

MODELO GEOQUIMICO PRELIMINAR DEL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO

A. Mañon M., A. Sánchez A., J. J. Fausto L., M. E. Jiménez S.,
A. Jacobo R., y I. Esquer P.

Comisión Federal de Electricidad
Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto
Mexicali, Baja California, México

RESUMEN

La distribución del valor del índice Na-K-Ca - en el acuífero geotérmico de Cerro Prieto, indica - la probable alimentación de agua de menor temperatura de la parte Norte y de la parte Oeste del campo - actual en explotación. En el centro del campo se - observa gran irregularidad en los valores del índice, debido al mayor ó menor efecto de percolación ó flujo vertical descendente de agua de menor temperatura, ocasionado por la aparente sobre-explotación - del acuífero en esa zona.

La extensa área existente al Este, Sureste y - Sur del campo, con índices que oscilan entre 0.5 y - 0.7, confirma la existencia de agua geotérmica almacenada a temperaturas mayores que las existentes - en el campo actual, siendo aún indefinidos, en las - direcciones Este y Sureste, los límites de dicho - acuífero caliente.

La distribución de temperaturas en el acuífero de Cerro Prieto, solo confirma las conclusiones encontradas a partir del indicador Na-K-Ca, ya que - esas temperaturas fueron calculadas con ese indicador. La máxima temperatura calculada fue la del - pozo M-53 (350°C) y la mínima la del M-9 (250°C), - sin tomar en cuenta los pozos M-6 y M-1A, que tienen temperaturas inferiores.

La distribución de cloruros en el acuífero - - confirma las posibilidades de alimentación de agua - menos salina y de menor temperatura por la parte - Norte y Oeste del campo. Sorpresivamente se encontró que en la parte Este (M-53), el contenido de - cloruros en el acuífero es menor que en el campo - actual, a pesar de tener mayor temperatura. Otro - dato interesante es el contenido tan bajo de cloruros encontrado en el pozo M-101, con temperaturas - del orden de 290°C.

La distribución del potasio y sílice en el - - acuífero no resultó muy útil para la interpretación del movimiento de fluidos en el acuífero, como se - esperaba, observándose aún discordancias con las interpretaciones obtenidas utilizando el geotermómetro Na-K-Ca y los cloruros.

Respecto a los cambios en el valor del índice Na-K-Ca, temperaturas y contenido de cloruros, durante la explotación del campo, se observó que se - tiene un gradual incremento en el valor del indicador Na-K-Ca, tanto en el grupo de pozos de baja entalpia como en el grupo de pozos de elevada entalpia, con casos excepcionales en los que disminuye o permanece constante. Dicho incremento en el valor

del indicador, ha representado un decremento de -- temperatura del orden de 10 a 20°C del valor original al iniciarse la explotación del campo (1973). El contenido de cloruros en el acuífero ha disminuido a diferentes velocidades, que van desde 670-mg/lit por año en el M-26, hasta 371 mg/lit por año en el pozo M-42, aunque en algunos pozos (M-20) se ha incrementado y en otros (M-5) ha permanecido -- casi constante.

Se recomienda que para disminuir las velocidades de abatimiento de temperatura y presiones en - el campo actual explotado, se suprima la explotación en los pozos de baja entalpia, substituyendo la producción de los mismos con nuevos pozos, localizados en la periferia del campo, preferentemente al Sur-Oeste y Nor-Este del mismo, de tal manera - que el área explotada originalmente se amplíe cuando menos dos veces más, tratando con esto de evitar la percolación ó flujo vertical que aparentemente está causando el enfriamiento.

Otra medida que puede ayudar a prevenir un rápido abatimiento es el de tratar de explotar los - acuíferos calientes más profundos que aparentemente existen en el centro del campo, lo cual se deberá comprobar antes con un pozo exploratorio o profundización de uno de los pozos actuales.

