

NUMERICAL MODELING STUDIES OF THE CERRO PRIETO RESERVOIR

M. J. Lippmann and K. P. Goyal
Lawrence Berkeley Laboratory
University of California
Berkeley, California 94720

ABSTRACT

A prerequisite to any meaningful numerical simulation of the behavior of a geothermal system under different production management schemes is knowing the system's initial and prevailing boundary conditions.

Based on existing data, different boundary conditions and material properties were simulated using a computer program to calculate heat and mass transport in (liquid-saturated) nonisothermal media. In these simulations, we assumed that initially Cerro Prieto was essentially a one-phase (liquid-dominated) geothermal system.

We computed steady-state temperatures for various assumed preproduction recharge and discharge boundary conditions. The results are discussed and compared with published initial temperature distributions in the Cerro Prieto system.

INTRODUCTION

The Cerro Prieto geothermal field is presently producing 150 MW of electric power. In April 1979 the capacity of the power plant was doubled (from 75 to 150 MW) as two new units came into operation. Consequently the fluid production rate has increased from about 2,800 to 4,200 tonnes per hour. Bermejo M. et al. (1979) estimate that about 1.2×10^8 tonnes of steam-brine mixture has been extracted from the field as of late 1978. Figure 1 shows the location of over 60 deep wells that have been completed in the field.

By 1985 the Comisión Federal de Electricidad expects to increase the cumulative plant capacity at Cerro Prieto to 400 MW. Improved estimates of the total capacity of the field will be essential in studying the feasibility of further developments of the area.

A realistic geohydrological model is of fundamental importance to estimate the capacity and longevity of the Cerro Prieto field. A number of papers in this volume discuss the various efforts under way to determine the dimensions, structure and stratigraphy of the field, the

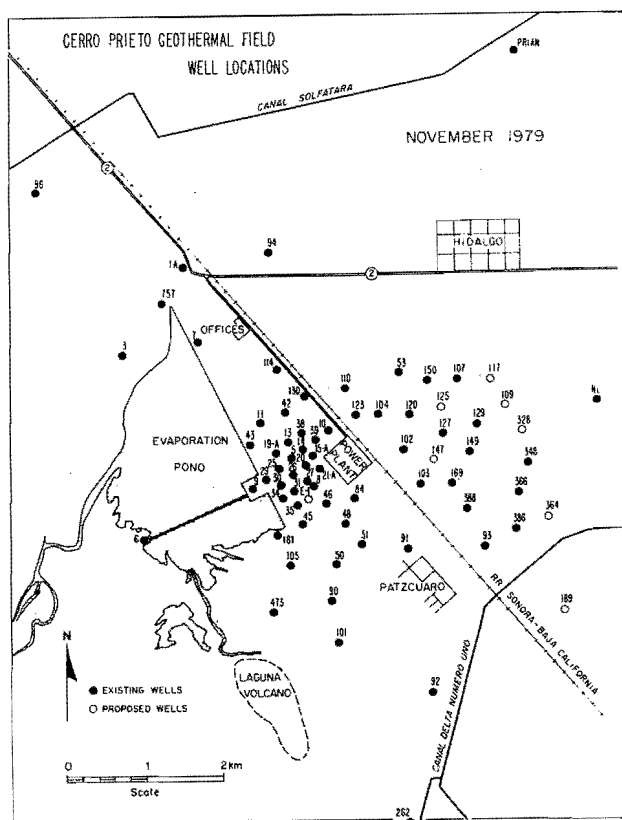


Figure 1. Well locations at the Cerro Prieto geothermal field, as of November 1979.

properties and interconnection between the various aquifers, and the circulation of fluid and heat within the geothermal system and across its boundaries.

The purpose of this study is to establish the preproduction recharge and discharge conditions of the field. As a first step, a simplified geological model of the system was developed on the basis of the available data. Then, the heat and mass flow through this model was calculated numerically using a computer program. The location, temperature, and strength of the reservoir recharge

and discharge areas, the thermal and hydraulic boundaries of the model, and the properties of the different materials were varied in an attempt to reproduce the preproduction temperatures given by Mercado G. (1976), and Elders et al. (1978). No effort was made to match early reservoir pressures since pre-1973 pressure data are only available for few wells in the central part of the field (Sánchez R. and de la Peña L., 1980).

The sources and sinks identified by this study could also be used for simulating the behavior of the field after 1973. However, their characteristics would change due to large-scale production. The mass inflow from the sources into the reservoir is expected to increase significantly in this open system and a decrease is anticipated at the sinks due to exploitation. In addition, areas surrounding the producing reservoir are also expected to drain (cold or hot) fluids in response to the changes in the pressure distribution in the field.

RELEVANT WORK

Knowledge about the recharge and discharge characteristics of the field is essential to predict its future behavior. Based on data from recent and earlier studies, zones of recharge and directions of flow of the recharged fluid may be inferred. Unfortunately not all the data point to exactly the same zones and directions.

On the other hand, no precise locations at depth are available for the zones where some of the fluid and heat transported across the geothermal reservoir find their way to the surface. It is safe to say that heat is conducted through the caprock, and that fluids and heat carried by convection are discharged to the surface along the main fault zones in the area.

Using well temperatures, pressures, enthalpy, flow data, and geothermochemical correlations of the fluids discharged by the wells, Mercado G. (1976) developed a hydrogeological model of the Cerro Prieto area. He postulated that: 1) hot fluids ascending in the eastern and central zones of the field flow toward the west, 2) the heat source is located in the eastern and deeper part of the field, 3) the reservoir is recharged mainly from the west (in the area of alluvial fans of the Sierra Cucapa) and also to some extent from the east by the underflow of the Colorado River water. Figures 2 and 3 show the preproduction temperature distributions in the field along two different cross-sections (Mercado G., 1976).

According to Truesdell et al. (1979b) the comparison of measured deuterium contents of the Cerro Prieto geothermal waters and the interpolated composition of cold Mexicali Valley ground waters suggests that the recharge to the system could have occurred along

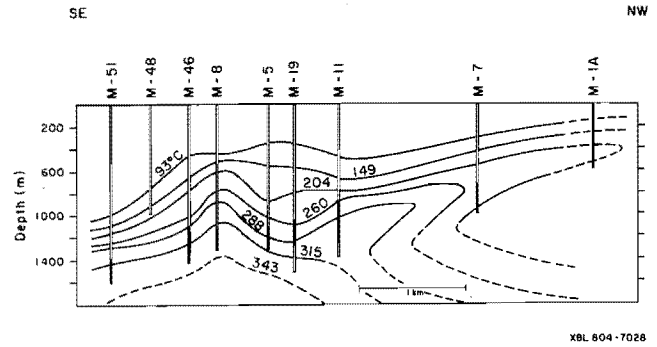


Figure 2. Preproduction temperature distribution in the reservoir along a southeast-northwest cross-section (adapted from Mercado G., 1976).

a narrow zone running from Mexicali on the north, passing just west of the field, and curving northeast to the Mesa Arenosa on the east. This recharge from the west agrees with part of Mercado's (1976) model.

Corwin et al. (1979) correlated the dipolar self-potential anomaly detected in the Cerro Prieto area with geothermal activity. They concluded that the surface anomaly could be the result of a vertical fault or fracture zone along which a vertical component of fluid and/or heat flow exists. Figure 4 shows the self-potential anomaly and the inferred location of the geological discontinuity. Based on these data the hot water upflow zone is distributed along an approximately north-south area passing near well M-48.

Elders et al. (1978) recognized a number of regularly distributed mineral zones in the field by examining cores and drill cuttings. They developed maps indicating depths to the first occurrence of some temperature diagnostic minerals. For example, Figure 5 shows the plot corresponding to epidote indicating the depth to the 230 to 250°C temperature zone. The mineral

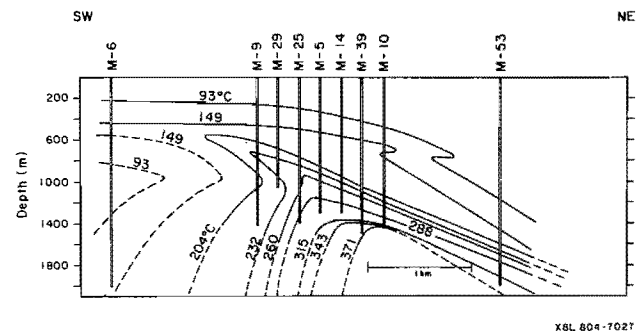


Figure 3. Preproduction temperature distribution in the reservoir along a southwest-northeast cross-section (adapted from Mercado G., 1976).

distributions suggest that the hottest fluids rose along a north-south trending zone passing near well M-105. This zone is displaced toward the west with respect to the one inferred from the self-potential study (Corwin et al., 1979).

It should be recognized that the isotopic and mineralogic data represent the preproduction condition of the system—that is, before 1973 when large-scale exploitation of the field began.

NUMERICAL COMPUTER PROGRAM AND METHODOLOGY

The numerical computer code CCC developed at Lawrence Berkeley Laboratory was used in these studies. The program solves the heat and mass flow equations for liquid-saturated media. Details on the Integrated Finite Difference Method and on explicit-implicit iterative procedure to advance in time used in this program are given elsewhere (Edwards, 1972; Narasimhan and Witherspoon, 1976; Lippmann et al., 1977).

In all cases the numerical computations were run until a steady-state pressure and temperature distribution was obtained in the simulated system. The computed temperatures were then compared with Mercado's (1976) temperature distributions (Figs. 2 and 3).

Using these comparisons as a guide, the characteristics of the sources, sinks, and boundary conditions were modified to improve the match. The changes were not arbitrarily made but were based on available geological and reservoir engineering information.

