

NOTICE CONCERNING COPYRIGHT RESTRICTIONS

This document may contain copyrighted materials. These materials have been made available for use in research, teaching, and private study, but may not be used for any commercial purpose. Users may not otherwise copy, reproduce, retransmit, distribute, publish, commercially exploit or otherwise transfer any material.

The copyright law of the United States (Title 17, United States Code) governs the making of photocopies or other reproductions of copyrighted material.

Under certain conditions specified in the law, libraries and archives are authorized to furnish a photocopy or other reproduction. One of these specific conditions is that the photocopy or reproduction is not to be "used for any purpose other than private study, scholarship, or research." If a user makes a request for, or later uses, a photocopy or reproduction for purposes in excess of "fair use," that user may be liable for copyright infringement.

This institution reserves the right to refuse to accept a copying order if, in its judgment, fulfillment of the order would involve violation of copyright law.

Geothermal Potential of Mexico

HECTOR ALONSO

*Subdirector Técnico de la comisión de Estudios del Territorio nacional de la Secretaría de la Presidencia,
Asesor en Energía Geotérmica de la Comisión Federal de Electricidad,
San Antonio Abad #124-4º piso "C", México 8, D.F., México*

ABSTRACT

After almost 15 years of studies in various parts of the country and 10 in the geothermal zone of Cerro Prieto, Baja California, the generation of electricity on a commercial scale was initiated at Cerro Prieto, using natural underground steam, when a first plant with 75 000 kW capacity was inaugurated in April 1973.

The possibilities for Mexico in this field are considered to be extensive since approximately 130 regions are known where it is feasible to obtain this type of energy.

Until now only one of these is being developed, five more are being studied, and an inventory and survey of the entire country is being pursued.

Preliminary evaluations of the probable potential of the field in Cerro Prieto, B.C., have been obtained and the total potential of the hitherto known zones has been estimated in a general manner.

INTRODUCTION

In Mexico, the first efforts toward the development of geothermal steam for the production of electricity took place in 1955. The exploration work began along the Neovolcanic axis which crosses Mexico in a west-east direction, and is primarily composed of upper Tertiary and Quaternary basaltic, andesitic, rhyolitic, and pyroclastic rocks.

The first detailed geothermal studies were concentrated in the geothermal field of Pathé, west of the city of Pachuca, in Hidalgo. The first Mexican geothermal plant was inaugurated here in 1959, with a capacity of 3500 kW. The experience obtained from this plant and the results obtained from the wells drilled motivated the Mexican government to continue the exploration and the development of geothermal resources. In this way, the study and exploration activities were started in several areas; for example, Cerro Prieto in Baja California, Ixtlan de los Hervores and Los Negritos in Michoacan. The Cerro Prieto area proved to be the most promising. Consequently, detailed geological and geophysical studies and surveys were done which clearly indicated the vast geothermal potential of the field. Further drilling and testing of the wells showed enough water-steam production for a 75 000 kW plant, consisting of two units, 37 500 kW each, which started to generate electricity in November 1973.

At the same time, studies along some zones in the Neovolcanic axis have been continued. Wells drilled in these

areas show promising results. Likewise, the inventory of the geothermal resources throughout the country was initiated, indicating that there are approximately 130 areas where geothermal energy could be developed. Three years ago a more detailed inventory of the geothermal resources was begun in the central region of the country, mainly covering the states of Michoacan and Jalisco.

PRESENT STATUS/SITUATION

Electric power in Mexico has been traditionally produced by conventional energy sources. At the present time, from a total installed capacity of 7.5 million kW, 3.6 million are produced by hydroelectric plants and 3.8 million by thermal plants. The remaining 100 000 kW are obtained from geothermal sources and coal.

The energy potential of the latter two sources is much higher. Therefore, it is rather important to intensify the study and development of these resources to help meet the increasing electrical demand. The hydroelectric potential in the country yet to be utilized is only about 12 million kW. However, the present rate of demand increase requires the total capacity to double every six to seven years. Hence, by the year 1987, Mexico would require an installed capacity of about 28 million kW which would mean a deficit of about 10 million kW of hydroelectric power to be satisfied by other means, geothermal energy being one of them. It is important to estimate as early as possible the energy potential available in the 130 possible geothermal areas so that the National Electric Industry may plan accordingly.

The geological characteristics of Mexico and the close relationship between the recent volcanism, areas of crust weakness and thermal activity, and their wide distribution indicate that although the geothermal resources might not be large enough to satisfy the total electrical needs, they may certainly be an important contribution. They should therefore be taken into consideration in national plans and programs.

Cerro Prieto, B.C.

To date, the production at Cerro Prieto amounts to 75 000 kW. A total of 32 wells were drilled, 27 of which are producing. Three wells drilled early in the history of the field were quite shallow. Two other wells were exploratory only, and were drilled outside the present production area.