INTRODUCCION

Desde el inicio de su desarrollo, hace aproximadamente quince años, se ha acumulado gran cantidad de información sobre el Campo Geotérmico de - Cerro Prieto, destacando por su consistencia la -- recopilación de datos sobre características químicas de los fluidos geotérmicos, que en forma natural ó por medio de pozos, se transportan a la superficie. Utilizando esa información de manera selectiva y con el auxilio de los recientes avances - en el conocimiento geológico estructural del campo geotérmico, se propone en este trabajo un modelo - geoquímico preliminar que se considera necesario - para el estudio del campo, y de gran ayuda para -- pronósticos de su comportamiento durante la explotación.

Para desarrollar este modelo se emplearon elementos, compuestos e índices "reactivos" ó con "memoria", cuyo valor es función de la temperatura -- del agua presente en el acuífero y elementos "pasivos" ó "conservadores" que no sufren cambios con - la temperatura pero que son de utilidad para explicar los procesos de concentración ó dilución que - ocurren en los fluidos geotérmicos en su recorrido a la superficie.

Uno de los principales problemas que se encontraron para desarrollar el modelo, fue que la mayor parte de los pozos productores en Cerro Prieto están siendo alimentados por dos acuíferos. Afortunadamente en los últimos 18 meses se han perforado cerca de 15 nuevos pozos en los cuales se ha tratado de explotar solo uno de los acuíferos, lo cual permitirá afinar y rectificar el modelo aquí propuesto.

En la fig. 1 se observa la localización de la mayoría de los pozos perforados hasta la fecha en Cerro Prieto. En esta figura no aparecen nueve pozos (1A, 2, 2A, 4, 93, 94, 96, S-262, Prian). Diecinueve pozos, localizados en el centro del campo, alimentan a la planta de 75MW actualmente en operación (M-5, M-8, M-11, M-14, M-15A, M-19A, M-20, M-21A, M-25, M-26, M-27, M-29, M-30, M-31, M-35, M-42, M-45, M-46 y M-53). Se han construido once pozos adicionales para suministro de vapor a las dos nuevas unidades de 37.5MW que se pondrán en operación en 1979 (M-48, M-50, M-51, M-84, M-90,

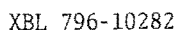


Figura 1. Localización de pozos perforados en el campo de Cerro Prieto.

Los pozos M-3, M-6, M-7 y M-92, no se han utilizado para la generación de energía eléctrica, ni los nueve mencionados antes, que no aparecen en la figura 1 y que fueron exploratorios. Otros siete pozos (M-10, M-13, M-15, M-21, M-34, M-38 y M-39) han sido abandonados por problemas mecánicos presentados en las tuberías. Se cuenta además con el pozo M-9, que está en proceso de desincrustación mecánica, y dos pozos M-107 y M-123, que están en la fase de perforación.

Lo anterior nos da una idea de la gran cantidad de información que se ha acumulado, con relación a los pozos geotérmicos del campo de Cerro Prieto.

TEMPERATURAS EN EL ACULFERO DE CERRO PRIETO
CALCULADAS CON EL GEOTERMOINDICADOR Na-K-Ca

Para calcular los valores de las concentraciones originales de los diversos componentes de la salmuera hidrotermal de Cerro Prieto, que alimenta a los pozos geotérmicos, se requiere conocer la temperatura del acuífero. Existen varias técnicas para evaluar esta temperatura, entre ellas se encuentra la de los geotermómetros químicos, la cual está basada en el equilibrio químico que ocurre entre los solutos reactivos existentes en los fluidos geotérmicos y las rocas del yacimiento.

