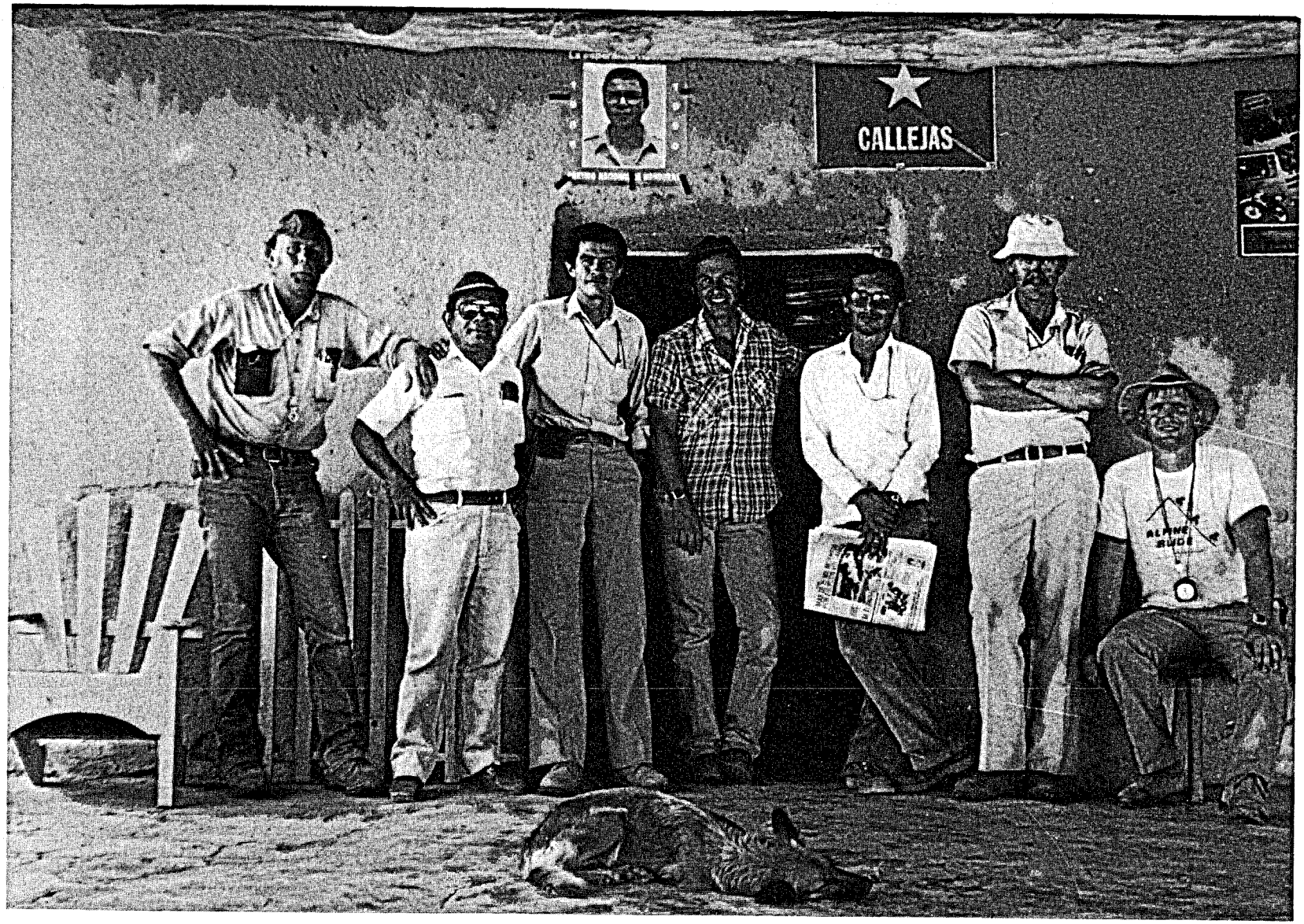
Portions of this document may be illegible in electronic image products. Images are produced from the best available original document.

PLATES

Plate 1. Geologic Map of the Pavana Geothermal Area.

Plate 2. Geologic Cross Section of the Pavana Geothermal Area.

Plate 3. Stratigraphic Sections of the Pavana Geothermal Area.



The Pavana Area Geology Team. Rear, left to right: Dean B. Eppler, Los Alamos National Laboratory (Los Alamos); German Flores, Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE) Driver; Wilmer Flores, ENEE; Wendell A. Duffield, U.S. Geological Survey; Rodrigo Paredes, ENEE; Grant Heiken, Los Alamos; Kenneth Wohletz, Los Alamos. Front: Mancha.

EXECUTIVE SUMMARY

Investigation of the Pavana geothermal site is part of an assessment of geothermal resources of Honduras being undertaken by a team of earth scientists from Los Alamos National Laboratory, the U.S. Geological Survey, and the Empresa Nacional de Energía Eléctrica de Honduras. This assessment is part of the Central American Energy Resources Project being sponsored by the U.S. Agency for International Development.

Pavana was selected as one of the initial sites for detailed study because previous geothermal reconnaissance work indicated resource potential there. The purpose of this geologic study was to evaluate the geothermal system to determine if geophysical surveys and follow-on drilling are justified. All studies are designed to provide technical information to help scientists and engineers evaluate the potential of the Pavana geothermal site for electrical power production.

The Pavana area has a long history of geothermal exploration. It was studied by Geonomics, Inc., in the mid-1970s, as part of an effort by the Honduran government to develop geothermal energy. The United Nations Development Program carried out geologic mapping, and GeothermEx, Inc., carried out stream sampling of the hot springs.

The Pavana geothermal area is in southern Honduras near the Gulf of Fonseca. It is 3 km southeast of the village of Pavana, ~200 m from the intersection of the Río Agua Caliente and the Pan-American Highway. The site consists of many small-volume springs and steam vents and appears to be similar to many geothermal areas in the Basin and Range province of the western United States. In such systems, waters circulate in fractures in the earth's crust and are heated during deep circulation within a region of thinned crust that has elevated temperature.

The Pavana reservoir base temperature, as indicated by geothermometry, is ~150°C (Goff et al., 1986), which is consistent with the results of geochemical analyses by GeothermEx, Inc. This temperature is substantially lower than at other geothermal areas of Honduras, for example, Platanares, San Ignacio, and Azacualpa. It is also too low for electrical power generation by a steam-driven turbine. It may, however, be suitable for a binary system where

heat from the geothermal water is used to boil a more volatile working fluid, whose vapor may then be used to drive a turbine.

The main thermal area at Pavana has an estimated outflow of about 3000 ℓ/min of 60°C water. This considerable energy potential could be used directly. Pavana has the logistical advantages of being located near power transmission lines, a major paved highway, and new agricultural projects where the water could be used for processing agricultural materials. We recommend no additional investigations be done until a specific end use for the geothermal heat from Pavana can be established.

GEOLOGY OF THE PAVANA GEOTHERMAL AREA
DEPARTAMENTO DE CHOLUTECA, HONDURAS, CENTRAL AMERICA

Field Report

by

The Pavana Area Geology Team

Los Alamos National Laboratory	Empresa Nacional de Energía Eléctrica	U.S. Geological Survey
D. Eppler	W. Flores	W. A. Duffield
G. Heiken	J. R. Paredes	
K. Wohletz		

ABSTRACT

The Pavana geothermal area is located in southern Honduras near the Gulf of Fonseca. This region is underlain by late Tertiary volcanic rocks. Within ranges near the geothermal manifestations, the rock sequence is characterized by intermediate to mafic laharic breccias and lavas overlain by silicic tuffs and lavas, which are in turn overlain by intermediate to mafic breccias, lavas, and tuffs. The nearest Quaternary volcanoes are about 40 km to the southwest, where the chain of active Central American volcanoes crosses the mouth of the Gulf of Fonseca.

Structure of the Pavana area is dominated by generally northwest-trending, southwest-dipping normal faults. This structure is topographically expressed as northwest-trending escarpments that bound blocks of bedrock separated by asymmetric valleys that contain thin alluvial deposits.

Thermal waters apparently issue from normal faults and are interpreted as having been heated during deep circulation along fault zones within a regional environment of elevated heat flow. Natural outflow from the main thermal area is about 3000 ℓ/min of 60°C water. Geothermometry of the

thermal waters (Goff et al., 1986) suggests a reservoir base temperature of about 150°C. Magmatism that led to emplacement of the Tertiary volcanic rocks is too old to provide contemporary localized crustal heat sources for the thermal waters. However, regionally elevated heat flow could result from residual Tertiary magmatic heat augmented by heat associated with the nearby active Quaternary subduction system. Alternatively, the heat source could be associated with crustal thinning associated with regional extension, as has been postulated for other Honduran geothermal areas.

I. INTRODUCTION

The present study was undertaken by a team of geologists from the Los Alamos National Laboratory, the U.S. Geological Survey, and the Empresa Nacional de Energía Eléctrica as part of a program for geothermal development in Honduras funded by the U.S. Agency for International Development (AID). The team completed geologic mapping of an area of about 120 km^2 that surrounds the geothermal manifestations near the village of Pavana in the Department of Choluteca (Fig. 1). Geochemical sampling of the hot springs was completed in May 1985 (Goff et al., 1986), as part of the same program.

The main area of hot springs is about 3 km southeast of Pavana and ~200 m south of the Pan-American Highway. Several additional thermal springs are located northeast and west of the main area. Bedrock geology consists of a sequence of Tertiary volcanic rocks exposed in a series of fault-block mountains.

II. PREVIOUS WORK

Williams and McBirney (1969) briefly describe the volcanic rocks along the shore of the Gulf of Fonseca (near Pavana) as interbedded andesitic and basaltic lavas, laharic deposits, abundant fine-grained volcaniclastic rocks, and ignimbrites. All of these rock units have been cut by "thin vertical and steeply dipping dikes...[that] were probably feeders for surface flows

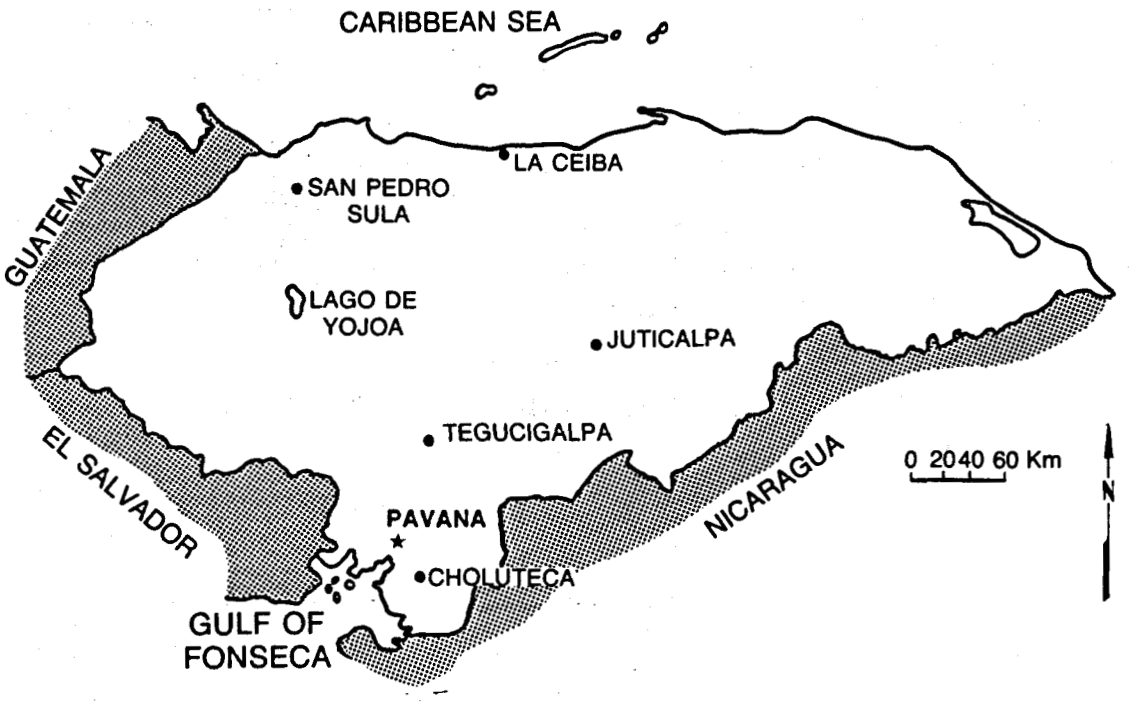


Figure 1. Location map, Pavana geothermal area, Honduras.

(Williams and McBirney, 1969, p. 61)." Near the village of Nacaome, Williams and McBirney (1969) sampled a biotite-dacite dike that yielded a K-Ar age of 7.1 Ma (1 Ma = 1 million years). On this basis, Williams and McBirney (1969) suggested that most of the rocks in this area are of late Miocene or Pliocene age. They also noted that the region is broken into many fault-bounded blocks.

