

EVOLUTION OF THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL SYSTEM AS INTERPRETED FROM VITRINITE REFLECTANCE UNDER ISOTHERMAL CONDITIONS

C. E. Barker, M. J. Pawlewicz, N. H. Bostick

U.S. Geological Survey
Denver, Colorado, U.S.A.

and

W. A. Elders

Institute of Geophysics and Planetary Physics,
University of California
Riverside, California, U.S.A.

Summary

The degree of thermal alteration measured by reflectance of sedimentary vitrinite grains is dependent mainly on the maximum temperature reached in the sediment and the duration of this temperature. Temperature estimates from reflectance data in the Cerro Prieto system correlate with modern temperature logs and temperature estimates from fluid inclusion and oxygen isotope geothermometry indicating that the temperature in the central portion of the Cerro Prieto System is now at its historical maximum. Thus, any differences in vitrinite reflectance values for parts of the system that are now at the same temperature are apparently due to differences in the duration of heating.

Isoreflectance lines formed by contouring vitrinite reflectance data for a given isothermal surface define an imaginary surface that indicates an apparent duration of heating in the system.

The 250°C isothermal surface has a complex dome-like form suggesting a localized heat source that has caused shallow heating in the central portion of this system. Isoreflectance lines relative to this 250°C isothermal surface define a zone of low reflectance roughly corresponding to the crest of the isothermal surface. Comparison of these two surfaces suggest that the shallow heating in the central portion of Cerro Prieto is young relative to the heating (to 250°C) on the system margins.

Laboratory and theoretical models of hydrothermal convection cells suggest that the form of the observed 250°C isothermal surface and the reflectance surface derived relative to it results from the convective rise of thermal fluids under the influence of a regional hydrodynamic gradient that induces a shift of the hydrothermal heating effects to the southwest.

Introduction

Kerogen is organic matter in sedimentary rocks composed of various types of distinctive plant debris (macerals; also termed phytoclasts). Reflected-light microscopy allows the

differentiation of the various macerals by their internal structure, external morphology, and brightness (reflectivity). Vitrinite is derived from woody plant tissues and occurs abundantly in shales and sandstones. Under the microscope, vitrinite has a homogeneous to cellular or banded internal structure, splintery to blocky external form, and an intermediate reflectivity (brightness) when compared to other maceral groups. Kerogen is also composed of two other maceral groups with obvious microscopic characteristics; liptinite (spores, pollen, resin, cuticle, and algal matter) and inertinite (charcoal, altered vitrinite, and fungal sclerotia). Kerogen was extracted from chip samples approximately every 100 m down 14 boreholes. Core samples were used from an additional 4 boreholes. Kerogen was concentrated by demineralization with acid and by heavy-liquid separation as previously described by Barker (1979). The kerogen concentrate was washed, freeze dried, mounted in epoxy on standard petrographic slides (Baskin, 1979), and polished for microscopy.

Chemical and physical properties of kerogen change in response to both heating duration and temperature. The integration of these two effects determine the rank of kerogen (Stach and others, 1975; Tissot and Welte, 1978; Hunt, 1979; Durand, 1980). The basis for heating duration studies is the irreversible changes of optical properties resulting from devolatilization of kerogen in response to temperature and reaction time. This process, termed catagenesis, involves a progressive evolution of H₂O, CO₂, and hydrocarbon, resulting in a relative increase in carbon content and greater crystallinity. Pressure is now thought to have little influence on catagenesis (Hunt, 1979; Tissot and Welte, 1978; Stach and others, 1975). The degree of catagenesis, or rank, of vitrinite can be measured by changes of both chemical and physical properties. The physical measure of rank utilized here was reflectance under oil immersion (R_o), which is defined as the ratio of the intensity of reflected light to light incident on a polished maceral surface. Reflectance was measured on randomly oriented vitrinite without rotation to maximum

reflectivity (brightness). Following Hevia and Virgos (1977), we use mean random reflectance under oil immersion ($\bar{R}_O$), apparently the best optical measure of rank. Vitrinite was selected according to criteria listed in Barker (1979) with the additional restrictions that mud-additive lignite and material judged to be from borehole cavings were excluded from consideration.

Heating duration--temperature effects on kerogen

The relationship between heating duration, temperature, and vitrinite reflectance can be modeled in several ways: the theoretical approach assumes a homogeneous chemical reaction dependent on temperature and duration of reaction, as described by the Arrhenius equation and first-order kinetics; the empirical approach uses an equation derived from temperature-rank studies in one borehole and applied later to other boreholes. Both methods must be calibrated in a geological system similar to their intended use, therefore, the empirical method seems most reasonable in open geochemical systems where no adequate theoretical model has been developed (Barker and Elders, 1979a, 1979b).

Huck and Karweil (1955) first developed a theoretical model based on Arrhenius equation and first-order kinetics. This model was originally developed for predicting rank in coal, but has since been applied to kerogen studies. A heating duration estimate (10^6 yr; Barker and Elders, 1981) from this model utilizing $\bar{R}_O$ -temperature data from the Cerro Prieto system exceeds the apparent geologic age of the reservoir rock (10^5 yr; Barker, 1979) and apatite fission-track annealing age of thermal activity ($10^{4.1}$; Sanford and Elders, 1981). Other Time-Temperature-Rank (TTR) functions based on chemical kinetic theory (Lopatin, 1971; Royden and others, 1980) and an empirical model based on measurements in boreholes from numerous sedimentary basins (Hood and others, 1975) also give spurious heating duration estimates for Cerro Prieto. Therefore, models such as these cannot be applied to estimate absolute heating duration in this system. The failure of TTR models is apparently due to the fluid-rich, open Cerro Prieto system promoting catagenesis, relative to the more closed sedimentary basins for which these models were derived (Barker, 1979).

Although a credible value of absolute heating duration in geothermal systems is not indicated by TTR models, vitrinite reflectance does show a strong correlation with temperature in borehole M-84 (Fig. 1). The logged equilibrium temperatures in this borehole correlate with temperature estimated from an empirical vitrinite-reflectance geothermometer (Barker and Elders; 1979a, 1979b) at almost all points and also correlate with the fluid-inclusion temperatures. Temperature profiles of several other boreholes studied in the field were also successfully predicted by the empirical method (Barker and Elders, 1979a, 1979b). We conclude that vitrinite reflectance is an accurate geothermometer for the central

portion of this system. Further, because temperature and rank are relatively well known, variation in rank of rocks at the same undiminished temperature across the system is apparently caused by changes in duration of heating.

Relative heating duration at Cerro Prieto

Barker and Elders (1979a, 1979b), as discussed above, have shown that theoretical models based on chemical kinetics do not accurately predict absolute heating duration in the Cerro Prieto system. Barker and Elders concluded, however, that temperature-rank curves should indicate relative heating duration. Therefore, although the absolute heating duration cannot be determined, relative heating duration across this system can be derived from rank-temperature data.

Chemical reactions causing rank increase are irreversible as volatile components are lost from the system. Thus, chemical and physical changes in kerogen record the maximum temperature that the sediment experienced. Accurate heating duration estimates require that temperatures in a borehole be at a maximum in the geothermal history of the system. Retrograde temperatures can cause spuriously long heating duration estimates because to attain a certain rank at lower temperature requires greater reaction time. However, this is not the reason for faulty heating duration estimates for Cerro Prieto.

