

GEOCHEMICAL EVIDENCE OF DRAWDOWN IN THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD

A. H. Truesdell

U. S. Geological Survey, Menlo Park, California, USA

A. Mañon M., M. E. Jiménez S., A. Sánchez A., and J. J. Fausto L.
Comisión Federal de Electricidad, Mexicali, Baja California, México

Introduction

The high-temperature hydrothermal reservoir of Cerro Prieto underlies an area exceeding 8 km², but the present production wells are within an area of less than 0.4 km² (fig. 1). At Wairakei, New Zealand, where geothermal wells produce chiefly from major fractures, close spacing of production wells has not resulted in significant pressure drawdown. However, most of the production at Cerro Prieto is from intergranular flow, and the result of clustering the wells has been significant drawdown in the center of the field.

Cerro Prieto production fluids have been extensively analyzed for major elements in the Comisión Federal de Electricidad laboratories since 1966¹. Additional analyses were made by the U.S. Geological Survey in 1974² and in 1977-78³.

The Cerro Prieto production aquifer contains a brine at 280-300°C with about 9,000 mg/kg chloride; flashing to one atmosphere increases chloride in the residual brine to about 16,000 mg/kg. Cooler, less saline brines are found in the same aquifer northeast and southwest of the center of the producing field and in overlying aquifers. Drawdown of pressure in response to production apparently has caused boiling in some parts of the aquifer and has caused lower chloride

brine to enter the production aquifer from overlying aquifers. In a recent publication⁴ we concluded that boiling is occurring in the aquifer in the southeastern part of the field as indicated by temperatures calculated from observed fluid enthalpies that are greatly in excess of measured downhole temperatures and those calculated from silica concentrations.

Chloride concentration patterns

The chloride concentrations of produced brine indicate drawdown in the southeastern part of the field. Figures 2 and 3 compare the average chloride concentrations after flashing of the brine produced from each well in 1973-74 with those of brines produced in 1977-78. In 1973-74 just after the start of power production, the field was relatively unaffected by fluid withdrawal.

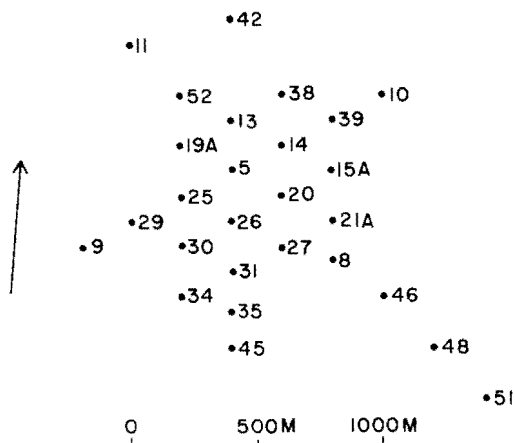


Figure 1. Well locations at Cerro Prieto (the area shown in figures 1-4 is the same).

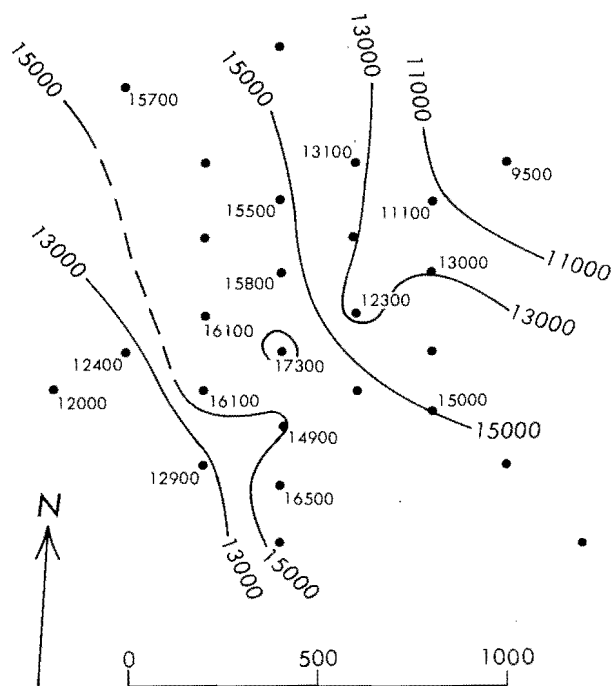


Figure 2. 1973-74 average brine chloride concentrations in mg/kg after flashing to one atmosphere. Data from Mañon *et al.*¹ and Reed²

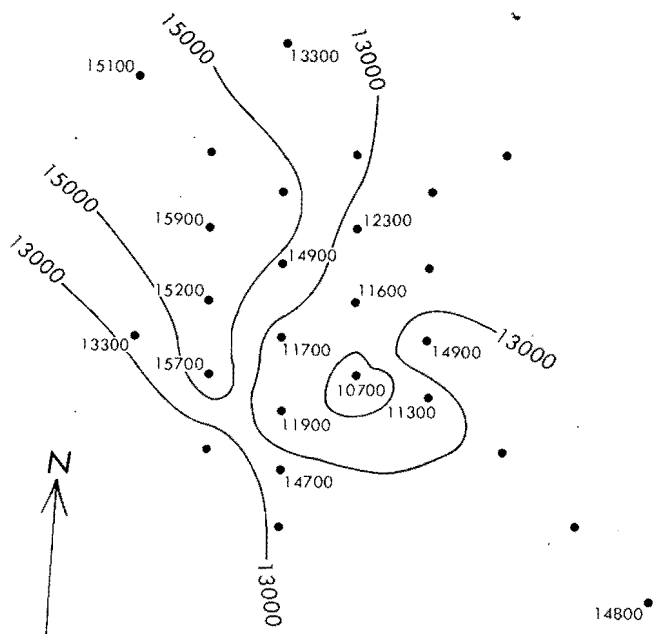


Figure 3. 1977-78 average brine chloride concentrations in mg/kg after flashing. Data from Mañon et al.¹ and unpublished data³.