The Pavana geothermal area has the longest history of geothermal exploration in Honduras. The area was studied by Geonomics, Inc., in the mid-1970s as part of an effort by the Honduran government to develop geothermal energy. The Geonomics study included photogeologic mapping and limited follow-up field checking of the known thermal areas and adjacent mountain ranges. A preliminary report, prepared by Geonomics in 1977 proposed the existence of three calderas in the Pavana area and suggested that the source of heat for the thermal springs was associated with these calderas. The Geonomics organization went into bankruptcy shortly thereafter and thus was unable to complete the project.

Subsequent study of Pavana carried out by the United Nations Development Program/GeothermEx included geologic mapping and geochemical sampling. The chemistry of the thermal waters indicated reservoir base temperatures on the order of 150°C ± 10°C (GeothermEx, 1980). Similar results were obtained by Goff et al. (1986). Geologic mapping of bedrock near the geothermal area showed the region to be composed of basaltic breccia, basaltic and andesitic lavas, and rhyolitic tuffs and lavas.

III. DESCRIPTIONS OF STRATIGRAPHIC RELATIONS AND ROCK UNITS

The area that was mapped by us during the present study may be subdivided into three fault blocks of bedrock called the Cerro Saracuco block (north), the Cerro Las Lajas block (southwest), and the La Joyada block (southeast). These blocks are separated by lowlands that are mostly covered with deposits of alluvium. The present study establishes a stratigraphic sequence within each block and tentative correlations among blocks. A similar degree of weathering and alteration is observed between silicic rocks in each block. This similarity forms the basis for the correlation between blocks (Plates 1-3). Broadly speaking, the composite stratigraphic section of the entire map area consists of a mafic basal sequence (map symbol Tba), overlain by a silicic sequence (map symbol Tr), in turn overlain by an additional mafic sequence (map symbol Tb and Ta). Each of these sequences is roughly 200 to 300 m thick. Rocks of all three sequences crop out in the northern part of the Cerro Saracuco block. Rocks of the silicic and upper mafic (Tb) sequence crop out in the southwest in the Cerro Las Lajas block, and rocks of the lower two sequences crop out in the southeast in the La Joyada block. All rocks presumably are Tertiary. A clast from the brecciated basal part of a silicic lava in the Cerro Saracuco block yielded a K-Ar age of 5.2 ± 0.2 Ma (Table I).

A. Petrographic Descriptions of Rock Units

1. Lower Basaltic and Andesitic Breccias and Lavas (Tba). These rocks crop out in the base of the Cerro Saracuco block and in portions of the La Joyada block and consist of basaltic and andesitic lava flows and fragmental deposits. Basalts are porphyritic and generally have phenocrysts of

TABLE I. Potassium-argon Age of Silicic Lava from the Pavana Geothermal Area, Department of Choluteca, Honduras (see Plate 1 for sample locality).

Lab Number	Rock Type	Material Dated	K_2O (wt%)	$^{40}Ar^{rad}$ (mol/g)	$^{40}Ar^{rad}$ (%)	Age (Ma)
861009	Basal breccia of silicic lava	Biotite	8.27	6.24270×10^{-11}	33.2	5.2 ± 0.2

Note: All sample preparation and analytical work was done at the U.S. Geological Survey Isotope Geology Laboratory in Menlo Park, California, using the techniques described in Dalrymple and Lanphere (1969). We analyzed potassium after lithium metaborate fusion using a flame photometer, with the lithium serving as the internal standard (Ingamells, 1970). Error, shown as the $\pm$ value, is the estimate of the standard deviation of analytical precision. K-Ar age was calculated using the constants for the radioactive decay and abundance of ^{40}Ar recommended by the International Union of Geological Sciences Subcommission on Geochronology (Steiger and Jager, 1977). These constants are

$$\gamma_t = 0.581 \times 10^{-10}\ yr^{-1} ,$$

$$\gamma_b = 4.962 \times 10^{-10}\ yr^{-1} , \text{ and}$$

$$^{40}K/K_{total} = 1.167 \times 10^{-4}\ mol/mol .$$

Age determination provided by E. H. McKee, U.S. Geological Survey, Menlo Park, California.

plagioclase, augite, and magnetite set in a very fine-grained groundmass of identical mineralogy. Some plagioclase phenocrysts are compositionally zoned and appear to have undergone two stages of growth, as indicated by thin, optically continuous rims on the phenocrysts. Andesites have phenocrysts of zoned plagioclase, augite, hypersthene, and magnetite set in a trachytic groundmass of plagioclase, magnetite and augite. Sericitic(?) alteration

patterns within the zoned plagioclase phenocrysts suggest normal zonation, with calcic cores and more sodic rims. Some andesites also have hornblende occurring as a phenocryst phase. In addition, plagioclase and magnetite occur as phenocryst phases. The phenocrysts are set in an groundmass of altered green-brown glass, plagioclase needles, magnetite, and apatite. Alteration patterns within the plagioclase phenocrysts suggest that some grains have oscillatory zoning.

2. Silicic Lava Flows, Pyroclastic Flows, and Tuffs (Tr). Silicic lava flows and tuffs crop out in both the Cerro Saracuco and La Joyada blocks. The lavas appear to be rhyolitic to rhyodacitic in composition, based on mineralogy. All of the lavas are flow banded. Generally, they contain rare phenocrysts of partially resorbed plagioclase, biotite, and magnetite set in a groundmass of very fine-grained quartz and alkali feldspar that is probably devitrified glass. Occasionally, a perlitic texture of concentric, nested fractures is found.

The mineralogy of the silicic tuffs suggests that the composition of these rocks is rhyolitic to rhyodacitic. The population of lithic fragments is complex in some cases. One sample from the Cerro Las Lajas contains numerous lithic fragments of basaltic rock with variable grain size, texture, and mineralogy. Some of the tuffs have been extensively recrystallized, and original shard texture has been destroyed. In addition to the lithic fragments, these rocks contain angular fragments of plagioclase, magnetite, biotite, and rare augite. Some fragments of pumice are partly flattened, indicating minor post-depositional welding.

3. Upper Basalt and Olivine Andesite (Tb, Ta). The upper basalts are found only in the Cerro Saracuco and Cerro Las Lajas blocks. The basalts are porphyritic, with plagioclase, augite, magnetite, and sparse olivine phenocrysts. The groundmass of these rocks contains laths of plagioclase, augite, and magnetite.

The upper olivine andesite is found only on the northern edge of the Cerro Saracuco block. This rock type is porphyritic, with partially resorbed olivine rimmed with iddingsite, zoned plagioclase, and augite phenocrysts set in a groundmass of very fine-grained plagioclase, augite, and magnetite. Analysis of the groundmass with the electron microprobe suggests that the

groundmass is approximately rhyolitic. Accordingly, these rocks are felt to be andesites, in spite of the basaltic phenocryst population.

B. Stratigraphic Relationships

1. The Cerro Saracuco Block. The thickest stratigraphic section (>700 m) is exposed in the Cerro Saracuco Block (Plate 3). The lowest part of the section consists of andesitic laharic breccias (Tba) characterized by matrix-supported cobbles of plagioclase- and pyroxene-phyric clasts in a silty matrix. These breccias are massive, with no apparent stratification, and range in color from gray to purple to green. A few steeply dipping dikes of andesitic composition, 1 to 3 m wide, cut the breccia sequence, and several platy-jointed andesitic lava flows, as thick as 20 m, are intercalated within the sequence. Exposures are poor, but the flow bottoms appear to dip gently to moderately to the northeast. We interpret the breccia sequence, interlayered lavas, and the intruding dikes as part of a stratovolcano or perhaps overlapping parts of more than one stratovolcano. We find no evidence to aid in the location of the volcanic center or centers, but the moderate to gentle dips at the base of lava flows suggest that mapped outcrops represent lower flank sections of one or more cones.

The sequence of andesitic laharic breccias is overlain by a complex of silicic lavas and associated pyroclastic deposits (Tr). Individual exposures of the pyroclastic deposits are as thick as 80 m, and range from moderately well-sorted lapilli and ash in beds generally less than a few centimeters thick, to massive, poorly sorted beds up to several meters thick. The thick, poorly sorted deposits appear to have been emplaced as pyroclastic flows. A similarly primary volcanic character of well-bedded tuffs is indicated by bedding-plane sags beneath ballistically emplaced bombs and by surge-related dune structures in many of the moderately sorted, thin beds. Lithic clasts in both the bedded tuff and the pyroclastic flows are $\leq$30 cm in length, and include basaltic, andesitic, and silicic lithologic types. They can form as much as 75% of some beds but generally comprise less than 10%. Biotite-bearing silicic pumices are common as lapilli and somewhat larger clasts. Pumice-lapilli-rich zones are common in the beds interpreted to be of surge

origin. The entire pyroclastic sequence has a silicic ash matrix that ranges from white to beige to red in color.

The rhyodacitic-rhyolitic lava flows are characteristically flow-banded, and the banding varies greatly in orientation, which is typical of silicic domes and flows. At the base of lava flows are brecciated zones as thick as 10 m. Domes and flows probably were entirely enveloped by a carapace of such monolithologic breccia immediately following emplacement, but this breccia has been eroded except where protected by penecontemporaneous overlying rocks. A breccia fragment from the base of one flow was sampled for K-Ar age determination (location shown on Plate 1), and a biotite concentrate yielded an age of 5.2 ± 0.2 Ma (Table I).

The sequence of silicic rocks is the composite accumulation of the products of many eruptions from several vents. The initial eruptive phase at each vent apparently produced a tuff ring and adjacent pyroclastic mantle and was followed by extrusion of lava. Geomorphic evidence of several vents appears on aerial photographs in the form of nearly circular lava bodies. The roughly concentric, inward-dipping attitudes of pyroclastic rocks may indicate the existence of other vents. Although the total number of vents is unknown, as is the time-period of the silicic eruptions, petrographic similarity suggests that these lavas are comagmatic.

The silicic sequence is overlain by basaltic and andesitic fragmental rocks and interlayered lava flows (Tb, Ta). The fragmental rocks include deposits of ≤20-cm angular blocks with little matrix, and well-sorted, weakly consolidated deposits and matrix-supported laharic deposits consisting of cobbles set in a silty matrix. Bedding is rarely apparent but is nearly horizontal where exposed in cliffs in the northwest part of the area being studied. The contact with the underlying silicic sequence is exposed in this area and exhibits many meters of relief and apparent deep weathering and erosion of the silicic rocks.

The uppermost rocks in the Cerro Saracuco block consist of a succession of platy andesitic lava flows (Ta) that are several meters thick. These form a relatively flat-lying cap on a broad hill in the northwest part of the area and apparently are the youngest volcanic rocks of the area.

2. The La Joyada Block. The lowest part of the La Joyada block consists of mafic lavas and mafic fragmental rocks (Tba). The fragmental rocks include deposits of basaltic scoria and laharic units that consist of basaltic clasts within a silty matrix. Outcrops of these mafic rocks are only a few meters in stratigraphic thickness. Most of this block consists of silicic tuffs and lavas.

The silicic rocks are petrographically similar to those exposed in the Cerro Saracuco block and are tentatively interpreted to be time-correlative with them on this basis. The La Joyada silicic rocks generally are biotite- and feldspar-phyric and occur as tuff rings, domes, and flows. Several vents produced overlapping sequences of tuffs and lavas without apparent intervening weathering or erosion, indicating that the vents were essentially simultaneously active. The lavas are flow-foliated with a devitrified groundmass. Locally the lavas are perlitic, and tuffs are altered to clay minerals through weathering, suggestive of a water-saturated environment of deposition.

3. The Cerro Las Lajas Block. The lowest exposures of rocks in the Cerro Las Lajas block are silicic tuffs that appear to have been emplaced as pyroclastic flows (Tr). These flow units are up to 80 m thick and consist of an ash matrix and ∿20% lithic fragments and silicic pumice-lapilli. Most of the lithic fragments are basalt, and a few are andesite.

The silicic pyroclastic flows are overlain by massive, aphyric basaltic lava flows with a cumulative thickness of ∿50 m (Tb). This sequence of flows is overlain by ∿170 m of basaltic to andesitic breccia with included clasts up to 1 m in long axis. In general, the breccia is clast-supported, with a matrix of mafic ash and black to gray scoriaceous lapilli. Some outcrops are crudely bedded, and both reverse and normal grading exist. These rocks are interpreted to have been deposited in part as debris flows and in part as near-vent fallout.