Depth to 250°C derived from borehole measurements is typically shallower than depths to this temperature derived from isotope data (Appendix I). This suggests that the system is heating up and that the calcite-water geothermometer appears to lag behind in equilibrating to the higher temperature. Further, temperature estimates from reflectance data in the central portion of this system correlate directly with either modern logged temperatures, and (or) temperature estimates from the fluid-inclusion geothermometry. The correspondence of these geothermometers, which indicate either maximum, ambient, or short-term temperatures, indicates that temperature in most of the Cerro Prieto system is now at its historical maximum. Therefore, differences in vitrinite reflectance for parts of the system that are now at the same temperature are apparently due to differences in the duration of heating.

Isorefectance lines formed by contouring vitrinite reflectance values, corresponding to a single temperature in different boreholes (isothermal condition), define an imaginary surface that indicates relative duration of heating across the system. If uniform heating to a given temperature occurred at the same time across the system, the reflectances would have a single value defining a planar surface. The selected isothermal surface (which is not necessarily planar) indicates the position of the reflectance measurement, and, therefore, the relative heating duration at this point in the system. Differences in heating time between boreholes at the same maximum temperature are

indicated by lower reflectances (less heating time) or higher reflectance (longer heating time). These differences produce a curved reflectance surface.

The 250°C isothermal surface has a complex dome-like form, shallow about M-105, M-9, M-7, and M-3 (Fig. 2). This form suggests a localized heat source that has caused shallow heating of sediments in the central portion of this system. The central portion of this system is defined by boreholes that have measured temperatures in excess of 300°C (Fig. 2) and occur near the crest of the 250°C isothermal surface.

Isoreflectance lines relative to the 250°C isotherm surface in the Cerro Prieto system indicate an area of low reflectance bounded approximately by boreholes M-51, M-105, M-19A, M-10, M-3, M-7, M-53, and M-84 (Fig. 3). Preliminary data indicate that reflectance increases on the southern and northern flanks of this low. The form of a portion of the western flank and northeastern flank are not yet well defined by our data. Reflectance data from boreholes M-96 and Prian-1 do indicate that isoflectance contours close around the central portion of this system.

Comparison of the 250°C isothermal surface and the isoreflectance surface derived relative to it suggest that the shallow heating in the central portion of Cerro Prieto is young relative to the heating to 250°C on the margins of this system.

Apparent thermal regime in the Cerro Prieto system

Elder (1965) through laboratory models of hydrothermal systems, suggested that fluid rise by thermal expansion in a high-temperature geothermal system in high porosity rocks would occur as a narrow plume surrounded by relatively cool ground waters. The ascending thermal fluid cools as it rises and descends on the flanks of the plume thereby recharging the system.

Barker and Elders (1979b), using borehole temperature measurements and vitrinite reflectance geothermometry, have shown that convection is apparently occurring in the central portion of the Cerro Prieto system. The effect of a convection system on borehole temperature profiles is illustrated in figure 4a (conductive heat transfer) and 4b (convection system). Convective systems are characterized by temperature gradients which decrease at depth, which is typical of boreholes in the central portion of Cerro Prieto (for example, see Fig. 1). The existence of relatively cool fluids adjacent to the central portion of the system, indicated by 250°C isothermal surface (Fig. 2), is also strong evidence supporting convection in a hydrothermal system (Elder, 1965). Further, Olson (1979) found that oxygen isotope data, from calcite in this system, indicated that a minimum of 10 pore volumes have passed through a given volume of rock assuming it has a 20 percent porosity. This water-rock ratio indicates that the Cerro Prieto system is

relatively open and fluid flow is occurring. These observations suggest a similarity of the Cerro Prieto system to Elder's convective thermal model, and it forms a basis for interpreting flow conditions as indicated by iso-reflectance lines under isothermal conditions. Norton and Cathles (1979) mathematically modeled a hydrothermal system of an igneous pluton cooling by conduction and convection, which quantifies Elder's model. Their model is used here to formulate a hypothetical reflectance pattern resulting from a convecting hydrothermal system. They assumed an isotropic sedimentary basin heated by a local source at depth, resulting in buoyant rise of thermal fluids (Fig. 4a, b). The plume of thermal fluids rising in the crust will intersect and heat successively shallower rocks. Consequently, the deep rock at the margin of the plume will have been heated for a longer duration at some arbitrary temperature than will the shallower portions of the system that reached this arbitrary temperature later in the system's thermal history. Thus, reflectance of vitrinite extracted from sediments at the same temperature in the system will be highest on the flanks and lower in the shallow, central portion (Fig. 4c). The zone of low reflectance will correspond with crest of the isothermal surface, and both these features will occur over the heat source (in this model, a pluton) of the system. Applying this model to the Cerro Prieto system indicates the heat source occurs below the central portion of this system as defined above. Fluid flow stream lines (not shown on Fig. 4) are roughly parallel (subvertical rise of fluid) to the heat source at its margin, but become sub-horizontal some distance away forming part of a convection cell. This fluid flow pattern suggests that the rise of the 250°C isothermal surface northwest of the central portion of this system is due to recharge and convective rise of fluids towards the heating volume. Southwest of the central portion of this system, the 250°C isothermal surface descends rapidly, making the dome-like surface significantly asymmetric (Fig. 2) when compared to Norton and Cathles model. The relatively gentle rise of isothermal surface in the northwest portion of the system (which according to the Norton and Cathles model should be quite sharp) and the asymmetry of the thermal dome suggest other geologic controls on convection in this system than simple thermally-induced rise of fluids in an isotopic media. Anisotropic permeability and ground-water flow regime are major elements controlling hydrothermal fluid movement, and their effect has apparently distorted the observed isothermal and reflectance patterns from those predicted by the Norton-Cathles model.

Permeable zones in the Cerro Prieto system are indicated by production zones (Puentes and de la Peña, 1979) and borehole geophysical log correlation (Abril and Noble, 1979; Prian, 1979). These permeable bodies are cut by northwest- and conjugate northeast-trending faults. The northwest-trending faults dominate the structure of the field and locally produce major offset of permeable zones. These faults offset the permeable zones with the down block

toward the basin axis, resulting in a step-like pattern of deepening production to the northeast (see Fig. 1 of Prian, 1979). Interpretation of borehole lithology, correlation of borehole geophysical logs (Prian, 1979; Lyons and van de Kamp, 1979), and considering the geographic position of the field on the Colorado river delta indicates that the storage structure and production zones consist of distributary channels and delta-plain deposits. The axis of elongation of these permeable bodies trends northwest (Prian, 1979) and appears to control hydrothermal fluid distribution that conforms to this trend (Pueente and de la Peña, 1979; Elders and others, 1980).

The ground-water table or piezometric surface is a muted expression of surficial topography. Ground-water flow is normal to the isopotential lines on the piezometric surface. Groundwater flow, therefore, tends to follow the slope of the topographic surface. Ground-water flow through the Colorado River delta, whose topographic surface approximates a conic section, will be radial from the delta apex near Yuma, Arizona. Isotopic studies on ground water from the Cerro Prieto vicinity indicate an origin from underflow from the Colorado River across its delta (Crosby and others, 1972). The origin of fluids in this system fits the apparent ground-water flow pattern and suggests that the Cerro Prieto system is mainly recharged from the northeast and discharges to the southwest.

The influence on the Cerro Prieto system of the northeast to southwest ground-water flow and southwest-shallowing storage structure in a convecting hydrothermal system explains (1) the more gentle rise of thermal fluids than expected from the Norton-Cathles model because the hydrothermal fluid movement appears to be controlled by the southwest-shallowing permeable zones; (2) the asymmetry of 250°C isothermal surface that, under the influence of the regional northeast-southwest groundwater flow, would shift the hydrothermal fluids and their heating effects to the southwest (rather than a simple vertical fluid ascent); (3) the evidence of recharge (from its cooling effects and salinity changes) occurring on the northerly margin (Mercado, 1970; Barker and Elders, 1979b; Elders and others, 1980; Seamount and Elders, 1981); and (4) discharge from the convection system occurring at shallow depth to the southwest (Elders and others, 1980).

