

DISTRIBUTION OF HYDROTHERMAL MINERAL ZONES IN THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD OF BAJA CALIFORNIA, MEXICO

Wilfred A. Elders, James R. Hoagland, Alan E. Williams
Institute of Geophysics and Planetary Physics
University of California
Riverside, California 92521, U.S.A.

ABSTRACT

Our on-going studies of water-rock interaction at Cerro Prieto have now been extended to include samples from 40 wells. We have confirmed the regular sequence of progressive hydrothermal alteration zones previously described, and have mapped these alteration zones across the geothermal field. Our earlier work showed the relationships between hydrothermal mineralogy, temperature and permeability, in that alteration occurs at lower temperature in sandstone than in the less permeable shales. The effects of chemical parameters such as silica activity and differences in CO_2 fugacity have also become apparent when mineral assemblages are compared in sandstones from different wells at the same temperature. A rather complete picture of the shape of the reservoir and the nature of its boundaries is developing, and we have begun to identify patterns in the observed hydrothermal mineral zonations which are characteristic of different temperature gradients. We infer such different gradients to be indicative of different parts of the hydrothermal flow regime. In certain wells mineral zones are closely spaced, indicating steep thermal gradients, while in others, they are much farther apart. We believe that patterns characteristic of recharge, discharge and upwelling zones as well as areas of primarily horizontal flow can be recognized.

The geothermal circulation system at Cerro Prieto appears to be rather young and shows no indication of retrograde reactions due to cooling. The pattern of fluid flow does not seem to be significantly affected by faults, stratigraphic horizons or by the presence of a cap-rock. The mineral zones define a thermal dome which is apparently fed from the east and spreads westward.

INTRODUCTION

The extensive drilling of the Cerro Prieto geothermal field and its study by a great variety of techniques are rapidly making this area the best understood geothermal anomaly in the world. As with our previous studies (Elders *et al.*, 1977, 1978), we continue to emphasize

the analysis of hydrothermal alteration in the rocks from within the geothermal system. The interaction of the circulation hydrothermal fluids with these rocks produces a variety of physical, mineralogical, chemical and isotopic changes which record the effects of temperature, hydrothermal flow, fluid chemistry, duration of heating and a number of other parameters. We believe that information regarding all of these parameters can be extracted from the rock by careful analysis.

Among the aims of our work are 1) To assist in making stratigraphic correlations between wells; 2) To improve the definition of the areal extent of the reservoir and the nature of its boundaries; 3) To use various geothermometric and dating methods to determine the time-temperature history of the field; 4) To identify patterns of hydrothermal alteration which record the dynamics of fluid flow, e. g. zones of boiling, of fluid discharge and recharge. These constraints are, in turn, necessary input to models of the natural hydrothermal circulation in the system before production began. Eventually the aim would be the discussion of the location of the heat source and how it is coupled with the hydrothermal circulation system.

In this paper we stress the use of petrologic examination of well cuttings for improving our understanding not only of the shape of, and temperature distribution within the geothermal field, but also of the fluid flow patterns producing the observed geothermal anomaly.

METHODS OF STUDY

For complete petrographic analysis of rock samples from Cerro Prieto, a wide variety of techniques can be used. The data developed and discussed in this paper represents primarily lithologic, mineralogic, textural and chemical observations. Samples of drill cuttings have been examined under the binocular microscope and thin sections of similar rock fragments have been studied under the petrographic microscope. Analysis of the hydrothermal mineralogy is greatly aided by the use of X-ray diffraction, while mineral chemistry is studied by electron

microprobe analysis. The reader is referred to our previous publications (Elders *et al.*, 1977, 1978) for more detailed description of our methods.

HYDROTHERMAL MINERAL ZONES

To date, lithologic samples from 40 wells at Cerro Prieto have been examined petrographically. The mineral assemblages encountered in the 19 new wells studied this year follow the same general sequences and relationships to temperature as have been previously discussed (Elders *et al.*, 1977, 1978). Our observations seem to indicate that progressive hydrothermal alteration of both sandstone and shale samples tends to decrease the porosity and increase the density of the rocks in the reservoir. Within all high temperature mineral zones, the formation of secondary mineral phases appears to dominate over the destruction of minerals by dissolution. Few changes have resulted in our concept of hydrothermal mineral zonation with respect to temperature at Cerro Prieto as a result of this year's investigation (Fig. 1). We have confirmed the presence of the pyroxene diopside-hedenbergite in several of the wells and have recognized the mineral stilpnomelane in the reservoir. Much of what has been previously reported as biotite may actually be stilpnomelane. These two phases occur within a similar temperature range and are often difficult to distinguish from one another. The "biotite zone" (Elders *et al.*, 1978) has therefore been redesignated as the "biotite-stilpnomelane zone" (Fig. 1).

Figure 1 represents our latest chart indicating the occurrence of specific hydrothermal mineral assemblages in the sandstones of Cerro Prieto as a function

of temperature. As mentioned earlier, our studies indicate that reactions occurring in sandstones are more diagnostic of the reservoir conditions than those occurring in the argillaceous rocks (Elders *et al.*, 1977, 1978). Invariably a given mineral zone occurs at a lower temperature in the more permeable sandstones than the temperature at which it appears in the shales. In fact, the high temperature mineral assemblages of the calcium-aluminum silicate zone and the biotite-stilpnomelane zone are usually absent in shales. It is clear that in addition to the effect of temperature, the intrinsic permeability of the sediments has an important effect on the occurrence of mineral reactions (Elders *et al.*, 1978). Therefore, we will emphasize the mineral zonations in sandstones almost exclusively for delineating the conditions existing at various locations within the reservoir.

SHAPE OF THE RESERVOIR

For the purposes of visualizing the Cerro Prieto geothermal reservoir as indicated by hydrothermal mineral zones, we have constructed a set of cross sections through the field (Fig. 2). These sections (Figs. 3 through 7), which show the hydrothermal alteration zones as observed in cuttings from various depths in Cerro Prieto wells, provide a reliable picture of the shape of the existing geothermal anomaly. In particular, it should be noticed that the high temperature mineral zones (calcium-aluminum silicate zone and biotite-stilpnomelane zone) roughly reflect the location of reservoir fluids at exploitable temperature (see Fig. 1).

In the cross sections (Figs. 3-7), it can be seen that the Cerro Prieto geothermal anomaly appears as

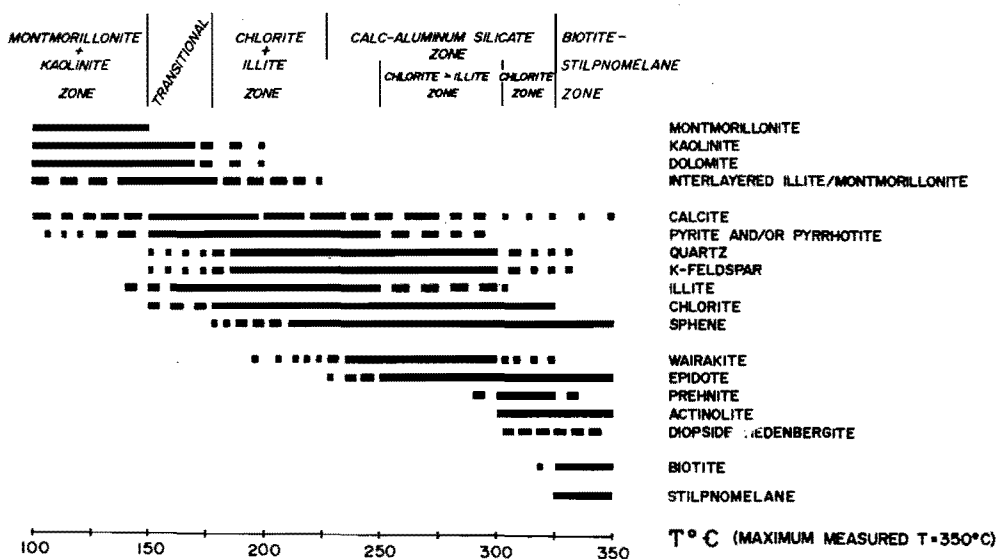


Figure 1. Temperature ranges for the occurrence of hydrothermal minerals in the sandstones of the Cerro Prieto Geothermal Field.

a high temperature dome culminating roughly at the location of the initial zone of exploitation which powers the Comisión Federal de Electricidad Geothermal Plant #1. This dome can be clearly seen on the cross sections in the vicinity of wells M9 through M123 on Figure 3, wells M90 to M104 on Figure 4, and of wells M43 to M48 on Figure 5.