IV. STRUCTURAL FRAMEWORK

A chain of active volcanoes that represents the surface expression of magmatism related to the Middle American subduction zone, projects across the mouth of the Gulf of Fonseca. Thus, Pavana, northwest of the gulf and about

40 km behind the volcanic chain, is in a back-arc tectonic environment. Two Quaternary basaltic volcanoes are located near the mouth of the gulf. Based upon their relatively small size and the apparent lack of a substantial surrounding Quaternary volcanic platform, this part of the volcanic chain has been far less active than adjacent parts in El Salvador and Nicaragua.

Structure within the study area is controlled by generally northwest-striking normal faults. This structural trend is clearly expressed in the morphology of the region as northwest-trending escarpments and streams (Plate 1). Faults seen in outcrop include southwest-dipping normal faults with up to several meters of vertical offset, plus northeast-dipping antithetic faults of similar or less normal displacement. A predominance of southwest-facing scarps suggests that most major normal faults are down to the southwest. Normal faults of various trends with little offset within silicic tuffs may be related to local slumping of these tuffs.

The main hot springs discharge from tuffaceous Tertiary gravels and sands (too limited in extent to show on Plate 1) that are tentatively correlated on the basis of lithology, with silicic pyroclastic deposits in the Cerro Saracuco block. The hot-spring area is ~0.5 km southwest of a northwest-trending fault zone that bounds the southwest side of that block (see Plate 1). This structural setting suggests that thermal waters probably rise from a great depth along this bounding fault zone and then flow laterally southwest, at least in part, within shallow permeable zones of the tuffaceous deposits. Lateral flow is no more than a few hundred meters, judged by the distance between the springs and the trace of the nearest major northwest-trending fault (see Plate 1). The main hot-spring area may be localized at an intersection between this northwest-trending fault and a northeast-trending fault mapped by the Geonomics group and generally following the course of Río Agua Caliente near the Pan-American Highway. The geologic map of the Geonomics group indicates the existence of such a northeast-trending fault, but we found no surface evidence for this structure.

In general, the Pavana geothermal system appears to be similar to many found in the Basin and Range province of the United States. In such systems, structure is dominated by normal faults, and thermal waters are interpreted to circulate within fault zones. In this province water is heated during deep

circulation within an environment of regionally elevated heat flow. These reservoirs consist of permeable parts of the fault zones themselves and/or permeable formations within the local rock sequence. The single radiometric age (5.2 ± 0.2 Ma) that we have determined for silicic rocks within the Pavana area and the degree of erosion imply that volcanism is too old to be correlated with currently active crustal magma reservoirs. Regionally elevated heat flow may exist as a result of active extensional tectonics leading to a thinned crust or as a by-product of nearby magmatism related to the active Quaternary subduction system. No heat flow determinations from boreholes exist to date in Honduras.

The geologic maps of the Geonomics and the United Nations Development Project (UNDP) groups show three calderas ∿10 km to the northwest, north, and west-northwest, respectively, from the main thermal area. During our reconnaissance we found little evidence for the existence of such structures other than erosional basins, a few up to several kilometers wide, that mimic caldera shape. No pyroclastic outflow sheets of a thickness and volume generally produced during caldera collapse are present within the area. We thus conclude that calderas are not present and that the geothermal area is unrelated to such structures.

V. DESCRIPTIONS OF THERMAL MANIFESTATIONS

The main thermal area of Pavana is ∿200 m southwest of the intersection of the Río Agua Caliente and Pan-American Highway (San Lorenzo sheet, 2756 III, UTM coordinates 655/812; Plate 1). Many small-volume springs and fumaroles are scattered within an area of several thousand square meters. Groups of manifestations are described below and identified on Figs. 2 and 3. Discharge from the overall area occurs through a single channel, where we measured a flow of 3150 ℓ/min of 60°C water (PV 3 and 4).

A nearly horizontal, tuffaceous, coarse-grained sandstone that is tentatively correlated with the silicic tuff units (Tr) crops out locally within the thermal area, especially at Group 4. The outcrops are too small to be shown on Plate 1. This sandstone in turn is overlain by nearly 1 m of coarse alluvial gravel that contains abundant euhedral calcite crystals. The

landscape is hummocky and a few water-filled pits occur where the gravel was excavated with dynamite; the purpose of this quarrying was to recover the calcite for cement manufacture. The original configuration of many of the springs and fumaroles also has been considerably altered by recent bulldozing, apparently to expand an adjacent soccer field.

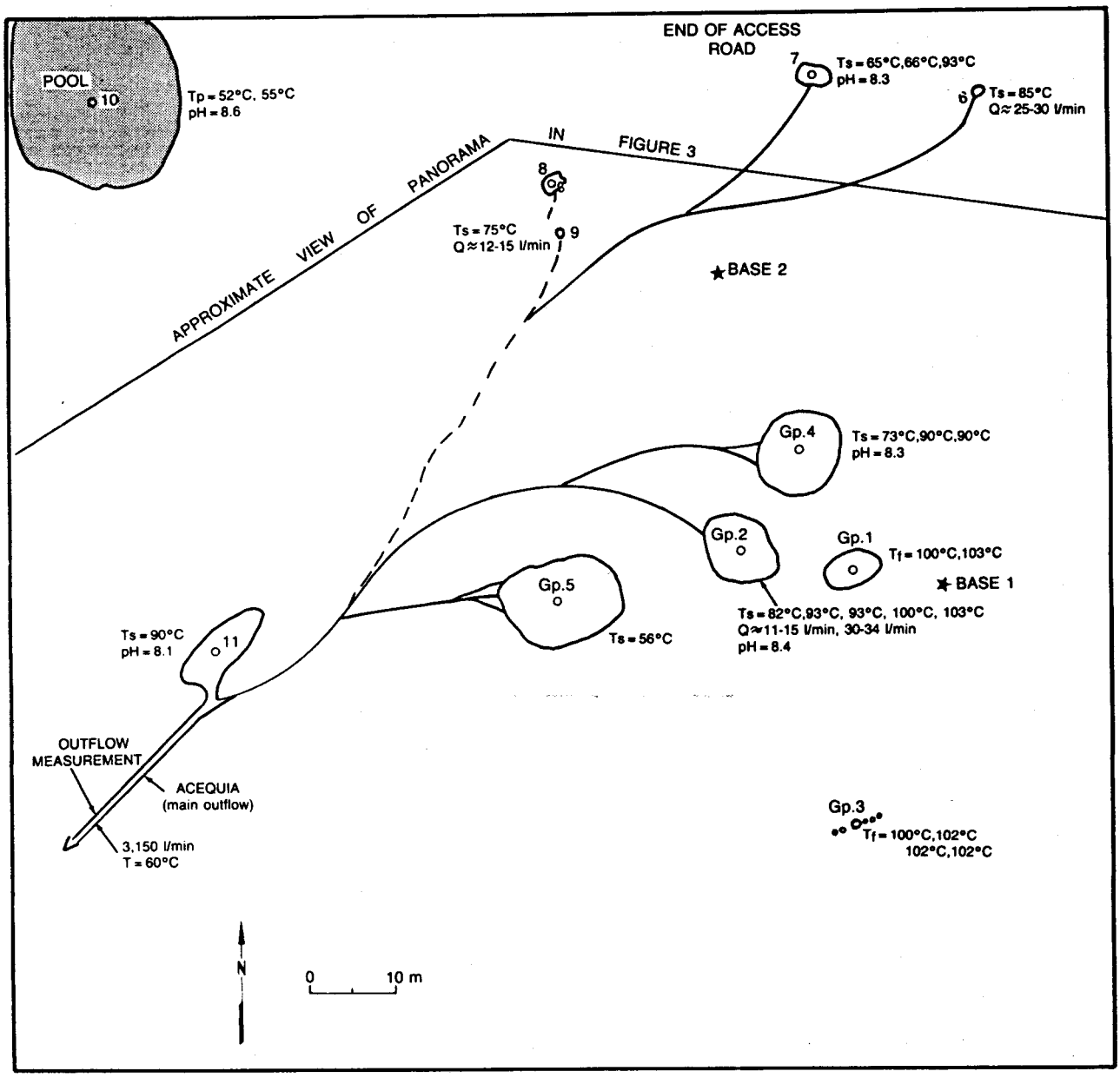


Figure 2. Spring map, main area, Pavana geothermal area.

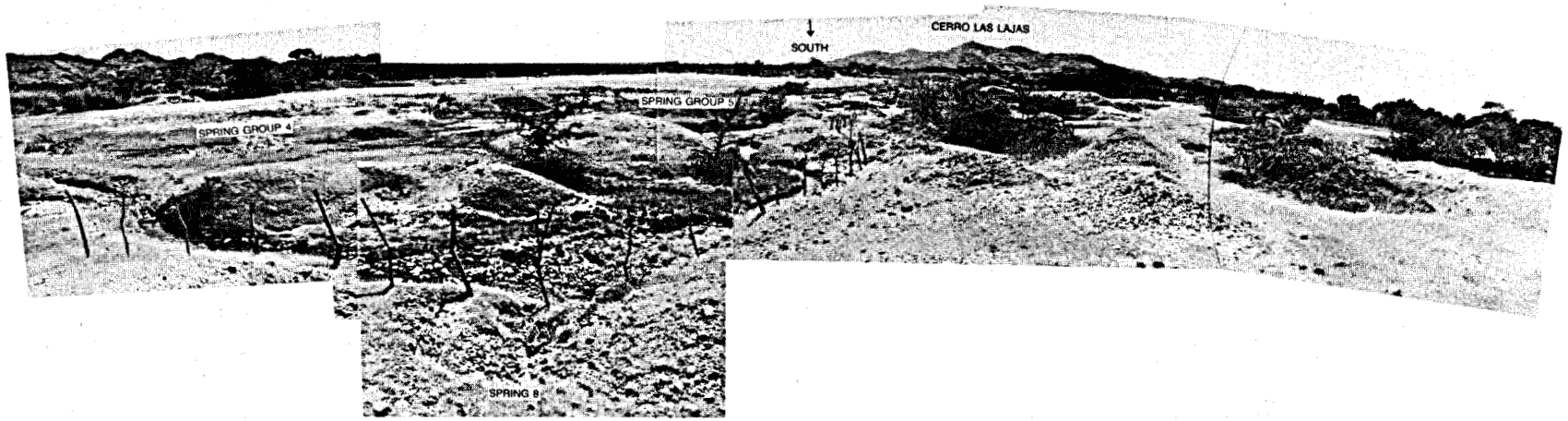


Figure 3. Partial panorama of the main spring area, Pavana, view approximately to south.

Main Spring Site (PV-3, PV-4 of Goff et al., 1986)

Spring Group 1

This is an area of many small fumaroles rising from alluvium in an 8- by 4-m area elongated on azimuth of N80°E. The ground around the fumaroles is covered with white sublimate.

Temperatures (six vents): 100°-103°C (212°-217°F)

Spring Group 2

There are 6 to 10 springs in this group, located where the bulldozed surface intersects the water table. The springs issue from an 8- by 10-m area.

Temperatures (springs): 82°-103°C (180°-217°F)

Estimated Flow Rate: 11-15 ℓ/min, 30-34 ℓ/min

Spring Group 3

This group is a 5-m-long line of fumaroles oriented along an azimuth of N70°E.

Temperatures (fumaroles): 100°-102°C (212-216°F)

Spring Group 4

Bulldozed holes form mudpits 0.2 to 0.5 m in diameter and 5 to 30 cm deep. There are 6 to 10 springs in an area about 10 by 10 m, and one fumarole issues from a pile of bulldozed debris.

Temperatures (springs): 73°-90°C (163°-194°F)

pH: 8.3

Spring Group 5

This 10- by 15-m area of diffuse seepage has been extensively bulldozed. There is only one active spring.

Temperature (spring) 56°C (133°F)

Spring Site 6

The single spring site at this location is found in a bulldozed area of gray soil.

Temperature (spring):	85°C (185°F)
Estimated Flow Rate	~25-30 ℓ/min

Spring Group 7

This group consists of two springs in an area about 4 by 3 m. The thermal water is depositing calcite within gravels around the springs.

Temperatures (springs):	65°C (149°F), 93°C (200°F)
pH:	8.3

Spring Sites 8 and 9

These two springs issue from the contact between flat-lying, coarse gray tuffaceous sandstone and a deposit of overlying cobbles. Springs 8 and 9 are a set of seeps ~3 m long.

Temperature (Spring site 9):	75°C (167°F)
Estimated Flow Rate:	12-15 ℓ/min

Spring Site 10

This spring fills a pool that is about 20 by 30 m and about 3 to 4 m at its deepest point. The pool is in hummocky terrain and is produced by blasting for extraction of calcite.

Temperature (pool):	55°C (132°F)
pH:	8.6

Spring Group 11

Several boiling springs fill a 4- by 13-m pool, elongated on an azimuth of ~N50°E. This is an area of mud and calcite crystals surrounded by hummocky terrain formed by blasting.