Chloride concentrations in 1973-74 were generally uniform at 15,000 to 17,000 mg/kg over an area extending 500 m east-west and 1,500 m north-south. The chloride concentrations of fluids decreased to 10,000 to 12,000 mg/kg toward the northeast and southwest. In 1977-78 the chloride distribution was markedly different. Little change in chloride had occurred in the wells to the northwest but chloride in those to the southeast decreased by as much as 5,000 mg/kg. This change in chloride appears to have been caused by drawdown, with lower-salinity brines entering the southeastern part of the production aquifer from above.

The June, 1977 pattern of excess aquifer steam as indicated by differences between enthalpy-derived and silica geothermometer temperatures (fig. 4) is similar to that of the chloride concentration decrease.

Chemical changes in individual wells

The effects of drawdown in the southeastern part of the Cerro Prieto reservoir can be examined in more detail from the changes in chloride concentration, sodium-potassium ratio and measured enthalpy of fluids from individual wells. Chloride is a "conservative" element that characterizes different water masses and is not affected by reaction with rock, although it is concentrated by boiling and steam loss; Na/K is controlled by temperature-sensitive reactions with rock minerals and can be used as a geothermometer^{5, 6} but is not affected by steam loss; and the enthalpy is a function of the temperature and the amount of steam in the aquifer. The changes with time of

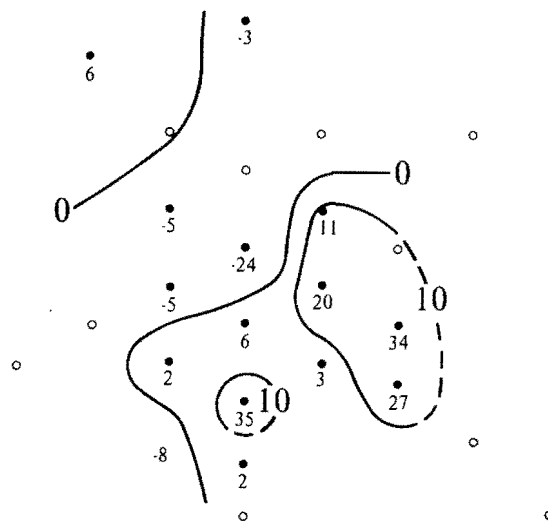


Figure 4. Differences in °C between aquifer temperatures calculated from measured enthalpies and those calculated from silica concentrations of fluids collected in 6/77.

Cl, Na/K, and enthalpy for fluids from well M-5 in the central part of the field just outside the area of drawdown are shown in figure 5. Before April 1973 samples were collected at low flows through 1.2-cm discharge pipes and had cooled largely by conduction. Their chloride concentrations are close to that of the aquifer fluid because little steam loss occurred. After April 1973 samples were collected from the production separator and allowed to flash to one atmosphere during collection. The increased chloride concentration reflects the loss of steam. The slight decrease in analyzed chloride contents between 1974 and 1977 results from decreased steam separation caused by a decrease in the temperature of the aquifer fluid. This decrease in fluid temperature is shown more directly by the increase in Na/K and the decrease in enthalpy. The aquifer fluid chloride contents and temperatures calculated from the enthalpy, the Na/K ratios and the silica contents are compared in table 1 with recently measured downhole temperatures (Eng. F. J. Bermejo, unpublished data, 1977).

The chemical composition of fluids from well M-5 has changed very regularly with time. The aquifer fluid temperature as indicated by enthalpy measurements and by Na/K has declined, but temperature declines indicated by Na/K ratios are only 10 to 12°C while that indicated by enthalpy measurements exceeds 30°C. Silica temperatures show an apparent increase with time but 1974 silica measurements of Cerro Prieto fluid are probably not accurate because it was not appreciated at the time that dilution is necessary to preserve silica for analysis in these fluids. Calculations based on temperatures derived from Na/K indicate reasonably constant aquifer chloride concentrations but calculations from the enthalpy values indicate a gain in chloride. If excess

steam occurs in the aquifer and enters a well, the measured enthalpy will be increased but Na/K will continue to indicate the temperature of brine (and steam) entering the well. The flashing of brine in the well and the separator will produce an increase in chloride concentration in the residual brine that depends on the enthalpy (and thus temperature) of the brine, not on enthalpy of the whole fluid. Tentatively it is concluded that at Cerro Prieto the Na/K thermometers are more accurate in indicating aquifer fluid temperatures than enthalpy or silica content.

Other wells show less regular behavior (figs. 6-8). Brine from well M-26 near the center of the area of drawdown showed nearly constant chloride concentrations from 1973 to 1975 with a rapid decline from June, 1975 to January, 1977. The chloride concentration may have stabilized since January, 1977. Both enthalpy and Na/K indicate aquifer temperature decreases of 8°C (enthalpy) to about 20°C (Na/K). The decrease indicated by Na/K is larger than that for M-5 but the Na/K ratio shows no discontinuity and the temperature change, unlike the change in chloride,