The boundaries of the geothermal anomaly on the south, west and northwest are indicated by the rather abrupt deepening of the thermal anomaly as seen between wells M9 and M6 on Figure 3, M90 and M101 on Figure 4, M105 and M6 on Figure 7 and between M43 and M3 as well as M48 and M92 on Figure 5. The geothermal dome deepens much more gradually to the north and east of the initial zone of exploitation as can be seen by the gradual slope of the higher temperature mineral zones toward M94 on Figure 6 and toward M53 on Figures 3 and 4. The boundary of the thermal anomaly to the southeast of the dome appears to be of intermediate gradient as shown by the moderate dip of the mineral zones toward T366 on Figure 6 and toward M93 on Figure 7.

Although our three dimensional understanding of the shape of the Cerro Prieto geothermal field is, as yet

incomplete, it appears certain that the existing thermal anomaly can be roughly defined by the hydrothermal mineral zonations. In particular, the high temperature dome, in which exploitation has already begun, appears to be sharply bounded on the south, west and northwest by cold, unaltered material. In a northeasterly direction, however, the thermal anomaly deepens rather gradually, giving the geothermal field roughly a wedge shape. In addition, the mineral zones which we have used to define the shape of the reservoir do not seem to be noticeably affected by faults, or by stratigraphic horizons.

TYPES OF MINERAL ZONATIONS

Although the sequence of appearance of mineral zones is quite constant in all of the wells examined, the spacing of such zones with respect to depth is rather variable. Since we have indicated that hydrothermal mineral zonation in sandstones is directly related to the reservoir temperature, it seems apparent that such differences in the mineral zone spacings indicate differences in the thermal gradient of the reservoir. Several types of mineral zone spacings have been recognized and appear to define different areas of the Cerro Prieto hydrothermal circulation system. Although these well types are gradational, and our interpretations of them are, at present, preliminary, we feel that mineral zone spacings have great

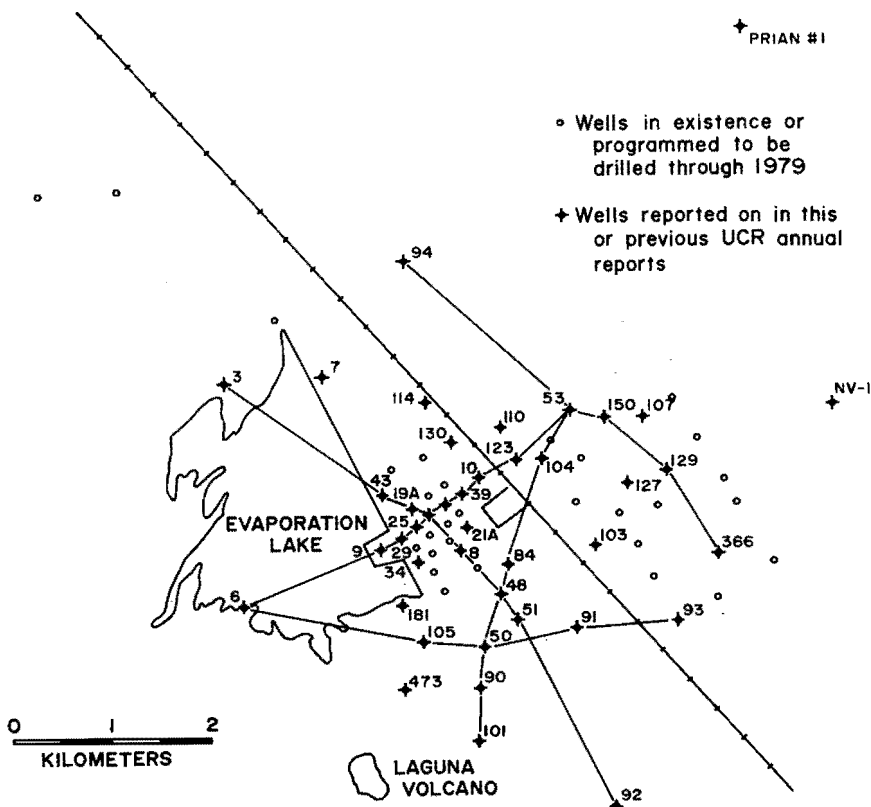


Figure 2. Map of the Cerro Prieto Geothermal Field showing wells studied and locations of cross sections.

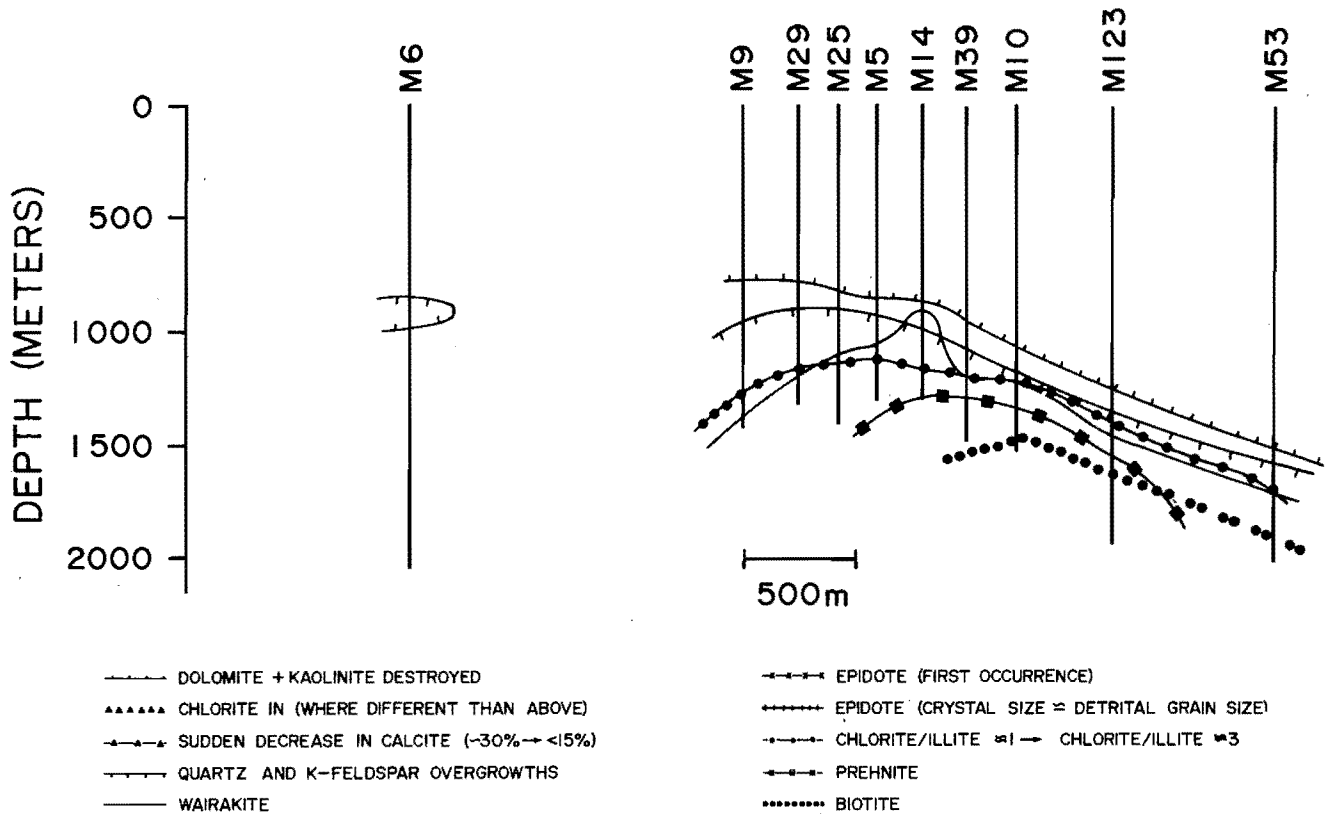


Figure 3. Distribution of mineral zones in sandstones on cross section from well M6 to well M53.