Temperature (pool):	90°C (194°F)
pH:	8.1

Subsidiary Spring Sites

1. Spring Sites Under Bridge Near Pavana (UTM Coordinates 656/814). Two springs are active here. One is boiling in a pit under the south side of the bridge. The other is a minor seep.

Temperature (springs):	101°C (214°F), 100°C (212°F)
pH:	8.3

2. Spring Sites South of Las Atillas (UTM coordinates 659/319; PV-5 of Goff et al., 1986). This manifestation is a set of seeps that issue from the contact between cemented alluvium and underlying basaltic lavas.

Temperature (spring):	50°C (122°F)
Estimated Flow Rate:	<5 ℓ/min

VI. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Hot springs of the Pavana geothermal area rise through a sequence of late Tertiary volcanic rocks along the northeast shore of the Gulf of Fonseca, Department of Choluteca. The oldest rocks in the area are deeply weathered andesitic lahars and interbedded andesitic lavas, intruded by dikes of similar composition. These rocks are overlain by a sequence of silicic lavas and tuffs, which are overlain in turn by mafic lava flows and deposits of basaltic scoria.

The structure of the area is dominated by northwest-trending, southwest-dipping normal faults, whose locations are inferred to correspond to nearly linear topographic scarps. The thermal waters appear to issue from such faults and are tentatively interpreted to be heated during deep circulation in a region of elevated heat flow. We see no evidence for a heat source related to nearby calderas as proposed by the earlier studies of Geonomics and UNDP.

The reservoir temperature indicated by chemical geothermometry (~150°C) is low for electrical generation by a steam-driven turbine but may be suitable for a binary system or direct use. Minimum natural outflow at the main thermal area is about 3000 ℓ/min of 60°C water. Other geothermal areas of Honduras, such as Platanares, San Ignacio, and Azacualpa exhibit substantially

higher base temperatures (Goff et al., 1986) and are thus more suited to the use of conventional steam-driven turbines. Pavana, however, includes the logistical advantages of being located near power-transmission lines and a major paved highway. It is also near some new agricultural projects where the water could be used for processing agricultural materials.

REFERENCES

Dalrymple, G. B., and Lanphere, M. A., 1969, Potassium-argon Dating: W. H. Freeman, San Francisco, California, 258 pp.

Geonomics, 1977, Report of geothermal feasibility studies in Honduras: unpublished consultant report.

GeothermEx, Inc., 1980, Report of the activities and interpretation of results of the geothermal project of Honduras 1979-1980, v. 1: unpublished consultant report RLA/76/012, Berkeley, California.

Goff, F., Grigsby, C., Shevenell, L., and Paredes, J. R., 1985, Hydrogeochemical exploration of geothermal systems in Honduras: Trans. Am. Geophys. Union, v. 66, p. 1155.

Goff, F., Truesdell, A., Grigsby, C. O., Janik, C. J., Shevenell, L., Paredes, J. R., Gutiérrez, J. W., Trujillo, Jr., P. E., and Counce, D., 1986, Geochemical prospecting of six thermal sites, Honduras, Central America: Los Alamos National Laboratory report LA-10785-MS (to be published).

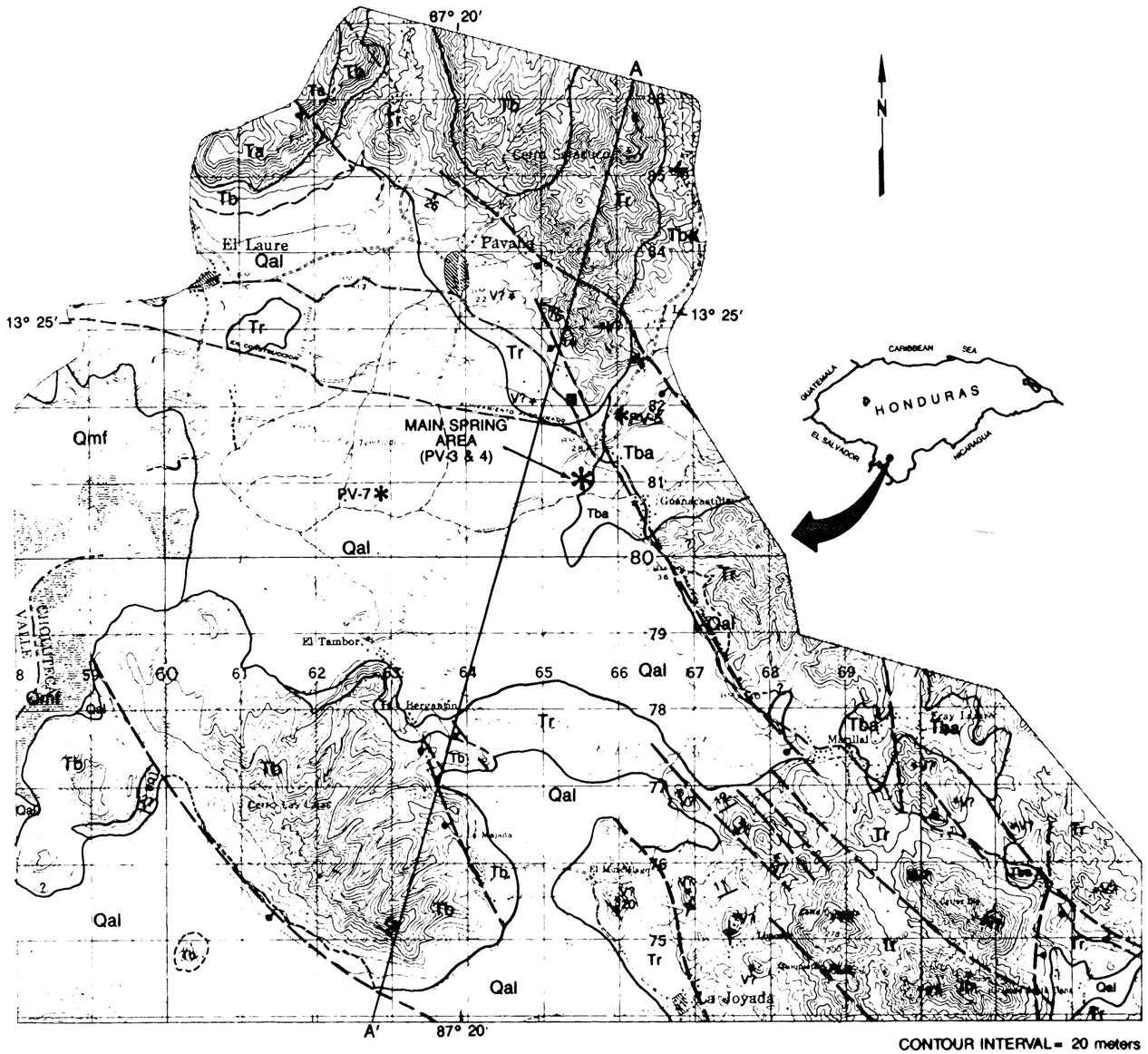
Ingamells, C. O., 1970, Lithium metaborate flux in silicate analysis: Anal. Chim. Acta, v. 52, pp. 323-334.

Steiger, R. H., and Jager, E., 1977, Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmo-chronology: Earth Planet. Sci. Lett., v. 36, pp. 359-362.

Williams, H., and McBirney, A. R., 1969, Volcanic History of Honduras, Univ. of Calif. Publ. in Geol. Sci., v. 85, 101 pp.

GEOLOGY OF THE PAVANA GEOTHERMAL AREA
DEPARTAMENTO DE CHOLUTECA, HONDURAS

PLATE 1



Scale 1:50,000

1 ½ 0 1 2 3 Statute Miles

1000 500 0 1000 2000 3000 4000 Meters

1000 500 0 1000 2000 3000 4000 Yards

1 ½ 0 1 2 3 Nautical Miles

EXPLANATION

QUATERNARY

Qmf MUDS OF MANGROVE FLATS

Qal ALLUVIUM
Thin deposits of alluvium blanketing low areas between structural blocks

TERTIARY

Ta UPPER ANDESITIC LAVA FLOWS

Tb UPPER BASALTIC LAVA FLOWS AND BRECCIAS
Basaltic lava flows with interbedded basaltic laharic breccias; includes minor interbedded andesitic lava flows and laharic breccias

Tr SILICIC LAVAS, TUFFS AND PYROCLASTIC FLOWS
Rhyolitic – rhyodacitic domes and associated tuff rings and pyroclastic flows. K – Ar age determination on lava from Cerro Saracuco of 5.2 ± 0.2 Ma.

Tba BASALTIC AND ANDESITIC BRECCIAS AND LAVA FLOWS
Basaltic and andesitic lava flows; interbedded with basaltic and andesitic laharic breccias

SYMBOLS

——— LITHOLOGIC CONTACT (approximately located; dashed where uncertain)

—⊤— FAULT (bar and ball on downthrown side)

15 FLOW FOLIATION IN SILICIC LAVAS

15 STRIKE AND DIP OF BEDS

STRIKE OF VERTICAL DIKE

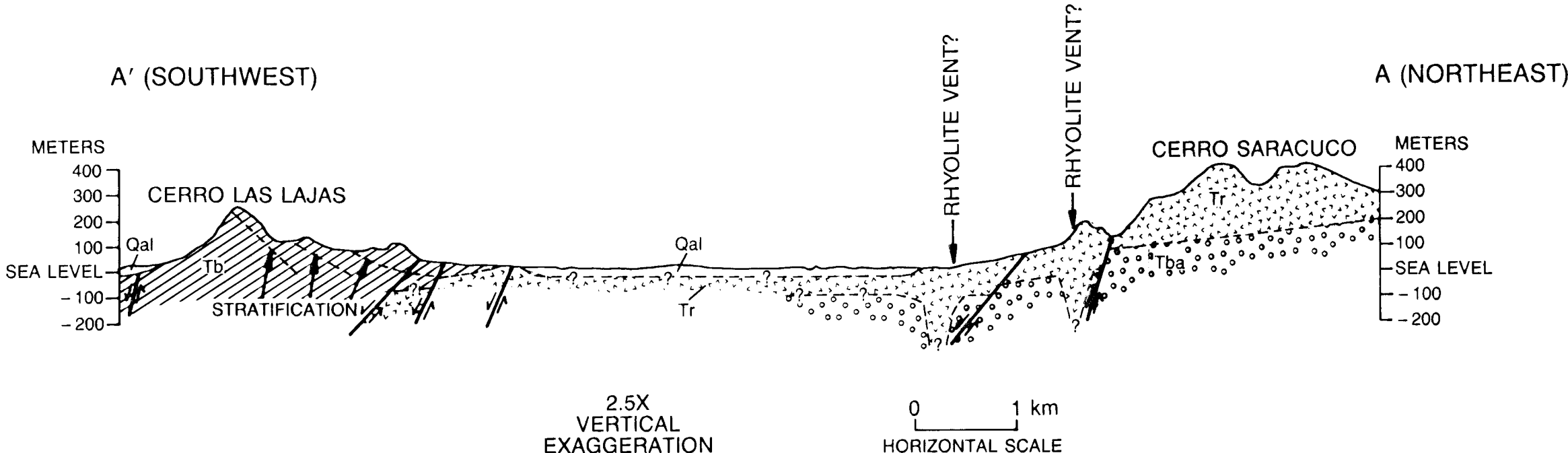
V? POSSIBLE LOCATION OF SILICIC VENT

PV-5 LOCATION OF THERMAL SPRINGS (see detailed map of thermal spring site in text)

■ LOCATION OF SAMPLE FOR K – Ar DETERMINATION

PLATE 2

SCHEMATIC GEOLOGIC CROSS SECTION OF THE PAVANA GEOTHERMAL AREA

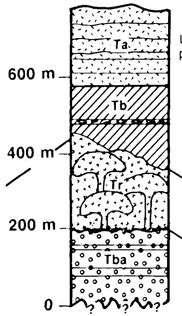


3

STRATIGRAPHIC SECTIONS OF STRUCTURAL BLOCKS, PAVANA GEOTHERMAL AREA

PLATE 3

CERRO SARACUCO



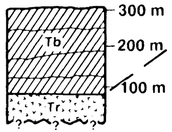
UPPER OLIVINE ANDESITE (Ta). Porphyritic olivine andesite flows with plagioclase, augite and olivine phenocrysts.

UPPER BASALT (Tb). Basaltic to andesitic breccia that locally exhibits crude bedding, with angular fragments of basalt and andesite in a matrix of mafic ash. Basaltic lava flows are common in the lower 25 m of the section. Basalts are are porphyritic with augite, plagioclase, magnetite and rare olivine phenocrysts.