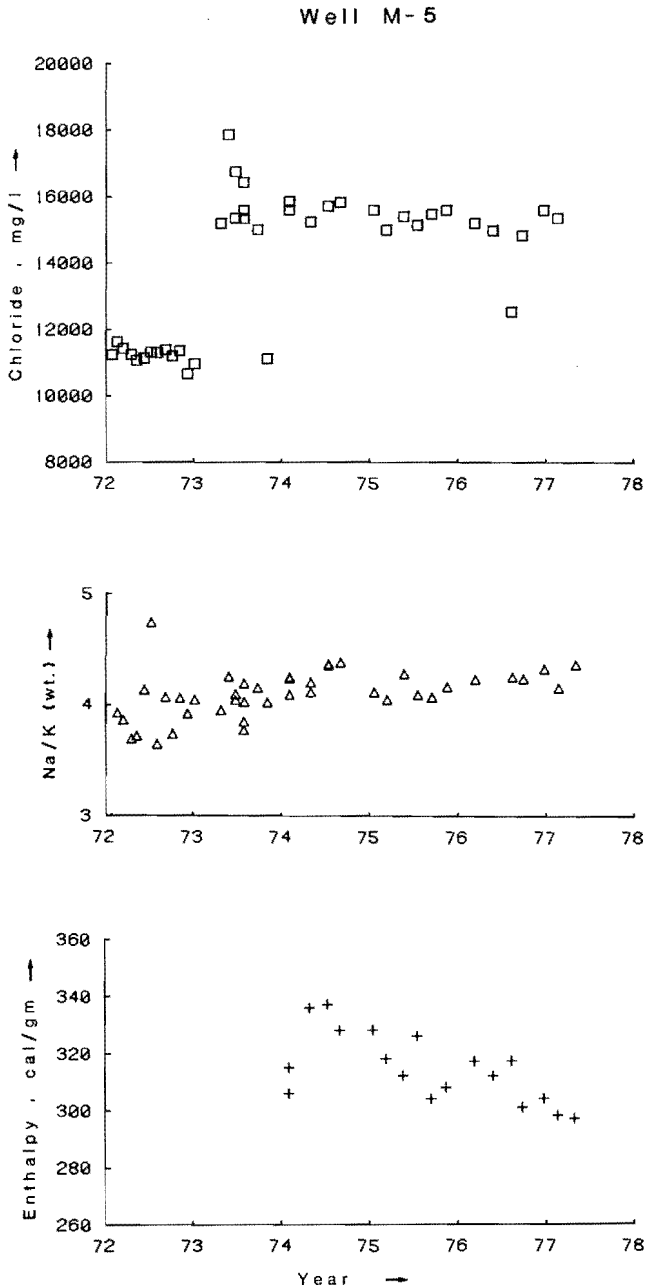


Figure 5. Chloride concentrations after flashing, Na/K ratios of brine and enthalpies of the total discharge of well M-5 from 1972 to mid 1977. Data from Manon *et al.*¹. Units are mg/kg, weight ratio and Kcal/kg.

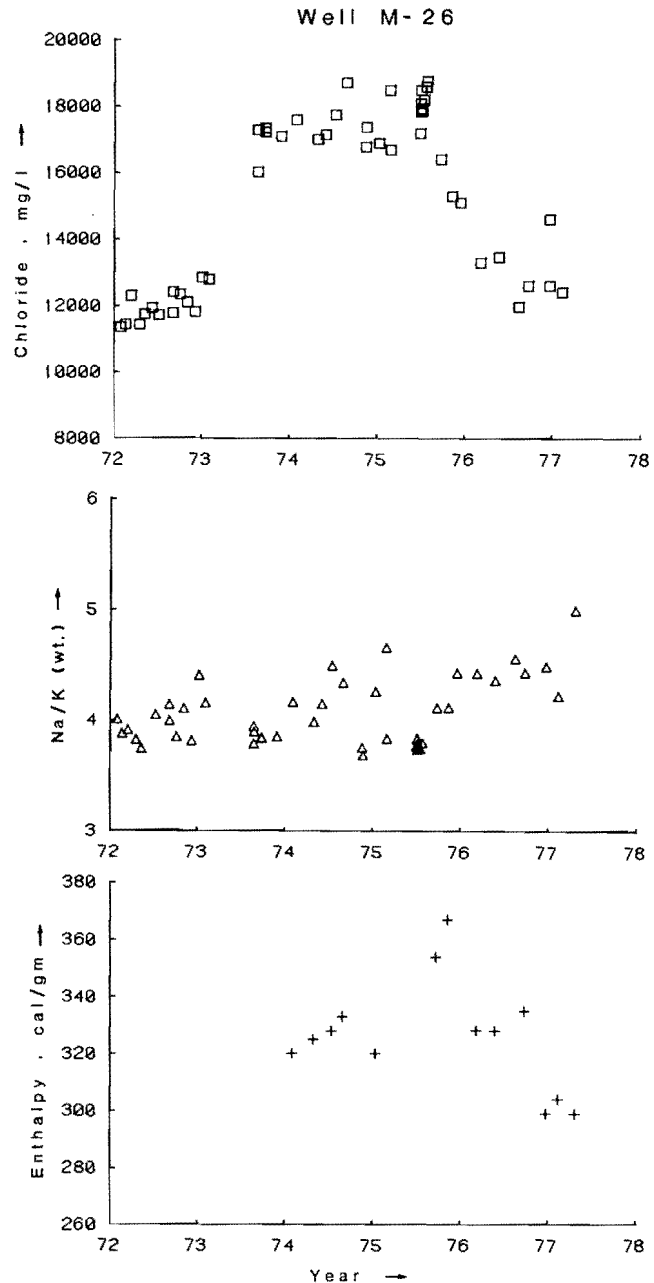


Figure 6. Chloride contents (after flashing) and Na/K ratios of brine and enthalpies of the total discharge of well M-26 from 1972 to mid 1977. Data from Manon *et al.*¹. Units are mg/kg, weight ratio and Kcal/kg.