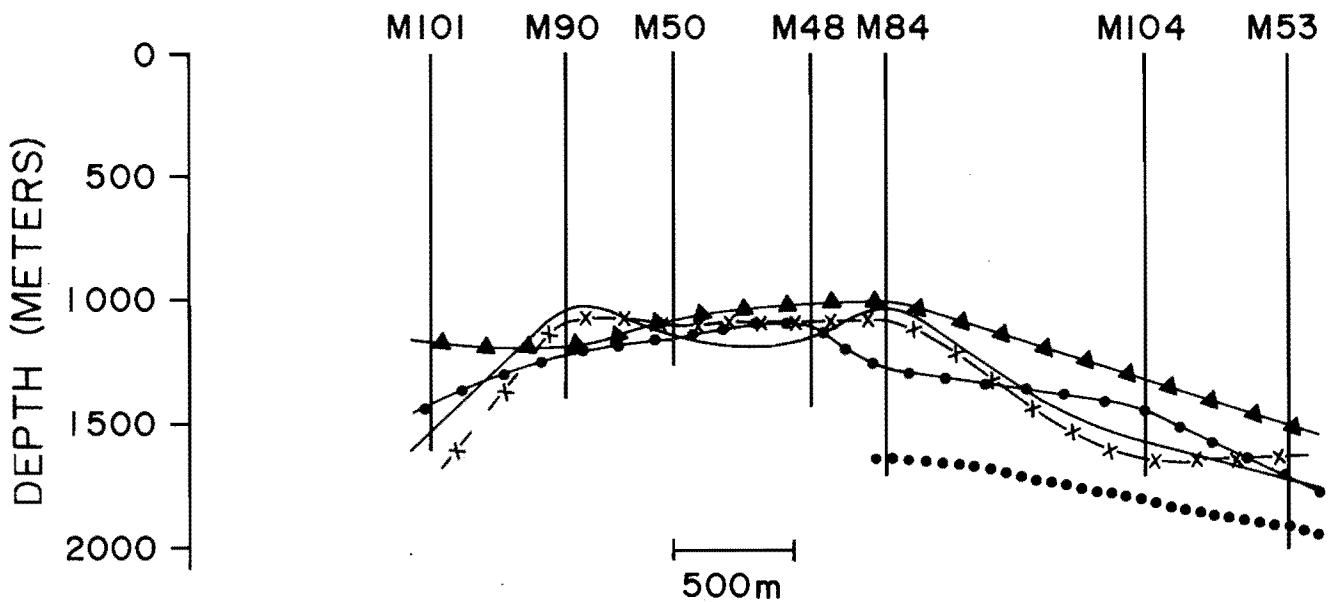


Figure 4. Distribution of mineral zones in sandstones on cross section from well M101 to M53. Symbols are the same as those used in Figure 3.

potential for defining the flow regime in different areas of the Cerro Prieto geothermal field.

Type 1: Prograding Mineral Zones. In wells of this type there is a regular, progressive sequence of mineral zones. They are rather evenly spaced with depth and follow the sequence shown in Fig. 1. These appear to be wells with thermal gradients similar to those observed in many geothermal environments. In these wells, a relatively steep thermal gradient marks the "top" of the reservoir, while at greater depth the gradient becomes progressively flatter within the reservoir where there is progressively more upward convective flow of the fluid. Wells near the culmination of the thermal dome appear to be primarily of this type, as are many wells to the northeast of the initial production zone. For instance, M8, M39, M43, M123 and T366 appear to be wholly of this type, while M101, M104, M105, M127, M129, M130, M150 and M181 are roughly similar to this type.

Type 2: Telescoped Mineral Zones. In wells of this type, a small increase in depth causes a much more rapid progression through the mineral zones than is observed in the Type 1 wells. At Cerro Prieto, wells M93, M107, M127, M129 and to a lesser extent, M123, could be placed in this category. These wells are all in the eastern part of the presently explored geothermal field and the rapid transition of mineral zones which classify these wells as Type 2, occurs deep in all of the wells. This implies a gentle temperature gradient at shallow depth and an extremely steep gradient at greater depths in this area. Such a gradient may be expected in a zone where shallow, cold water influx (recharge) causes depression of the thermal gradient. Wells M93, M107, M127 and M129 all appear to lie near the margins of the field where such recharge might be expected.

Type 3: Extended Mineral Zones. Wells of this type show the opposite effect as Type 2 wells, in that certain mineral zones extend over an unusually large depth interval. Wells M94, M110, M114 (all north of the main field), and to a lesser degree, M105 and M181 (southwest of the field) show this characteristic. If we make similar inferences about the relationship of mineral zones to temperature, we can suggest that the thermal gradient in the extended zones is unusually low. The occurrence of low temperature gradients deep within a geothermal well coupled with high gradients at shallow depths may imply a zone of discharge, i. e. of active upwelling of hot fluid into a shallow aquifer.

Type 4: Reversed Mineral Zones. Wells in which mineral zones appear in the reverse of their normal sequence are interpreted to have zones of reversed temperature gradient, i. e. temperature is decreasing with

depth. Such reversed mineral zones are observed in M6, M9, M101, M130, 0473, and to a lesser degree, in M114. The reversal of temperature gradients in a well requires a corresponding heat source or sink which is presumably hot or cold fluid with a strong horizontal component of flow. It should be noticed that all wells of this type are located near the margins of the geothermal field where such horizontal outflow (discharge) or inflow (recharge) might be expected.

Our initial interpretation of the mineralogic constraints on the Cerro Prieto geothermal field indicate a thermal dome, dipping gently to the east and northeast where thermal gradients may be "telescoped" by descending cold water. Thermal gradients indicative of discharge and horizontal flow (wells of Types 3 and 4) are found in wells on the north, west and southwest boundaries of the thermal dome. The apparent concentration of "recharge" type wells to the east and "discharge" wells to the west of the geothermal field indicates the possibility of a flow-through circulation in which fluid is fed from the east and spreads westward.

CHEMICAL CONSTRAINTS

Although the overall pattern of mineral zonation in Cerro Prieto is rather regular, we have detected important variation in mineral assemblages which are not due to temperature or permeability. The best studied example compares the hydrothermal mineralogies of wells M53 and M84. Figure 8 illustrates the important phases in each well at the same temperatures but at different depths. In particular, note the lack of prehnite and the persistence of calcite and K-mica in M53. Both wells contain coexisting epidote and wairakite, and Figure 9 illustrates the significance of this assemblage with respect to the silica saturation of the associated fluids, and the temperature of the reservoir. The boundaries of the shaded zone represent the reactions limiting the stability of coexisting clinozoisite (an end member composition epidote) and wairakite. Note that the stability field for these minerals indicates silica activities at, or above, quartz saturation throughout the 250-350°C temperature range. The hatchured rectangles represent the shift in the shaded stability field corresponding to the actual chemical compositions of epidotes measured in samples from the two wells. The electron microprobe analyses of epidote compositions in coexistence with wairakite, therefore, require an even greater supersaturation of silica than does the assemblage clinozoisite-wairakite.