One of these last wells was cold, while the other produced low pressure steam.

During 1974, 14 new wells were drilled. The total steam-water mixture production is not sufficient to supply a 145 000 kW plant. The geology of the area consists on the surface of lake and alluvial deposits toward the center, and of talus deposits towards the west. The talus deposits are the result of the erosion of the Sierra Cucapah, which consists of granites, granodiorites, and gneisses, and forms the western border of the geothermal field. The only extrusive volcanic rocks outcropping within the geothermal field are located at and around the Cerro Prieto Volcano. These rocks are mainly basaltic in nature and consist of lava flows, breccias, and agglomerates overlying the alluvial deposits. Stratigraphically, the oldest rock in the area is the Lower Cretaceous limestone outcropping high in the Sierras of Cucapah and Juarez, which shows granitic intrusions of Upper Cretaceous age, determined by radiometric methods.

These granites form the basement of the field, and are overlain by sandstones, sands, shales, and clays of continental origin. Observed fossils indicate that these units are of mid and upper Tertiary age.

Based on their relative position, the extrusive rocks of the Cerro Prieto Volcano have been assigned to the Pleistocene. Finally, the youngest rocks are the talus deposits.

This geothermal area is part of a large area of crustal weakness, being highly fractured and showing large uplifts and downthrows. Geological and geophysical studies, together with the exploratory borings, have indicated a number of local normal faults with a northwest-southeast strike and dipping to the north-northeast. These faults are almost parallel to each other, starting at the western end of the field and becoming deeper toward the east. One of the main faults is located to the east of Cerro Prieto Volcano, probably displacing the basement vertically about 2900 m.

The present producing wells supplying the plant are located along this fault and south of Cerro Prieto. For the moment, the wells to be drilled to allow future increases in capacity will also be located along this fault, within a 6 to 7 km radius from the power plant.

Ixtlan de los Hervores, Michoacan

The Ixtlan de los Hervores field is located in central Mexico within the sierra known as the Neovolcanic axis. The field consists of andesitic and basaltic rocks from the upper Tertiary and Quaternary, which are overlain by a thick unit of fine-grained lacustrine tuffs. In the valley where this field is located, a great number of hot springs and mud pots are lined up in an east-west direction, along the traces of the main faults affecting the region.

Five small and three large diameter wells have been drilled to investigate the stratigraphy of the area. One of the large wells is 1000 m deep. Problems related to the completion of the three large wells have prevented the adequate evaluation of geothermal potential of this field.

Los Negritos, Michoacan

The stratigraphy and the thermal gradient in the Los Negritos area has been investigated by means of a number of small diameter wells. Intermittent water/steam production was obtained from a large diameter well extending to a depth of 1000 m. Thermometric studies to depths of 1

and 2 m have indicated a regional thermal anomaly of about 311.7 kcal/sec, for an area of 0.27 km². Furthermore, the geology of the field has been investigated by means of seismic refraction, electric resistivity, gravimetric, magnetic, and geochemical methods. The results indicate that basalts and andesites are the main rock units covered by lake deposits. The zone is highly fractured in the east-west direction. The thermal manifestations in the area are located along these fracture zones.

Los Azufres, Michoacan

Los Azufres field is located 200 km west of Mexico City in the central part of the state of Michoacan. Only the geological, geophysical, geochemical, and the resistivity studies have been completed to date. There are numerous strong thermal manifestations, and the structural conditions of the area appear to be quite favorable for the presence of underground steam. As yet, no exploratory nor thermal gradient wells have been drilled.

La Primavera, Jalisco

La Primavera area is a 14 km diameter volcanic caldera with numerous thermal springs and steam vents, located to the west of the city of Guadalajara. The area shows rhyolites and pumiceous tuffs, fractured in a northwest-southeast direction.

Geological, geochemical, magnetic, gravimetric, and geoelectric studies have been completed. The stratigraphy and the geothermal gradient have been investigated with a few small diameter wells.

San Marcos, Jalisco

This field is located 80 km to the southwest of the city of Guadalajara. The area shows steam vents and hot springs, some of which have a flow of up to 300 l/sec. Geologically it consists of rhyolites and tuffs which are covered by lake deposits.

Geological, resistivity, and geochemical surveys have been completed. Also six small diameter exploratory boreholes at depths of 50 to 300 m have been made.

Other Fields

In addition to the geothermal fields described above, geological and geochemical studies have been performed in Los Hervores de la Vega, Jalisco; La Soledad, Jalisco; and Los Humeros, Puebla. Geochemical sampling was done in Puruándiro, Michoacan; San Agustín del Maíz, Michoacan; San Juan Cosalá, Jalisco; San Pedro Mixcán, Jalisco; San Bartolo y la Pila, Guanajuato; El Molote, Nayarit; Comanjilla, Guanajuato; Abasolo, Guanajuato; San Gregorio Cuerámaro, Guanajuato; Amatlán de Cañas, Nayarit; Santa Rita, Jalisco; Santiago Maravatío, Michoacan; San Ignacio, Sinaloa; and Agua Blanca, Baja California.