Table 1. Observed and calculated aquifer temperatures and calculated aquifer chloride concentrations for Cerro Prieto wells M-5, M-26, M-21A, and M-11 in 1973-74 and 1977-78.*

Well	Date	Aquifer temperatures, °C					Aquifer chloride, mg/kg			
		measured	enthalpy	SiO ₂	Na/K Mercado	White- Ellis	enthalpy	SiO ₂	Na/K Mercado	White- Ellis
M-5	1/74		312	288	316	311	8,660	9,580	8,490	8,980
	6/77	299	281	299	304	301	9,680	9,020	8,550	8,940
M-26	1/74		291	282	314	309	10,600	11,000	9,644	9,870
	6/77	292	285	278	293	292	7,820	7,970	7,532	7,560
M-21A	1/75		362	272	320	314	7,300	12,200	10,000	10,300
	6/77	279	307	280	316	311	9,020	10,100	8,630	8,900
M-11	1/74		276	272	292	291	9,960	10,100	9,380	9,420
	6/77	281	295	287	315	310	9,450	9,750	8,650	8,850

*Silica and Na/K temperatures were calculated using geothermometer scales from references 4-6. Downhole temperatures are from Eng. F. J. Bermejo (unpublished data, 1977) and were measured in 1976-1977. Data are given for 1/74 and 6/77 except for well M-21A for which the initial data is from 1/75. Only analyses of fluid samples from production separators were used in the calculations although all data are shown in figures 5-8. Temperatures calculated from enthalpy, Na/K and silica values are from averaged data and are not exactly same as calculations in reference 4 which were taken from single analyses.

has been gradual. This suggests that the lower chloride fluid that appeared in 1975 had been heated by passage through the reservoir rock. Nathenson⁷ showed that chemical changes should precede thermal changes and that the elapsed time between these changes is related to the porosity of the rock. With 0.2 porosity, chemical changes that appear X years after the start of production indicate that thermal changes will appear about 2.4X years later. If present production rates continue, this model predicts a sharp decline in fluid temperatures in the southeast part of the present Cerro Prieto field starting between 1980 and 1985.

Well M-21A on the margin of the area of drawdown has shown unusual behavior. The enthalpy of this well when first measured in early 1975 was 420-480 cal/gm, equivalent to the enthalpy of water at 360-370°C. By mid 1977 the enthalpy had declined to values similar to those of other wells in the field. The chloride contents of the flashed fluid were also initially high and decreased to values typical of the field. Despite the unusual enthalpy and chloride behavior, the Na/K and SiO₂ temperatures were similar or only slightly above (5-10°C) those of other high temperature Cerro Prieto wells with only a small (3-4°C) decrease in Na/K temperatures with time. The calculated aquifer chloride concentrations based on Na/K were significantly higher than those for M-5 in 1975 but almost equal to M-5 values in 1977. Calculated aquifer chloride based on enthalpy and SiO₂ were not reasonable for either time.

The most likely explanation of the behavior of M-21A is that the fluids tapped initially resulted from extensive boiling in the aquifer, perhaps related to a pressure decrease caused by other wells. Excess steam entered the well to produce the exceptionally high measured enthalpy values and water that entered the well at this time contained excess chloride from steam loss during boiling in the aquifer. When tapped by M-21A this water had been heated by contact with the rock so further steam loss in the separator and during collection produced fluids with unusually high chloride. As production continued, the excess steam and boiled water were exhausted and more normal fluids were drawn into the well. The Na/K ratio reflected the aquifer temperature which, because it was buffered by heat contained in rock, did not change greatly as the source of the fluid changed. In this regard the behavior of M-21A fluids was similar to that of M-26 fluids.

Well M-11 in the northwestern part of the field, far removed from the drawdown area, is included in the diagrams to show the effects of casing failure which are quite different from the effects of drawdown. From June, 1973 to January, 1975, M-11 fluids showed a more rapid decrease in Cl and increase in Na/K than did those from M-5.

In mid-1975 these changes accelerated rapidly; chloride concentrations after flashing dropped from about 15,000 to 11,000 and Na/K ratios changed from 5 to 11. The Na/K indicated temperature dropped from 280 to 180°C and the enthalpy dropped 30 cal/gm. It was then