Figure 10 illustrates the stability fields of various assemblages found in wells M53 and M84 as a function of $f\text{CO}_2$ and $a\text{SiO}_2$. The M84 assemblage of epidote + prehnite + K - feldspar without calcite must plot within the lower left field of the diagram. Since M53

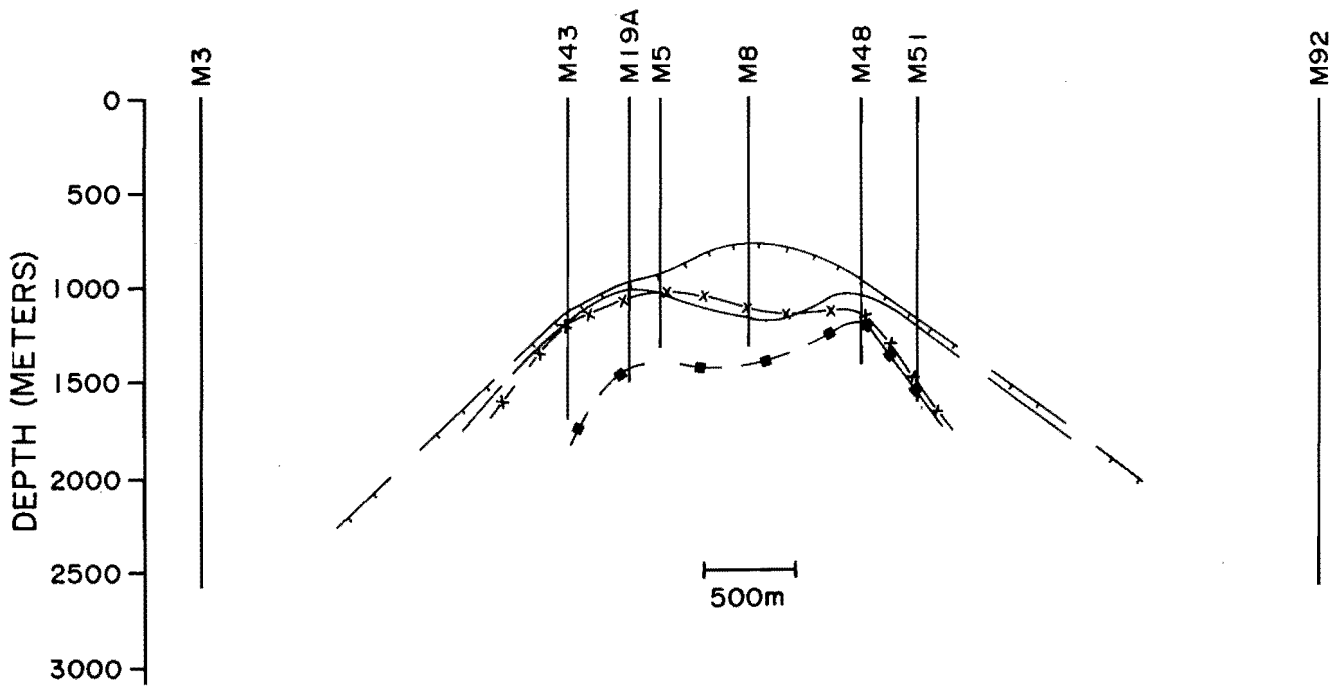


Figure 5. Distribution of mineral zones in sandstones on cross section from well M3 to M92. Symbols are the same as those used in Figure 3.

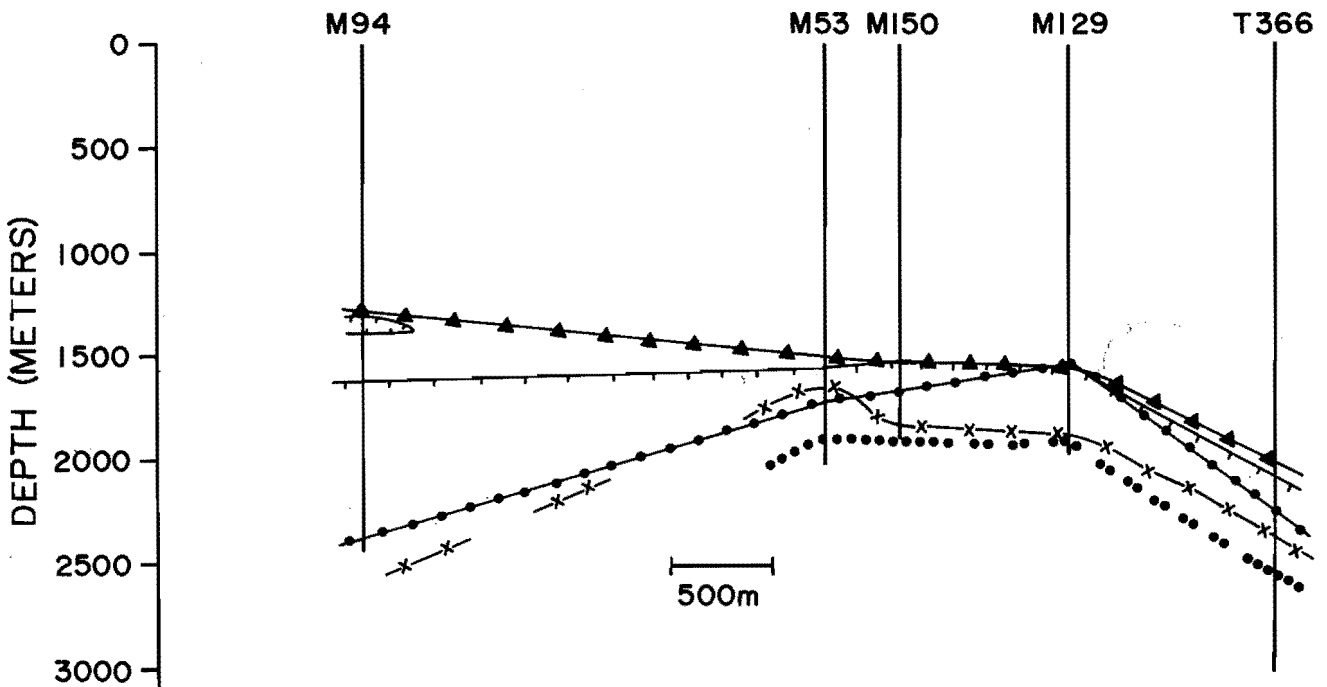


Figure 6. Distribution of mineral zones in sandstones on cross section from well M94 to T366. Symbols are the same as those used in Figure 3.