Conclusion

The major features of the Cerro Prieto system indicated by this study are:

- (1) The form of the 250°C isothermal surface and the isoreflectance surface derived relative to it suggests that the shallow heating in the central portion of Cerro Prieto is young relative to the heating to 250°C on the margins of this system;
- (2) similarity of the temperature and rank data to that predicted by Norton-Cathles model indicate Cerro Prieto is a hot-water convection system centered approximately

about boreholes M-84, M-102, and M-39;

(3) the Cerro Prieto hydrothermal system is distorted from a simple vertical convection cell by regional ground-water flow from northeast to southwest and permeable zones that shallow to the southwest. These controls on the system induce a shift of the hydrothermal fluids to the southwest with recharge occurring mainly deep in the northeast portion, strong convective rise of fluids in the northeast to central portion, and discharge chiefly in the shallow-southwest portion;

(4) the position of the heat source for Cerro Prieto is difficult to determine only from its shallow manifestations. The Norton-Cathles model predicts the shallowest occurrence of high temperature fluid should correspond with the crest of isothermal surfaces over the heat source for the system. The close association between boreholes which exceed 300°C and the crest of the 250°C isothermal surface at Cerro Prieto (Fig. 2), partially consistent with the Norton-Cathles model, suggest the southwesterly shift of hydrothermal fluids is minor and that the heat source for the Cerro Prieto system is approximately beneath its center. However, the single, compact heat source utilized in the Norton-Cathles model is probably too simple for the Cerro Prieto system which has experienced numerous and widespread igneous intrusive and extrusive events; and

(5) variation of heating duration across the system limits the use of the M-105 empirical vitrinite-reflectance geothermometer to the central portion of the Cerro Prieto system.

References

- Abril, A., and Noble, J. E., 1979, Geophysical well-log correlations along various cross-sections of the Cerro Prieto geothermal field: *Geothermics*, 8: 177-182.
- Barker, C. E., 1979, Vitrinite reflectance geothermometry in the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico: Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Riverside, UCR/IGPP Report 79/10, 105 p.
- Barker, C. E., and Elders, W. A., 1979a, Vitrinite reflectance geothermometry in the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico: *Geothermal Resources Council, Transactions*, 3: 27-30.
- _____, 1979b, Vitrinite reflectance geothermometry in the Cerro Prieto geothermal field: An interim report: *Proceedings, Second Symp. on the Cerro Prieto geothermal system, Baja California, Mexico. Mexicali, October, 1979*, p. 70-81 (to be published in *Geothermics* as listed below).
- _____, 1981, Vitrinite reflectance geothermometry and apparent heating duration in the Cerro Prieto geothermal field: *Geothermics*, 10: (in press).
- Baskin, D. K., 1979, A method of preparing phytoclasts for vitrinite reflectance analysis: *J. Sed. Pet.*, 49: 633-635.
- Crosby, J. W., Chatters, R. M., Anderson, J. V., and Fenton, R. L., 1972, Hydrogeologic

- evaluation of the Cerro Prieto thermal system utilizing isotopic techniques: Wash. St. Univ., College of Eng., Research Division, Proj. no. 130-3811-1040, 30 p.
- Durand, B., (ed.), 1980, Kerogen: Editions Technip, Paris, 519 p.
- Elder, J. W., 1965, Physical processes in geothermal areas: *in* Lee, W. H. K., (ed.), Terrestrial heat flow, Am. Geophys. Union. Geophysical Monograph Series, 8: 211-239.
- 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 23 wells in the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico: Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Riverside, UCR/IGPP Report 78/26, 274 p.
- Elders, W. A., Hoagland, J. R., and Williams, A. E., 1980, Hydrothermal alteration as an indicator of temperature and flow regime in the Cerro Prieto geothermal field of Baja California: Geothermal Resources Council, Transactions, 4: 121-125.
- Hevia, V., and Virgos, J. M., 1977, The rank and anisotropy of anthracites: the indicating surface of reflectivity in uniaxial and biaxial substances: Jour. of Microscopy, 109: 23-28.
- Hood, A., Gutjahr, C. C. M., and Heacock, R. L., 1975, Organic metamorphism and the generation of petroleum: Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 59: 986-996.
- Huck, G., and Karweil, J., 1955, Physikalische Probleme der Inkohlung: Brennstoff-Chemie, 36: 1-11.
- Hunt, J. M., 1979, Petroleum geochemistry and geology: Freeman, San Francisco, 617 p.
- Lopatin, N. V., 1971, Temperature and geologic time as factors in coalification: Akad. Nauk SSSR, Izvestiya, Ser. Geol., 3: 95-106.
- Lyons, D. J., and van de Kamp, P. C., 1979, Subsurface geological and geophysical study of the Cerro Prieto geothermal field: Proceedings, Second symp. on the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico. Mexicali, October, 1979, p. 173-186.
- Mercado, S., 1970, High activity hydrothermal zones detected by Na/K, Cerro Prieto, Mexico: Geothermics (Spec. Issue 2), 2: 1367-1376.
- Norton, D., and Cathles, L. M., 1979, Thermal aspects of ore deposition: *in* Barnes, H. L. (ed.), Geochemistry of hydrothermal ore deposits, second edition, p. 611-631.
- Olson, E. R., 1979, Oxygen and carbon isotope studies of calcite from the Cerro Prieto geothermal field: Geothermics, 8: 245-252.
- Prian, R., 1979, Lithological correlations of the Cerro Prieto wells, based on well-log interpretation: Geothermics, 8: 183-190.
- Puente, I., and de la Peña, A., 1979, Geology of the Cerro Prieto geothermal field: Geothermics, 8: 155-176.
- Royden, Leigh, Sclater, J. G., and Von Herzen, R. P., 1980, Continental margin subsidence and heat flow: important parameters in formation of petroleum hydrocarbons: Am. Assoc. Petrol. Geol., Bull., 64: 173-187.
- Sanford, S. J., and Elders, W. A., 1981, Dating thermal events by fission track annealing in wells M-94 and T-366 at Cerro Prieto: Abstracts, Third Symp. on the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico. San Francisco, March, 1981, p. 14.
- Seamount, D. T., and Elders, W. A., 1981, Well log use at Cerro Prieto in identification of hydrothermally altered zones, correlation with reservoir temperature and interpretation of reservoir porosity: Abstracts, Third symp. on the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico. San Francisco, March, 1981, p. 15.
- Stach, E., Mackowsky, M.-Th., Teichmüller, M., Taylor, G. H., Chandra, D., and Teichmüller, R., 1975, Stach's textbook of coal petrology, 2nd ed.: Gebrüder Borntraeger, Berlin, 428 p.
- Tissot, B. P., and Welte, D. H., 1978, Petroleum formation and occurrence: Springer-Verlag, New York, 538 p.