A number of different models were used to reproduce Mercado's preproduction temperature distributions. Only the results of two of the cases studied will be dis-

cussed here. As will be shown, it was not possible to reach good agreements. We suspect that the simplified geological model and boundary conditions used in the simulations contributed to the poor matches obtained. Recent studies (Lyons and van de Kamp, 1980) indicate that the lithology of the field is quite complex, with lithofacies changes controlling largely the fluid flow within the system.

GEOLOGICAL MODEL

Using the information available in mid-1979, a simplified geological model of Cerro Prieto was developed for use in simulations. The faults believed to be bounding and intersecting the area initially developed by CFE (Cerro Prieto I) are shown on Figure 6. Based on these data, the region modeled to reproduce the preproduction conditions of the field was restricted to the area indicated on Figure 7.

Basically, the lithologic column introduced by Abril G. and Noble (1979) was incorporated in the model (Fig. 8). According to them, in this area the column may be subdivided into three units. The upper one (Unit A) consists of unconsolidated sediments, the middle one (Unit B) of consolidated materials, and the lower one (Unit C) of granodioritic and metamorphic rocks. Unit A acts as the leaky caprock of the geothermal system while Unit C constitutes its impermeable bedrock. Unit B, overlying the basement formed by alternating sandstone and shale layers, can be divided into five major subunits.

The top layer, L_1 , consists of sandstone lenses and shales. Its lenticular aquifers supposedly could be the source of colder, less saline waters which recharge the geothermal reservoir below, as their pressures drop in response to fluid extraction (Truesdell et al., 1979a).

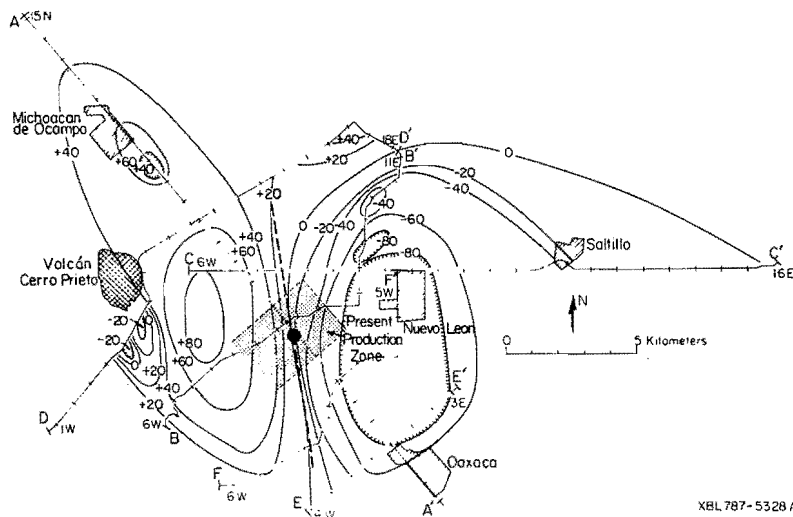


Figure 4. Self-potential contours in the Cerro Prieto area. Lines A-A' through F-F' are survey lines. The heavy dashed line represents the trace of the inferred self-potential source plane and location of a possible geological discontinuity. The heavy dot indicates the center of the source region (from Corwin et al., 1979).

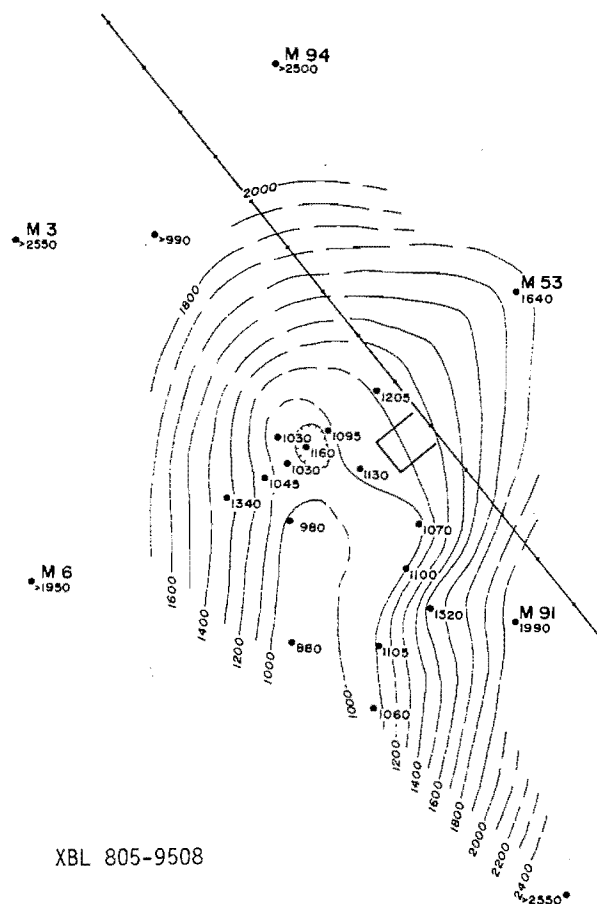


Figure 5. Depth to the first occurrence of epidote in sandstone (from Elders et al., 1978).

Below Layer L_1 is Layer L_2 , which is characterized by rocks with high content of carbonate cement. The underlying sandy strata, separated by a shaly layer, are the main geothermal reservoirs A and B at Cerro Prieto.

The total thickness of the sedimentary column varies within the Cerro Prieto field. Bedrock was reached only in wells M-3 (2532 m), M-96 (2713 m), and S-262 (1470 m). The depth to the block-faulted basement increases significantly toward the east (Fonseca L. and Razo M., 1980). For simulation purposes the top of the bedrock was assumed to be at a constant depth of 2,500 m throughout the modeled area.

An isopach map of Unit A, based on data provided by CFE, is given in Figure 9. For the simulations the variable thickness of this unit was modeled as shown in Figure 7. By assuming constant thicknesses for the different subunits of Unit B, three basic lithologic columns were used in the model (Fig. 8). It is believed (A. Mañón M., personal commun.) that in the central part of the Cerro Prieto I area there is preferential fluid

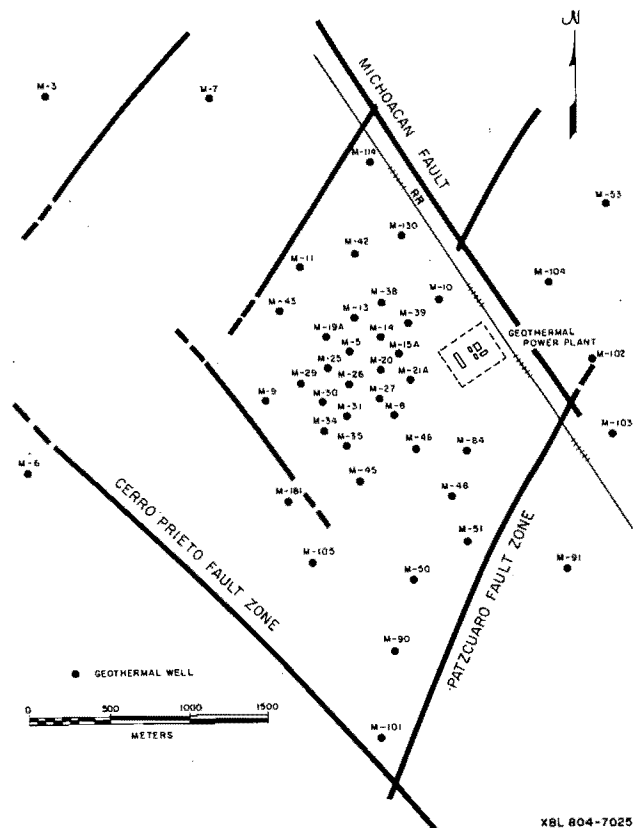


Figure 6. Fault map for the area initially developed at Cerro Prieto (from Vonder Haar and Howard, 1980).

movement in a northeast-southwest direction due to presence of more permeable facies or highly fractured rocks. This feature was incorporated in the model as discussed below.

MESH USED IN THE SIMULATIONS

The three-dimensional region studied was subdivided into 560 nodes (or elements). The vertical column, 2,500 m thick, was subdivided into 8 horizontal levels (each having 70 nodes). The lowest level (100 level) is 600 m thick, above it the 200 to 700 levels each 200 m thick, and the upper level (800 level) is 700 m thick. The different thicknesses were needed to account for the different lithologic columns used in the model (Fig. 8).

Figure 10 depicts the numbering used for the nodes in the 400-level, a similar numbering scheme was used in the other levels. In this three digit system, the first digit represents the level, while the number of the node is represented by the other two. Thus, node 818 lies in the 800-level layer and is vertically above nodes 118, 218, 318, 418, 518, 618, and 718. In the horizontal plane,

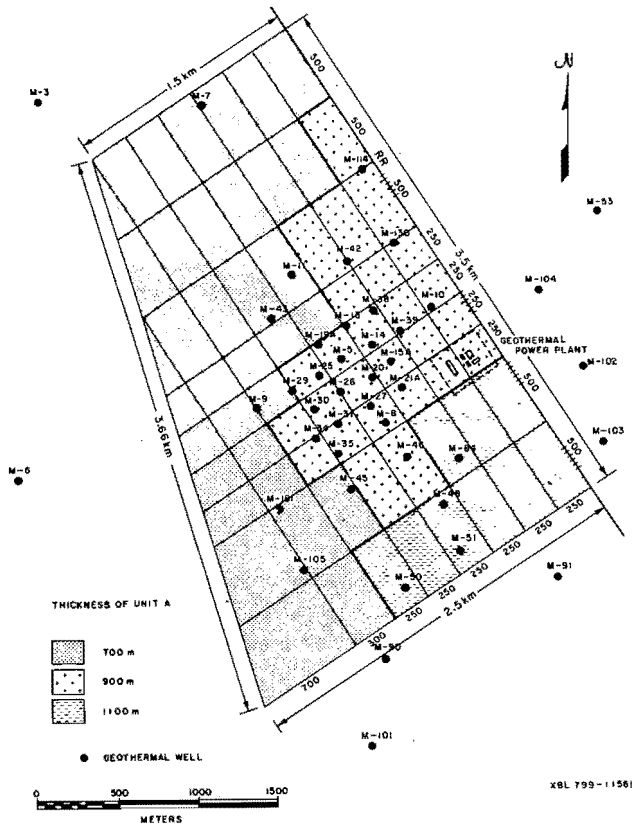


Figure 7. Plan view of the area modeled and the mesh used in this paper. Contrasting hatchings correspond to different thicknesses of Unit A (unconsolidated sediments).