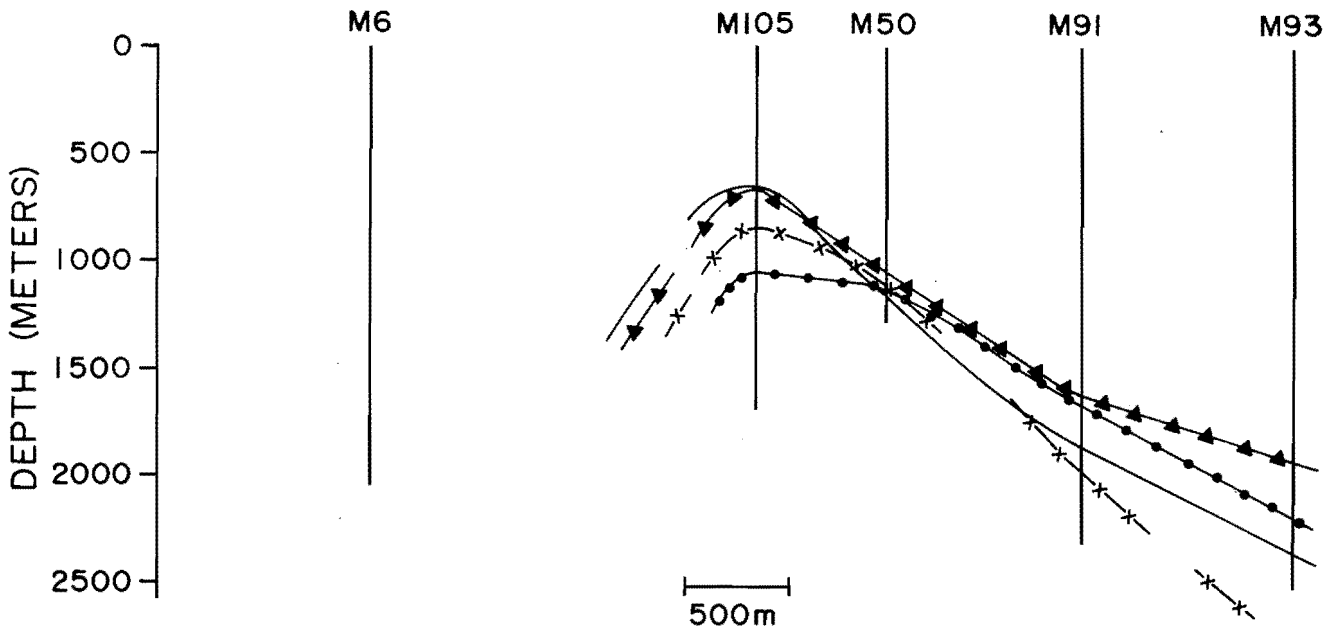


Figure 7. Distribution of mineral zones in sandstones on cross section from well M6 to M93. Symbols are the same as those used in Figure 3.

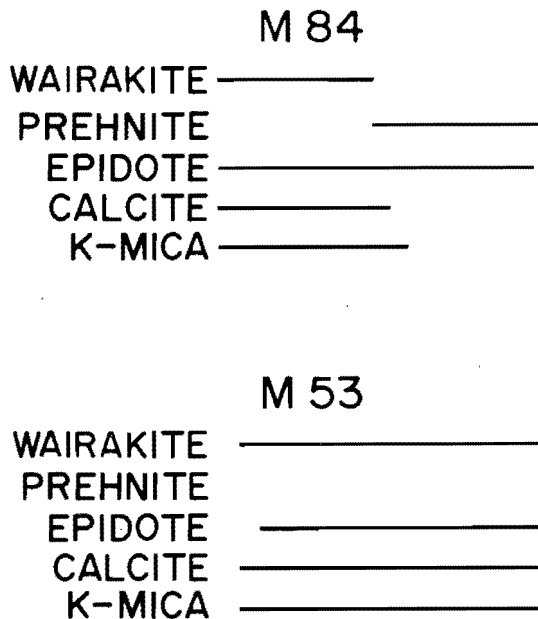


Figure 8. Comparison of mineral paragenesis at similar temperatures in wells M84 and M53, Cerro Prieto Geothermal Field.

contains coexisting epidote + wairakite + calcite + K-mica, it must be located along the boundary of the epidote + calcite stability field and the wairakite + calcite field and must be at an $f\text{CO}_2$ value higher than that required for the decarbonation reaction changing K-mica + calcite to epidote + K-feldspar + CO_2 . Therefore, $\log f\text{CO}_2$ in M53 should be greater than 1.5 while M84 must have an $f\text{CO}_2$ less than 1.2.

The significance of this chemical difference at the same temperature in two areas of the Cerro Prieto geothermal field is uncertain at present. Therefore, research in this area is continuing to determine if such chemical variations are the result of pressure differences, if they require barriers to fluid flow, or if they indicate hydrothermal variations such as the existence of localized areas of boiling.

CONCLUSIONS

Hydrothermally altered rocks are records of the temperature and fluid flow which they have experienced. They can potentially be used to infer modern and past temperatures, the ratio of water to rock involved in hydrothermal interactions, chemical parameters of the fluid, the duration of heating and the location of zones of boiling, heating, discharge and recharge. Because of the large number of wells drilled at Cerro Prieto and the large number of complementary studies there, it provides an excellent opportunity to apply these concepts.

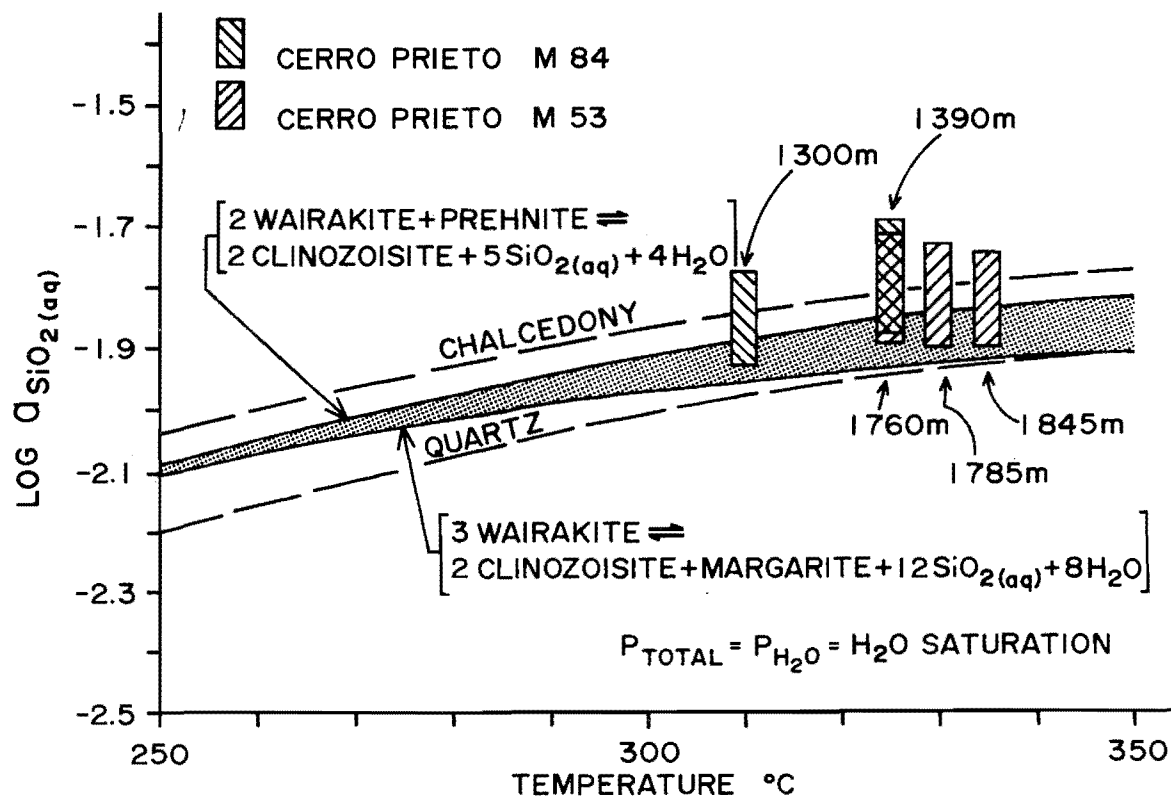


Figure 9. Calculated activity of SiO_2 versus temperature diagram showing the stability fields for assemblages found in wells M84 and M53.