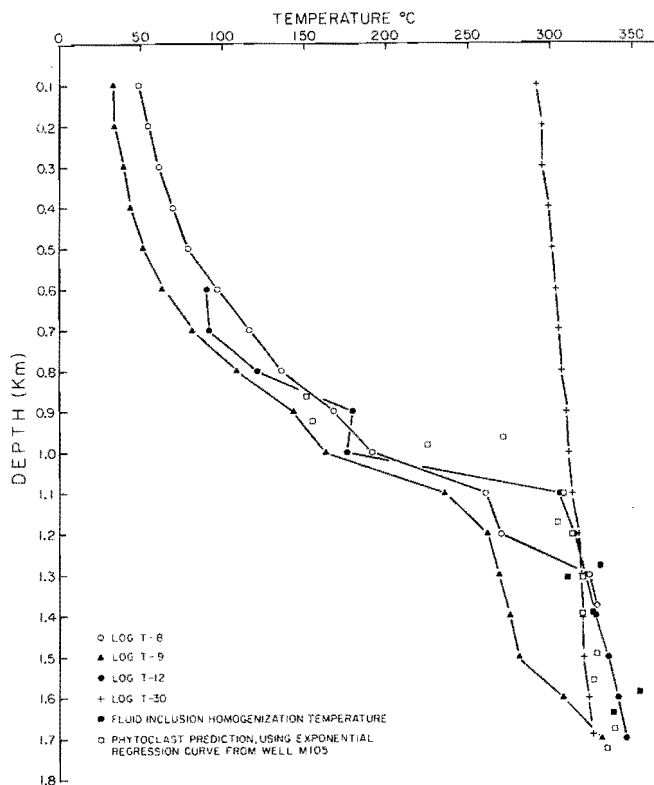


Figure 1. Temperature logs and estimates--borehole M-84. Fluid inclusion data from Elders and others (1978). Log T-8 was taken October 3, 1977, under zero wellhead pressure and allowing the borehole to stabilize for 5.5 hours. Log T-9 was taken November 18, 1977, with borehole bleeding through a 6-mm orifice and wellhead pressure = 3.66 kg/cm². Log T-12 taken January 15, 1978, under conditions similar to log T-9. Log T-30 taken September 6, 1978 with borehole discharging 116.3 tons steam/hour through 5-cm orifice. Modified from Barker and Elders (1979a).

Figura 1: Registros y estimaciones de temperatura del pozo M-84. Datos de inclusiones fluidas de Elders y otros (1978). El registro T-8 se tomó el 3 de octubre de 1977 a presión de cabezal nula y permitiendo la estabilización del pozo por 5.5 horas. El registro T-9 se tomó el 18 de noviembre de 1977 con el pozo fluyendo a través de un orificio de 6 mm y presión de cabezal = 3.66 kg/cm². El registro T-12 se tomó el 15 de enero de 1978 bajo condiciones similares a las del registro T-9. El registro T-30 se tomó el 6 de septiembre de 1978 con el pozo descargando 116.3 toneladas de vapor por hora a través de un orificio de 5 cm. Modificado de Barker y Elders (1979a).

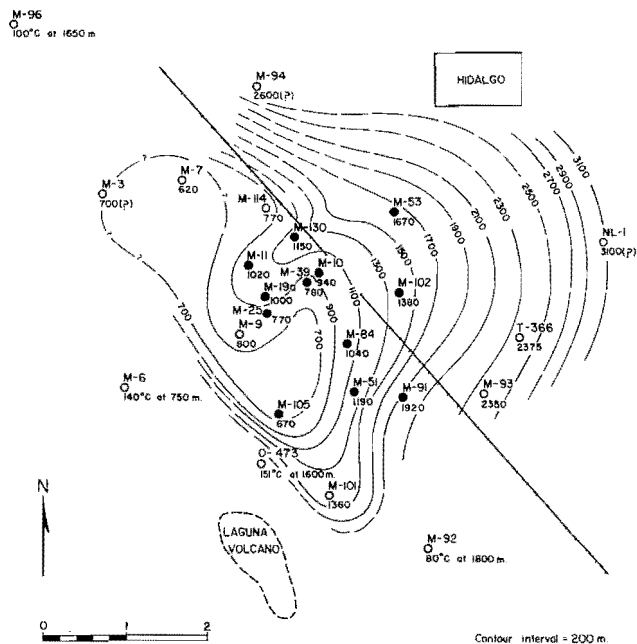


Figure 2. 250°C isothermal surface derived from borehole temperature measurements. Solid circles indicate boreholes from this study in which measured temperatures exceeded 300°C. Queried depth indicates some uncertainty or other problem in the borehole measurements from which the estimate was derived. Temperature logs used and borehole conditions during measurement listed in Appendix I.

Figura 2: Superficie isotérmica de 250°C derivada de mediciones de temperatura de pozos. Los círculos llenos indican los pozos en los cuales las temperaturas medidas excedieron los 300°C en este estudio. Los signos de interrogación en las profundidades indican cierta incertidumbre u otro problema en las mediciones de las cuales se obtuvo la estimación. Los registros de temperatura utilizados y las condiciones del pozo durante las mediciones están dados en el Apéndice I.

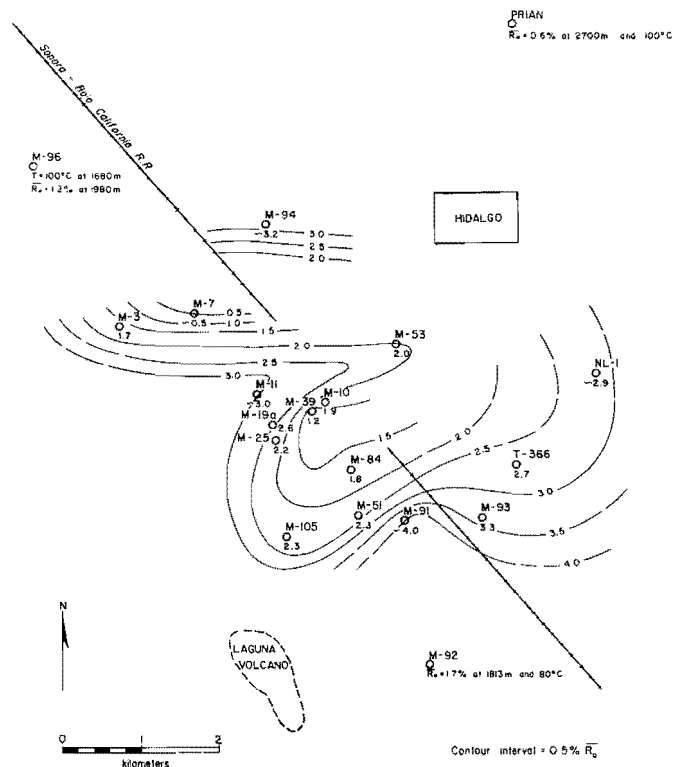
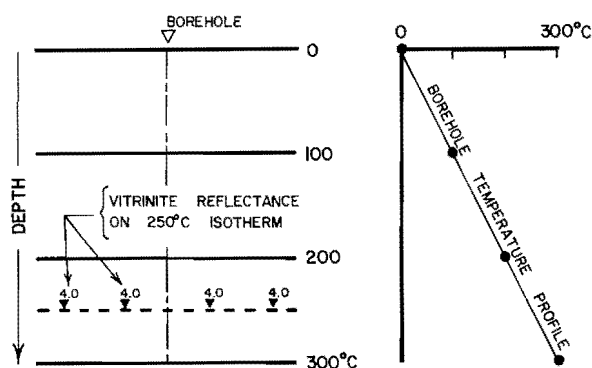
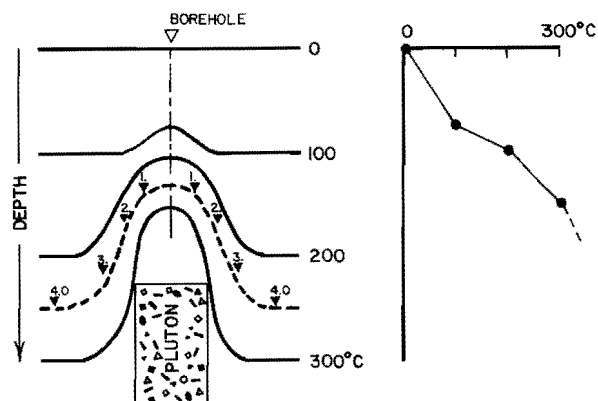


Figure 3. Isorefectance lines for the 250°C isotherm in the Cerro Prieto system. Circles indicate boreholes with identification above and mean vitrinite reflectance below. R_o refers to mean reflectance data or the depth to 250°C datum from which it was determined.