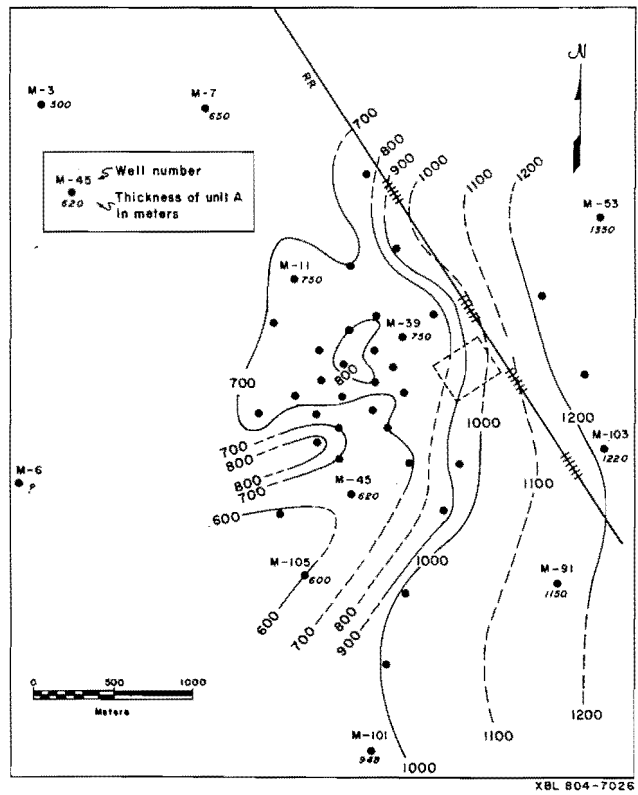


Figure 9. Unit A isopach map.

its shape is exactly the same as that of node 418. Figure 10 shows the northeast-southwest trending high permeability area, representing a coarser facies or a fractured zone in the field. The higher permeable material was restricted to the 400 level only.

BOUNDARY AND INITIAL CONDITIONS

Boundary conditions which have to be specified in the model are: (1) type of boundaries whether open or closed to heat and mass flow, (2) temperatures and pressures at the boundaries, (3) location and strength of sources and sinks, and (4) temperature of fluid entering the system.

In the various models developed for the Cerro Prieto I area most of these conditions were varied to study their effect on the preproduction temperature distributions. However, in both cases discussed here, we used the following conditions: 1) the inflow and outflow of fluids into and from the region were modeled by placing sources and sinks in some nodes located at the boundaries (i. e. near geologic faults). 2) All vertical boundaries were closed to heat flow. 3) The top and bottom boundaries were held at constant temperatures. The top surface was assumed to be at 25°C; the bottom either at 150°C or 280°C. 4) The total mass flow rate

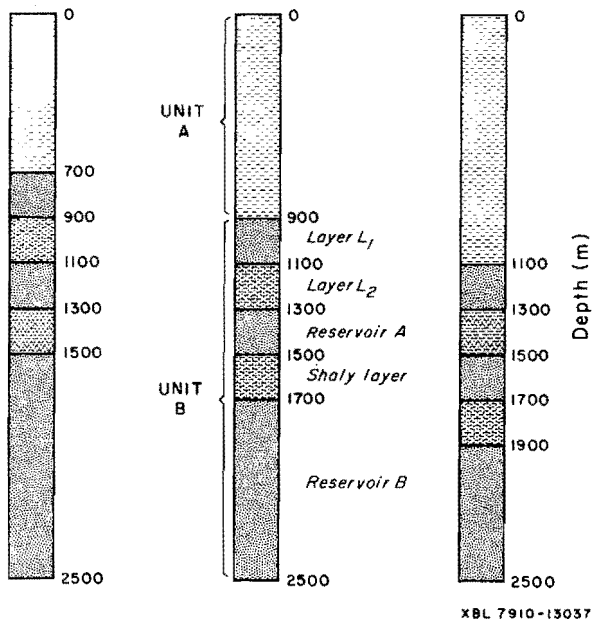


Figure 8. Basic lithologic columns used in the model for the areas with different Unit A thicknesses (see Fig.7).

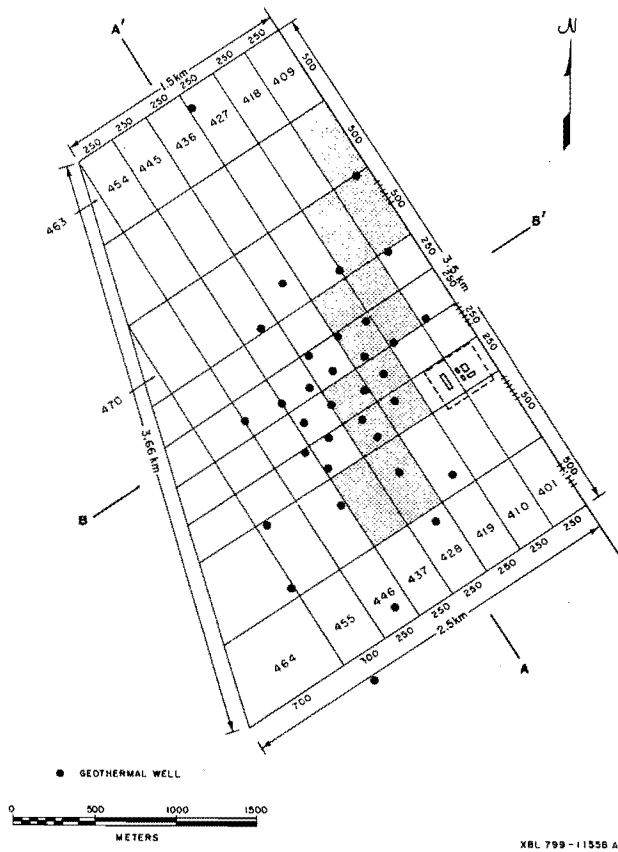


Figure 10. Plan view of the mesh used for computation. Hatched area indicates an area of higher permeability in the 400 level (1,400 m depth). Node numbering for the 400 level, and the location of the A-A' and B-B' cross sections are also shown.

across the model (from the sources towards the sinks) was arbitrarily assumed to be 2.95×10^7 kg/day. This rate is about 2.15 times the preproduction discharge of the surface manifestations in the area as reported by Mercado G. (1968). We considered that before 1973 a significant fraction of the heat and mass inflow into the geothermal field rose to the surface mainly through the fault zones.

Hydrostatic pressure and linear temperature-depth distribution were used as initial conditions for the system.

FLUID AND ROCK PROPERTIES

We assumed that 1) the fluid in the system was liquid and had constant properties, and 2) the properties of the solid matrix are isotropic and constant.

For the fluid, pure water properties at 250°C were used. The solid matrix properties are given in Table 1 and are representative of the different lithologies included in the model.

No temperature or pressure dependency of the properties was used to reduce the cost of computations, and we felt that this simplification would not significantly affect the computed steady-state temperature distributions. We planned to include temperature and pressure dependencies once an acceptable match between computed and published (Mercado G., 1976) temperatures was obtained.

MODEL 1

In model 1 as well as in the one discussed later, we considered that the recharge and discharge areas were closely associated with the bounding faults. We assumed

TABLE 1. PROPERTIES USED FOR THE SOLID MATRIX

Material	Density (kg/m ³)	Heat capacity J/kg · °C	Thermal cond. (J/m-day · °C)	Intrinsic permeability (md)	Porosity
Unit A	2500	935	1.92×10^5	10^{-3}	0.20
Layer L ₁	2650	825	2.8×10^5	20	0.10
Layer L ₂	2700	860	1.85×10^5	5	0.10
Reservoir A	2650	825	2.8×10^5	50	0.10
Shaly layer	2700	860	1.85×10^5	5	0.10
Reservoir B	2650	825	2.8×10^5	80	0.10
Highly permeable layer	2650	825	2.8×10^5	100	0.10

the inflow of fluids into the system to be distributed as follows (Table 2):

1. 22% of the total mass recharge is at 350°C. The sources are located in the lower part of Reservoir B (100 level), near the intersection of the Michoacán and Pátzcuaro faults (Fig. 6).