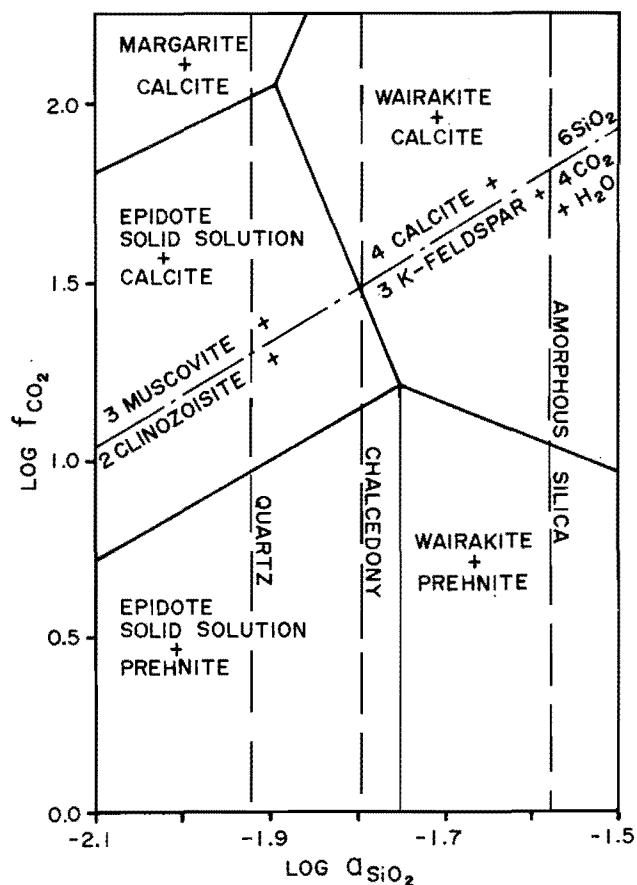


Figure 10. Calculated CO_2 fugacity versus silica activity diagram showing stability fields for various mineral assemblages found at Cerro Prieto. See text for application to the observed paragenesis in M84 and M53.

The pattern of mineral zones across the field defines a thermal dome fed from the east and spreading laterally toward the west. The geothermometric indicators suggest that the present temperatures are the highest that the rocks have ever experienced. The hydrothermal system, therefore, appears to be too young to show any effects of cooling. The reservoir is more highly indurated than the rocks above it, so that there does not appear to be a cap-rock sealing the system from above. Similarly, the pattern of alteration suggests that fluid flow in the reservoir is not affected to any large extent by faults, or by preexisting stratigraphy or lithological variations.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank Ing. Héctor Alonso Espinosa of Comisión Federal de Electricidad of Mexico and all of his staff at Cerro Prieto for providing us with samples, and for their helpful discussions. The laboratory facilities used at UCR were made possible by grants from NSF-RANN and USDI-USGS during the past several years. The funding for this project came

from the Geothermal Reservoir Engineering Management Program, Division of Geothermal Energy of the Department of Energy. The project was monitored by the staff of the Lawrence Berkeley Laboratory.

This is report number 80/12 of the Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Riverside.

REFERENCES

- Elders, W. A., Olson, E., Hoagland, J. R., Barker, C., Johnson, P., and Collier, P., 1977, A comprehensive study of samples from geothermal reservoirs: Petrology and light stable isotope geochemistry of wells M48, M84, M90, M91 and Prian No. 1: University of California, Riverside/Institute of Geophysics and Planetary Physics report 77/37.
- 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: University of California, Riverside/Institute of Geophysics and Planetary Physics report 78/26.

ESTUDIOS DE LA INTERACCION AGUA-ROCA EN EL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO DE BAJA CALIFORNIA, MEXICO

RESUMEN

Los estudios de los autores sobre la interacción agua-roca en Cerro Prieto, se han extendido ahora para incluir muestras de 40 pozos. Se ha confirmado la secuencia regular de zonas de alteración hidrotérmica progresiva descrita previamente, y levantado mapas de dichas zonas de alteración a través del campo geotérmico. El trabajo previo mostró las relaciones entre mineralogía hidrotérmica, temperatura y permeabilidad, observando que la alteración ocurre a temperaturas más bajas en areniscas que en las menos permeables lutitas. Los efectos de parámetros químicos, tales como la actividad de la sílice y diferencias en la fugacidad del CO_2 , se hicieron evidentes al comparar asociaciones mineralógicas en arcillas de diferentes pozos a la misma temperatura. Se está desarrollando una imagen bastante completa de la forma del yacimiento y de la naturaleza de sus límites, y se ha comenzado a identificar rasgos en las zonas mineralógicas hidrotérmicas observadas, característicos de diferentes gradientes de temperatura. Se in-

fiere que tales gradientes diferentes indican distintas partes del régimen de flujo hidrotérmico. En ciertos pozos, las zonas mineralógicas están muy poco espaciadas, indicando pronunciados gradientes térmicos, mientras que en otros están mucho más separadas. Se cree que pueden reconocerse rasgos característicos de recarga, descarga y zonas de subida, así como de áreas de flujo primordialmente horizontal.

El sistema de circulación geotérmico de Cerro Prieto parece bastante joven y no muestra indicios de reacciones retrógradas debidas al enfriamiento. Los rasgos del flujo no parecen estar significativamente afectados por fallas, horizontes estratigráficos o por la presencia de la roca de cubierta. Las zonas mineralógicas definen una cúpula térmica que aparentemente se alimenta del este y se extiende hacia el oeste.

INTRODUCCION

La extensa perforación del campo geotérmico de Cerro Prieto y su estudio por una gran variedad de técnicos están haciendo rápidamente de esta área la anomalía geotérmica mejor comprendida del mundo. Tal como se hizo en trabajos previos (Elders *et al.*, 1977, 1978), en la actualidad se sigue haciendo hincapié en el análisis de alteración hidrotérmica de las rocas desde dentro del sistema geotérmico. La interacción de los fluidos hidrotérmicos circulantes con estas rocas produce una variedad de cambios físicos, mineralógicos, químicos e isotópicos, que registran los efectos de temperatura, flujo hidrotérmico, química de los fluidos, duración del calentamiento y una cantidad de otros parámetros. Pensamos que, mediante un cuidadoso análisis de la roca puede extraerse información respecto a todos estos parámetros.

Entre las metas de este trabajo están: 1) Ayudar a hacer correlaciones estratigráficas entre pozos. 2) Mejorar la definición de la naturaleza de sus límites. 3) Usar varios métodos geotermométricos y de datación para determinar la historia tiempo-temperatura del campo. 4) Identificar rasgos de alteración hidrotérmica que registren la dinámica del flujo de fluidos, como zonas de ebullición y de descarga y recarga de fluido. Estos vínculos son, a su vez, necesarios como datos de entrada para modelos de la circulación hidrotérmica natural en el sistema antes que comenzara la producción. Eventualmente la meta sería la discusión de la ubicación de la fuente de calor y su acoplamiento con el sistema de circulación hidrotérmica.

En este trabajo se hace hincapié en el uso del examen petrológico de recortes de pozos para mejorar la comprensión, no sólo de la forma del campo geotérmico y de la distribución de la temperatura dentro del mismo, sino también de los rasgos del flujo de fluido que producen la anomalía geotérmica observada.

MÉTODOS DE ESTUDIO

Para el análisis petrográfico completo de las muestras de roca de Cerro Prieto, se pueden utilizar una gran variedad de técnicas. Los datos desarrollados y analizados en este informe representan, primariamente, observaciones litológicas, mineralógicas, de textura y químicas. Se han examinado muestras de recortes de perforación bajo microscopio binocular y se han estudiado secciones finas de fragmentos de roca similares bajo el microscopio petrográfico. El uso de la difracción de rayos X es de gran ayuda en el análisis de la mineralogía hidrotérmica, mientras que la química mineral se estudia mediante análisis de microsonda. El lector debe referirse a las publicaciones anteriores (Elders *et al.*, 1977, 1978) para una descripción más detallada de estos métodos.

ZONAS MINERALÓGICAS HIDROTÉRMICAS

Hasta la fecha, se han examinado petrográficamente muestras litológicas de 40 pozos de Cerro Prieto. Las asociaciones mineralógicas en los 19 pozos nuevos estudiados este año, siguen las mismas secuencias generales y relaciones con la temperatura analizadas antes (Elders *et al.*, 1977, 1978). Las observaciones parecen indicar que la alteración hidrotérmica progresiva en muestras de arenisca y lutita tiende a reducir la porosidad y a incrementar la densidad de las rocas del yacimiento. La formación de fases mineralógicas secundarias parece dominar sobre la destrucción de minerales por disolución en todas las zonas mineralógicas de alta temperatura. Como resultado de la investigación de estos años (Fig. 1), ha habido pocos cambios en nuestro concepto de la distribución de zonas mineralógicas hidrotérmicas respecto a la temperatura en Cerro Prieto. Se ha confirmado la presencia de hedenbergita diopsida piroxenada en varios de los pozos y se reconoció el mineral estilpnomelano en el yacimiento. Mucho de lo que ha sido informado previamente como biotita, puede ser en realidad estilpnomelano. Estas dos fases ocurren dentro de una gama de temperatura similar, y a menudo son difíciles de distinguir una de la otra. Por lo tanto, la "zona de biotita" (Elders *et al.*, 1978) ha sido redenominada como "zona de biotita-estilpnomelano" (Fig. 1).