Se han calibrado ya diferentes geotermómetros químicos; Fournier y Truesdell (1973), demostraron que bajo condiciones favorables, las concentraciones de Na, K y Ca en aguas naturales pueden ser -- utilizadas para calcular las temperaturas de equilibrio de reacción entre el agua y las rocas. Ellos demostraron que los datos de temperatura y -- concentración de la mayoría de los fluidos geotérmicos, se agrupan cerca de una línea recta, cuando son graficados como función de la expresión $\log \frac{Na}{K + B} \left(\log \sqrt{Ca} / Na \right)$ contra el recíproco de la temperatura absoluta, donde B es una constante que tiene un valor de 1/3 ó 4/3 dependiendo de que el agua esté en equilibrio arriba ó abajo de 100°C -- respectivamente.

Para la calibración del geotermómetro empírico, aplicable a los fluidos de Cerro Prieto, se utilizaron los valores calculados del indicador Na-K-Ca, con base a datos analíticos existentes de las concentraciones molales de Na, K y Ca con un valor de 1/3 para B. Estos valores fueron graficados contra las temperaturas de fondo obtenidas por mediciones directas llevadas a cabo en los pozos.

Los datos utilizados para encontrar la ecuación, se muestran en la Tabla N° 1, donde se obser

TABLA NO. 1 DATOS UTILIZADOS PARA LA ECUACION DEL GEOTERMOINDICADOR Na-K-Ca

POZO	PRESION CABEZA (kg/cm ²)	CONDICIONES DE FLUJO	Nº Y AÑO DE REGISTRO	TEMPERATURA REGISTRO (°C)	INDICE Na-K-Ca (1978)
M-11	20.3	P 1/2" Ø V.R.	T-20/72	290	0.6618
M-19A	39.0	L 6" Ø Orif. 3"Ø	T-21/75	307	0.6758
M-25	20.4	P 2" Ø V.R.	T- 7/73	300	0.6849
M-29	12.0	L 8" Ø Orif. 4"Ø	T-24/76	252	0.8376
M-30	40.6	P 2" Ø V.A.	T-12/75	296	0.7006
M-31	36.3	P 2" Ø	T-15/75	280	0.7389
M-35	49.2	P 2" Ø	T-11/75	306	0.6605
M-45	17.0	P 1/4" Ø V.R.	T-14/77	316	0.5440
M-46	24.1	P 1/4" Ø V.R.	T- 9/77	309	0.6197
M-50	42.7	P 1" Ø V.R.	T-20/78	314	0.6425
M-53	59.6	P 1" Ø V.R.	T-32/78	343	0.5057
M-90	26.7	P 1" Ø V.R.	T-14/77	303	0.6223
M-91	46.5	P 2" Ø V.R.	T-12/78	318	0.6002

$$T(^{\circ}\text{C}) = (1176.9/1.393 + \text{Na-K-Ca}) - 273.15$$

SÍMBOLOS: Ø=Diámetro, V.R.=Válvula Regulada,
V.A.=Válvula Abierta, Orif.=Orificio.

van las condiciones de flujo de los pozos, así como el número y año en que se efectuó el registro ó medición de temperatura de fondo. Aparece también la temperatura medida y el valor del Na-K-Ca, -- calculados con datos analíticos.

La ecuación resultante fue la siguiente:

$$T^{\circ}(\text{C}) = (1176.9/1.393 + \text{Na-K-Ca}) - 273.15 \quad (1)$$

Seguramente esta ecuación no es la más representativa de las que se puedan encontrar para la totalidad de los pozos de Cerro Prieto, pero es importante establecer un método estandarizado para efectuar los cálculos de concentraciones originales y llevar a cabo la interpretación geoquímica. El índice de correlación obtenido para esta ecuación fué de 0.88.

CALCULO DE LAS CONCENTRACIONES EN EL ACUIFERO DE LOS CONSTITUYENTES QUÍMICOS

Las concentraciones de los constituyentes químicos en el agua de los pozos geotérmicos de Cerro Prieto, dependen de las condiciones de muestreo, -- pero sobre todo de la presión y temperatura a la que se recolecta la muestra.