2. 61% of the recharge comes from colder water sources located in the upper part of Reservoir B (levels

TABLE 2. MODEL 1 – LOCATION AND CHARACTERISTICS OF SOURCES AND SINKS

SOURCES		
Node	Mass Flow Rate (kg/day)	Temperature (°C)
101	2.5×10^6	350
110	2.5×10^6	350
119	1.5×10^6	350
264	2.5×10^6	208
265	2.5×10^6	208
266	1.5×10^6	208
267	1.5×10^6	208
268	1.0×10^6	208
364	2.5×10^6	188
365	2.5×10^6	188
366	1.5×10^6	188
367	1.5×10^6	188
368	1.0×10^6	188
608	5.0×10^6	250

SINKS	
Node	Mass Flow Rate (kg/day)
527	1.00×10^6
536	1.00×10^6
545	1.00×10^6
554	1.00×10^6
562	2.00×10^6
563	0.50×10^6
564	3.50×10^6
565	2.75×10^6
566	2.00×10^6
727	1.00×10^6
736	1.00×10^6
745	1.00×10^6
754	1.00×10^6
762	2.00×10^6
763	0.50×10^6
764	3.50×10^6
765	2.75×10^6
766	2.00×10^6

200 and 300, at 208°C and 188°C, respectively), near the southwest region of the system, along the Cerro Prieto fault zone.

3. 17% of inflow of fluid is concentrated at the intersection of the Michoacán fault and a northeast-southwest trending fault (Fig. 6.) The 250°C source (node 608) is located in Layer L_1 .

The sinks where the fluids leave the system were distributed around its northwest and southwest corners, near the intersection of the Cerro Prieto fault and northeast-southwest trending faults. The discharge occurs through Layers L_1 and L_2 , at levels 700 and 500 respectively. The sinks were arranged in a manner approximately similar to the surface distribution of the geothermal manifestations in the area given by Mercado G. (1968).

The bottom of the model (2,500 m depth) was considered to be a constant temperature boundary at 150°C. This low value was used to duplicate the temperatures of the regions away from the hot recharge zones. Around the inflow zones the temperatures near the bottom of the model will be reflecting those of the recharge fluids and not that of the boundary.

The computed steady-state temperatures are described by various temperature distribution maps. The effect of sources and lower permeability layers on the fluid flow can be established by analyzing the isotherms at different depths. The hotter waters entering the system at the deeper levels move in response to the pressure distribution resulting from the sources and sinks located in the model; it tends to move around the less permeable layers.

The isotherms at 1,000 m (600 level) and 1,400 m (400 level) are given in Figures 11 and 12, respectively. In Figure 11 the 250°C isotherm in the northeast part reflects the effect of the source in node 608. The high temperatures in the south-central part of the system are caused by the hot water rising from beneath. In Figure 12, the isotherms in the southeast corner indicate the movement and cooling of the water as it flows away from the 350°C sources. The 190°C isotherm toward the west shows the influence of 188°C sources located in the 300 level; the 260°C isotherm toward the northeast shows that of 250°C sources in the 600 level.

The calculated temperatures along the sections A-A' and B-B' (Fig. 10) are shown in Figures 13 and 14. These plots, when compared with the temperatures given in Figures 2 and 3, indicate that in the southeast-northwest section, the computed temperatures are higher everywhere except in the area near the center of Figure 13. In this region the temperatures seem to be dominated

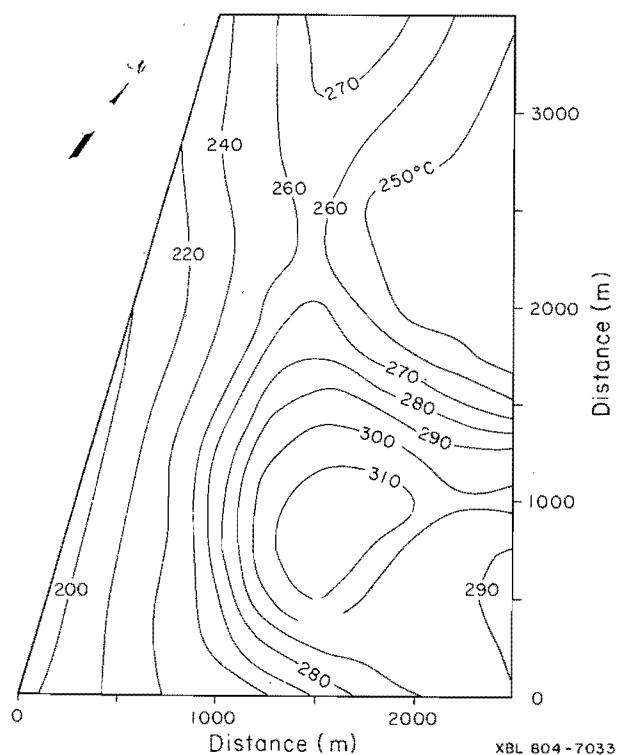


Figure 11. Model 1. Isothermal map for the 600 level (1000 m depth).

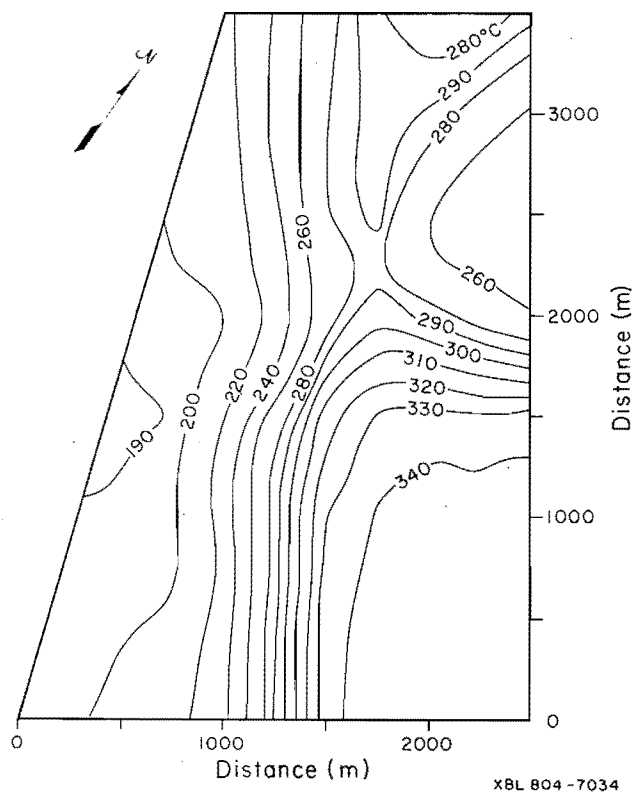


Figure 12. Model 1. Isothermal map for the 400 level (1400 m depth).

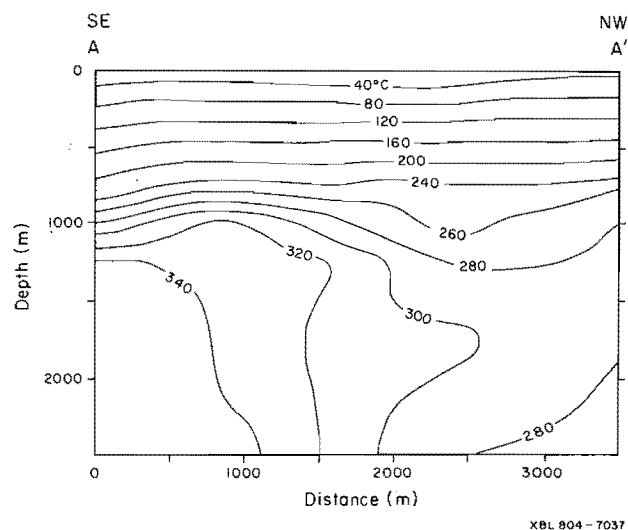


Figure 13. Model 1. Temperature distribution along the A-A' cross section.

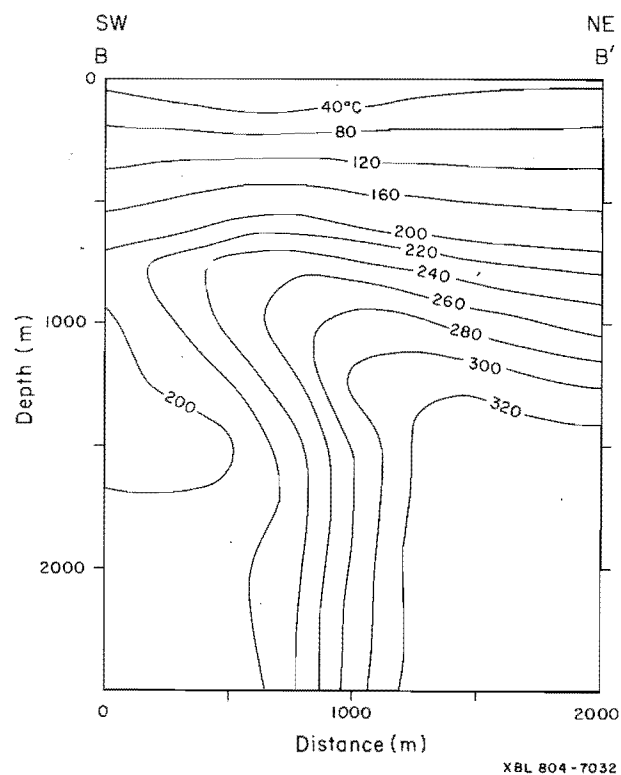


Figure 14. Model 1. Temperature distribution along the B-B' cross section.

by the strength and temperatures of the sources located at the southeast corner of the field. A comparison of Figures 3 and 14 indicates that the temperatures match favorably near well M-9 and in the central part of the field. Generally the calculated temperatures are higher than those of Mercado.