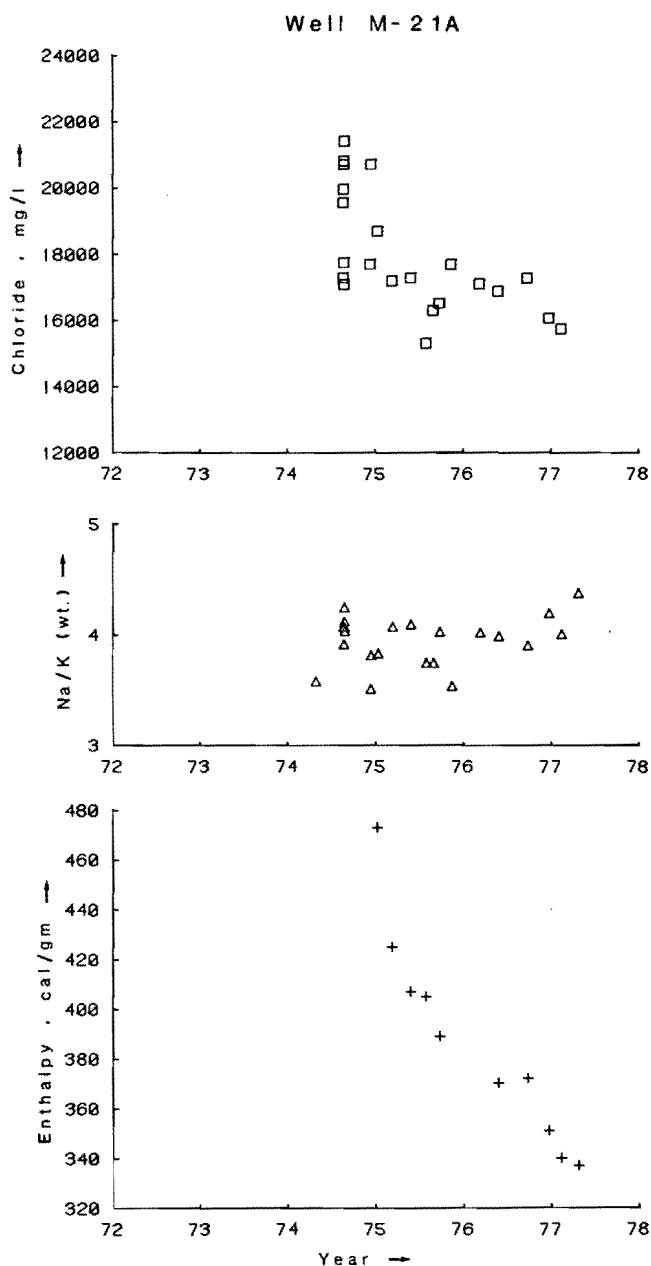


Figure 7. Chloride contents after flashing, Na/K ratios of brine and enthalpy of the total discharge of well M-21A from 1975 to mid 1977. Data from Mañon *et al.*¹ Units are mg/kg, weight ratio, and kcal/kg.

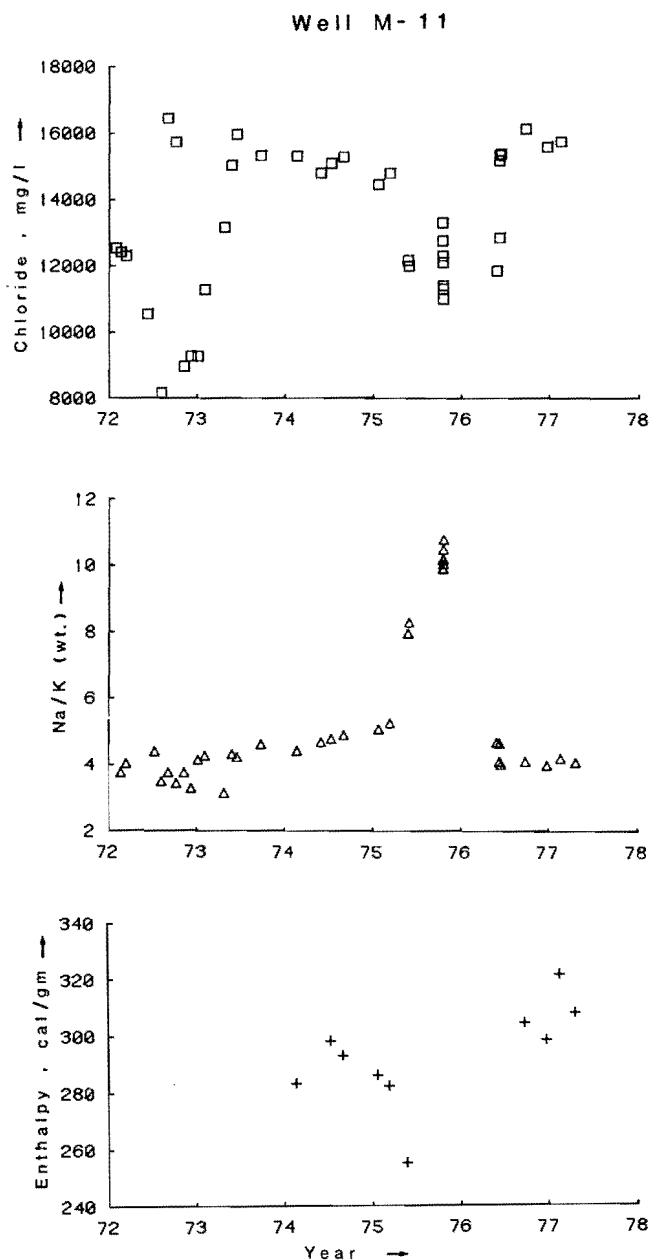


Figure 8. Chloride contents after flashing, Na/K ratios of brine and enthalpies of the total discharge of well M-11 from 1972 to mid 1977. Data from Mañon *et al.*¹ Units are mg/kg, weight ratio and kcal/kg.

recognized that a break in the casing had occurred and in May 1976 a new casing was installed closing off a production interval near 900 m.

The new casing caused rapid improvement in the production characteristics. The Na/K temperature increased to 310-315°C and Cl concentrations after flashing increased to equal those found in 1973. The enthalpy of the discharge was higher than earlier measurements and the calculated

aquifer chloride was again typical of good production wells of the field.

Summary

Some wells of the Cerro Prieto geothermal field have undergone changes in the chemistry of fluids produced which reflect reservoir processes. Pressure decreases due to production in the southeastern part of the field have produced both drawdown of lower chloride fluids

from an overlying aquifer and boiling in the aquifer with excess steam reaching the wells. These reservoir changes are indicated by changes in fluid chloride concentrations, Na/K ratios and measured enthalpies and by comparisons of aquifer fluid temperatures and chloride concentrations calculated from enthalpy and chemical measurements. Fluid temperatures have not been greatly affected by this drawdown because heat contained in the rock was transferred to the fluid. When this heat is exhausted, fluid temperatures may drop rapidly.

Work partially supported by U.S. DOE.