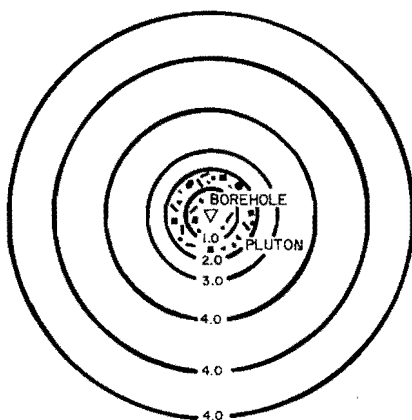
Figura 3: Líneas de isorefectancia para la isoterma de 250°C en el sistema de Cerro Prieto. Los círculos indican pozos con su nombre dado arriba, y con la reflectancia media de vitrinita abajo. R_o se refiere a la reflectancia media de vitrinita en aceite. El signo aproximado que precede a los datos de R_o indica cierta incertidumbre en los datos de reflectancia o en la profundidad correspondiente al dato de 250°C a partir de los cuales fueron determinados.



(A) Initial thermal and reflectance conditions.



(B) Thermal plume increases temperature in shallow portions of the system.



(C) Resultant isorefectance lines on the 250°C isothermal surface.

Figure 4. Thermal model of a convecting geothermal system driven by an igneous intrusion into an isotropic sedimentary system. Hypothetical vitrinite reflectance values shown by black triangles on the 250°C isotherm. Figure c represents a map view of system shown in cross-section of figures a and b. Modified from Norton and Cathles (1979).

Figura 4: Modelo térmico de un sistema geotérmico convectivo impulsado por una intrusión ígnea en un sistema sedimentario isótropo. Los triángulos negros muestran valores hipotéticos de reflectancia de vitrinita sobre la isoterma de 250°C. La figura c representa una vista en planta del sistema que, a su vez, se observa en cortes transversales en las figuras a y b. Modificado de Norton y Cathles (1979). (A) Condiciones iniciales térmicas y de reflectancia. (B) El penacho térmico incrementa la temperatura en zonas someras del sistema. (C) Líneas resultantes de isorefectancia sobre la superficie isotérmica de 250°C.

APPENDIX 1. DEPTH TO 250°C IN SELECTED BOREHOLES, CERRO PRIETO GEOTHERMAL SYSTEM.

APENDICE 1: PROFUNDIDAD CORRESPONDIENTE A 250°C EN POZOS SELECCIONADOS DEL SISTEMA GEOTERMICO DE CERRO PRIETO.

Borehole	Depth to 250°C (log used) [meters]	Minimum temperature (Log used if different from Col. 1) [°C @ meters]	Maximum temperature (Log used if different from Col. 1) [°C @ meters]	Borehole equilibration time [days]	Borehole purging through choke diameter [millimeters]	Calcite/water Oxygen isotope geothermometer depth to 250°C [meters]
M-3	700(?) (T-7)	166 @ 152	267 @ 823 note a.	1	static	
M-6	N.R. (T-14)	80 @ 100	154 @ 750 note b.	unknown	static	
M-7	620 (T-11)	170 @ 100	260 @ 800 note c.	50	12	
M-9	800 (T-6)	102 @ 400 (T-10)	250 @ 800 (T-6)	96 (T-6) 10 (T-10)	static static	
M-10	940 (T-13)	128 @ 200 (T-14)	329 @ 1445 (T-11)	unknown (T-11) 39 (T-11) 40 (T-14)	unknown	1240
M-11	1020 (T-26)	36 @ 0	283 @ 1214	1.3 (?)	6	
M-19A	1000 (T-9)	70 @ 200 (T-8)	302 @ 1440	40 (T-8) 41 (T-9)	static static	1090
M-21A	960 (T-1) note d.	59 @ 400	277 @ 1000	unknown	6	
M-25	770 (T-6)	54 @ 200 (T-4)	300 @ 1340 (T-6)	unknown (T-4) unknown (T-6)	static 12 (?)	1040
M-39	780 (T-14)	137 @ 600	350 @ 1400	22	static	1230
M-51	1190 (T-6)	53 @ 800 (T-5)	328 @ 1570 (T-6)	4 (T-5) 10 (T-6)	static static	1140
M-53	1670 (T-8)	76 @ 1090	336 @ 2000	21	static	1720
M-84	1040 (T-12)	96 @ 600	346 @ 1700	unknown	6	1100
M-91	1920 (T-4)	35 @ 600	310 @ 2000	1.8	unknown	
M-92	N.R. (T-2)	56 @ 1000	81 @ 1800	0.3	static	
M-93	2350 exp. (T-9)	38 @ 1000	240 @ 2300	1.3	unknown	
M-94	2600 (?) est. (T-11) note e.	45 @ 100	214 @ 1600	unknown	unknown	2450
M-96	N.R. (T-3)	73 @ 100	99 @ 1650	1.2	unknown	
M-101	1360 (T-7)	83 @ 100	252 @ 1358	8	unknown	
M-102	1380 (T-19)	33 @ 100	343 @ 1780	37	6	
M-105	670 (T-21) note f.	33 @ 30	328 @ 1675 (T-25)	>60 (T-21) 1 (T-25)	unknown 6	1110
M-130	1150 (T-8)	92 @ 700	331 @ 1625	unknown	unknown	
T-366	2375 (T-18)	38 @ 300	293 @ 2650	unknown	unknown	
NL-1	2890 (T-12)	102 @ 1800	258 @ 3059	unknown	unknown	
Prian-1	N.R.	68 @ 1800 (T-12)	115 @ 3200 (T-5)	1.3 (T-5) unknown (T-12)	unknown	

General notes: est. = estimated; exp. = extrapolation of log; N.R. = not reported; ? = data uncertain. Temperature log selection was by picking log with longest repose time and, if possible, purging through small diameter choke. Minimum and maximum temperatures in each borehole are those recorded on the log and may not be taken at the minimum or maximum borehole depths. Oxygen isotope temperatures were taken from temperature cross-sections supplied by A. E. Williams, I. G. P. P., University of California, Riverside.

Specific Notes: a. Temperature reversal to 222°C at 914 m.
b. Temperature reversal to 140°C at 750 m.
c. Temperature reversal to 213°C at 1000 m.
d. Drilling normally in progress when log T-1 taken; no better log available to us at present.
e. Depth to 250°C from wide extrapolation of log T-11.
f. Borehole deepened from 1200 to 1675 meters between temperature measurement T-21 and T-25. (Both these logs indicate a depth to 250°C of 670 m.)

Notas generales: est. = estimado; exp. = extrapolación de registro; N.R. = no dad; ? = dato incierto. La selección de registros de temperatura se hizo eligiendo los registros con tiempo de reposo más largos y, cuando posible, flujo a través de purgas de pequeño diámetro. Las temperaturas máxima y mínima en cada pozo son las indicadas por el registro y pueden no corresponder a las profundidades mínima o máxima del pozo. Las temperaturas isotópicas de oxígeno fueron tomadas de secciones transversales de temperatura provistas por A.E. Williams, I.G.P.P., University of California, Riverside.