SILICIC LAVA FLOWS AND TUFFS (Tr). Rhyolitic to rhyodacitic domes formed from light grey to white flow – banded lavas, with associated tuffs. Both lavas and tuffs contain phenocrysts of plagioclase, biotite, magnetite and rare augite. Domes schematically illustrated as mushroom – shaped bodies.

LOWER BASALT AND ANDESITE Basaltic and andesitic breccias and lava flows. Crossed by dikes of similar composition.

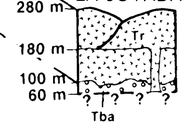
CERRO LAS LAJAS



UPPER BASALT (Tb). Basaltic to andesitic breccia that locally exhibits crude bedding, with angular fragments of basalt and andesite in a matrix of mafic ash. Basaltic lava flows are common in the lower 25 m of the section. Basalts are are porphyritic with augite, plagioclase, magnetite and rare olivine phenocrysts.

SILICIC PYROCLASTIC FLOWS (Tr). These rocks contain as much as 20% lithic fragments of basalt and andesite up to 25 cm in size and 0.5 – 2.0 mm silicic pumices in a matrix of recrystallized silicic ash. Phenocrysts of magnetite, plagioclase, biotite and rare augite are also present in the tuffs.

LA JOYADA



SILICIC LAVA FLOWS AND TUFFS (Tr). Rhyolitic to rhyodacitic domes formed from light grey to white flow – banded lavas. Domes sit within eroded silicic tuff rings. Both lavas and tuffs contain phenocrysts of plagioclase, biotite, magnetite and rare augite. Domes schematically illustrated as mushroom – shaped bodies.

LOWER ANDESITIC LAVAS AND BRECCIAS (Tba). Andesitic lava flows with minor interlayered andesitic lahars.

LA-10864-MS

UC-66b
Issued: September 1987

Geología del Area Geotérmica de Pavana Departamento de Choluteca, Honduras, Centroamérica

Informe de Campo

El Equipo de Geología del Area de Pavana

D. B. Eppler
G. Heiken
K. Wohletz
W. Flores*
J. R. Paredes*
W. A. Duffield**

*Official Visitor at Los Alamos. Empresa Nacional de Energía Eléctrica, Apartado 99, Tegucigalpa, HONDURAS.
**Official Visitor at Los Alamos. U.S. Geological Survey, 2255 North Gemini Drive, Flagstaff, AZ 86001.

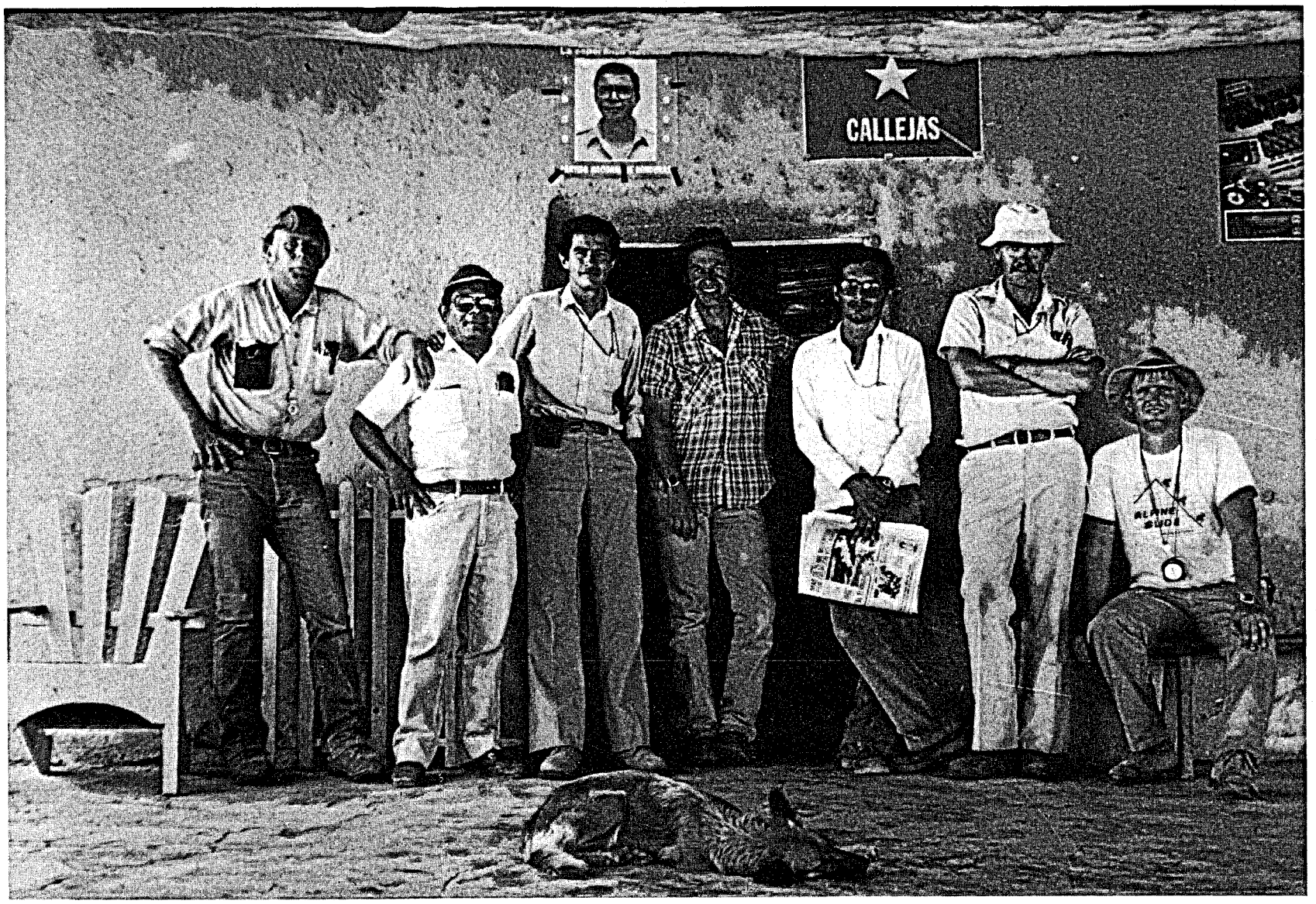
Los Alamos
Los Alamos National Laboratory
Los Alamos, New Mexico 87545

LAMINAS

Lámina 1. Mapa geológico del área geotérmica de Pavana.

Lámina 2. Sección transversal geológica del área geotérmica de Pavana.

Lámina 3. Sección estratigráfica del área geotérmica de Pavana.



El Grupo de Investigación Geotérmica en el Area de Pavana. Atrás, de izquierda a derecha: Dean B. Eppler, del Laboratorio Nacional de Los Alamos (Los Alamos); German Flores, chofer de la Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE), Wilmer Flores, ENEE; Wendell A. Duffield, U.S. Geological Survey; Rodrigo Paredes, ENEE; Grant Heiken, Los Alamos; Kenneth Wohletz, Los Alamos. En frente: Mancha.

RESUMEN EJECUTIVO

La investigación del área geotérmica de Pavana es parte del reconocimiento de los recursos geotérmicos de Honduras, llevado a cabo por un equipo de geólogos del Laboratorio Nacional de Los Alamos, el Servicio Geológico de los Estados Unidos de América y la Empresa Nacional de Energía Eléctrica de Honduras. La evaluación forma parte del Proyecto de Recursos Energéticos en Centroamérica respaldado por la Agencia para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos.

Se escogió Pavana como una de las áreas iniciales seleccionadas a estudiarse en detalle porque estudios previos de reconocimiento indicaron la presencia de recursos potenciales. El propósito del estudio geológico era de evaluar el sistema geotérmico para ver si se justificarían reconocimientos geofísicos y luego perforación. Todos los estudios llevados a cabo fueron diseñados para proveer a científicos e ingenieros los datos para evaluar el potencial del área geotérmica de Pavana para la producción de energía eléctrica.

El área de Pavana ha pasado por una larga historia de exploración geotérmica. Se estudió por Geonomics, Inc., a mediados de la década de los 70, como parte de un esfuerzo del gobierno hondureño para desarrollar la energía geotérmica. Luego, bajo el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, se efectuó un cartografiado geológico y la compañía GeothermEx, Inc., llevó a cabo un muestreo de los manantiales calientes.

El área geotérmica de Pavana está en la parte sur del país cerca del Golfo de Fonseca. Está a 3 km al sureste del pueblo de Pavana, a unos 200 m del cruce entre el Río Agua Caliente y la Carretera Panamericana. El área consiste en muchos manantiales de poco flujo y chimeneas de vapor, y parece semejarse a muchas áreas geotérmicas de la provincia de Cuenca y Cordillera en el oeste de los Estados Unidos. En dichos sistemas, las aguas circulan por fracturas en la corteza terrestre y se calientan por circulación a grandes profundidades dentro de una región de corteza delgada con temperaturas elevadas.

La temperatura de base del reservorio (la medida de la temperatura correspondiente a la más reciente equilibración del agua con la roca

circundante), indicada por medio de la geotermometría, es de aproximadamente 150°C (Goff y otros, 1986), y está de acuerdo con los resultados de los análisis geoquímicos por GeothermEx, Inc. La temperatura indicada es mucho más baja que en las otras áreas geotérmicas del país, por ejemplo, Platanares, San Ignacio, y Azacualpa. También es demasiado baja para la generación de energía eléctrica con turbina a vapor; sin embargo, puede servir para un sistema binario donde el calor del agua termal se utilice para hervir otro fluido más volátil, con el cual se pueda operar una turbina.

El área termal principal de Pavana tiene un flujo de casi 3000 ℓ/min de agua a 60°C. Esta energía potencial considerable se podría utilizar directamente. Pavana disfruta de ventajas logísticas tales como el de estar localizada cerca de líneas de transmisión de electricidad, una carretera principal pavimentada, y proyectos agrónomos nuevos donde el agua podría usarse para procesar productos agrícolas. Recomendamos no continuar con investigaciones adicionales antes de establecer un aprovechamiento específico para el calor geotérmico de Pavana.

GEOLOGIA DEL AREA GEOTERMICA DE PAVANA
DEPARTAMENTO DE CHOLUTECA, HONDURAS, CENTROAMERICA

Informe de Campo

por

El Equipo de Geología del Area de Pavana

Laboratorio Nacional de Los Alamos	Empresa Nacional de Energía Eléctrica	Servicio Geológico de los E.E.U.U.
D. B. Eppler	W. Flores	W. A. Duffield
G. Heiken	J. R. Paredes	
K. Wohletz		

RESUMEN

El área geotérmica de Pavana está situada en la parte sur de Honduras cerca del Golfo de Fonseca. Esta región está subyacida por rocas volcánicas del Terciario Tardío. En las montañas cercanas a los manantiales geotérmicos las rocas características son brechas de laháricas intermedias a máficas, sobreyacidas por tobas y lavas silícicas, que a su vez yacen debajo de brechas intermedias a máficas, lavas y tobas. Los volcanes Cuaternarios más cercanos están a 40 km al suroeste, donde la cadena de volcanes activos centroamericanos cruzan la boca del Golfo de Fonseca.

En la estructura del área de Pavana predominan las fallas normales de rumbo noroeste y de buzamiento suroeste. Esta estructura se ve topográficamente en los escarpes de rumbo noroeste que limitan bloques, separados por valles asimétricos con un relleno de aluvión de poco espesor.

Las aguas termales aparentemente fluyen a través de las fallas normales y se cree que se calientan por circulación profunda en zonas de fallas dentro de un ambiente regional de elevado flujo de calor. El flujo natural

del área térmica principal es de 3000 ℓ/min a una temperatura de 60°C. La geotermometría (Goff y otros, 1986) indica que la temperatura de base en el reservorio es de 150°C. El magmatismo que provocó el emplazamiento de las rocas volcánicas del Terciario es demasiado viejo como para considerarlo la fuente de calor localizada en la corteza terrestre. Sin embargo, el flujo de calor elevado de la región podría ser resultado del calor residual del magma Terciario aumentado con el calor generado por el cercano sistema de subducción activo del Cuaternario. Por otro lado, la fuente de calor podría estar relacionada con el adelgazamiento de la corteza terrestre debido a un proceso de extensión regional, como se ha postulado para otras áreas geotérmicas de Honduras.

I. INTRODUCCION

El estudio aquí presentado se llevó a cabo por un equipo de geólogos del Laboratorio Nacional de Los Alamos, el Servicio Geológico de los Estados Unidos y la Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE), como parte de un programa auspiciado por La Agencia para el Desarrollo Internacional (AID) de los Estados Unidos, para el desarrollo de los recursos geotérmicos de Honduras. El equipo de geólogos realizó el cartografiado geológico de un área de 120 km^2 que rodea las manifestaciones geotermales cerca de la aldea de Pavana, en el Departamento de Choluteca (Figura 1). Como parte del mismo programa, el muestreo geoquímico de los manantiales calientes se terminó en mayo de 1985 (Goff y otros, 1986).