References

1. Mañón, A., Mazor, E., Jiménez, M., Sánchez, A., Fausto, J., and Zenizo, C., 1977, Extensive geochemical studies in the geothermal field of Cerro Prieto: Lawrence Berkeley Lab. Report LBL 7019, 113 p.
2. Reed, M. J., 1976, Geology and hydrothermal metamorphism in the Cerro Prieto geothermal field, Mexico: Proceedings, 2nd U.N. Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, May 1975, p. 539-548.
3. Truesdell, A. H., Nehring, N. L., Thompson, J. M., Ball, J. W., Jenne, E. A., Vivit, D. V., and Bowman, H., unpublished data.
4. Truesdell, A. H., and Mañón, A. M., 1979, Geochemical indications of boiling in the aquifer of the Cerro Prieto geothermal field: Proc. Primera Reunión de Intercambio Técnico sobre Geotermia, San Felipe, B. C., November, 1977 (in press).
5. Mercado, S., 1970, High activity hydrothermal zones detected by Na/K, Cerro Prieto, Mexico, in Proceedings, U.N. Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa, 1970: Geothermics Special Issue 2, v. 2, pt. 2, p. 1367-1376.
6. White, D. E., 1970, Geochemistry applied to the discovery, evaluation, and exploitation of geothermal energy resources; Rapporteur's Report, in Proceedings, United Nations Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa, 1970: Geothermics Special Issue 2, v. 1., p. 58-80.
7. Nathenson, Manuel, 1975, Physical factors determining the fraction of stored energy recoverable from hydrothermal convection systems and conduction dominated areas: U.S. Geological Survey Open-file Report 75-525, 51 p.

EVIDENCIAS GEOQUIMICAS DE DISMINUCION DE PRESION EN EL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO

Introducción

El yacimiento hidrotermal de alta temperatura de Cerro Prieto cubre un área de más de 8 km², pero actualmente los pozos de producción se encuentran dentro de un área de menos de 0.4 km² (Figura 1). En Wairakei, Nueva Zelanda, donde los pozos geotérmicos producen principalmente de grandes fracturas, el tener los pozos de producción a distancias muy reducidas no ha resultado en una disminución importante de la presión. Sin embargo, en Cerro Prieto la mayor parte de la producción es de flujo intergranular, y el agrupamiento de los pozos resultó en una significativa reducción de presión en el centro del campo.

Desde 1966 se han analizado extensamente en los laboratorios de la Comisión Federal de Electricidad, los fluidos producidos en Cerro Prieto para determinar los elementos principales¹. El U.S. Geological Survey llevó a cabo análisis adicionales en 1974², y en 1977-78³.

El acuífero productor de Cerro Prieto contiene una salmuera, con aproximadamente 9,000 mg/kg de cloruro, a 280-300°C; la vaporización instantánea a una atmósfera, aumenta la concentración de cloruro en la salmuera residual a alrededor de

16,000 mg/kg. Se encuentran salmueras mas frías y menos salinas en el mismo acuífero, al noreste y suroeste del centro del campo productor, y en acuíferos superyacentes. La reducción de presión debida a la producción aparentemente ha provocado ebullición en algunas partes del acuífero, y ha causado la infiltración de salmuera de menor contenido de cloruro al acuífero productor desde los acuíferos superyacentes. En una publicación reciente⁴ concluimos que hay ebullición en el acuífero en la parte sureste del campo, según lo indican las temperaturas calculadas a partir de entalpías observadas del fluido, que resultan ser mucho mayores que las temperaturas medidas en el pozo y que las calculadas a partir de las concentraciones de sílice.

Características de la Concentración de Cloruro

Las concentraciones de cloruro en la salmuera producida indican disminución de la presión en la parte sureste del campo. En las Figuras 2 y 3 se comparan las concentraciones promedio de cloruro (después de la vaporización instantánea) en la salmuera producida por cada pozo en 1973-74, con las de las salmueras producidas en 1977-78. En 1973-74, inmediatamente después de iniciarse la producción de energía eléctrica, el campo se en-

contraba relativamente no afectado por la extracción de fluidos.

Las concentraciones de cloruro en 1973-74 fueron generalmente uniformes de 15,000 a 17,000 mg/kg, en un área que se extiende 500 m de este a oeste y 1,500 m de norte a sur. Las concentraciones de cloruro en los fluidos disminuían a 10,000 y a 12,000 mg/kg hacia el noreste y el suroeste. En 1977-78 la distribución de cloruro fue marcadamente diferente. Pocos cambios en la concentración de cloruro se observaron en los pozos situados al noroeste, pero dicha concentración disminuyó hasta en 5,000 mg/kg en los pozos situados al sureste. Este cambio en la concentración del cloruro parece haber sido causado por la reducción de la presión que produjo la infiltración desde arriba de salmueras de menor salinidad en la parte sureste del acuífero de producción.

La tendencia en junio de 1977, de un exceso de vapor en el acuífero, según lo indica la diferencia entre la temperatura calculada de la entalpía y la derivada del geotermómetro de sílice (Figura 4), es similar a la indicada por la disminución en la concentración de cloruro.