In Mexico, 130 hydrothermal areas have been located, varying from small seeps to large water and steam flows. These fields are located in the Baja California Peninsula, western Sierra Madre, the volcanic axis, and the southern Sierra Madre, closely related to fractured and faulted zones. The distribution of the fields by states of the Mexican Republic is shown in Table 1.

Table 1. Distribution of the principal hydrothermal zones.

State	Number of Fields	Mean Temperature
Aguascalientes	5	50°C
Baja California	15	70-90°C
Chihuahua	5	60°C
Chiapas	2	70°C
Coahuila	2	40°C
Distrito Federal	1	40°C
Durango	5	60°C
Guanajuato	9	80°C
Guerrero	3	40°C
Hidalgo	6	75°C
Jalisco	16	85°C
México	3	80°C
Michoacán	22	90°C
Morelos	2	60°C
Nayarit	6	70°C
Nuevo León	1	50°C
Oaxaca	2	50°C
Puebla	3	65°C
Querétaro	6	70°C
San Luis Potosí	3	40°C
Sinaloa	3	60°C
Tamaulipas	2	40°C
Veracruz	1	50°C
Zacatecas	2	40°C

The list contains only those fields which are well-documented in each state. There are many more fields which have only been reported, and will be investigated by the Federal Electricity Commission under the present inventory program.

ESTIMATED GEOHERMAL POTENTIAL

Technological advances during the past 10 years have made feasible the preliminary evaluation of a geothermal field on the basis of a field reconnaissance considering the areal extension and temperature of the thermal manifestations, the geochemical characteristics of the fluids, and the estimated reservoir thickness. A better estimate of the thermal potential of the field is obtained by measuring the amount of heat produced from the wells; this provides not only a more accurate assessment of the potential, but also of its probable useful life. Since at the present time there are wells in only 9 out of the 130 potential geothermal areas, it is necessary for planning purposes to proceed with the more general evaluations.

Cerro Prieto is the only geothermal field with well-established thermal potential, even though there still remain certain uncertainties to be resolved. The potential of the remaining eight fields where drilling has been performed is still inconclusive and cannot be defined until further studies are completed. For preliminary purposes and taking a pessimistic point of view, it was estimated that only 30% of the remaining 120 fields were going to produce energy in commercial amounts and that each field was able to supply a 75 000 kW plant. It should be noted that the estimated minimum capacity of the Cerro Prieto field is between 450 000 and 500 000 kW, and the eight fields in the central region of Mexico were estimated to be capable of producing 100 000 kW each. On this basis, the total installed geothermal capacity of Mexico would be roughly on the order of 4 000 000 kW.

The surveys and readings that are being taken in the

Cerro Prieto field from the beginning of its operation have been organized in a well planned program to permit a better evaluation of its future potential and useful life.

To estimate the thermal potential, the water reserves were first estimated by considering a cubic model where no recharge of the field would take place. The data indicated that the average porosity of the formations was of the order of 15%, and that the thickness of the productive zone varied between 700 and 1600 m (observed in Wells M-3 and M-51), and that the production was obtained from a quadrilateral region of about 11.88 cm². The amount of water available is therefore 11.88 × 0.15 × 0.9 = 1.603 × 10⁹ m³.

On the other hand, and based on the characteristics of the Toshiba turbines now in operation, the steam consumption is 8.5 kg/kWh. Since the mixture obtained from the wells is about 80% water/20% steam, the required mixture to produce 1 kWh is equal to about 42.5 kg/kWh. The available water is then sufficient to generate 37.17 million MWh,

$$\frac{1.603 \times 10^9}{42.5} = 37.71 \times 10^6$$

that is, 4.304 = 10³ MW/yr. Therefore, a 150 MW plant with an efficiency factor of 80% would have enough water for 35.8 years.

The thermal potential of the stored water was estimated assuming that there was no thermal recharge; that is, if the total volume of stored fluid is 1.603 × 10⁹ m³, with an average enthalpy of 269 kcal/kg, and the production pressure is 7.1 kg/cm², about 20% of the fluid could be converted into saturated steam with an enthalpy of 660 kcal/kg.

If one considers that the turbines are supplied only by the separated steam: (1) steam enthalpy at the turbine INLET: 660 kcal/kg; (2) steam enthalpy at the turbine OUTLET (4 in. vacuum): 520 kcal/kg; and (3) Enthalpy drop inside the turbine (with 80% internal efficiency): (660 - 520) × 0.8 = 112 kcal/kg.