Notas específicas: a. Inversión de temperatura a 222°C a 914 m.
b. Inversión de temperatura a 140°C a 750 m.
c. Inversión de temperatura a 213°C a 1000 m.
d. Perforación en progreso cuando se tomó el registro T-1; hasta el presente no disponemos de un registro mejor.
e. Profundidad correspondiente a 250°C obtenida extrapolando del registro T-11.
f. El pozo fue profundizado de 1200 a 1675 metros entre los registros de temperatura T-21 y T-25. (Ambos registros indican una profundidad de 670 m correspondiente a 250°C).

EVOLUCION DEL SISTEMA GEOTERMICO DE CERRO PRIETO EN BASE A REFLECTANCIA DE LA VITRINITA BAJO CONDICIONES ISOTERMICAS

RESUMEN

El grado de alteración termal medido por la reflectancia de granos de vitrinita extraídos de sedimentos, depende principalmente de la temperatura máxima alcanzada en el sedimento y de la duración de esa temperatura. La temperatura estimada a partir de datos de reflectancia en el sistema de Cerro Prieto correlaciona con registros modernos de temperatura y con temperaturas estimadas a partir de inclusiones fluidas y geotermometría de isótopos de oxígeno. Estas medidas indican que la temperatura en la parte central del sistema de Cerro Prieto está actualmente en su máximo histórico. Por consiguiente, las diferencias en los valores de la reflectancia de vitrinita en partes del sistema que se encuentran actualmente a la misma temperatura se deben, aparentemente, a diferencias en la duración del calentamiento.

Los contornos de isorefectancia basados en los datos de reflectancia de vitrinita para una superficie isotérmica dada, definen una superficie imaginaria que indica una duración aparente del calentamiento en el sistema.

La superficie isotérmica de 250°C tiene una compleja forma de domo que sugiere una fuente de calor localizada que ha causado calentamiento a poca profundidad en la parte central del sistema. Las líneas de isorefectancia relativas a esta superficie isotérmica de 250°C definen una zona de baja reflectancia que corresponde, aproximadamente, con la cresta de la superficie isotérmica. La comparación de estas dos superficies sugiere que el calentamiento somero en la porción central de Cerro Prieto es joven en relación al calentamiento (a 250°C) en las márgenes del sistema.

Modelos teóricos y de laboratorio de celdas de convección hidrotermal sugieren que la forma de la superficie isotérmica de 250°C observada y la superficie de reflectancia derivada en relación a ella resultan del ascenso convectivo de fluidos termales bajo la influencia de un gradiente hidrodinámico regional que induce un corrimiento hacia el suroeste de los efectos de calentamiento hidrotermal.

INTRODUCCION

El kerógeno es materia orgánica en rocas sedimentarias compuesto de varios tipos de residuos de plantas (macerales; también llamados fitoclastos). La microscopía de luz reflejada permite la diferenciación de los diferentes macerales por su estructura interna, morfología externa y brillo (reflectividad). La vitrinita se deriva de tejidos de plantas leñosas y abunda en lutitas y areniscas. Bajo el microscopio, la vitrinita posee una estructura

interna de homogénea a celular o bandeada; una forma externa que varía entre astillada y blocosa; y una reflectividad (brillo) intermedia cuando se la compara con otros grupos de fitoclastos. El kerógeno también se compone de otros dos grupos macerales con características microscópicas obvias; la liptinita (esporas, polen, resina, cutícula y material de algas) e inertinita (carbón, vitrinita alterada y esclerotias de hongos). Se extrajo el kerógeno de muestras de recortes de 14 pozos tomadas aproximadamente cada 100 m. Se usaron muestras de núcleos de otros 4 pozos. El kerógeno se concentró mediante desmineralización con ácido y por separación con líquido pesado, como Barker (1979) describió previamente. El kerógeno concentrado se lavó, se deshidrató por congelación, se montó en resina epóxica sobre platinas petrográficas estándar (Baskin, 1979) y se pulió para microscopía.

Las propiedades químicas y físicas del kerógeno cambian en respuesta a la duración del calentamiento y a la temperatura. La integración de estos dos efectos determina el rango del kerógeno (Stach y otros, 1975; Tissot y Welte, 1978; Hunt, 1979; Durand, 1980). La base para los estudios de la duración del calentamiento son los cambios irreversibles de las propiedades ópticas resultantes de la desvolatilización del kerógeno en respuesta a la temperatura y tiempo de reacción. Este proceso, denominado catagénesis, involucra un desprendimiento progresivo de H₂O, CO₂, e hidrocarburos, dando como resultado un incremento relativo en el contenido de carbono y una mayor cristalinidad. Se piensa actualmente que la presión tiene escasa influencia sobre la catagénesis (Hunt, 1979; Tissot y Welte, 1978; Stach y otros, 1975). El grado de catagénesis, o rango, de la vitrinita se puede medir por cambios en las propiedades químicas y físicas. La medida física del rango utilizada aquí fue la reflectancia bajo inmersión en aceite (R_o), que se define como la razón de la intensidad de la luz reflejada a la de la luz incidente sobre una superficie maceral pulida. La reflectancia se midió sobre vitrinita estocásticamente orientada sin rotación hasta máxima reflectividad (brillo). Siguiendo a Hevia y Virgos (1977), usamos reflectancia estocástica media bajo inmersión en aceite (R_o), aparentemente la mejor medida óptica de rango. La vitrinita fue seleccionada de acuerdo a criterios dados por Barker (1979), con restricciones adicionales de haber excluido la lignita adicionada a los lodos de perforación y material juzgado como proveniente de derrumbes de los pozos.

DURACION DEL CALENTAMIENTO -- EFECTOS DE LA TEMPERATURA SOBRE EL KEROGENO

La relación entre la duración del

calentamiento, temperatura y reflectancia de la vitrinita se puede modelar de varias maneras: el enfoque teórico asume una reacción química homogénea dependiente de la temperatura y duración de la reacción, según lo descrito por la ecuación de Arrhenius y cinética de primer orden; el enfoque empírico utiliza una ecuación derivada de estudios de temperatura-rango en un pozo y aplicada luego a otros pozos. Ambos métodos deben calibrarse en un sistema geológico similar a aquél donde serán utilizados; por consiguiente, el método empírico parece ser el más razonable en sistemas geoquímicos abiertos donde no se ha desarrollado un modelo teórico adecuado (Barker y Elders, 1979a, 1979b).

Huck y Karweil (1955) fueron los primeros en desarrollar un modelo teórico basado en la ecuación de Arrhenius y cinética de primer orden. Dicho modelo se desarrolló originalmente para predecir el rango del carbón pero desde entonces se ha aplicado a los estudios de kerógeno. Una estimación de la duración del calentamiento (10^6 años; Barker y Elders, 1981) basada en este modelo utilizando datos de temperatura R_0 del sistema de Cerro Prieto, excede la aparente edad geológica de la roca del yacimiento (10^5 años; Barker, 1979) y la edad de la actividad termal obtenida del recocido de las trazas de fisión en apatita ($10^{4.1}$; Sanford y Elders, 1981). Otras funciones de tiempo-temperatura-rango (TTR) basadas en teoría cinética química (Lopatin, 1971; Royden y otros, 1980), y un modelo empírico basado en mediciones en pozos en varias cuencas sedimentarias (Hood y otros, 1975), dan también estimaciones espurias de la duración del calentamiento para Cerro Prieto. Por consiguiente, tales modelos no pueden aplicarse para estimar la duración absoluta del calentamiento en este sistema. El fracaso de los modelos TTR se debe, aparentemente, al sistema abierto rico en fluido, de Cerro Prieto que promueve catagénesis, en relación a cuencas sedimentarias más cerradas para las que se derivaron dichos modelos (Barker, 1979).