La figura 1 representa la última carta de los autores que indica la aparición de asociaciones mineralógicas hidrotérmicas específicas en las areniscas de Cerro Prieto en función de la temperatura. Como fue mencionado al comienzo, los estudios indican que las reacciones que ocurren en areniscas constituyen un mejor diagnóstico de las condiciones del yacimiento que las que suceden en las rocas arcillosas (Elders *et al.*, 1977, 1978). Invariablemente, una zona mineralógica dada ocurre a una temperatura más baja en las areniscas más permeables que la de aparición de la misma zona en las lutitas. En realidad, las asociaciones mineralógicas de alta temperatura de la zona de silicatos de calcio-aluminio y de la zona de biotita-estilpnomelano, en general están ausentes en lutitas. Está claro que, además del efecto de temperatura, la permeabilidad intrínseca de los sedimentos tiene un efecto importante sobre la presencia de reacciones mineralógicas (Elders *et al.*, 1978). Por lo tanto, se hará hincapié casi exclusivamente en los agrupamientos zonales mineralógicos en areniscas para delinear las condiciones existentes en varios lugares dentro del yacimiento.

FORMA DEL YACIMIENTO

Se ha construido un conjunto de secciones transversales a través del campo (Fig. 2) con el propósito de visualizar el yacimiento geotérmico de Cerro Prieto en función de lo indicado por las zonas mineralógicas hidrotérmicas. Dichas secciones (Fig. 3 a 7) que muestran las zonas de alteración hidrotérmica inferidas de observaciones de recortes

de pozos de Cerro Prieto a varias profundidades, proveen una imagen fidedigna de la forma de la anomalía geotérmica existente. En particular, debe destacarse que las zonas mineralógicas de alta temperatura (zona de silicatos de calcio-aluminio y zona de biotita-estilpnomelano) reflejan aproximadamente la ubicación de los fluidos del yacimiento a temperatura explotable (Fig. 1).

En las secciones transversales (Fig. 3 a 7), se ve que la anomalía geotérmica de Cerro Prieto aparece como un domo de alta temperatura que culmina aproximadamente en el lugar de la zona inicial de explotación que alimenta la Planta Geotérmica # 1 de la Comisión Federal de Electricidad. Dicho domo puede verse claramente en las secciones transversales, en la vecindad de los pozos M9 a M123 en la figura 3, de los pozos M90 a M104 en la figura 4 y de los pozos M43 a M48 en la figura 5.

Los límites de la anomalía geotérmica en el sur, oeste y noroeste están indicados por la profundización bastante abrupta de la anomalía térmica que se observa entre los pozos M9 y M6 de la figura 3, M90 y M101 de la figura 4, M105 y M6 de la figura 7, y M43, M3, M48 y M92 de la figura 5. El domo geotérmico se profundiza mucho más gradualmente al norte y al este de la zona inicial de explotación, como puede apreciarse por la pendiente gradual de las zonas mineralógicas de más alta temperatura hacia M94 en la figura 6, y hacia M53 en las figuras 3 y 4. El límite de la anomalía térmica al sureste del domo parece tener un gradiente intermedio, tal como lo indica la inclinación moderada de las zonas mineralógicas hacia T366 en la figura 6 y hacia M93 en la figura 7.

Aunque es aún incompleta la comprensión tridimensional de la forma del campo geotérmico de Cerro Prieto, parece seguro que la anomalía térmica existente puede definirse aproximadamente por los agrupamientos mineralógicos hidrotérmicos. En particular, el domo de alta temperatura, cuya explotación ya ha comenzado, parece estar bien limitado al sur, oeste y noroeste por material frío e inalterado. No obstante, en dirección aproximada noreste, la anomalía térmica se profundiza de manera gradual, dando forma como de cuña al campo geotérmico. Además, las zonas mineralógicas que se han utilizado para definir la forma del yacimiento no parecen estar notablemente afectadas por fallas o por horizontes estratigráficos.

TIPOS DE AGRUPAMIENTOS MINERALOGICOS

Aunque la secuencia de aparición de zonas mineralógicas es bastante uniforme en todos los pozos examinados, el espaciado de dichas zonas respecto a la profundidad es muy variable. Desde que hemos señalado que los agrupamientos mineralógicos hidrotérmicos en areniscas están directamente relacionados con la temperatura del yacimiento, parece claro que tales diferencias en los espaciamientos de las zonas mineralógicas indican diferencias en el gra-

diente térmico del yacimiento. Se han reconocido varios tipos de espaciamientos de zonas mineralógicas que parecen definir diferentes áreas del sistema de circulación hidrotérmico de Cerro Prieto. Aunque estos tipos de pozos son gradacionales y sus interpretaciones son preliminares en este momento, se cree que los espaciamientos de las zonas mineralógicas tienen gran potencial para definir el régimen de flujo en diferentes áreas del campo geotérmico de Cerro Prieto.

Tipo 1. Zonas mineralógicas en avance. En pozos de este tipo hay una secuencia regular y progresiva de zonas mineralógicas. Están bastante uniformemente espaciadas en profundidad y siguen la secuencia observada en la figura 1. Parecen ser pozos con gradientes térmicos similares a los observados en muchos ambientes geotérmicos. En estos pozos, un gradiente térmico relativamente alto marca el "tope" del yacimiento, mientras que a mayor profundidad dicho gradiente se vuelve progresivamente más chato dentro del yacimiento donde el flujo convectivo de fluido se hace más vertical y dirigido hacia arriba. Los pozos cercanos a la culminación del domo térmico son de este tipo, en su mayoría, como muchos pozos al noroeste de la zona inicial de producción. Por ejemplo, parecen completamente de este tipo los pozos M8, M39, M43, M123 y T366, y los M101, M104, M105, M127, M129, M130, M150 y M181 son también similares.

Tipo 2: Zonas mineralógicas telescópicas. En pozos de este tipo un pequeño aumento en profundidad causa una mucho más rápida progresión a través de las zonas mineralógicas que la observada en los pozos del Tipo 1. En Cerro Prieto podrían colocarse en esta categoría los pozos M93, M107, M127, M129 y, en menor grado, M123. Dichos pozos están en el sector oriental del campo geotérmico actualmente explorado, y la rápida transición de zonas mineralógicas que clasifican estos pozos como del Tipo 2, sucede a profundidad en todos los pozos. Esto implica en esta área un gradiente de temperatura suave a poca profundidad y un gradiente extremadamente pronunciado a mayores profundidades. Un gradiente semejante puede esperarse en una zona donde el influjo de agua fría poco profunda (recarga) causa depresión del gradiente térmico. Los pozos M93, M107, M127 y M129 parecen encontrarse cerca de las márgenes del campo donde podría esperarse tal recarga.

Tipo 3: Zonas mineralógicas extendidas. Los pozos de este tipo muestran el efecto opuesto a los del Tipo 2 debido a que ciertas zonas mineralógicas se extienden sobre un intervalo de profundidad inusualmente grande. Los pozos M94, M110, M114 (todos al norte del campo principal) y, a un grado menor, M105 y M181 (al suroeste del campo), muestran esta característica. Si se hacen inferencias similares sobre la relación de las zonas mineralógicas con la temperatura, se puede sugerir que el gradiente tér-

mico es inusualmente bajo en las zonas extendidas. La aparición de pequeños gradientes de temperatura ubicados muy profundos dentro de un pozo geotérmico, acoplados con altos gradientes a poca profundidad pueden implicar una zona de descarga, es decir, de surgencia activa de fluido caliente dentro de un acuífero poco profundo.