The amount of energy that could be produced would be:

$$\frac{1603 \times 10^9 \times 0.20 \times 112}{860} = 41.75 \times 10^9 \text{ kWh,}$$

where 860 kcal = 1 kWh.

From the above, a 150 MW plant with an 80% efficiency factor would have enough steam for

$$\frac{41.75 \times 10^9}{150\ 000 \times 8760 \times 0.8} = 39.7 \text{ yr.}$$

The above calculations consider only the area which is now under production. New studies and exploratory wells (especially M-53) toward the east indicate that the actual extent of the geothermal area is much larger than that used in the calculations. Taking this into account, and considering the evidence which indicates that the field is indeed being recharged, then the estimated life for a 150 MW plant becomes 92 years. But even this last estimate is preliminary, since new studies, measurements, and drilling operations are taking place, and better and more abundant data will become available for more precise estimates.

FUTURE PROGRAMS

To properly compare the geothermal resources of the country with other sources of energy, the following study and exploratory program has been established:

1. To prepare an inventory of all geothermal areas in the country.
2. To study the geological characteristics of these areas, the magnitude of the thermal manifestations, areal extent, temperature, and so on.
3. Chemical sampling and analysis and geochemical correlations of these thermal manifestations. With this information, it will be possible to obtain a better assessment of the thermal potential of each field. This evaluation will be quite useful in deciding the areas where future development should be concentrated.)
4. The thermal potential at Cerro Prieto field will be confirmed so that the proposed expansion of the facility

may be pursued as follows: By August 1977, two more units of 37.5 MW each; by May 1978, a low pressure unit of 30 MW; by June 1979, a 55 MW unit; by June 1980, a 55 MW unit; by June 1981, a 55 MW unit; and by June 1982, another 55 MW unit. By this date, the total capacity would be 400 MW. Further expansions would depend on the regional demand and the geothermal characteristics of the field.

5. The drilling and studies at Ixtlan, Los Negritos, San Marcos, and Los Azufres will be continued in order to obtain a better assessment of their geothermal potential. Feasibility studies will be carried out to determine the adequacy of the fields for commercial use. It is expected that a decision may be reached early in 1977.

6. Finally, the application of geothermal energy to other uses is being studied. These alternate uses, which could be done independently or simultaneously with the generation of electricity, include desalting of water, extraction of chemicals from the brine, and heating of greenhouses.

Potencial Geotérmico de la República Mexicana

HECTOR ALONSO

*Subdirector Técnico de la Comisión de Estudios del Territorio Nacional de la Secretaría de la Presidencia.
Asesor en Energía Geotérmica de la Comisión Federal de Electricidad,
San Antonio Abad #124-4° piso "C", México 8, D.F., México*

RESUMEN

Después de casi quince años de estudios en diferentes regiones del País y diez en la zona geotérmica de Cerro Prieto, Baja California (B.C.), se inició en esta última, al inaugurarse en abril de 1973 una primera planta con capacidad de 75 000 kW, la generación de electricidad en escala comercial, utilizando el vapor natural del subsuelo.

Las posibilidades de México en este campo se consideran amplias, ya que se conocen cerca de 130 zonas en las que es factible obtener esta energía.

Hasta ahora se tiene en desarrollo sólo una zona, cinco más en proceso de estudio y se está realizando un inventario y muestreo general en todo el País.

En forma preliminar se ha determinado el probable potencial del campo de Cerro Prieto, B.C., y se ha estimado de manera muy general la potencialidad total de las zonas hasta ahora conocidas.

INTRODUCCION

Alrededor del año de 1955 se iniciaron en México los primeros trabajos, que conducirían más adelante al aprovechamiento del vapor del subsuelo para la generación de electricidad. Las exploraciones comenzaron a lo largo del Eje Neo-Volcánico, que atraviesa a la República Mexicana de Poniente a Oriente, y está constituido principalmente por rocas basálticas, andesíticas, riolíticas y piroclásticas, del Terciario Superior y del Cuaternario.

Del gran número de áreas con manifestaciones termales superficiales que se localizaron, se eligió para principiar los estudios de detalle, la de Pathé, ubicada al oeste de la Ciudad de Pachuca, en el Estado de Hidalgo. Fue en ella que en 1959 se instaló e inició la operación de la primera planta geotermoeléctrica mexicana, la cual tuvo una capacidad de 3500 kW. La experiencia con esta planta y los resultados de las perforaciones efectuadas, impulsó al Gobierno Mexicano a continuar en la búsqueda y aprovechamiento de este energético. Fue así que se empezó el estudio y exploración de varias otras zonas como la de Cerro Prieto en Baja California, la de Ixtlán de los Hervores en Michoacán y la de los Negritos en el mismo Estado. Por su importancia y posibilidades destacó de inmediato la zona de Cerro Prieto, en la cual se efectuaron una serie de investigaciones y levantamientos geológicos y geofísicos detallados, que permitieron llegar a la certeza de la existencia de un potencial geotérmico importante. Las perforaciones que posterior-

mente se realizaron, demostraron la fidelidad de los estudios, al tenerse temperaturas y producciones de agua-vapor suficientes para abastecer a una planta geotermoeléctrica de 75 000 kW, constituida por dos unidades de 37 500 kW cada una, la cual inició su operación en el mes de noviembre de 1973.