Aunque en sistemas geotérmicos los modelos TTR no indican un valor creíble de la duración absoluta de calentamiento, la reflectancia de vitrinita sí muestra una fuerte correlación con la temperatura en el pozo M-84 (Figura 1). Las temperaturas de equilibrio registradas en este pozo correlacionan en casi todos los puntos con la temperatura estimada con un geotermómetro empírico de reflectancia de vitrinita (Barker y Elders, 1979a, 1979b) y correlacionan también con las temperaturas basadas en inclusiones fluidas. El método empírico (Barker y Elders, 1979a, 1979b) también predijo exitosamente los perfiles de temperatura de varios otros pozos estudiados en el campo. Concluimos que la reflectancia de vitrinita es un geotermómetro preciso para la parte central del sistema. Además, dado que la temperatura y el rango son bastante bien conocidos, la variación en rango de las rocas a la misma temperatura a través del sistema se debe, aparentemente, a cambios en la duración del calentamiento.

DURACION RELATIVA DEL CALENTAMIENTO EN CERRO PRIETO

Como se mencionó, Barker y Elders (1979a, 1979b) mostraron que los modelos teóricos basados en cinética química no predicen con precisión la duración absoluta del calentamiento en el sistema de Cerro Prieto. Sin embargo, Barker y Elders concluyeron que las curvas de temperatura-rango debían indicar la duración relativa del calentamiento. Por lo tanto, aunque no pueda determinarse la duración absoluta de calentamiento, la duración relativa de calentamiento a través del sistema puede derivarse de los datos de temperatura-rango.

Las reacciones químicas que causan aumento de rango son irreversibles porque los componentes volátiles se pierden del sistema. De este modo, los cambios químicos y físicos del kerógeno registran la máxima temperatura que ha experimentado el sedimento. Estimaciones precisas de la duración del calentamiento requieren que las temperaturas de los pozos estén en el máximo de la historia geotérmica del sistema. Las temperaturas retrógradas pueden ocasionar estimaciones espuriamente largas de la duración del calentamiento porque para lograr un rango determinado a una temperatura más baja se requiere un tiempo de reacción mayor. Sin embargo, ésta no es la razón de las estimaciones erróneas de la duración del calentamiento en Cerro Prieto.

Las profundidades correspondientes a 250°C derivadas de mediciones en los pozos son típicamente más someras que las derivadas de datos isotópicos (Apéndice I). Esto sugiere que el sistema se está calentando y que el equilibrio del geotermómetro de calcita-agua pareciera estar siendo retardado por las temperaturas más elevadas. Además, en la parte central del sistema las estimaciones de temperatura basadas en los datos de reflectancia correlacionan directamente con las temperaturas modernas de los registros y (o) con las estimaciones de temperatura de la geotermometría de inclusiones fluidas. La correspondencia entre estos geotermómetros, que indican temperaturas máximas, ambientes o de corto plazo, indican que en la mayor parte del sistema de Cerro Prieto la temperatura se encuentra actualmente en su máximo histórico. Por consiguiente, las diferencias en la reflectancia de vitrinita para partes del sistema que ahora están a la misma temperatura, se deben, aparentemente, a diferencias en la duración del calentamiento.

Los contornos de isorefectancia basados en los valores de reflectancia de vitrinita, correspondiendo a una dada temperatura en diferentes pozos (condición isotérmica), definen una superficie imaginaria que indica la duración relativa del calentamiento a través del sistema. Si se hubiera producido simultáneamente en todo el sistema un calentamiento uniforme hasta alcanzar una temperatura dada, las reflectancias tendrían un solo valor que definiría una superficie plana. La superficie isotérmica elegida (que no es necesariamente plana) indica la posición de la medición de reflectancia

y, por lo tanto, la duración relativa del calentamiento en este punto del sistema. Las diferencias en el tiempo de calentamiento entre pozos a la misma temperatura máxima, están indicadas por reflectancias más bajas (menor tiempo de calentamiento), o por reflectancias más altas (mayor tiempo de calentamiento). Estas diferencias producen una superficie de reflectancia curva.

La superficie isotérmica de 250°C presenta una compleja forma de domo, poco profunda alrededor de los pozos M-105, M-9, M-7 y M-3 (Figura 2). Dicha forma sugiere una fuente de calor localizada que ha ocasionado el calentamiento somero de sedimentos en la parte central del sistema. La parte central de este sistema se define por pozos cuyas temperaturas exceden los 300°C (Figura 2) y está localizada cerca de la cresta de la superficie isotérmica de 250°C.

En el sistema de Cerro Prieto las líneas de isorefectancia relativas a la superficie isothermal de 250°C indican un área de baja reflectancia limitada aproximadamente por los pozos M-51, M-105, M-19A, M-10, M-3, M-7, M-53 y M-84 (Figura 3). Datos preliminares indican que la reflectancia aumenta en los flancos sur y norte de este bajo. La forma de parte de los flancos oeste y noreste no están aún bien definidos por nuestros resultados. Los datos de reflectancia de los pozos M-96 y Priar-1 indican que los contornos de isorefectancia se cierran alrededor de la parte central de este sistema.

La comparación entre la superficie isotérmica de 250°C y la superficie de isorefectancia derivada en relación a ella sugiere que el calentamiento somero en la parte central del sistema es joven en relación al calentamiento a 250°C en las márgenes de este sistema.

REGIMEN TERMICO APARENTE EN EL SISTEMA DE CERRO PRIETO

Por medio de modelos de laboratorio de sistemas hidrotermales, Elder (1965) sugirió que en un sistema geotérmico de alta temperatura con rocas de alta porosidad el ascenso del fluido por expansión térmica ocurriría en forma de un angosto penacho rodeado por aguas subterráneas relativamente frías. El fluido termal ascendente se enfría a medida que se eleva y desciende por los flancos del penacho recargando así el sistema.

Usando registros de temperatura de pozos y geotermometría de reflectancia de vitrinita, Barker y Elders (1979b) mostraron que aparentemente está teniendo lugar convección en la parte central del sistema de Cerro Prieto. El efecto de un sistema de convección sobre los perfiles de temperatura de los pozos se ilustra en la Figura 4a (transferencia conductiva de calor) y 4b (sistema convectivo). Los sistemas convectivos se caracterizan por gradientes de temperatura que disminuyen con la profundidad, lo