Los manantiales calientes principales están aproximadamente a 3 km al sureste de Pavana y a unos 200 m al sur de la Carretera Panamericana. Los otros están situados al nordeste y al oeste del área principal. La geología consiste en rocas volcánicas del Terciario, expuestas en montañas falladas en bloque.

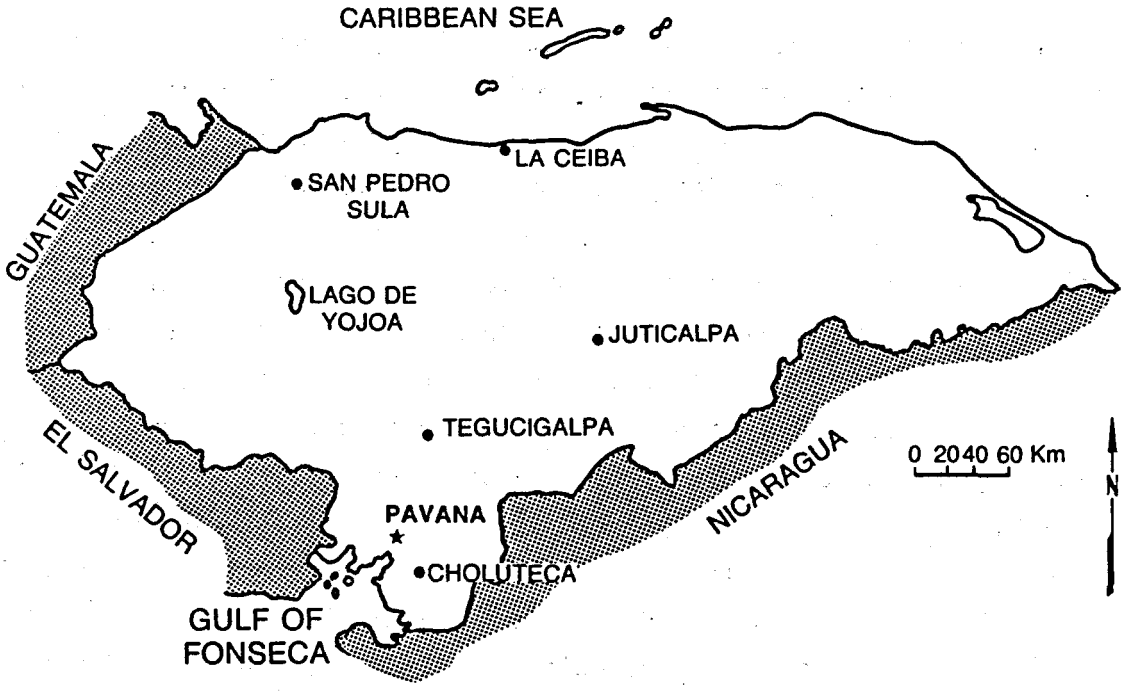


Figura 1. Mapa del área geotérmica de Pavana, Honduras.

II. TRABAJOS PREVIOS

Williams y McBirney (1969) describieron brevemente las rocas volcánicas a lo largo de la costa del Golfo de Fonseca (cerca de Pavana) como lavas andesíticas basálticas interestratificadas, depósitos de lahar, abundantes rocas volcaniclásticas de grano fino e ignimbritas. Todas estas unidades han sido cortadas por "diques delgados verticales y subverticales...[por los que] probablemente se alimentaron los flujos de superficie" (Williams y McBirney, 1969, p. 61). Cerca del pueblo de Nacaome, el equipo de Williams y McBirney (1969) recolectó una muestra de un dique de dacita biotítica que dio una edad de K-Ar de 7.1 Ma (1 Ma = 1 millón de años). Sobre esta base concluyeron que la mayoría de las rocas en el área son del Mioceno Tardío o del Plioceno. También notaron que la región contiene muchos bloques limitados por fallas.

El área geotérmica de Pavana tiene la historia más larga de exploración geotérmica en Honduras. Geonomics, Inc., estudió el área a

mediados de la década de los 70, como parte de un esfuerzo del gobierno hondureño para desarrollar la energía geotérmica. El estudio de Geonomics incluyó cartografía fotogeológica y un control de campo limitado en las áreas termales ya conocidas y la cordillera adyacente. Un reporte preliminar, preparado por Geonomics en 1977, propuso la existencia de tres calderas en el área de Pavana y sugirió que la fuente de calor para los manantiales termales tenía relación con dichas calderas. Geonomics cayó en bancarrota poco después, y por eso no pudo terminar los estudios.

Un estudio subsecuente de Pavana realizado por el Programa de las Naciones Unidas/GeothermEx, Inc., llevó a cabo un cartografiado geológico y también un levantamiento geoquímico. El análisis químico de las aguas termales indica temperaturas de base del reservorio de alrededor de 150°C ± 10°C (GeothermEx, 1980). Goff y otros (1986) obtuvieron resultados similares. La cartografía geológica cerca del área geotérmica indica que la región se compone de brecha basáltica, lavas basálticas y andesíticas, y tobas y lavas riolíticas.

III. DESCRIPCION DE RELACIONES ESTRATIGRAFICAS Y UNIDADES DE ROCAS

El área cartografiada en el estudio presente se puede dividir en tres bloques rocosos fallados llamados el bloque Cerro Saracuco (norte), el bloque Cerro Las Lajas (suroeste) y el bloque La Joyada (sureste). Dichos bloques están separados por tierras bajas que están cubiertas mayormente con depósitos de aluvión. Una secuencia estratigráfica se estableció en cada bloque, y se hicieron correlaciones tentativas entre ellas, basadas principalmente en la apariencia similar de las rocas silícicas dentro de cada bloque que se interpretaron como de la misma edad o parte de un período de erupción (Láminas 1, 2, 3). En términos generales, la sección estratigráfica compuesta del área entera del mapa consiste en una secuencia basal máfica (símbolo en el mapa, Tba), que subyace a una secuencia silícica (símbolo en el mapa, Tr), que a la vez subyace a otra secuencia máfica (símbolos en el mapa, Tb y Ta). Cada una de las secuencias antes mencionadas es de 200 a 300 m de espesor. Rocas de las tres secuencias afloran en la parte norte del área en el

bloque Cerro Saracuco. Rocas de las secuencias silícica y máfica superior (Tb) afloran en la parte suroeste, en el bloque del Cerro las Lajas, y rocas de las dos sequencias inferiores afloran en la parte sureste en el bloque La Joyada. Todas las rocas supuestamente son del Terciario. Un clasto del flujo de brecha basal de lava silícica en el bloque Cerro Saracuco se dató por K-Ar en 5,2 ± 0,2 Ma (Tabla 1).

A. Descripciones Petrográficas de las Unidades de Rocas

1. Rocas Basálticas Inferiores, Brechas y Lavas Andesíticas (Tba).

Dichas rocas afloran en la base del bloque Cerro Saracuco y también en porciones del bloque La Joyada; consisten en flujo de lava basáltica y andesítica y depósitos de fragmentos. Los basaltos son porfídicos y por lo general tienen fenocristales de plagioclasa, augita y magnetita, distribuidos en una matriz de grano muy fino de mineralogía idéntica. Algunos fenocristales de plagioclasas están zoneados según su composición, y parecen haber sufrido dos etapas de crecimiento, las cuales se indican por bordes delgados con continuidad óptica que los cubren.

TABLA I. Edad Potasio-Argón de Lava Silícica del Area Geotérmica de Pavana, Departamento de Choluteca, Honduras (Vea Lámina 1 para localización de muestras).

No. Lab.	Tipo de Roca	Material Fechado	K_2O Peso (%)	$^{40}Ar^{rad}$ (mol/g)	$^{40}Ar^{rad}$ (%)	Edad (Ma)
861009	Brecha Basal de Lava Silícica	Biotita	8,27	$6,24270 \times 10^{-11}$	33,2	5,2 ± 0,2

Nota: Toda la preparación de la muestra y los análisis se hicieron por el Laboratorio de Isótopos Geológicos del Servicio Geológico de los Estados Unidos, localizado en Menlo Park, California, y utilizando las técnicas descritas en Dalrymple y Lanphere (1969). El potasio

fue analizado por la técnica de fusión con metaborato de litio, en un fotómetro de llama; el litio sirvió como estandard interno (Ingamells, 1970). El error estadístico, indicado por el símbolo ±, es el estimado de la medida de desviación estandard de precisión analítica. La edad de K-Ar se calculó con las constantes para la desintegración radioactiva espontánea y la cantidad de ^{40}Ar recomendado por la Subcomisión sobre Geocronología de la Unión Internacional de las Ciencias Geológicas (Steiger y Jager, 1977). Las constantes son:

$$\gamma_t = 0{,}581 \times 10^{-10} \text{ año}^{-1} ,$$

$$\gamma_b = 4{,}962 \times 10^{-10} \text{ año}^{-1} ,$$

y

$$^{40}K/K_{total} = 1{,}167 \times 10^{-4} \text{ mol/mol} .$$

La determinación de la edad fue hecha por E. H. McKee, del Servicio Geológico de Los Estados Unidos, Menlo Park, California.

Las andesitas tienen fenocristales de plagioclasas zoneadas, augita, hipersteno y magnetita distribuidos en una matriz traquítica de plagioclasa, magnetita y augita. Patrones de alteración sericítica(?) dentro de los fenocristales de plagioclasas zoneados nos indican zonas de crecimiento normales con núcleos cálcicos y con bordes más sódicos. Algunas andesitas también tienen hornblenda en su fase fenocristalina. También, la plagioclasa y la magnetita ocurren en las fases fenocristalinas. Los fenocristales están en una matriz de vidrio alterado de color verde-café, agujas de plagioclasa, magnetita y apatito. Patrones de alteración dentro de los fenocristales de plagioclasas indican que algunos cristales tienen zonas oscilatorias.

2. Flujo de Lava Silícica, Flujo Piroclástico, y Tobas (Tr). Los flujos de lava silícica y tobas afloran en los bloques Cerro Saracuco y La Joyada. De acuerdo a su mineralogía, las lavas parecen ser riolíticas y riodacíticas. Todas las lavas tienen bandas de flujo. Por lo general, contienen fenocristales excepcionales de plagioclasa parcialmente reabsorbida, biotita y magnetita en una mesostasa de cuarzo de grano muy fino y feldespato alcalino que probablemente sea de vidrio desvitrificado. De vez en cuando, se encuentra una textura perlítica de fracturas concéntricas en forma de nidos.

La mineralogía de las tobas silícicas sugiere que la composición de estas rocas es de riolítica a riodacítica. Los fragmentos líticos son complejos en algunos casos. Una muestra del Cerro Las Lajas contiene numerosos fragmentos líticos de roca basáltica con tamaños de grano, textura y mineralogía variable. Algunas de estas tobas están fuertemente recristalizadas, y su textura original acicular se ha destruido. Además de los fragmentos líticos, estas rocas contienen fragmentos angulares de plagioclasa, magnetita, biotita y algunos de augita. Algunos fragmentos de pumita están en parte aplastados, lo cual sugiere soldadura menor post-deposicional.

3. Basalto Superior y Andesita Olivina (Tb, Ta). Los basaltos superiores se encuentran solamente en los bloques Cerro Saracuco y Cerro Las Lajas. Los basaltos son porfiríticos, con plagioclasa, augita, magnetita y unos pocos fenocristales de olivino. La matriz contiene cristales largos de plagioclasa, augita y magnetita.

La andesita olivínica superior solamente se encuentra en el límite norte del bloque Cerro Saracuco. Este tipo de roca es porfirítico, con reabsorción parcial de la olivina con bordes de idingsita, plagioclasas zoneadas y fenocristales de augita en una matriz de plagioclasa, augita y magnetita de grano muy fino. Un análisis de la matriz con una microsonda electrónica nos indica que la matriz es aproximadamente de una composición riolítica. Por consiguiente, creemos que dichas rocas sean andesitas, a pesar del contenido fenocristalino tipo basáltico.

B. Relaciones Estratigráficas

1. Bloque Cerro Saracuco. La sección estratigráfica más gruesa (>700 m) está expuesta en el bloque Cerro Saracuco (Lámina 3). La parte basal de la sección consiste de brechas andesíticas y laháricas (Tba) cuyos guijarros con matriz de plagioclasa y piroxeno están cementados por una matriz limosa. Dichas brechas son masivas, sin estratificación aparente, y varían de color del gris a morado y verde. Unos pocos diques subverticales de composición andesítica, de 1 a 3 m de ancho, cortan la secuencia de brecha; algunas lavas andesíticas platiformes diaclasadas, con espesor hasta de 20 m, también están intercaladas dentro de la secuencia. Hay poca exposición, pero parece que el flujo basal buza ligera a moderadamente hacia el nordeste. Podemos interpretar la secuencia de la brecha, las lavas interestratificadas y los diques emplazados, como parte de un estratovolcán o tal vez partes superpuestas de más de un estratovolcán. No hay evidencia alguna para ayudarnos a encontrar el centro (o centros) del volcán, pero los buzamientos entre moderados y suaves en la base de la colada de lava indican que los afloramientos cartografiados representan las secciones inferiores del flanco de uno o más conos.