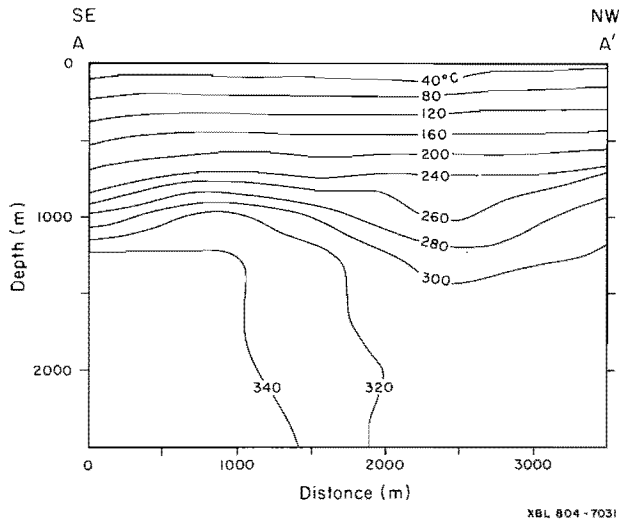


Figure 15. Model 1, with lower constant temperature boundary at 280°C. Temperature distribution along the A-A' cross section.

To determine the effect of increasing the temperature of the lower boundary of the model, it was changed from 150 to 280°C. Comparing Figures 13 and 15 shows an increase of the temperature throughout the system. The major observed temperature differences are in the lower 1,500 m, in the northwest part of the section. The effects are less toward the southeast because of the presence of the fluid sources whose temperatures were kept unchanged.

By modifying the temperature of the lower boundary no improvement of the match with Figure 2 and 3 was achieved. It was decided to modify the characteristics of the fluid sources of the model to attain a closer correspondence with Mercado's preproduction temperatures.

TABLE 3. MODEL 2 – LOCATION AND CHARACTERISTICS OF SOURCE

Node	Mass Flow Rate (kg/day)	Temperature (°C)
128	2.5×10^6	350
137	3.0×10^6	350
146	3.0×10^6	350
155	3.0×10^6	350
164	2.5×10^6	350
165	1.5×10^6	350
364	2.5×10^6	200
365	2.5×10^6	200
366	1.5×10^6	200
367	1.5×10^6	200
368	1.0×10^6	200
608	5.0×10^6	200

MODEL 2

To obtain a better match, the sources in the 100 level were displaced towards the southwest corner of the system and the 200-level sources were taken out and their flow rates were added to those at the 100 level. The temperature of the sources at the 300 and 600 levels were changed to 200°C (Table 3). The sinks in this model were assumed to be equal to those in Model 1 (Table 2). The temperature of the lower boundary was again fixed at 150°C.

Isotherms at 1,000- and 1,400-m depths (600 and 400 levels) are given in Figures 16 and 17. Temperatures have changed with respect to those of Figures 11 and 12 in response to the change of source characteristics.

Isotherms along section A-A' are shown in Figure 18. A comparison with Figure 2 indicates that the calculated temperatures at well M-8 are close to Mercado's. Temperatures in the central part of Figure 18 also match favorably those in Figure 2. The calculated temperatures are slightly higher in the southeastern part of the field. Isotherms along section B-B' are shown in Figure 19. A comparison of these temperatures with those in Figure 3 shows that the calculated temperatures are, in general, higher than the preproduction temperatures given by Mercado G. (1976).

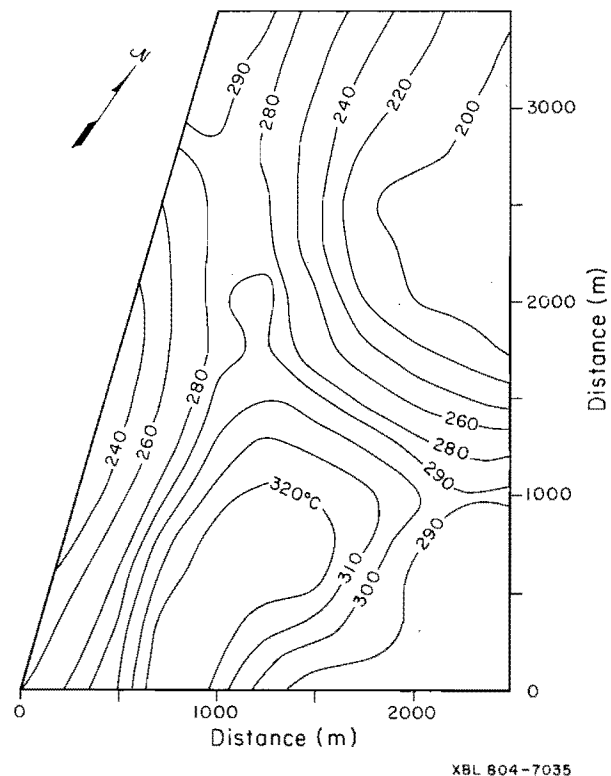


Figure 16. Model 2. Isothermal map for the 600 level (1,000 m depth).

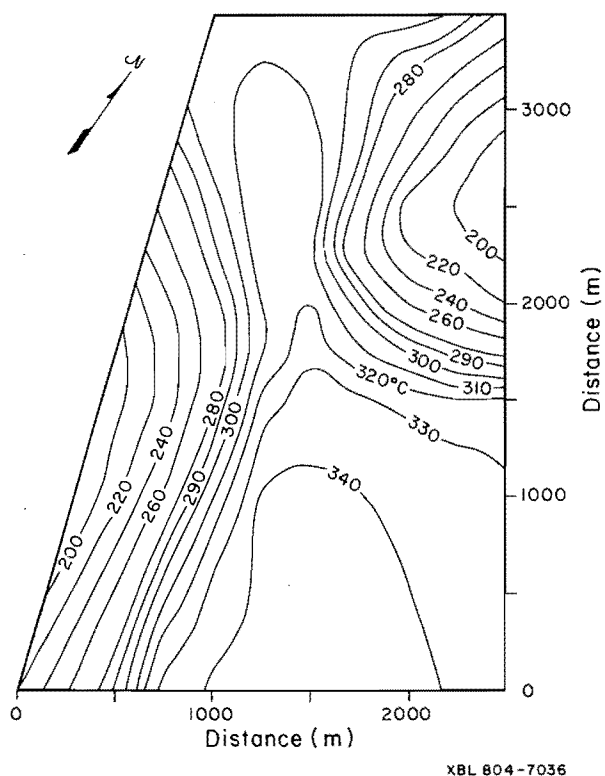


Figure 17. Model 2. Isothermal map for the 400 level (1,400 m depth).

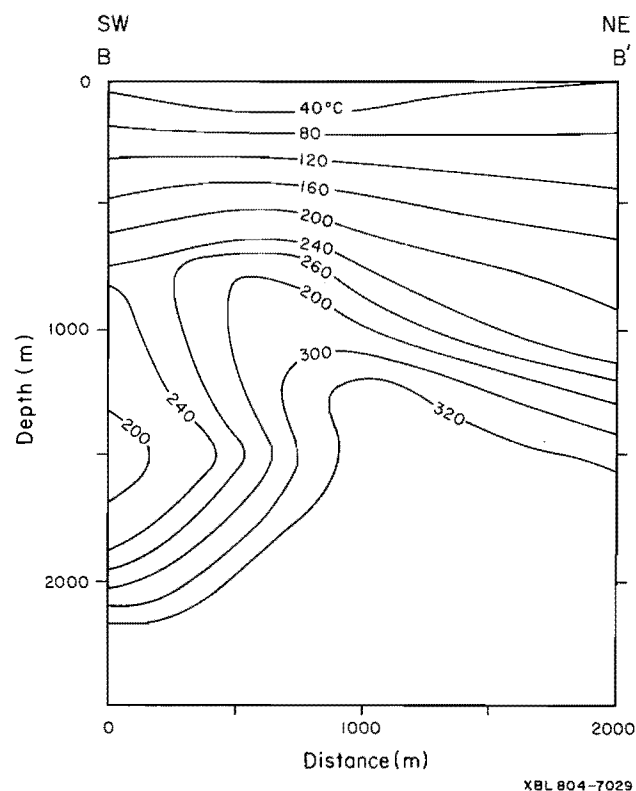


Figure 19. Model 2. Temperature distribution along the B-B' cross section.

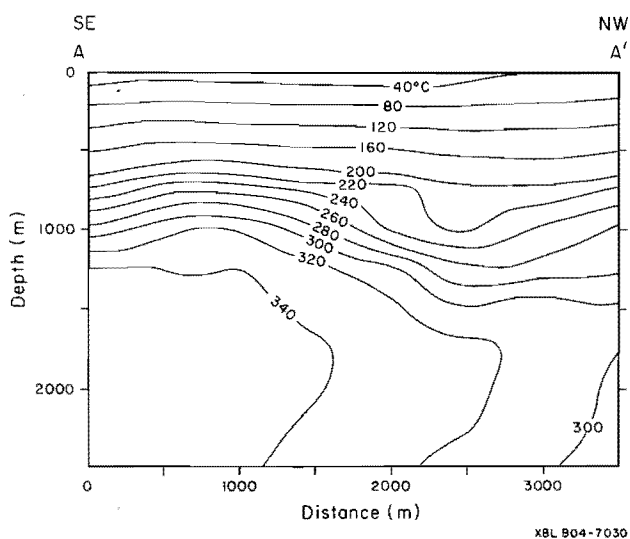


Figure 18. Model 2. Temperature distribution along the A-A' cross section.

FINAL REMARKS

A simplified three-dimensional hydrogeological model of the Cerro Prieto field was developed using the available data at the time. We considered numerous modifications in the model's boundary conditions, especially in the characteristics and locations of sources and sinks, and properties of the different lithologies in the model with the purpose of matching the computed steady-state temperatures with those preproduction temperatures reported by Mercado G. (1976). Only partial matches were obtained, as illustrated in the two examples discussed above. To determine the preproduction recharge and flow characteristics of the field, it will be necessary to obtain not only more temperature data but also early pressure distribution data and to improve the geological model of this system.