Paralelamente a este desarrollo, se han continuado efectuando estudios en algunas zonas del Eje Neo-volcánico, habiéndose llevado a cabo perforaciones con resultados que indican posibilidades interesantes. Asimismo se ha iniciado un inventario de los recursos geotérmicos a nivel Nacional, el cual en una primera aproximación, ha arrojado la existencia de un total aproximado de 130 áreas en las que es factible llegar a aprovechar esta energía. Un inventario más detallado se inició hace tres años en la parte Central de País, cubriendo principalmente los Estados de Michoacán y Jalisco.

SITUACION ACTUAL

Tradicionalmente en México se han venido aprovechando para producir electricidad, las fuentes convencionales de energía. Es así que actualmente de los 7.5 millones de kW instalados en el País, 3.6 millones corresponden a plantas hidroeléctricas y 3.8 millones a termoeléctricas. Los 100 000 kW restantes, corresponden a geotérmica en primer lugar y a carbón en segundo lugar.

En ambos casos las posibilidades de estos energéticos son mucho mayores, por lo que se ha considerado que es conveniente que su estudio y aprovechamiento se intensifique, con objeto de utilizarlos como un complemento importante para satisfacer la demanda creciente de electricidad. Esto aunado al hecho de que el potencial hidroeléctrico total estimado que aún queda por utilizarse en el país, es de 12 millones de kW aproximadamente y que el crecimiento de acuerdo con la tasa actual, demanda que la capacidad total debe duplicarse cada seis o siete años, indica que para 1987 México deberá tener una capacidad instalada del orden de los 28 millones de kW, lo que representa un déficit de 10 millones de kW con energía hidroeléctrica, el cual deberá satisfacerse por otros medios, considerándose que uno de ellos podría ser la energía geotérmica; por lo que es importante determinar con tiempo suficiente, en forma general, cuál es la potencialidad aproximada con que se cuenta en las 130 probables zonas geotérmicas, con objeto de poder manejar este concepto dentro de los planes de desarrollo de la Industria Eléctrica Nacional.

Dadas las características geológicas de México y la estrecha relación entre zonas de volcanismo reciente, áreas de debilidad cortical y manifestaciones termales, así como su amplia distribución, es razonable estimar que el aprovechamiento de la energía geotérmica debe desarrollarse hasta un punto tal, que aún y cuando no llegue a ser la solución completa a las necesidades de electricidad, si sea un apoyo importante para considerarse como se decía anteriormente en los planes y programas nacionales.

Cerro Prieto, Baja California

A la fecha y como se citó, se tienen en Cerro Prieto 75 000 kW instalados y se han perforado un total de 32 pozos; 27 de éstos son productores. Tres que se perforaron al principio, fueron muy superficiales y los otros dos fueron estrictamente de exploración y se localizaron en áreas distintas a la que está actualmente en explotación. De éstos, uno resultó sin temperatura y el otro produjo vapor a baja presión.

En el transcurso del pasado año de 1974, se continuó con la perforación, habiéndose realizado 14 pozos, con lo que se completó el total señalado con lo cual en términos generales se tiene una mezcla agua-vapor suficiente para abastecer a una central de 145 000 kW.

Geológicamente el área está constituida en superficie, por depósitos de aluvión y lacustres en su parte central, y por depósitos de talud hacia el occidente. Siendo éstos últimos producto de la erosión de la Sierra de Cucapah, formada por granitos, granodioritas y gneisses, y la que forma el límite poniente del campo geotérmico. Las únicas rocas ígneas extrusivas que afloran dentro del campo, se localizan en el volcán de Cerro Prieto y sus alrededores, y están formadas por corrientes lávicas, brechas y aglomerados de origen principalmente basáltico, que sobreyacen a los aluviones antes citados. Estratigráficamente la roca más antigua en la zona está representada por las calizas del Cretácico Inferior que se localizan en las partes altas de la Sierra de Cucapah y Juárez y las cuales fueron intrusionadas por los granitos que forman estas sierras y a las que se les considera, en base a lo citado y a estudios radiométricos efectuados, una edad del Cretácico Superior.

Los granitos señalados forman a su vez el basamento del campo y sobre ellos descansan areniscas, arenas, lutitas y arcillas, de origen continental, las que en base a los fósiles observados, se han clasificado como pertenecientes al Terciario Medio y Superior.