Uno de los objetivos de este trabajo, fue el de conocer las variaciones químicas que han ocurrido en el yacimiento a través del tiempo. Para tal propósito, fue necesario calcular los valores de --

las concentraciones originales a partir de las concentraciones de los componentes químicos a la presión atmosférica, ya que la mayoría de las muestras de agua en Cerro Prieto son recolectadas en estas condiciones.

Para el cálculo de las concentraciones en el acuífero de los constituyentes químicos, se usó la ecuación $C_a = C_{pa} (1 - f)$; donde "Ca" es la concentración en el acuífero de cualquier componente químico, "Cpa" es la concentración a la presión atmosférica y a 100°C y "f" la fracción de agua evaporada ó fracción en peso de vapor al pasar el agua de la temperatura en el acuífero a la presión atmosférica, suponiendo un enfriamiento adiabático e isentálpico, cuyo valor se deberá calcular utilizando la relación $f = (h_o - h_a) / h_{fa}$, donde h_o es la entalpía del agua en el acuífero, que se obtiene a partir de la temperatura base Na-K-Ca, calculada con la ecuación (1), h_a es la entalpía del agua a 100°C y presión atmosférica y h_{fa} es el calor latente de vaporización a 100°C.

DISTRIBUCION DEL INDICADOR Na-K-Ca EN EL ACUIFERO (1978)

En la fig. 2 se muestra la distribución actual (1978) de los valores del geotermoindicador Na-K-Ca, con la cual se puede intentar una interpretación del movimiento que sufre el agua en el acuífero de Cerro Prieto.

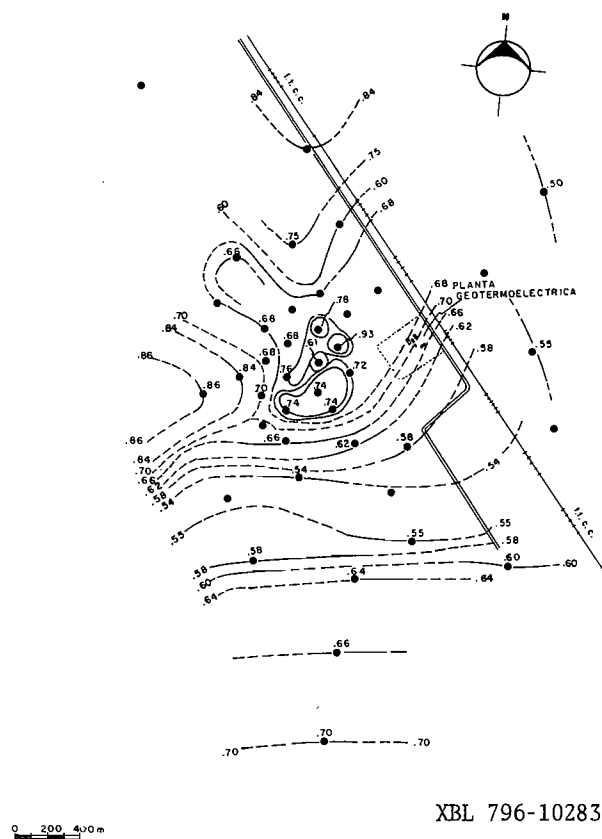


Figura 2. Distribución del indicador Na-K-Ca en el acuífero (1978).

El valor más bajo que se tiene actualmente -- del índice, es el perteneciente al pozo M-53 con 0.50 unidades y el más alto el del M-6 con 1.2 unidades. En el centro del campo se tienen grandes variaciones del valor del índice Na-K-Ca, oscilando estos entre 0.61 (M-20) y 0.93 unidades (M-15A), que se pueden explicar por efectos de flujo vertical descendente de agua de menor temperatura proveniente de estratos superiores.

El área con valores de índices bajos, se extiende cuando menos 2 Km., al Este, al SE y al Sur del campo actual. La parte más interesante, se localiza al Sur y Sureste, donde se encuentran situados los pozos M-48, M-50, M-51, M-84, M-90, M-91, M-101, M-102 y M-103.