La secuencia de brechas laháricas andesíticas subyace a un complejo de lavas silícicas y depósitos piroclásticos relacionados (Tr). Exposiciones individuales de los depósitos piroclásticos presentan un espesor hasta de 80 m, y varían desde lapilli bien seleccionado y ceniza en estratos generalmente de unos pocos centímetros de grueso hasta estratos masivos, mal seleccionados, de varios metros de grueso. Los depósitos gruesos y poco seleccionados parecen haber sido emplazados en forma de flujos piroclásticos. El carácter de origen volcánico primario de las tobas bien estratificadas de origen primario volcánico está indicado por combaduras de los planos de estratificación debajo de bombas balísticamente depositadas, y por estructuras de médanos relacionadas con tipo "surge" en muchos de los estratos moderadamente seleccionados y delgados. Los clastos líticos tanto en la toba estratificada como en los flujos piroclásticos son de ≤30 cm de largo, e incluyen basalto, andesita y tipos

litológicos silícicos. Estos pueden formar hasta el 75% de algunos de los estratos, pero generalmente forman parte en menos del 10%. Pumitas silícicas con biotita son comunes, en forma de lapilli y en algunos clastos más grandes. Zonas ricas en lapilli de pumita son comunes en los estratos que se interpretan de tipo "surge". La secuencia piroclástica entera tiene una matriz de ceniza silícica que varía entre los colores de blanco a café claro a rojo.

Los flujos de lava riodacíticos-riolíticos característicamente forman bandas que varían mucho en su orientación, lo cual es típico de domos silícicos y flujos. En la base de la colada de lava hay zonas de brecha con un espesor de hasta 10 m. Domos y flujos probablemente se encerraron completamente en una caparazón de brecha monolitológica poco después de su emplazamiento, pero dicha brecha se ha erosionado, con la excepción de los sitios protegidos por rocas superimpuestas penecontemporáneas. Se tomó una muestra de un fragmento de brecha de la base de una colada para determinar su edad por K-Ar (localización en Lámina 1), y un concentrado de biotita nos indicó una edad de 5,2 ± 0,2 Ma (Tabla 1).

La secuencia de rocas silícicas representa una acumulación compuesta por los productos de muchas erupciones de varias chimeneas. La fase inicial eruptiva en cada chimenea aparentemente produjo un anillo de toba y un manto piroclástico adyacente, seguido por una extrusión de lava. Evidencia geomórfica de varias chimeneas se puede notar en las fotografías aéreas por la forma de cuerpos casi circulares de lava. La disposición casi concéntrica hacia adentro de las secuencias de rocas piroclásticas puede indicar la existencia de otras chimeneas. Aunque el número total de chimeneas se desconoce, como también el período de tiempo de las erupciones silícicas, las semejanzas petrográficas indican que las lavas antes mencionadas son co-magmáticas.

La secuencia silícica subyace rocas fragmentadas basálticas y andesíticas, y coladas de lava interestratificadas (Tb, Ta). Las rocas fragmentadas andesíticas incluyen depósitos de bloques angulares de $\leqslant$20 cm de diámetro con poca matriz y bien clasificados, depósitos poco consolidados y depósitos laháricos con guijarros incrustrados en una matriz limosa. La estratificación se puede ver muy poco, pero en los riscos del

noroeste del área estudiada es casi horizontal. El contacto con la secuencia silícica inferior está expuesto aquí y revela muchos metros de relieve y una meteorización profunda y erosión de las rocas silícicas.

Las rocas superiores del bloque Cerro Saracuco consisten en una serie de coladas de lava andesítica de varios metros de espesor y platiformes (Ta). Dichas rocas forman una capa relativamente plana en un cerro ancho al noroeste del área, y al parecer, son las rocas volcánicas más recientes del área.

2. Bloque La Joyada. La parte más baja del bloque La Joyada consiste en lavas máficas y rocas fragmentadas máficas (Tba). Las rocas fragmentadas incluyen depósitos de escoria y unidades laháricas de clastos basálticos adentro de una matriz limosa. Los afloramientos de estas rocas máficas tienen solamente unos pocos metros de espesor. La mayor parte de dicho bloque consiste en tobas y lavas silícicas.

Las rocas silícicas se parecen petrográficamente a las que están expuestas en el bloque Cerro Saracuco y por ello tentativamente pueden correlacionarse con la misma época. Las rocas silícicas de La Joyada generalmente son pórfido de feldespato y biotita, y ocurren en forma de anillos de toba, domos y flujos. Varias chimeneas han producido secuencias sobrepuestas de tobas y lavas sin la influencia aparente de meteorización ni de erosión, lo cual indica que en efecto, estuvieron activas simultáneamente. Las lavas consisten en flujo foliado con matriz devitrificada. En esta región las lavas son perlíticas y las tobas se convierten por meteorización en minerales arcillosos, lo cual indica un ambiente saturado de agua en el momento de la depositación.

3. El Bloque Cerro Las Lajas. Las exposiciones de las rocas inferiores en el bloque Cerro Las Lajas consisten en tobas silícicas que parecen haberse depositado como flujos piroclásticos (Tr). Dichas unidades de flujo tienen hasta 80 m de espesor y están formadas por una matriz de ceniza y alrededor de 20% de fragmentos líticos y pumita-lapilli silícica. La mayoría de los fragmentos líticos son de basalto y unos cuantos son de andesita.

Los flujos piroclásticos silícicos subyacen a flujos masivos de lavas basálticas afíricas con un espesor total de alrededor de 50 m (Tb). Esta secuencia de flujos subyace por alrededor de 170 m de brecha basáltica a andesítica con clastos de hasta 1 m en su eje mayor. Por lo general, la brecha tiene clastos, con una matriz de ceniza máfica y lapilli escoriácea de color negro a gris. Algunos afloramientos están estratificados de forma poco definida, y existen las dos clases de gradación, la normal y la inversa. Estas rocas se supone que fueron depositadas por una parte como flujos de detrito, y por otra como precipitación cerca de una chimenea.

IV. ESTRUCTURA

Una cadena de volcanes activos, que representan la expresión superficial de magmatismo relacionado a la zona de subducción Mesoamericana, proyectan a través de la boca del Golfo de Fonseca. Asímismo, Pavana, al noroeste del golfo y alrededor de 40 km detrás de la cadena volcánica, está en un ambiente tectónico de trasarco. Dos volcanes basálticos del Cuaternario están ubicados cerca de la boca del golfo, y a juzgar por su tamaño relativamente pequeño y la falta aparente de una plataforma sustancial volcánica circundante del Cuaternario, esta parte de la cadena volcánica ha sido mucho menos activa que las partes adyacentes en El Salvador y Nicaragua.

La estructura dentro del área está generalmente controlada por fallas de rumbo noroeste. Este control estructural se puede ver claramente en la morfología de la región en forma de escarpes y corrientes rumbo noroeste (Lámina 1). Las fallas que se ven en los afloramientos incluyen fallas normales de buzamiento suroeste con un desplazamiento vertical de varios metros, además de las fallas antitéticas de buzamiento nordeste con un desplazamiento normal similar o menor. La existencia predominante de escarpes con la cara hacia el suroeste indica que todas las fallas principales normales se han movido hacia abajo para el suroeste. Fallas normales de varios rumbos con poco desplazamiento dentro de tobas silícicas tal vez estén relacionadas con asentamientos locales de estas tobas.

Los manantiales principales fluyen de gravas y arenas tobáceas del Terciario (demasiado limitadas para mostrarlas en Lámina 1) que tentativamente están relacionados, basándonos en su litología, con los depósitos piroclásticos silícicos del bloque Cerro Saracuco. El área de manantiales de agua caliente está más o menos a 0,5 km al suroeste de una zona de fallas de rumbo noroeste que limita el lado suroeste del mismo bloque (Lámina 1). El ambiente estructural indica que las aguas termales probablemente surgen desde una gran profundidad a lo largo de la zona limitada por fallas para luego fluir al suroeste lateralmente, por lo menos en parte, dentro de zonas permeables de poca profundidad de los depósitos tobáceos. El flujo lateral es de unos cientos de metros, si juzgamos por la distancia entre los manantiales y la traza de la falla principal más cercana de rumbo noroeste (Lámina 1). El área principal de aguas termales puede estar localizada en la intersección de dicha falla de rumbo noroeste con una falla de rumbo nordeste que fue cartografiada por el equipo de Geonomics, y que generalmente sigue el curso del Río Agua Caliente cerca de la Carretera Panamericana. En ese mapa se indica la existencia de tales fallas, pero nosotros no encontramos evidencia en la superficie para su verificación.

Generalmente, el sistema geotérmico de Pavana se asemeja a muchos del tipo de la provincia de Cuenca y Cordillera de los Estados Unidos. En tales sistemas, la estructura es predominantemente de fallas normales, y las aguas termales se presume circulan dentro de zonas de fallas. En esa provincia, el agua se calienta durante su circulación a grandes profundidades dentro de un ambiente regional de flujo de calor elevado. Los reservorios consisten en niveles permeables de la mismas zonas de fallas y/o formaciones permeables en la secuencia de rocas de dicha región. La única edad radiométrica (5,2 ± 0,2 Ma) determinada para la roca silícica en el área de Pavana, y el grado de erosión evidente en el terreno, implican que el volcanismo sucedió hace demasiado tiempo para tener correlación con depósitos activos de magma en la corteza terrestre. El flujo de calor elevado de la región puede deberse a una tectónica activa de carácter extensional que causa el adelgazamiento de la corteza terrestre o a consecuencia del magmatismo cercano relacionado al sistema

de subducción activo del Cuaternario. No existen hasta la fecha determinaciones del flujo del calor en los pozos de perforación en Honduras.

En los mapas geológicos hechos por Geonomics y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP) se muestran tres calderas como a 10 km, respectivamente, al noroeste, al norte y al oesnoroeste del área termal principal. Durante nuestro reconocimiento encontramos poca evidencia de la existencia de tales estructuras aparte de ser cuencas, algunas de hasta varios kilómetros de ancho, que asemejan la forma de una caldera. No hay evidencia alguna de mantos piroclásticos de gran volumen y espesor que indiquen el colapso de una caldera, lo cual sería de esperar. Así que podemos concluir que no hay calderas y que el área geotérmica no está relacionada a dichas estructuras.

V. DESCRIPCION DE LAS MANIFESTACIONES TERMALES

El área termal principal de Pavana está situada a alrededor de 200 m al suroeste de la intersección del Río Agua Caliente con la Carretera Panamericana (hoja de San Lorenzo, 2756 III, en las coordenadas 655/812 del UTM; Lámina 1). Muchos manantiales y fumarolas de poco flujo están dispersas en un área de varios miles de metros cuadrados. Los grupos de manifestaciones se describen abajo y se identifican en las Figuras 2 y 3. El flujo total del área principal pasa por un sólo canal, donde medimos 3150 ℓ/min a 60°C (PV-3 y PV-4).

Arenisca de grano grueso, tobácea, casi horizontal, que tentativamente se correlaciona con las unidades de toba silícica (Tr), aflora en el área termal, sobre todo en el Grupo 4. Los afloramientos son demasiado pequeños para incluirlos en la Lámina 1. Dicha arenisca subyace a casi 1 m de grava gruesa aluvial que contiene bastantes cristales euhedrales de calcita. Se observan muchos montículos y unos cuantos hoyos llenos de agua, de donde se extraía grava con dinamita para recobrar la calcita y fabricar cemento. La configuración original de muchos de los manantiales y fumarolas ha sido alterada considerablemente por la acción de nivelar el terreno con tractor, aparentemente con el propósito de agrandar un campo de balompié adyacente.