que es típico de pozos de la parte central de Cerro Prieto (véase por ejemplo la Figura 1). La existencia de fluidos relativamente fríos adyacentes a la parte central del sistema, indicada por la superficie isotérmica de 250°C (Figura 2) también constituye una evidencia fuerte de apoyo a la convección en un sistema hidrotermal (Elder, 1965). Además, Olson (1979) encontró que los datos de isótopos de oxígeno de calcita de este sistema, indican que un mínimo de 10 volúmenes de poro pasaron a través de un volumen de roca dado asumiendo que la misma tiene una porosidad de 20%. Esta razón agua-roca indica que el sistema de Cerro Prieto es relativamente abierto y que hay flujo de fluido. Estas observaciones sugieren una semejanza entre el sistema de Cerro Prieto y el modelo termal convectivo de Elder, y constituye una base para interpretar las condiciones de flujo indicadas por las líneas de isorefectancia bajo condiciones isotérmicas. Norton y Cathles (1979) modelaron matemáticamente un sistema hidrotermal de un plutón ígneo enfriado por conducción y convección que cuantifica el modelo de Elder. Dicho modelo se utiliza aquí para formular un patrón hipotético de reflectancia resultante de un sistema hidrotermal convectivo. Ellos supusieron una cuenca sedimentaria isótropa calentada a profundidad por una fuente local, que produce un ascenso boyante de fluidos termales (Figura 4a, b). El penacho de fluidos termales que asciende en la corteza intersectará y calentará sucesivamente rocas menos profundas. Consecuentemente, la roca profunda al margen del penacho habrá sido calentada a una dada temperatura por un tiempo mayor que las partes menos profundas del sistema que habrán alcanzado esa misma temperatura posteriormente en la historia termal del sistema. De este modo, la reflectancia de la vitrinita extraída de los sedimentos a la misma temperatura, será más elevada en los costados y menor en la parte central no profunda del sistema (Figura 4c). La zona de baja reflectancia corresponde con la cresta de la superficie isothermal, y ambos caracteres aparecerán sobre la fuente de calor del sistema (en este modelo, un plutón). La aplicación de este modelo al sistema de Cerro Prieto indica que la fuente de calor se encuentra bajo la parte central del sistema, tal como se definió más arriba. Las líneas de corriente de flujo (no indicadas en la Figura 4) son aproximadamente paralelas (ascenso subvertical del fluido) a la fuente de calor en su margen, pero se transforman en sub-horizontales a cierta distancia de la fuente, formando parte de una celda de convección. Este patrón de flujo del fluido sugiere que el ascenso de la superficie isotérmica de 250°C al noroeste de la parte central del sistema se debe a recarga y al ascenso convectivo de los fluidos hacia el volumen de caldeo. Al sudoeste de la parte central del sistema, la superficie isotérmica de 250°C desciende rápidamente, haciendo significativamente asimétrica la superficie en forma de domo (Figura 2) cuando se la compara con el modelo de Norton y Cathles. El ascenso relativamente suave de la superficie isotérmica en la porción noroeste del sistema (que, de acuerdo al modelo de Norton y Cathles, debiera ser bastante aguda) y la asimetría del domo termal sugieren otros factores geológicos que

controlan la convección en este sistema, más que el simple ascenso de fluidos, inducido térmicamente, en un medio isótropo. Permeabilidades anisótropas y el régimen de flujo de aguas subterráneas son elementos importantes en el control del movimiento del fluido hidrotermal, y su efecto ha aparentemente deformado los patrones isotérmicos y de reflectancia observados con respecto a aquellos predichos por el modelo de Norton-Cathles.

En el sistema de Cerro Prieto, las zonas permeables están indicadas por las zonas de producción (Puente y de la Peña, 1979) y por correlaciones de registros geofísicos de pozos (Abril y Noble, 1979; Prian, 1979). Dichos cuerpos permeables son cortados por fallas de rumbo noroeste y por fallas conjugadas de rumbo noreste. Las fallas de rumbo noroeste dominan la estructura del campo y, localmente, producen grandes desplazamientos de las zonas permeables. Dichas fallas desplazan las zonas permeables con el bloque caído hacia el eje de la cuenca, dando como resultado un patrón escalonado con las zonas de producción hundiéndose hacia el noreste (ver Figura 1 de Prian, 1979). En base a las interpretaciones de la litología de los pozos, correlaciones de registros geofísicos de pozos (Prian, 1979; Lyons y van de Kamp, 1979) y considerando la posición geográfica del campo sobre el delta del Río Colorado, se deduce que la estructura de almacenamiento y las zonas de producción consisten en canales distributarios y depósitos de llanura deltaica. El eje de elongación de estos cuerpos permeables tiende hacia el noroeste (Prian, 1979) y parece controlar la distribución de fluido hidrotermal la que se ajusta a esta tendencia (Puente y de la Peña, 1979; Elders y otros, 1980).

El nivel piezométrico tiende a ser paralelo a la topografía de la superficie. El flujo de agua subterránea es perpendicular a las líneas equipotenciales de la superficie piezométrica. Por lo tanto, el flujo de agua subterránea tiende a seguir la pendiente de la superficie topográfica. El flujo subterráneo a través del delta del Río Colorado, cuya superficie topográfica se asemeja a una sección cónica, será radial desde el ápice del delta, cerca de Yuma, Arizona. Estudios isotópicos de aguas subterráneas de las vecindades de Cerro Prieto indican que provienen de la corriente subálvea del Río Colorado a través de su delta (Crosby y otros, 1972). El origen de los fluidos en este sistema se ajusta al patrón aparente de flujo subterráneo, y sugiere que el sistema de Cerro Prieto se recarga desde el noroeste y descarga al sudoeste.

La influencia sobre el sistema de Cerro Prieto del flujo subterráneo del noreste al sudoeste y de la estructura de almacenamiento que se hace más somera hacia el sudoeste en un sistema convectivo hidrotermal explica: (1) el ascenso más moderado de los fluidos termales de lo que predice el modelo de Norton-Cathles, porque el movimiento del fluido hidrotermal parece estar controlado por las zonas permeables que se hacen más someras hacia el sudoeste;

(2) la asimetría de la superficie isotérmica de 250°C que, bajo la influencia del flujo subterráneo regional noreste-sudoeste, desplazaría los fluidos hidrotermales y sus efectos de calentamiento hacia el sudoeste (en lugar de un simple ascenso vertical del fluido); (3) la evidencia de recarga (por sus efectos de enfriamiento y cambio de salinidad) que tiene lugar sobre la margen norte (Mercado, 1970; Barker y Elders, 1979b; Elders y otros, 1980; Seamount y Elders, 1981); y (4) la descarga desde el sistema de convección que ocurre a poca profundidad al sudoeste (Elders y otros, 1980).

CONCLUSION

Las características principales del sistema de Cerro Prieto indicadas por este estudio son:

(1) La forma de la superficie isotérmica de 250°C y la superficie de isorefectancia derivada en relación a ella, sugieren que el calentamiento somero en la parte central de Cerro Prieto es joven en relación al calentamiento a 250°C sobre las márgenes de este sistema;

(2) La similitud de los datos de temperatura y rango con los predichos por el modelo de Norton-Cathles indica que Cerro Prieto es un sistema de convección de agua caliente centrado, aproximadamente, alrededor de los pozos M-84, M-102 y M-39.

(3) El sistema hidrotermal de Cerro Prieto está distorsionado con respecto a una celda simple de convección vertical por un flujo subterráneo regional que corre del noreste al sudoeste, y por zonas permeables que se hacen más someras hacia el sudoeste. Dichos factores geológicos, que controlan el sistema, inducen un desplazamiento de los fluidos hidrotermales hacia el sudoeste, con recarga ocurriendo principalmente a profundidad en la parte noreste fuerte ascenso convectivo de fluidos en la parte nordeste-central y descarga, principalmente, en la parte sudoeste más somera;

(4) La localización de la fuente de calor para Cerro Prieto es difícil de determinar usando sólo sus manifestaciones someras. El modelo de Norton-Cathles predice que la ocurrencia más somera de fluido de alta temperatura debe corresponder con la cresta de las superficies isotérmicas sobre la fuente del calor del sistema. La estrecha asociación entre pozos que sobrepasan 300°C y la cresta de la superficie isotérmica de 250°C en Cerro Prieto (Figura 2), parcialmente consistente con el modelo de Norton-Cathles, sugiere que el desplazamiento de fluidos hidrotermales hacia el sudoeste es leve, y que la fuente de calor del sistema de Cerro Prieto se encuentra aproximadamente por debajo de su parte central. Sin embargo, la fuente de calor única y compacta usada en el modelo de Norton-Cathles es probablemente demasiado simple para el sistema de Cerro

Prieto, el cual ha experimentado numerosos y extensos eventos igneos intrusivos y extrusivos, y

(5) La variación de la duración de

calentamiento a través del sistema limita el uso del geotermómetro empírico de reflectancia de vitrinita desarrollado para el pozo M-105 a la parte central del sistema de Cerro Prieto.