El modelo de distribución del Na-K-Ca, nos indica una probable alimentación de agua de menor temperatura de la parte Norte, donde el índice del pozo M-114 muestra un valor de 0.84.

Otra zona de probable alimentación, o al menos de existencia de agua de menor temperatura, está al Oeste del campo (M-9, M-6), en donde se tienen los índices más altos.

DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS EN EL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO (1978)

Utilizando la ecuación (1), se calculó la temperatura del agua que está alimentando a los pozos

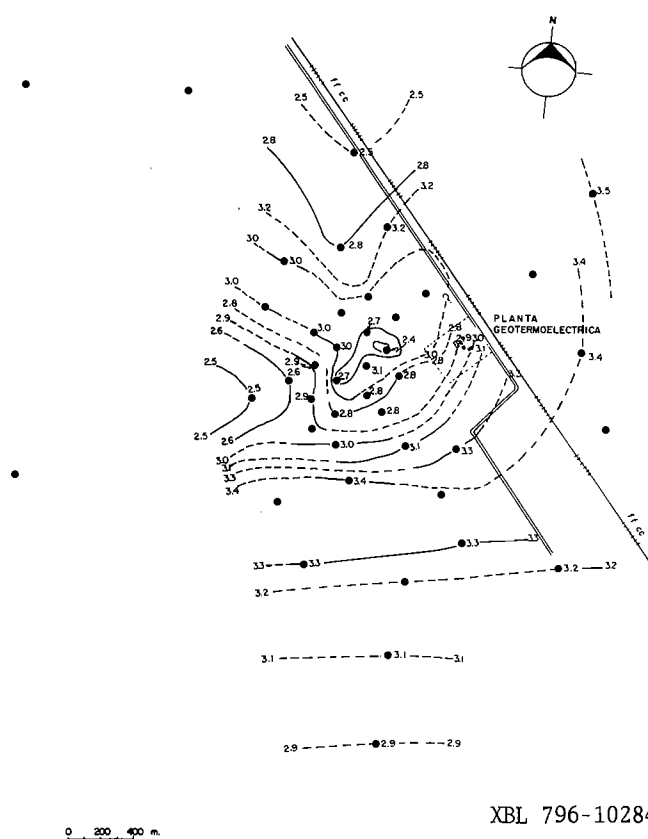


Figura 3. Temperaturas base Na-K-Ca, $T \times 10^{-2}$ (1978)

geotérmicos, elaborándose la fig. 3, donde se muestra la distribución de la misma en los acuíferos productores del campo de Cerro Prieto durante 1978. En el centro del campo se tienen grandes contrastes, mencionados antes, como resultados de la elevada explotación y al acercamiento excesivo entre los pozos, observando los siguientes comportamientos:

Los pozos M-5, M-11, M-19A, M-25, M-35 y M-46 mantienen sus temperaturas en el rango de 290 a 300°C pero por otro lado, se observa un efecto de abatimiento de temperaturas, aparentemente por percolación de agua de menor temperatura proveniente de estratos superiores que oscilan entre 283°C (M-21A), y 240°C (M-15A). Los pozos M-30 y M-35 no se han visto afectados notoriamente, manteniendo una temperatura de 288°C y 300°C respectivamente. Al Oeste del campo se observa una posible entrada de agua de menor temperatura por los pozos M-29 (260°C) y M-9 (250°C). Hacia el Sur se incrementa la temperatura hasta 340°C (M-45) y disminuye gradualmente hasta 290°C en el pozo M-101, localizado a 2000m aproximadamente al Sur del campo actual, haciendo de esta parte Sur del campo un área de temperaturas elevadas, más segura y grande que la actual en explotación. Hacia el Este del campo se tienen aún mejores condiciones, ejemplo de esto son los pozos: M-53 y M-102, que tienen valores de temperatura de 350°C y 340°C respectivamente, -- calculados con el mismo geotermoindicador.