Cambios Químicos en Pozos Individuales

Los efectos de la disminución de presión en la parte sureste del yacimiento de Cerro Prieto pueden estudiarse en mayor detalle por medio de los cambios en la concentración de cloruro, en la razón sodio/potasio y en la entalpía de los fluidos medidos en pozos individuales. El cloruro es un elemento "conservador" que caracteriza las diferentes masas de agua y no se ve afectado por reacciones con la roca, aunque se concentra por ebullición y pérdida de vapor. La razón Na/K está controlada por reacciones, sensibles a la temperatura, con minerales de la roca y puede utilizarse como geotermómetro^{5,6}, pero no se ve afectada por la pérdida de vapor. La entalpía es una función de la temperatura y de la cantidad de vapor en el acuífero. En la Figura 5 aparecen en función del tiempo los cambios registrados en Cl, Na/K, y entalpía para fluidos del pozo M-5 que se encuentra situado en la parte central del campo, inmediatamente vecino al área de reducción de presión. Antes de abril de 1973 las muestras se extraían a flujos bajos a través de tuberías de descarga de 1.2 cm y se enfriaban principalmente por conducción. Sus concentraciones de cloruro eran cercanas a las del fluido del acuífero, porque había poca pérdida de vapor. A partir de abril de 1973 las muestras se obtuvieron del separador de producción, permitiendo durante la recolección la vaporización instantánea a una atmósfera. La mayor concentración de cloruro refleja la pérdida de vapor. Entre 1974 y 1977 la ligera disminución en el contenido de cloruro analizado resulta de una menor separación de vapor causada por una disminución en la temperatura del fluido del acuífero. Esta disminución en la temperatura del fluido se demuestra más directamente por el aumento en Na/K y por la disminución en entalpía. En la Tabla 1 se presenta el contenido de cloruro del fluido en el acuífero, y se comparan las temperaturas calculadas a partir de la entalpía, de la razón Na/K y del contenido de sílice, con las temperaturas recientemente medidas en los fondos de pozo (Ing. F.J. Bermejo, datos no publicados, 1977).

La composición química de fluidos del pozo M-5 ha cambiado con mucha regularidad con el paso del tiempo. La temperatura del fluido del acuífero ha disminuido según lo indicado por las medidas de entalpía y por la razón Na/K, pero las disminuciones indicadas por las razones Na/K son solo de 10 a 12°C mientras que las indicadas por las mediciones de entalpía exceden 30°C. Las temperaturas basadas en la sílice muestran un aparente aumento con el tiempo, pero las mediciones de 1974 de la sílice en el fluido de Cerro Prieto son probablemente inexactas, ya que no se reconocía en aquel tiempo que es necesaria la dilución para preservar la sílice para analizar estos fluidos. Los cálculos basados en temperaturas derivadas de la razón Na/K indican concentraciones razonablemente constantes de cloruro en el acuífero, pero los cálculos basados en los valores de entalpía indican un aumento de cloruro. Si en el acuífero hay un exceso de vapor, y éste entra al pozo, la entalpía medida aumentará, pero la razón Na/K continuará indicando la temperatura de la salmuera (y del vapor) que entra al pozo. La vaporización instantánea de la salmuera en el pozo y en el separador producirán en la salmuera residual un aumento en la concentración de cloruro que depende de la entalpía (y por lo tanto de la temperatura) de la salmuera, no de la entalpía de todo el fluido. Provisoriamente se concluye que en Cerro Prieto los termómetros de Na/K son más precisos para indicar las temperaturas del fluido en el acuífero que el contenido de sílice o la entalpía.

Otros pozos muestran un comportamiento menos regular (Figuras 6-8). La salmuera del pozo M-26, cercano al centro del área de disminución de presión, mostró concentraciones de cloruro casi constantes de 1973 a 1975, con una rápida disminución de junio de 1975 a enero de 1977. La concentración de cloruro pudo haberse estabilizado desde enero de 1977. Tanto la entalpía como la razón Na/K indican disminuciones de la temperatura del acuífero entre 8°C (entalpía) y aproximadamente 20°C (Na/K). La disminución indicada por la razón Na/K es mayor que la del pozo M-5, pero la razón Na/K no manifiesta discontinuidad y el cambio de temperatura, a diferencia del cambio en el contenido de cloruro, ha sido gradual. Esto sugiere que el fluido de menor contenido de cloruro que apareció en 1975 fue calentado al pasar a través de la roca del yacimiento. Nathenson⁷ mostró que los cambios químicos deben preceder a los cambios térmicos y que el tiempo transcurrido entre dichos cambios está relacionado con la porosidad de la roca. Con una porosidad de 0.2 los cambios químicos que aparecen X años después de iniciada la producción indican que los cambios térmicos aparecen 2.4X años más tarde. Si continúan las tasas de producción actuales, este modelo predice una disminución muy marcada de las temperaturas del fluido en la parte sureste del campo actual de Cerro Prieto, que comenzará entre 1980 y 1985.

El pozo M-21A en la margen del área de reducción de presión, ha manifestado un comportamiento extraño. La entalpía de este pozo, cuando fue medida por primera vez a principios de 1975, era 420-480 cal/gm, es decir equivalente a la entalpía del agua a 360-370°C. Para mediados de 1977 la entalpía había disminuido a valores similares a los de otros pozos en el campo. Los contenidos de cloruro del fluido vaporizado instantáneamente

también fueron altos inicialmente, y disminuyeron a valores típicos del campo. A pesar del inusitado comportamiento del cloruro y de la entalpía, las temperaturas de Na/K y de SiO_2 fueron similares o ligeramente superiores (5-10°C) a las de otros pozos de alta temperatura de Cerro Prieto, con sólo una pequeña disminución (3-4°C) con el tiempo de las temperaturas de Na/K. Las concentraciones de cloruro en el acuífero calculadas en base a la razón Na/K fueron significativamente más elevadas que las del pozo M-5 en 1975, pero casi iguales a los valores del M-5 en 1977. El contenido de cloruro calculado para el acuífero en base a la entalpía y al contenido de SiO_2 no fue razonable en ambas ocasiones.

La explicación más probable del comportamiento del pozo M-21A es que los fluidos obtenidos inicialmente resultaron de la extensa ebullición del acuífero, posiblemente relacionada a una disminución de presión causada por otros pozos. Para producir los valores medidos de entalpía excepcionalmente elevados un exceso de vapor debió entrar al pozo, en tanto que el agua que entró al mismo tiempo contenía un exceso de cloruro por pérdida de vapor por la ebullición en el acuífero. Previamente a su extracción por el pozo M-21A el agua se calentó por contacto con la roca, de modo que la subsecuente pérdida de vapor en el separador y durante la recolección produjo fluidos con un contenido inusitadamente alto de cloruro. Al continuar la producción, se agotaron el exceso de vapor y el agua hervida arrastrando fluidos más normales hacia el pozo. La razón Na/K reflejó la temperatura del acuífero que, puesto que estaba amortiguada por el calor contenido en la roca, no varió en forma importante al cambiar la fuente del fluido. En este aspecto el comportamiento de los fluidos del pozo M-21A fue similar al de los fluidos del pozo M-26.