Por su posición relativa, a las rocas extrusivas del volcán de Cerro Prieto se les ha clasificado como del Pleistoceno. Por último y como las rocas más jóvenes se presentan los depósitos de talud.

Esta área geotérmica forma parte de una importante zona de debilidad cortical profundamente fracturada, con hundimientos y levantamientos de grandes proporciones. Localmente y como producto de los estudios geológicos, geofísicos y de las perforaciones efectuadas, se han determinado varias fallas normales de dirección noroeste-sureste, con echado al nor-noreste, sensiblemente paralelas y que se inician en el extremo occidental del campo, profundizándose hacia el oriente. Una de las principales corre al este del volcán de Cerro Prieto y se ha determinado un probable desplazamiento vertical en el basamento del orden de 2900 m.

Es a lo largo de esta falla y al sur de Cerro Prieto, en donde se han perforado los pozos de producción que

abastecen a la central eléctrica. Es asimismo en ella, y con un radio de 6 o 7 km, tomando como centro la planta, que por el momento se perforarán los siguientes pozos que permitan programar y construir las ampliaciones futuras.

Ixtlán de los Hervores, Michoacan

El campo de Ixtlán de los Hervores se localiza en la parte central de México, dentro de la Sierra conocida como Eje Neovolcánico. Geológicamente está formado por rocas andesíticas y basálticas del Terciario Superior y Cuaternario a los que superyace una potente serie de tobas lacustres de grano fino. Un gran número de manantiales calientes y hervideros de lodo, se manifiestan en el valle en que se encuentra este campo, principalmente alineados con dirección este-oeste coincidiendo con las trazas de las principales fallas que afectan a la zona y a la región.

A la fecha se han perforado cinco pozos de exploración de pequeño diámetro, para conocer la columna estratigráfica y tres de diámetro grande, uno de ellos hasta 1000 m de profundidad. Problemas posteriores a la terminación de estos tres pozos, principalmente referentes a su terminación, han impedido evaluar adecuadamente las posibilidades reales de este campo.

Los Negritos, Michoacan

En la zona de Los Negritos se han realizado varias perforaciones de diámetro pequeño, con objeto de conocer la estratigrafía y el gradiente geotérmico y una perforación de diámetro grande hasta 1000 m de profundidad en la que se tuvo producción intermitente de agua-vapor. Se han efectuado además estudios de termometría a 1 y 2 m de profundidad, habiéndose determinado una anomalía térmica regional del orden de 311.7 kcal/s para una superficie de 0.27 km². Asimismo se llevaron a cabo levantamientos sísmicos de refracción, de resistividad, gravimétricos, magnetométricos y geoquímicos, que permitieron conocer con suficiente detalle las características geológicas de esta zona, constituida principalmente por basaltos y andesitas a las que sobreyacen depósitos lacustres. El área está afectada por un sistema de fracturamiento este-oeste a lo largo del cual se presentan las principales manifestaciones de termalismo en la zona.

Los Azufres, Michoacan

Los Azufres esta localizado a unos 200 km al oeste de la Ciudad de México, en la parte central del Estado de Michoacán. Hasta la fecha se han efectuado únicamente estudios geológicos, geoquímicos y de resistividad. Las manifestaciones en esta zona son numerosas y especialmente intensas y las condiciones estructurales son favorables para la existencia de vapor en el subsuelo. Aún no se han efectuado perforaciones de gradiente geotérmico no de exploración.

La Primavera, Jalisco

El área de La Primavera es una caldera volcánica de 14 km de diámetro, con un gran número de manantiales termales y escapes de vapor, al oeste de la Ciudad de Guadalajara. Las rocas que la constituyen son riolitas y

tobas pumíticas afectadas por un sistema de fracturamiento noroeste-sureste.

En la zona se han hecho estudios geológicos, geoquímicos, magnéticos, gravimétricos y geoelectricos; y se han efectuado varias perforaciones someras de pequeño diámetro, con objeto de tener un conocimiento más amplio sobre la estratigrafía y gradiente geotérmico.

San Marcos, Jalisco

Al suroeste de Guadalajara y a unos 80 km se localiza esta área hidrotermal en la que se presentan escapes de vapor y manantiales termales, algunos con gastos hasta de 300 litros por segundo. Geológicamente la zona está formada por riolitas y tobas a las que están sobreyaciendo depósitos lacustres.

Se han efectuado en este campo estudios geológicos, de resistividad y de geoquímica, así como seis perforaciones de 50 a 300 m de carácter exploratorio y pequeño diámetro.

Otros Campos

Además de los campos descritos, se han realizado estudios de geología y geoquímica en Los Hervores de la Vega y en, La Soledad, ambos en Jalisco, y en Los Humeros, Puebla, y de muestreo geoquímico únicamente en Puruándiro y San Agustín del Maíz, Michoacan, San Juan Cosalá, Jalisco, San Pedro Mixcán, Jalisco, El Molote, Nayarit, Comanjilla, Guanajuato, Abasolo, Guanajuato, San Bartolo y la Pila, Guanajuato, San Gregorio Cuerámara, Guanajuato, Amatlán de Cañas, Nayarit, Santa Rita, Jalisco, Santiago Maravatío, Michoacan, San Ignacio, Sinaloa, Agua Blanca, Baja California.