Several authors in this volume have presented new information on the structure, lithology, and the physical characteristics of the field. The wealth of information becoming available will allow the development of an improved model of the field which could be incorporated in future simulations to establish the pre-1973 characteristics of the area and to predict the future behavior of the geothermal field as its development continues.

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to thank our colleagues of the Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto of CFE and of the Earth Sciences Division of LBL for sharing their data and for their valuable suggestions.

This work was supported by the U. S. Department of Energy, Division of Geothermal Energy, under contract W-7405-ENG-48.

REFERENCES CITED

- Abril G. A. and Noble, J. E., 1979, Geophysical well-log correlations along various cross-sections of the Cerro Prieto geothermal field, *in* Proceedings, First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, September 1978: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7098, p. 41-48.
- Bermejo M. F., Cortéz A. C., and Aragón A. A., 1979, Physical and thermodynamic changes observed in the Cerro Prieto geothermal reservoir, *in* Proceedings, First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, September 1978: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7098, p. 300-332.
- Corwin, R. F., Morrison, H. G., Díaz C. C., and Rodríguez B. J., 1979, Self-potential studies at the Cerro Prieto geothermal field, *in* Proceedings, First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, September 1978: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7098, p. 204-210.
- Edwards, A. L., 1972, TRUMP: A computer program for transient and steady state temperature distribution in multidimensional systems: Livermore, Lawrence Livermore Laboratory, UCRL-14754, Rev. 3.
- Elders, W. A., Hoagland, J. R., Olson, E. R., McDowell, S. D. and Collier, P., 1978, A comprehensive study of samples from geothermal reservoirs: Petrology and light stable isotope geochemistry of twenty-three wells in the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico: Riverside, University of California, UCR/IGPP-78/26.
- Fonseca L. H., and Razo M. A., 1980, Gravimetric magnetometric and seismic reflection studies at the Cerro Prieto geothermal field (this volume).
- Lippmann, M. J., Tsang, C. F., and Witherspoon, P. A., 1977, Analysis of the response of geothermal reservoirs under injection and production procedures: Dallas, Society of Petroleum Engineers, SPE-6537.
- Lyons, D. J., and van de Kamp, P. C., 1980, Subsurface geological and geophysical study of the Cerro Prieto geothermal field: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-10540 (in preparation).
- Mercado G. S., 1968, Localización de zonas de máxima actividad hidrotermal por medio de proporciones químicas, campo geotérmico de Cerro Prieto B. C.: presented at the III Congreso Mexicano de Química Pura y Aplicada March 21-23, 1968, Guadalajara, Mexico: Sociedad Química de México.
- Mercado G. S., 1976, Movement of geothermal fluids and temperature distribution in the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico, *in* Proceedings Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, May 1975: Washington, D. C., U. S. Government Printing Office, v. 1, p. 487-494.
- Narasimhan, T. N., and Witherspoon, P. A., 1976, An integrated finite difference method for analyzing fluid flow in porous media: Water Resources Research, v. 12, no. 1, pp. 57-64.
- Sánchez R. J., and de la Peña L. A., 1980, Preliminary geohydrological study of the Cerro Prieto geothermal field (this volume).
- Truesdell, A. H., Mañón M. A., Jiménez S. M. E., Sánchez A. A., and Fausto L. J. J., 1979a, Geochemical evidence of drawdown in the Cerro Prieto geothermal field, *in* Proceedings, First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, September 1978: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7098, p. 130-135.
- Truesdell, A. H., Rye, R. O., Pearson, F. J. Jr., Olson, E. R., Nehring, N. L., Huebner, M. A., and Coplen, T. B., 1979b, Preliminary isotopic studies of fluids from the Cerro Prieto geothermal field, *in* Proceedings, First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, September 1978: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7098, p. 95-99.
- Vonder Haar, S., and Howard, J. H., 1980, Intersecting faults and sandstone stratigraphy at the Cerro Prieto geothermal field (this volume).

MODELADO NUMERICO DEL YACIMIENTO DE CERRO PRIETO. INFORME DE AVANCE

RESUMEN

Un prerrequisito para toda simulación numérica correcta del comportamiento de un sistema geotérmico bajo diferentes esquemas de producción, es el conocimiento de las condiciones iniciales y de contorno del sistema.

Con base en los datos disponibles, se consideraron diferentes condiciones de contorno y propiedades de los materiales, usando un programa de computación que calcula el transporte de calor y masa en medios porosos noisotérmicos saturados de líquido. En estas simulaciones se supuso que en principio Cerro Prieto era esencialmente un sistema geotérmico de una fase (dominado por líquido).

Se calcularon temperaturas estacionarias para diferentes condiciones de contorno de recarga y descarga supuestas para el periodo anterior a la iniciación de la producción del campo. Se analizaron los resultados obtenidos y se compararon con las distribuciones de temperatura iniciales publicadas para el sistema de Cerro Prieto.

INTRODUCCION

En la actualidad, el campo geotérmico de Cerro Prieto produce 150 MW de energía eléctrica. En abril de 1979 la capacidad de la planta geotermoeléctrica fue duplicada (de 75 a 150 MW) al entrar en operación dos nuevas unidades. En consecuencia, la producción de fluidos ha aumentado de alrededor de 2800 a 4200 toneladas/hora. Bermejo M. *et al.* (1979) estiman que hasta fines de 1978 cerca de 1.2×10^8 toneladas de mezcla han sido extraídas del campo. La figura 1 indica la ubicación de más de 60 pozos profundos realizados en el campo.

Para 1985, la Comisión Federal de Electricidad espera incrementar a 400 MW la capacidad acumulativa de planta en Cerro Prieto. Mejores estimaciones de la capacidad total del campo serán esenciales para estudiar la posibilidad de un mayor desarrollo de la zona.

Para estimar la capacidad y vida del campo de Cerro Prieto, es de fundamental importancia un modelo geohidrológico. En este texto varios trabajos detallan las distintas actividades que se están realizando para determinar las dimensiones, la estructura y la estratigrafía del campo, las propiedades e interconexiones entre

los varios acuíferos, y la circulación de fluidos y calor dentro del sistema geotérmico y a través de sus fronteras.

El propósito de este estudio es establecer las condiciones de recarga y descarga del campo antes de que comenzara su explotación. Primero, con base en los datos disponibles se desarrolló un modelo geológico simplificado del campo. Luego, utilizando un programa de computación se calcularon numéricamente los flujos de calor y masa a través de este modelo. Con el propósito de reproducir las temperaturas de preproducción publicadas por Mercado G. (1976) y Elders *et al.* (1978), se variaron la ubicación, la temperatura y la intensidad de las áreas de recarga y descarga, y las propiedades de los diferentes materiales. No se intentó duplicar las presiones iniciales del yacimiento ya que para el periodo anterior a 1973 sólo hay disponibles presiones para la parte central del campo (Sánchez R. y de la Peña L., 1980).

Las fuentes y sumideros identificados por este estudio también podrían ser utilizados para simular el comportamiento del campo después de 1973. Sin embargo, sus características cambiarían debido a la producción de fluidos a gran escala. En este sistema abierto, la entrada de masa al yacimiento desde las fuentes debería incrementar en forma significativa, y se prevé una disminución en los sumideros debido a la explotación del campo. Además, es de esperar que las regiones vecinas al yacimiento en producción drenen fluidos (fríos y calientes) como resultado de los cambios en la distribución de presiones en el campo.

TRABAJOS RELACIONADOS

Para predecir el comportamiento futuro de un campo es esencial el conocimiento de sus características de recarga y descarga. Con base en datos de estudios realizados, se pueden inferir zonas de recarga y direcciones de flujo del fluido recargado. Lamentablemente no todos los datos indican con exactitud las mismas zonas y direcciones.

Por otro lado, no se tiene la ubicación precisa a profundidad de las zonas a través de las cuales parte del fluido y del calor transportados en el yacimiento fluye hacia la superficie. Se puede afirmar que a través de la capa sello se conduce calor, y que fluidos y calor trans-

portados por convección son descargados en la superficie a lo largo de las fallas principales de la zona.

Mercado G. (1976) desarrolló un modelo hidrogeológico del área de Cerro Prieto utilizando datos de temperatura, presión, entalpía y producción de los pozos, y correlaciones geotermoquímicas de los fluidos producidos. El postuló que: 1) fluidos calientes que ascienden en las zonas oriental y central del campo fluyen hacia el O, 2) el yacimiento es recargado principalmente desde el O (en el área de los abanicos aluviales de la Sierra de Cucapás), y en parte por el flujo subterráneo de agua proveniente del Río Colorado. Las figuras 2 y 3 muestran la distribución de temperaturas previas a la explotación del campo, a lo largo de dos secciones (Mercado G., 1976).

De acuerdo con Truesdell *et al.* (1979b), la comparación entre el contenido de deuterio medido en las aguas geotérmicas de Cerro Prieto y la composición interpolada de las aguas frías del Valle de Mexicali, sugiere que la recarga del sistema pudo haber ocurrido a lo largo de una angosta zona que corre al N por Mexicali, pasa exactamente al O del campo, y dobla para el NE hacia la Mesa Arenosa al E. La recarga desde el O concuerda en parte con el modelo de Mercado (1976).

Corwin *et al.* (1979) correlacionaron la anomalía dipolar de potencial espontáneo detectada en el área de Cerro Prieto con la actividad geotérmica. Ellos concluyeron que la anomalía en superficie podría resultar de una zona de falla o fractura a lo largo de la cual existiría una componente vertical de flujo de fluido y/o calor. La figura 4 muestra la anomalía de potencial espontáneo y la posición inferida de la discontinuidad geológica. Según estos datos, la zona de flujo ascendente de agua caliente está distribuida a lo largo de una zona aproximadamente N-S que pasa cerca del pozo M-48.