El pozo M-11, situado en la parte noroeste del campo y muy alejado del área de disminución de presión se incluye en los diagramas para mostrar los efectos de fallas en las tuberías, que son muy diferentes a los efectos de la reducción de presión. Desde junio de 1973 hasta enero de 1975 los fluidos del pozo M-11 mostraron una disminución en Cl y un aumento en Na/K más rápidos que en el pozo M-5.

A mediados de 1975 estos cambios se aceleraron rápidamente; las concentraciones de cloruro después de la vaporización instantánea disminuyeron de aproximadamente 15,000 a 11,000 mg/kg y las razones Na/K cambiaron de 5 a 11. La razón Na/K indicó que la temperatura disminuyó de 280 a 180°C y que la entalpía decreció 30 cal/gm. Entonces se reconoció que había ocurrido una ruptura en la tubería. En mayo de 1976 se instaló una nueva tubería, tapando un intervalo productor a unos 900 m.

La nueva tubería causó una rápida mejoría de las características de producción. La temperatura de Na/K aumentó a 310-315°C y las concentraciones de Cl después de la vaporización instantánea aumentaron igualando a las observadas en 1973. La entalpía de la descarga fue mayor que las medidas anteriormente y el cloruro calculado para el acuífero fue nuevamente típico de los buenos pozos productores del campo.

Resumen

La química de los fluidos producidos por algunos pozos del campo geotérmico de Cerro Prieto ha sufrido cambios que reflejan procesos que tienen lugar en el yacimiento. Las disminuciones de presión debidas a la producción en la parte sureste del campo generaron un descenso de fluidos de menor contenido de cloruro provenientes de un acuífero superyacente y ebullición en el acuífero acompañada por un exceso de vapor que llega a los pozos. Estos cambios en el yacimiento son indicados por cambios en las concentraciones de cloruro en los fluidos, en las razones Na/K y en las entalpías medidas, y por comparaciones de las temperaturas y concentraciones de cloruro en los fluidos del acuífero calculadas a partir de la entalpía y basadas en mediciones químicas. Las temperaturas de los fluidos no han sido muy afectadas por esta reducción de presión porque parte del calor contenido en la roca fue transferido al fluido. Cuando se agote este calor las temperaturas del fluido podrán reducirse rápidamente.

Título de Tabla

Tabla 1: Temperaturas del acuífero, calculadas y observadas y concentraciones de cloruro en el acuífero calculadas para los pozos de Cerro Prieto M-5, M-26, M-21A y M-11, en 1973-74 y 1977-78.

Nota: Se calcularon las temperaturas de sílice y Na/K utilizando escalas de geotermómetro de las Referencias 4-6. Las temperaturas de fondo de pozo, medidas en 1976-1977, son del Ing. F.J. Bermejo (datos no publicados, 1977). Se suministran datos para enero de 1974 y junio de 1977, salvo para el pozo M-21A, para el que los datos iniciales son de enero de 1975. Para los cálculos sólo se utilizaron análisis de muestras de fluidos de separadores de producción, aunque todos los datos aparecen en las Figuras 5-8. Las temperaturas calculadas a partir de entalpía, Na/K y contenido de sílice son de datos promediados y no son exactamente iguales a los cálculos de la Referencia 4, que fueron basados en análisis individuales.

Títulos de Figuras

Figura 1. Ubicaciones de los pozos en Cerro Prieto (el área que aparece en las Figuras 1 y 4 es la misma).

Figura 2. Concentraciones promedio de cloruro en salmueras (después de vaporización instantánea a una atmósfera) en mg/kg, para el período 1973-1974, datos de Mañón, et al.¹, y Reed².

Figura 3. Concentraciones promedio de cloruro en salmueras (después de vaporización instantánea a una atmósfera) en mg/kg, para el período 1977-1978, datos de Mañón, et al.¹; y datos no publicados.

Figura 4. Diferencias, en °C, entre temperaturas del acuífero calculadas a partir de entalpías medidas y las calculadas a partir de concentraciones de sílice de fluidos recolectados en junio 1977.

Figura 5. Concentraciones de cloruro (después de vaporización instantánea), razones Na/K en salmueras y entalpías de la descarga total del pozo M-5 desde 1972 hasta mediados de 1977. Datos de Mañón, et al.¹ Las unidades son mg/kg, razón en peso y kcal/kg.

Figura 6. Contenido de cloruro (después de vaporización instantánea), razones Na/K en salmueras y entalpías de la descarga total del pozo M-26 desde 1972 hasta mediados de 1977. Datos de Mañón, et

al.¹ Las unidades son mg/kg, razón en peso y kcal/kg.

Figura 7. Contenido de cloruro (después de vaporización instantánea), razones Na/K en salmueras y entalpías de la descarga total del pozo M-21A desde 1975 hasta mediados de 1977. Datos de Mañón, et al.¹ Las unidades son mg/kg, razón en peso y kcal/kg.

Figura 8. Contenido de cloruro (después de vaporización instantánea), razones Na/K en salmueras y entalpías de la descarga total del pozo M-11 desde 1972 hasta mediados de 1977. Datos de Mañón, et al.¹ Las unidades son mg/kg, razón en peso y kcal/kg.