Se tienen localizadas en total en el País, 130 zonas hidrotermales, cuyo gasto y manifestaciones varían desde emanaciones con escurrimientos menores, hasta grandes volúmenes hidráulicos y escapes de vapor.

Están distribuidas en la Península de la Baja California, en la Sierra Madre Occidental, en el Eje Volcánico y en la Sierra Madre del Sur, guardando una estrecha relación con zonas de fracturamiento y afallamiento. La distribución de las zonas principales, por Estados de la República Mexicana aparece en la Tabla 1.

En esta relación sólo se consignan el número de zonas que se conocen de cada Estado, pero existen muchas más que hasta el momento sólo se tienen reportadas y que de acuerdo con el programa del inventario de recursos geotérmicos que está efectuando la Comisión Federal de Electricidad, se visitarán y se obtendrá en ellas la información necesaria para poderlas catalogar.

POTENCIAL GEOTERMICO ESTIMADO

La tecnología para el aprovechamiento del vapor del subsuelo, ha avanzado rápidamente en el mundo en los últimos diez años, es así que actualmente es posible inferir la importancia de un campo en formainicial durante la visita preliminar, en base a su extensión superficial, a la temperatura de las manifestaciones, a sus características químicas y al espesor estimado del yacimiento. Es indudable que una mejor aproximación se obtiene a través de la medida de la cantidad de calor que se extrae durante la producción de los pozos perforados; medida que con el transcurso del tiempo permite obtener en definitiva un conocimiento preciso

Tabla 1. Distribución de las principales zonas hidrotermales.

Estado	No. de areas	Temp. media
Aguascalientes	5	50°C
Baja California	15	70-90°C
Chihuahua	5	60°C
Chiapas	2	70°C
Coahuila	2	40°C
Distrito Federal	1	40°C
Durango	5	60°C
Guanajuato	9	80°C
Guerrero	3	40°C
Hidalgo	6	75°C
Jalisco	16	85°C
México	3	80°C
Michoacán	22	90°C
Morelos	2	60°C
Nayarit	6	70°C
Nuevo León	1	50°C
Oaxaca	2	50°C
Puebla	3	65°C
Querétaro	6	70°C
San Luis Potosí	3	40°C
Sinaloa	3	60°C
Tamaulipas	2	40°C
Veracruz	1	50°C
Zacatecas	2	40°C

sobre su potencialidad y su probable duración; pero para fines de una estimación gruesa a nivel nacional, con objeto de manejar la información para poderla considerar como un auxilio dentro de la planeación del sector eléctrico, considerando que sólo se tienen perforaciones y estudios en 9 de las 130 zonas con posibilidades conocidas hasta ahora en el país, se ha aplicado el sistema de inferir la potencialidad en forma general a partir de la información superficial.

En realidad sólo puede hablarse de potencialidad conocida, aún con ciertas reservas, en el campo de Cerro Prieto; con relación a los otros ocho en que se cuenta con estudios, es necesario efectuar más perforaciones para determinar las condiciones y características del yacimiento; de las otras 120 se calculó en condiciones pesimistas que sólo el 30 por ciento de ellas produjera comercialmente y se estimó que pudieran soportar una capacidad media instalada de 75 000 kW cada una. Esto, incluyendo Cerro Prieto, en que se considera factible instalar una capacidad mínima de 450 000 a 500 000 kW—como se detalla más adelante—y las ocho zonas del Centro del País en que se estima una capacidad de 100 000 kW por área, da en forma gruesa un potencial geotérmico para México del orden de 4 000 000 de kW instalados.

En Cerro Prieto se han venido efectuando mediciones desde que se inició la explotación del campo, pero hasta que la planta entró en operación se comenzaron a realizar en forma sistemática y dirigidas a tener información suficiente para evaluar la capacidad que podría llegarse a instalar y estimar la vida del campo.