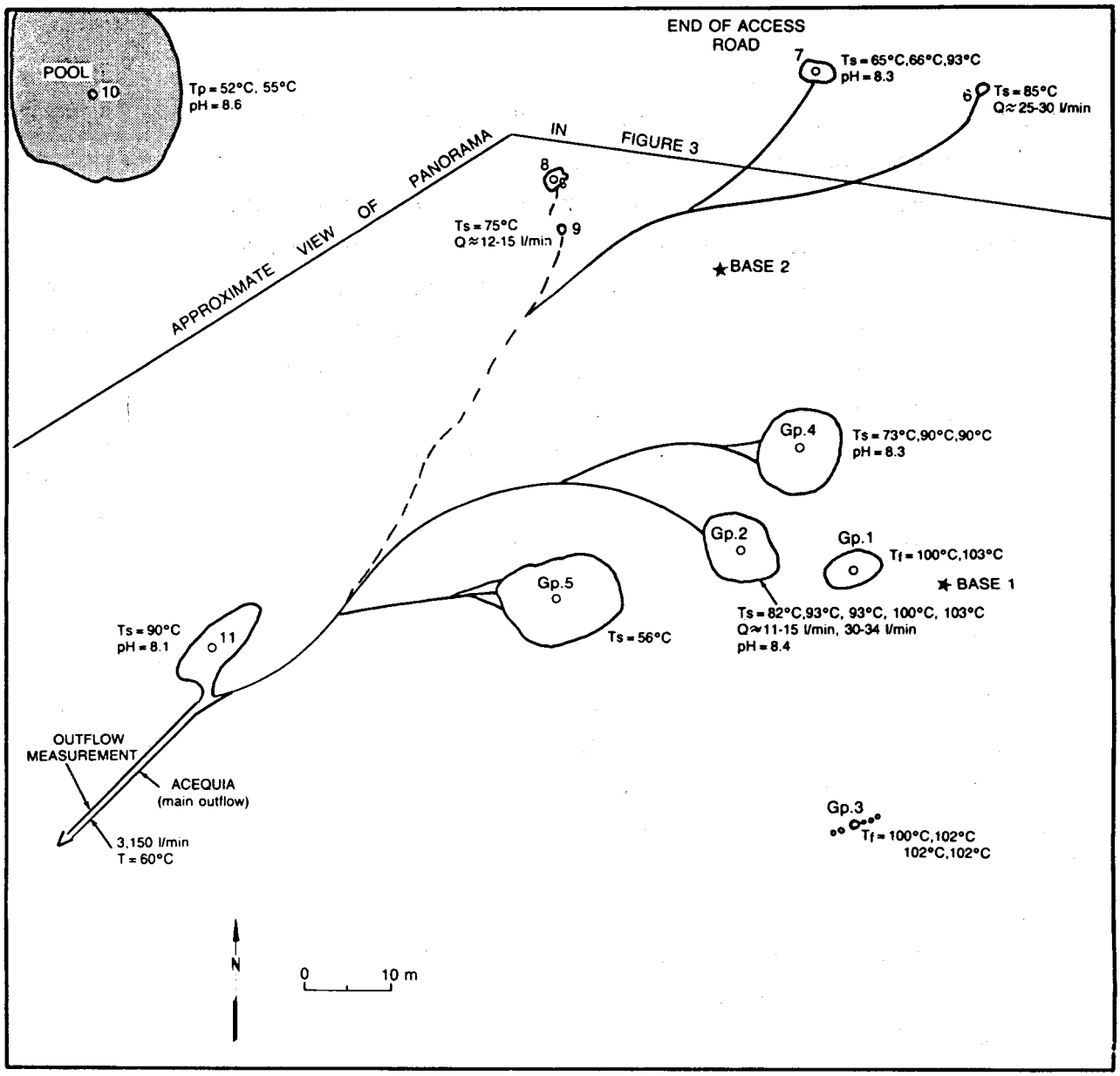


Figura 2. Mapa de los manantiales, sitio principal, área geotérmica de Pavana.

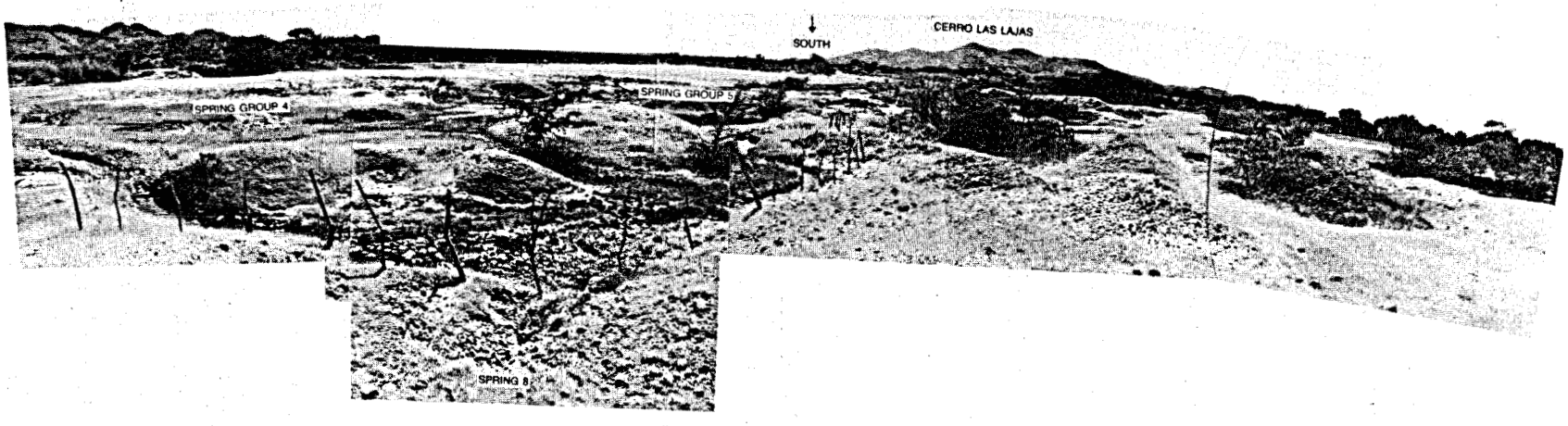


Figura 3. Un panorama parcial del sitio principal de Pavana, con vista hacia el sur.

Area Principal de Manantiales (PV-3, PV-4, en Goff y otros, 1986)

Grupo de Manantiales 1

El área es elongada y consiste en muchas fumarolas pequeñas que emergen del aluvión; tiene dimensiones de 8 por 4 m con una orientación de N80°E. El terreno circundante de las fumarolas está cubierto con un sublimado blanco.

Temperatura (6 aberturas): 100°-103°C (212°-217°F)

Grupo de Manantiales 2

Hay entre 6 y 10 manantiales en este grupo, localizados donde la superficie del terreno nivelado se intercepta con el nivel freático. Los manantiales emergen en un área de 8 por 10 min.

Temperatura (manantiales): 82°-103°C (180°-217°F)

Flujo estimado: 11-15 ℓ/min, 30-34 ℓ/min

Grupo de Manantiales 3

Este grupo consiste en una línea de fumarolas de 5 m de largo, con una orientación de N70°E.

Temperatura (fumarolas): 100°-102°C (212°-216°F)

Grupo de Manantiales 4

Hoyos hechos con tractor forman charcos de 0,2 a 0,5 m de diámetro, y de 5 a 30 cm de profundidad. Hay de 6 a 10 manantiales en un área de alrededor de 10 por 10 m, y una de las fumarolas emerge entre escombros dejados por el tractor.

Temperatura (manantiales): 73°-90°C (163°-194°F)

pH 8,3

Grupo de Manantial 5

El área de 10 por 15 m, con filtraciones difusas, ha sido nivelada extensamente con tractor. Aquí solamente hay un manantial activo.

Temperatura (manantial): 56°C (133°F)

Sitio Manantial 6

El único manantial localizado aquí está en un suelo nivelado de color gris.

Temperatura (manantial):	85°C (185°F)
Flujo estimado:	∿25-30 ℓ/min

Grupo de Manantiales 7

Este grupo consiste de dos manantiales en un área de alrededor de 4 por 3 min. El agua termal deposita calcita en las gravas de alrededor de los manantiales.

Temperatura (manantiales):	65°C (149°F)
	93°C (200°F)
pH	8,3

Sitios Manantiales 8 y 9

Estos dos manantiales emergen en el contacto entre una arenisca tobácea gris de grano grueso y un depósito de guijarros que yacen encima. Los manantiales 8 y 9 son un grupo de filtraciones de aproximadamente 3 m de largo cada uno.

Temperatura (manantial 9):	75°C (167°F)
Flujo estimado:	12-15 ℓ/min

Sitio Manantial 10

Este manantial forma un reservorio de alrededor de 20 por 30 m con una profundidad máxima de 3 a 4 min. El reservorio está situado entre montículos, formados por voladuras con dinamita durante el proceso de extraer calcita.

Temperatura (manantial):	55°C (132°F)
pH	8,6

Sitio Manantial 11

Varios manantiales en estado de ebullición forman un reservorio de agua elongado de alrededor de 4 por 13 m, con una profundidad máxima de 3 a 4 m, y con una orientación aproximada de N50°E. La superficie se

distingue por lodo y cristales de calcita rodeada por montículos formados por fragmentos dinamitados.

Temperatura (manantial):	90°C (194°F)
pH	8,1

Areas Subsidiarias

1. Manantiales Debajo de un Puente Cerca de Pavana (coordenadas 656/814 de la cuadrícula UTM). Hay dos manantiales activos aquí. Uno de ellos está en estado de ebullición en un hoyo debajo del lado sur del puente. El otro es una filtración pequeña.

Temperatura (manantiales):	101°C (214°F)
	100°C (212°F)
pH:	8,3

2. Manantiales al Sur de Las Atillas (coordenadas 659/319 de la cuadrícula UTM; PV-5 de Goff y otros, 1986). Aquí hay un grupo de filtraciones que emergen en el punto de contacto entre el aluvión consolidado y las lavas basálticas subyacentes.

Temperatura (manantiales):	50°C (122°F)
Flujo estimado:	<5 ℓ/min

VI. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Las aguas termales del área geotérmica de Pavana surgen a través de una secuencia de rocas volcánicas del Terciario Tardío a lo largo de la costa nordeste del Golfo de Fonseca en el Departamento de Choluteca. Las rocas más antiguas del área son lahares andesíticas bastante meteorizadas y lavas andesíticas interestratificadas, intruidas por diques de similar composición. Estas rocas subyacen a una secuencia de lavas y tobas silícicas que subyacen, a su vez, a flujos de lava máfica y depósitos de escoria basáltica.

En la estructura del área predominan las fallas normales de rumbo noroeste con buzamiento suroeste, cuyas localizaciones se supone

corresponden con los escarpes topográficos casi lineales. Las aguas termales parecen emerger por dichas fallas y suponemos que se calientan por circulación profunda en una región de flujo de calor elevado. No hay evidencia de una fuente de calor relacionada con calderas cercanas como se propuso en estudios anteriores hechos por Geonomics y UNDP.

La temperatura del reservorio indicada por geotermometría química, es baja (alrededor de 150°C) para la generación de energía eléctrica por medio de una turbina de vapor, pero tal vez puede ser apropiada para un sistema binario o para uso directo. El flujo normal mínimo del área termal principal es de 3000 ℓ/min a una temperatura de 60°C. Hay otras áreas termales en Honduras, tales como Platanares, San Ignacio y Azacualpa con temperaturas de base bastante más altas (Goff y otros, 1986) y por eso apropiadas para el uso en turbinas de vapor convencionales. Sin embargo, Pavana tiene ventajas logísticas como estar localizada cerca de líneas eléctricas y una carretera principal pavimentada; también está cerca a nuevos proyectos agrícolas donde el agua se podría usar para el procesamiento de productos.

REFERENCIAS

Dalrymple, G. B., and Lanphere, M. A., 1969, Potassium-argon Dating: W. H. Freeman, San Francisco, California, 258 pp.

Geonomics, 1977, Report of geothermal feasibility studies in Honduras: unpublished consultant report.

GeothermEx, Inc., 1980, Report of the activities and interpretation of results of the geothermal project of Honduras 1979-1980, v. 1: unpublished consultant report RLA/76/012, Berkeley, California.

Goff, F., Grigsby, C., Shevenell, L., and Paredes, J. R., 1985, Hydrogeochemical exploration of geothermal systems in Honduras: Trans. Am. Geophys. Union, v. 66, p. 1155.

Goff, F., Truesdell, A., Grigsby, C. O., Janik, C. J., Shevenell, L., Paredes, J. R., Gutiérrez, J. W., Trujillo, Jr., P. E., and Counce, D., 1986, Geochemical prospecting of six thermal sites, Honduras, Central America: Los Alamos National Laboratory report LA-10785-MS (to be published).

Ingamells, C. O., 1970, Lithium metaborate flux in silicate analysis: Anal. Chim. Acta, v. 52, pp. 323-334.

Steiger, R. H., and Jager, E., 1977, Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmo-chronology: Earth Planet. Sci. Lett., v. 36, pp. 359-362.

Williams, H., and McBirney, A. R., 1969, Volcanic History of Honduras, Univ. of Calif. Publ. in Geol. Sci., v. 85, 101 pp.