Tipo 4: Zonas mineralógicas invertidas. Los pozos en los que las zonas mineralógicas aparecen al revés de su secuencia normal, se interpretan como teniendo zonas de gradiente de temperatura invertido, es decir, que la temperatura disminuye con la profundidad. Dichas zonas mineralógicas invertidas se observan en M6, M9, M101, M130, O473 y, en un grado menor, en M114. La inversión de los gradientes de temperatura en un pozo requiere una correspondiente fuente o sumidero de calor, que presumiblemente es fluido caliente o frío con un fuerte componente de flujo horizontal. Debe destacarse que todos los pozos de este tipo están ubicados cerca de las márgenes del campo donde podría esperarse tal salida (descarga) o entrada (recarga) horizontal.

Nuestra interpretación inicial de los vínculos mineralógicos del campo geotérmico de Cerro Prieto indican un domo térmico que se sumerge suavemente hacia el este y noroeste donde los gradientes térmicos pueden ser "telescopizados" por agua fría descendente. Gradientes térmicos indicativos de descarga y flujo horizontal (pozos del Tipo 3 y 4) se encuentran en los pozos situados sobre los límites norte, oeste y suroeste del domo térmico. La concentración aparente de pozos tipo "recarga" al este y "descarga" al oeste del campo geotérmico indican la posibilidad de una circulación a través del yacimiento, en la que el fluido ingresa por el este y se derrama hacia el oeste.

VINCULOS QUIMICOS

Aunque las características generales de las zonas mineralógicas son bastante regulares en Cerro Prieto, se han detectado importantes variaciones en las asociaciones mineralógicas que no se deben a temperatura o permeabilidad. El ejemplo mejor estudiado compara las mineralogías hidrotérmicas de los pozos M53 y M84. La figura 8 muestra las fases importantes en cada pozo, a las mismas temperaturas pero a diferentes profundidades. En M53 nótese en particular la ausencia de prehnita y la persistencia de calcita y K-mica. Ambos pozos contienen juntos epidoto y wairakita; la figura 9 muestra la importancia de esta asociación respecto a la saturación de sílice de los fluidos asociados y con la temperatura del yacimiento. Los límites de la zona sombreada representan las reacciones que limitan la estabilidad de las fases coexistentes de clinozoisita (un miembro de los epidotos de composición final) y wairakita. Obsérvese que el campo de estabilidad de estos minerales indica actividad de la sílice en, o por encima, de la saturación del cuarzo a través de la gama de temperatura

de 250 a 350°C. Los rectángulos rayados representan el corrimiento del campo de estabilidad sombreado y corresponden a la composición química exacta de epidotos medidos en muestras de ambos pozos. Por lo tanto, los análisis de microsonda electrónica de las composiciones de epidoto coexistentes con wairakita requieren una supersaturación de la sílice, aún mayor que la requerida por las asociaciones de clinozoisita-wairakita.

La figura 10 muestra los campos de estabilidad de varias asociaciones encontrados en los pozos M53 y M84 en función de $f\text{CO}_2$ y $a\text{SiO}_2$. En M84, la asociación de epidoto + prehnita + K-feldespato sin calcita debe caer dentro del campo izquierdo más bajo del diagrama. Dado que en M53 coexisten epidoto + wairakita + calcita + K-mica, debe ser ubicado a lo largo de los límites del campo de estabilidad del epidoto + calcita y del campo wairakita + calcita, y debe estar a un valor de $f\text{CO}_2$ más alto que el necesario para la reacción de decarbonización que transforma K-mica + calcita en epidoto + K-feldespato + CO_2 . Por consiguiente, el $\log f\text{CO}_2$ en M53 debería ser mayor que 1.5, mientras M84 debe tener un $f\text{CO}_2$ menor que 1.2.

El significado de esta diferencia química a la misma temperatura, en dos áreas del campo geotérmico de Cerro Prieto, es incierto hasta el presente. Por lo tanto, se continúa la investigación en esta área para determinar si tales variaciones químicas son el resultado de diferencias de presión, si requieren barreras al flujo de fluido o si indican variaciones hidrotérmicas tales como la existencia de áreas de ebullición localizadas.

CONCLUSIONES

Las rocas alteradas hidrotérmicamente constituyen registros de la temperatura y flujo de fluido por ellas experimentados. En potencia, la relación de agua-roca involucrada en las interacciones hidrotérmicas, los parámetros químicos del fluido y la duración de calentamiento, descarga y recarga, pueden ser utilizadas para inferir temperaturas actuales y pasadas. Dada la gran cantidad de pozos perforados en Cerro Prieto, y el gran número de estudios realizados allí, dicho campo representa una excelente oportunidad para aplicar los conceptos mencionados.

Las formas características de las zonas mineralógicas a través del campo definen un domo térmico alimentado desde el este y que se esparce lateralmente hacia el oeste. Los indicadores geotermométricos sugieren que las temperaturas actuales son las más elevadas que las rocas hayan experimentado. Por consiguiente, el sistema hidrotérmico parece ser demasiado joven para mostrar efectos de enfriamiento. El yacimiento está mucho más consolidado que las rocas que están sobre él, por lo que pareciera no existir una roca de cubierta que selle el sistema desde arriba. En forma similar, los rasgos de alteración sugieren que el

flujo de fluido en el yacimiento no está afectado significativamente por fallas o por variaciones estratigráficas litológicas preexistentes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran agradecer al ingeniero Héctor Alonso Espinosa, de la Comisión Federal de Electricidad de México, y a todo el personal de Cerro Prieto por proveerles muestras y por sus útiles análisis. Las facilidades de laboratorio usadas en UCR fueron hechas posibles por subvenciones de NSF-RANN y USDI-USGS durante los años pasados. Los fondos para este proyecto provienen del Geothermal Reservoir Engineering Management Program, Division of Geothermal Energy of the Department of Energy. El proyecto fue supervisado por el personal del Lawrence Berkeley Laboratory.

Este es el informe número 80/12 del Institute of Geophysics and Planetary Physics, Universidad de California, Riverside.

TITULOS DE FIGURAS

Figura 1. Gamas de temperatura para la ocurrencia de minerales hidrotérmicos en las areniscas del campo geotérmico de Cerro Prieto.

- Figura 2. Mapa del campo geotérmico de Cerro Prieto; se muestran los pozos estudiados y las ubicaciones de los cortes transversales.
- Figura 3. Distribución de las zonas mineralógicas en areniscas en corte transversal desde el pozo M6 al M53.
- Figura 4. Distribución de las zonas mineralógicas en areniscas en corte transversal desde el pozo M101 al M53. Los símbolos son los mismos usados en la figura 3.
- Figura 5. Distribución de las zonas mineralógicas en areniscas en corte transversal desde el pozo M3 al M92. Los símbolos son los mismos usados en la figura 3.
- Figura 6. Distribución de las zonas mineralógicas en areniscas en corte transversal desde el pozo M94 al T366. Los símbolos son los mismos usados en la figura 3.
- Figura 7. Distribución de las zonas mineralógicas en areniscas en corte transversal desde el pozo M6 al M93. Los símbolos son los mismos usados en la figura 3.
- Figura 8. Comparación de la paragénesis mineralógica a temperaturas similares en los pozos M84 y M53, campo geotérmico de Cerro Prieto.
- Figura 9. Diagrama de actividad calculada de SiO_2 versus el de temperatura que muestra los campos de estabilidad para asociaciones encontradas en los pozos M84 y M53.
- Figura 10. Diagrama de fugacidad calculada de CO_2 versus el de actividad de la sílice, que muestra los campos de estabilidad para varias asociaciones mineralógicas encontradas en Cerro Prieto. Véase el texto para su aplicación a la paragénesis observada en M8 y M53.