Por medio del estudio de núcleos y recortes de pozos, Elders *et al.* (1978) establecieron en el campo un número de zonas mineralógicas regularmente distribuidas. Ellos elaboraron mapas indicando las profundidades a las que aparecen por primera vez ciertos minerales que pueden diagnosticar temperaturas. Por ejemplo, la figura 5 muestra el mapa correspondiente a la epidota, indicando la profundidad para temperaturas de 230° a 250°C. La distribución mineralógica sugiere que los fluidos más calientes ascendieron a lo largo de una zona de rumbo N-S que pasa cerca del pozo M-105. Esta zona está desplazada hacia el O respecto a la que fue inferida del estudio de potencial espontáneo (Corwin *et al.*, 1979).

Debería indicarse que los datos isotópicos y mineralógicos representan las condiciones del sistema antes

de comenzar su explotación; es decir, antes de 1973, cuando se inició en el campo la producción en gran escala.

PROGRAMA NUMERICO DE COMPUTACION Y METODOLOGIA

En estos estudios se utilizó el código numérico de computación CCC desarrollado en el Lawrence Berkeley Laboratory. El programa resuelve las ecuaciones de flujo de calor y masa para medios saturados de líquidos. Detalles del Método Integrado de Diferencias Finitas y del procedimiento explícito-implícito iterativo para avanzar en el tiempo, utilizados en este código, se encuentran en otras fuentes (Edwards, 1972; Narasimhan y Witherspoon, 1976; Lippmann *et al.*, 1977).

En todos los casos estudiados los cálculos numéricos fueron realizados hasta obtener un estado estacionario de presión y temperatura en los sistemas simulados. Luego, las temperaturas calculadas fueron comparadas con las distribuciones de temperatura de Mercado (1976), (Figs. 2 y 3).

Con estas comparaciones como guías, se modificaron las características de las fuentes, sumideros y condiciones de contorno para reducir las diferencias. Estos cambios no fueron hechos arbitrariamente, sino que se basaron en la información geológica y de ingeniería de yacimientos disponible.

Para reproducir las distribuciones de temperatura de Mercado se utilizaron varios modelos diferentes. Sólo se presentarán aquí dos de los casos estudiados. Como se verá, no fue posible obtener un buen acuerdo. Se sospecha que el modelo geológico simplificado y las condiciones de contorno utilizados en las simulaciones contribuyeron a los deficientes acuerdos obtenidos. Estudios recientes (Lyons y van de Kamp, 1980) indican que la litología del campo es bastante compleja, con cambios de litofacies que en gran proporción controlan el flujo de fluidos en el sistema.

MODELO GEOLOGICO

Con la información disponible hasta mediados de 1979, se desarrolló un modelo simplificado de Cerro Prieto para ser utilizado en las simulaciones. Las fallas que se supone limitan e intersecan el área se muestran en la figura 6. Con base en estos datos la región modelada para duplicar las condiciones del campo antes de comenzar su explotación, se restringió al área indicada en la figura 7.

Básicamente, en el modelo se utilizó la columna litológica desarrollada por Abril G. y Noble (1979), (Fig. 8). De acuerdo con ellos, en esta área la columna puede subdividirse en tres unidades. La superior (Uni-

dad A) consta de sedimentos no consolidados; la intermedia (Unidad B), de materiales consolidados, y la inferior (Unidad C), de rocas granodioríticas y metamórficas. La Unidad A se comporta como la roca sello del sistema geotérmico, la que, sin embargo, permite el movimiento parcial de los fluidos. La Unidad C constituye el basamento impermeable del sistema. La Unidad B, que yace sobre el basamento, está formada por estratos alternados de arenisca y lutita, y puede dividirse en cinco subunidades principales.

El estrato superior, L_1 , está constituido por lentes de areniscas y lutitas. Sus acuíferos lenticulares posiblemente podrían ser la fuente de aguas frías y menos salobres, que recargan los yacimientos geotérmicos infrayacentes, al disminuir las presiones de los mismos como resultado de la extracción de fluidos (Truesdell *et al.*, 1979a). Debajo del Estrato L_1 se encuentra el Estrato L_2 , caracterizado por rocas de elevado contenido de cemento carbonático. Los estratos arenosos infrayacentes, separados por una capa lutítica, son los principales yacimientos geotérmicos, A y B, en Cerro Prieto.

En el campo de Cerro Prieto el espesor total de la columna sedimentaria es variable. El basamento sólo se alcanzó en los pozos M-3 (2532 m), M-96 (2713 m), y S-262 (1470 m). Hacia el E, la profundidad del basamento, cuya estructura es de bloques fallados, aumenta apreciablemente (Fonseca L. y Razo M., 1980). En los estudios de simulación se supuso que en toda el área modelada la cima del basamento se encontraba a una profundidad uniforme de 2500 m.

En la figura 9 se muestra un mapa de isopacas para la Unidad A elaborado según datos suministrados por la CFE. Suponiendo espesores constantes para las diferentes subunidades de la Unidad B, en el modelo se utilizaron tres columnas litológicas básicas (Fig. 8). Se cree (A. Mañón M., comunicación personal) que en la parte central del área Cerro Prieto I hay un movimiento preferencial de fluidos en dirección NE-SO debido a la presencia de facies de rocas más permeables o altamente fracturadas. Esta característica fue incorporada en el modelo, como se analizará más adelante.

MALLA UTILIZADA EN LAS SIMULACIONES

La región tridimensional estudiada se subdividió en 560 nodos (elementos). La columna vertical, de 2500 m de espesor, se subdividió en 8 niveles horizontales (cada uno de ellos con 70 nodos). El nivel inferior (nivel 100) tiene un espesor de 600 m, sobre éste se encuentran los niveles 200 a 700, de 200 m de espesor cada uno, y el nivel superior (nivel 800), de 700 m de espesor. Se necesitaron utilizar diferentes espesores debido a las distintas columnas litológicas empleadas en el modelo (Fig. 8).

En la figura 10 se indica la numeración de los nodos del nivel 400. Un sistema similar de numeración se empleó en los otros niveles. En este sistema de tres dígitos, el primer dígito indica el nivel, mientras que el número del nodo está dado por los otros dos. O sea, que el nodo 818 se encuentra en el nivel 800 y está verticalmente sobre los nodos 118, 218, 318, 418, 518, 618 y 718. En el plano horizontal su forma es exactamente igual a la del nodo 418. En la figura 10 se muestra el área de alta permeabilidad, de rumbo NE-SO, que representa una facie más gruesa o una zona fracturada del campo. El material de alta permeabilidad se restringió sólo al nivel 400.

CONDICIONES INICIALES Y DE CONTORNO

Las condiciones de contorno que tienen que ser especificadas en el modelo son: 1) tipo de contorno —si está abierto o cerrado al flujo de calor y masa—; 2) temperatura y presión en los contornos; 3) ubicación e intensidad de las fuentes y sumideros, y 4) temperatura de los fluidos que entran en el sistema.

En los diversos modelos desarrollados para el área de Cerro Prieto I, la mayoría de dichas condiciones fueron variadas para estudiar sus efectos sobre la distribución de temperaturas anterior a la explotación del campo. Sin embargo, en ambos casos presentados aquí se utilizaron las siguientes condiciones: 1) La entrada y salida de fluidos se modeló colocando fuentes y sumideros en algunos de los nodos ubicados en los bordes de la región (es decir, cerca de fallas geológicas). 2) Todos los contornos verticales se cerraron al flujo de calor. 3) Los contornos inferior y superior se mantuvieron a temperaturas constantes. La temperatura de la superficie superior se fijó en 25°C, la de la inferior en 150°C o 280°C. 4) El flujo total de masa a través del modelo (desde las fuentes a los sumideros) se fijó arbitrariamente en 2.95×10^7 kg/día. Este flujo es aproximadamente 2.15 veces la descarga dada por Mercado G. (1968) de las manifestaciones superficiales en el área, antes de que comenzara la explotación del campo. Se considera que antes de 1973 una fracción significativa del calor y de la masa que recargaba al sistema geotérmico, fluía hacia la superficie, especialmente por las zonas de fallas.

Como condiciones iniciales del sistema se utilizaron presiones hidrostáticas y distribuciones de temperaturas que variaban en forma lineal con la profundidad.

PROPIEDADES DEL FLUIDO Y DE LAS ROCAS

Se supuso que 1) el fluido en el sistema era líquido y que tenía propiedades constantes, y 2) las propiedades de la matriz sólida eran isotrópicas y constantes.

Para el fluido se emplearon las propiedades del agua pura a 250°C. Las propiedades de la matriz sólida

se observan en la tabla 1 y son representativas de las diferentes litologías incluidas en el modelo.

Para reducir el costo del modelado, las propiedades se tomaron como independientes de la temperatura y presión. Se consideró que esta simplificación no afectaría significativamente las distribuciones estacionarias de temperatura. Se programó incluir la dependencia con la temperatura y la presión una vez que se obtuvieran concordancias aceptables entre las temperaturas calculadas y las publicadas por Mercado G. (1976).

MODELO 1

Tanto en el modelo 1 como en el que se analizará después, se considera que las áreas de recarga y descarga estaban íntimamente relacionadas con las fallas que limitan el sistema. Se supuso que la entrada de fluidos al sistema estaba distribuida de la siguiente manera (Tabla 2):

1. 22% de la masa total recargada está a 350°C. Las fuentes se encuentran ubicadas en la parte inferior del Yacimiento B (nivel 100), cerca de la intersección de las fallas de Michoacán y Pátzcuaro (Fig. 6).
2. 61% de la recarga proviene de fuentes de agua más fría, ubicadas en la parte superior del Yacimiento B (niveles 200 y 300 a 208° y 188°C, respectivamente), cerca de la región SO del sistema, a lo largo de la zona de falla Cerro Prieto.
3. 17% de la entrada de fluidos está concentrada en la intersección de la falla Michoacán y una falla de rumbo NE-SO (Fig. 6). La fuente de 250°C (nodo 608) está ubicada en el Estrato L_1 .