Para ello se hizo primeramente un análisis de la reserva de agua, considerando un modelo hipotético de forma cúbica y en el que únicamente se calculó el agua que pudiera estar almacenada, aceptando que no hubiera recarga. Con base en los datos de los registros efectuados se obtuvo una porosidad media de las formaciones del 15 por ciento y un espesor de producción entre los 700 y los 1600 m (zonas productoras en los pozos M-3 y M-51) de profundidad; y

como superficie productora un cuadrilátero de 11.88 km². La resultante disponibilidad de agua es:

$$11.88 \times 0.15 \times 0.9 = 1.603 \times 10^9 \text{ m}^3$$

Por otra parte y de acuerdo con las características de los turbogeneradores Toshiba, actualmente en operación, se tiene que el consumo total de vapor es de 8.5 kg/kWh y la mezcla que se obtiene de los pozos está formada de 20 por ciento de vapor, o sea que se requieren de 42.5 kg de mezcla para generar un kWh, lo que significa que el agua disponible sería suficiente para producir 37.71 millones de MWh.

$$\frac{1.603 \times 10^9}{42.5} = 37.71 \times 10^6$$

o sea, 4.304 × 10³ MW/año, lo que para planta de 150 MW con un factor del 80 por ciento, daría agua suficiente para 35.8 años.

Por otro lado se calculó también el potencial calorífico del agua almacenada, aceptándose como para el cálculo de la reserva hidrológica, un modelo idealizado que no recibiría más calor que el que ya contiene. Esto es, si la cantidad de fluido geotérmico almacenado es de 1.603 × 10⁹ m³, con una entalpia media de 269 kcal/kg y considerando una presión de operación de 7.1 kg/cm²; alrededor del 20 por ciento de este fluido se podrá convertir en vapor saturado con una entalpia de 660 kcal/kg.

Considerando únicamente el vapor separado para ser alimentado a una turbina tendríamos: Entalpia del vapor a la entrada de la turbina 660 kcal/kg; Entalpia del vapor a la descarga de la turbina (a 4 pulgadas de vacío) 520 kcal/kg; y Caída de la entalpia en la turbina (con eficiencia interna de 0.8) (660-520) × 0.8 = 112 kcal/kg. De lo cual es posible calcular la cantidad de energía que se puede producir con este vapor:

$$\frac{1603 \times 10^9 \times 0.20 \times 112}{860} = 41.75 \times 10^9 \text{ kWh}$$

siendo 860 kcal = 1 kWh

O sea para una planta de 150 MW con un factor del 80 por ciento, hay vapor para:

$$\frac{41.75 \times 10^9}{150\,000 \times 8760 \times 0.8} = 39.7 \text{ años.}$$

Los cálculos anteriores están tomando en cuenta únicamente el área que está en explotación, pero las exploraciones y los pozos de investigación últimamente perforados, (M-53 en especial) hacia el oriente del campo, han confirmado que la zona geotérmica se continúa por muchos kilómetros

más. Con ésto y con las evidencias que se tienen sobre la recarga que está sufriendo el campo, se han efectuado cálculos que han llevado a la conclusión de que se tienen reservas para operar una planta de 150 MW durante 92 años. Aún así este dato no puede tomarse como definitivo; nuevos trabajos de investigación y perforación, así como la medición sistemática de los pozos en producción, están permitiendo afinar las estimaciones que hasta ahora se tienen.

PROGRAMAS FUTUROS

Con objeto de poder programar adecuadamente el orden e importancia que debe darse al aprovechamiento de la geotérmica, dentro de los demás recursos energéticos del país, se ha establecido el siguiente programa de estudios y exploraciones:

1. Levantar el inventario de localización de todas las fuentes termales del País.
2. Realizar en ellas estudios sobre las características geológicas de la roca encajonante, magnitud de las manifestaciones superficiales, área de cubrimiento y temperatura de las mismas.
3. Muestrear y efectuar análisis químicos y correlaciones geoquímicas de dichas manifestaciones. Con esta información será factible hacer una estimación más certera sobre la potencialidad de cada zona y establecer así un programa para aquellas que de acuerdo a sus características y a su localización geográfica, convenga desarrollar en un futuro cercano.
4. En el campo de Cerro Prieto se confirmarán las investigaciones y perforaciones para ampliarlo, de manera tal que para agosto de 1977 se pondrán en operación dos unidades más de 37.5 MW cada una, para mayo de 1978 una unidad de baja presión de 30 MW, para junio de 1979 una unidad de 55 MW, para junio de 1980 una de 55 MW, para junio de 1981 una de 55 MW y para junio de 1982 una de 55 MW, ésto es un total para esa fecha de 400 MW. El continuar ampliando la capacidad eléctrica en este campo, dependerá básicamente de sus características geotérmicas y de las necesidades regionales.
5. En Ixtlán, Los Negritos, San Marcos y Los Azufres, se continuarán los trabajos de exploración y perforación, con objeto de conocer con más detalle su potencialidad y proceder si sus características son adecuadas, a la construcción de plantas generadoras. Una cuantificación más exacta de los yacimientos y de la posible capacidad a instalarse, se espera poderla tener para principios de 1977.
6. Por último y simultáneamente se están realizando investigaciones de otros usos del vapor geotérmico como desalación, aprovechamiento de productos químicos y calefacción en invernaderos para cierto tipo de cultivos, que puedan realizarse conjuntamente a la generación de electricidad o en forma independiente.