Los sumideros, donde los fluidos salen del sistema, se distribuyeron alrededor de sus esquinas NO y SO, cerca de la intersección de la falla Cerro Prieto con fallas de rumbo NE-SO. La descarga se da a través de los Estratos L_1 y L_2 en los niveles 700 y 500, respectivamente. Los sumideros fueron dispuestos en una forma similar a la distribución de las manifestaciones geotérmicas superficiales dada por Mercado G. (1968).

La base del modelo (a 2500 m de profundidad) se consideró como un contorno de temperatura constante a 150°C. Este bajo valor se utilizó para duplicar las temperaturas de las regiones alejadas de las zonas calientes de recarga. Alrededor de las zonas de recarga, las temperaturas cerca de la base del modelo reflejarían la temperatura de los fluidos de recarga y no la del contorno.

La temperaturas estacionarias computadas se describen en varios mapas de distribuciones de temperatura. Los efectos de las fuentes y de los estratos de baja permeabilidad sobre el flujo de los fluidos pueden establecerse analizando las isotermas a diferentes profundida-

des. Las aguas más calientes, que penetran en el sistema por los niveles más profundos, se mueven en respuesta a la distribución de presiones debida a las fuentes y sumideros ubicados en el modelo; las aguas tienden a moverse alrededor de los estratos menos permeables.

En las figuras 11 y 12 se ven las isotermas a 1000 m (nivel 600) y 1400 m (nivel 400) de profundidad, respectivamente. En la figura 11, en la parte noreste, la isoterma de 250°C refleja el efecto de la fuente ubicada en el nodo 608. Las altas temperaturas en la parte centro-sur del sistema son debidas al ascenso de agua caliente desde los niveles inferiores. En la figura 12, las isotermas en la esquina SE indican el movimiento y enfriamiento de las aguas a medida que se alejan de las fuentes de 350°C. Al O, la isoterma de 190°C ilustra la influencia de las fuentes de 188°C localizadas en el nivel 300. La isoterma de 260°C, hacia el NE, indica el efecto de las fuentes de 250°C en el nivel 600.

Las figuras 13 y 14 muestran las temperaturas calculadas a lo largo de las secciones A-A' y B-B' (Fig. 10). Cuando se comparan con las temperaturas dadas en las figuras 2 y 3, se observa que en toda la sección SE-NO las temperaturas calculadas son mayores, excepto cerca de la parte central de la figura 13. En esta región las temperaturas parecen estar dominadas por las intensidades y temperaturas de las fuentes localizadas en la esquina SE del campo. Una comparación de las figuras 3 y 14 indica que las temperaturas concuerdan favorablemente cerca del pozo M-9 y en la parte central del campo. En general, las temperaturas calculadas son mayores que las de Mercado.

Para determinar el efecto de aumentar la temperatura del contorno inferior del modelo, se cambió ésta de 150° a 280°C. Comparando las figuras 13 y 15 se observa un aumento de temperatura en todas las partes del sistema. Las mayores diferencias de temperatura se observan en la parte NE de la sección, en los 1500 m inferiores. Los efectos son menores hacia el sureste debido a la presencia de fuentes de fluidos cuyas temperaturas no fueron modificadas.

El cambio de temperatura del contorno inferior no resultó en una mejor concordancia con las figuras 2 y 3. Se decidió modificar en el modelo las características de las fuentes de fluidos para lograr una mejor duplicación de las temperaturas anteriores a la explotación del campo dadas por Mercado.

MODELO 2

Para obtener una mejor concordancia en las temperaturas, se desplazaron hacia la esquina SO del sistema las fuentes ubicadas en el nivel 100, y se eliminaron las fuentes del

nivel 200. Los gastos de estas últimas fueron agragados a las fuentes del nivel 100. Las temperaturas de las fuentes en los niveles 300 y 600 fueron cambiadas a 200°C (Tabla 3). En este modelo se supuso que los sumideros eran iguales a los del Modelo 1 (Tabla 2). Nuevamente, la temperatura del contorno inferior se fijó en 150°C.

En las figuras 16 y 17 se ilustran las temperaturas a 1000 m y 1400 m de profundidad (niveles 600 y 400). Como resultado del cambio de las características de las fuentes, las temperaturas han cambiado respecto a las dadas en las figuras 11 y 12.

En la figura 18 se muestran las isotermas a lo largo de la sección A-A'. Si se compara con la figura 2, se observa que las temperaturas calculadas en el pozo M-8 son similares a las de Mercado. Las temperaturas en la parte central de la figura 18 también concuerdan favorablemente con las de la figura 2. En la parte SE del campo las temperaturas calculadas son levemente mayores. En la figura 19 se indican las isotermas a lo largo de la sección B-B'. Una comparación entre estas temperaturas y las de la figura 3 muestra, en general, que las temperaturas calculadas son mayores que las temperaturas anteriores a la explotación del campo presentadas por Mercado G. (1976).

COMENTARIOS FINALES

Utilizando los datos disponibles en esa oportunidad, se elaboró un modelo hidrogeológico tridimensional simplificado del campo de Cerro Prieto. Con el objeto de hacer corresponder las temperaturas estacionarias calculadas con las temperaturas anteriores a la explotación del campo dadas por Mercado G. (1976), se consideraron numerosas modificaciones de las condiciones de contorno del sistema, especialmente en las características y ubicaciones de fuentes y sumideros, y en las propiedades de las diferentes litologías del modelo. Como se mostró en los dos ejemplos dados, sólo fueron obtenidas concordancias parciales. Para determinar la recarga y las características de flujo del campo, anteriores a la explotación del mismo, será necesario no sólo obtener más datos de temperatura, sino también la distribución inicial de presiones, y mejorar el modelo geológico del sistema.

En este texto varios autores han presentado nuevos datos sobre la estructura, litología y características físicas del campo. La cantidad de información que se está obteniendo va a permitir la elaboración de un modelo mejor del campo, el cual podrá ser incorporado en futuras simulaciones para determinar las características del área antes de 1973 y predecir el futuro comportamiento del campo geotérmico a medida que continúe su desarrollo.

AGRADECIMIENTOS

Se desea agradecer a los colegas de la Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto de la CFE y de la División de Ciencias de la Tierra del LBL por compartir sus datos y por sus valiosas sugerencias.

Este trabajo fue auspiciado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos, División de Energía Geotérmica, bajo contrato W-7405-ENG-48.

TITULOS DE FIGURAS Y TABLAS

- Figura 1. Ubicación de los pozos en el Campo Geotérmico de Cerro Prieto, en noviembre de 1979.
- Figura 2. Distribución de temperaturas en el yacimiento a lo largo de una sección SE-NO, antes de comenzar la explotación del campo (modificada de Mercado G., 1976).
- Figura 3. Distribución de temperaturas en el yacimiento a lo largo de una sección SO-NE, antes de comenzar la explotación del campo (modificada de Mercado G., 1976).
- Figura 4. Curvas de igual potencial espontáneo en el área de Cerro Prieto. Las líneas A-A' a F-F' son líneas de estudio. La línea quebrada gruesa representa la traza del plano fuente de potencial espontáneo y la ubicación de la posible discontinuidad geológica. El punto grueso indica el centro de la región fuente (de Corwin *et al.*, 1979).
- Figura 5. Profundidad a la primera aparición de epidota en areniscas (de Elders *et al.*, 1978).
- Figura 6. Mapa de fallas para el área inicialmente desarrollada en Cerro Prieto (de Vonder Haar y Howard, 1980).
- Figura 7. Vista en planta del área modelada y de la malla utilizada en este trabajo. Los diferentes sombreados corresponden a diferentes espesores de la Unidad A (sedimentos no consolidados).
- Figura 8. Columnas litológicas básicas usadas en el modelo para las áreas con diferentes espesores de Unidad A (ver Fig. 7).
- Figura 9. Mapa de isopacas para la Unidad A.
- Figura 10. Vista en planta de la malla utilizada en el modelado. El área sombreada indica zonas de mayor permeabilidad en el nivel 400 (1400 m de profundidad). También se indica la numeración de los nodos del nivel 400 y la ubicación de las secciones A-A' y B-B'.
- Figura 11. Modelo 1. Mapa de isotermas para el nivel 600 (1000 m de profundidad).
- Figura 12. Modelo 1. Mapa de isotermas para el nivel 400 (1400 m de profundidad).
- Figura 13. Modelo 1. Distribución de temperaturas a lo largo de la sección A-A'.
- Figura 14. Modelo 1. Distribución de temperaturas a lo largo de la sección B-B'.
- Figura 15. Modelo 1, con un contorno inferior a una temperatura constante de 280°C. Distribución de temperaturas a lo largo de la sección A-A'.
- Figura 16. Modelo 2. Mapa de isotermas para el nivel 600 (1000 m de profundidad).
- Figura 17. Modelo 2. Mapa de isotermas para el nivel 400 (1400 m de profundidad).
- Figura 18. Modelo 2. Distribución de temperaturas a lo largo de la sección A-A'.
- Figura 19. Modelo 2. Distribución de temperaturas a lo largo de la sección B-B'.
- Tabla 1. Propiedades utilizadas para la matriz sólida.
- Tabla 2. Modelo 1. Ubicación y características de las fuentes y sumideros.
- Tabla 3. Modelo 2. Ubicación y características de los sumideros.