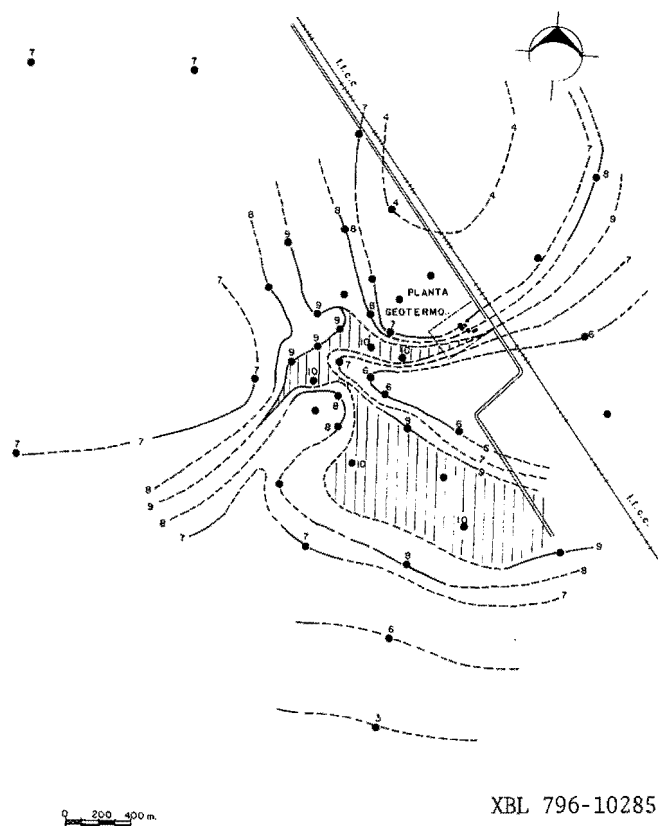
En conclusión, la anomalía de elevada temperatura más interesante se observa en la zona donde

se encuentra el pozo M-45, la cual se prolonga hacia el Oeste, hasta la localización del pozo M-181. La dirección de esta anomalía coincide con el trazo de una falla que se confirmó con secciones geológicas (Puente 1978) y coincide también con un alineamiento de manantiales, por lo que hay evidencias de que esta es una zona de gran fracturamiento, aunque no se observa un gran desplazamiento vertical y que consideramos alimenta al campo actual, en gran medida, con flujo ascendente de agua caliente.

DISTRIBUCION DE CLORUROS EN EL ACUIFERO DE CERRO PRIETO (1978)

Los cloruros son posiblemente los más útiles-trazadores químicos aplicados a la geoquímica de los campos geotérmicos de líquido dominante. La figura de perfiles o contornos de isocloruros en un área, puede mostrar la posición de la fuente u origen del agua caliente en la profundidad, la magnitud de la dilución de aguas calientes que llegan a la superficie y posiblemente las fronteras del acuífero geotérmico.

En la fig. 4 se muestra la distribución de cloruros en el acuífero de Cerro Prieto, con base a los datos de 1978. Como se observa, en el centro del área actual y en la parte Sur del campo se tiene la concentración de cloruros uniforme, con un valor de 10,000 ppm, extendiéndose hasta los pozos M-51 y M-91 y disminuyendo gradualmente hasta 3000 ppm en el pozo M-101.



XBL 796-10285

Figura 4.3 Distribución de cloruros en el acuífero, mg/l x 10³ (1978).

Sorpresivamente en la parte Este del campo, - se muestra un contenido bajo de cloruros, 6000 ppm y 8000 ppm en los pozos M-102 y M-53 respectivamente, que aunque se tengan temperaturas superiores, - 350 y 340°C, hace pensar que en esta zona el acuífero aún está en calentamiento sin haberse alcanzado aún el equilibrio de reacción entre roca y agua. Estos datos pronto se confirmarán, al poner en producción los pozos que se perforarán en esa área.

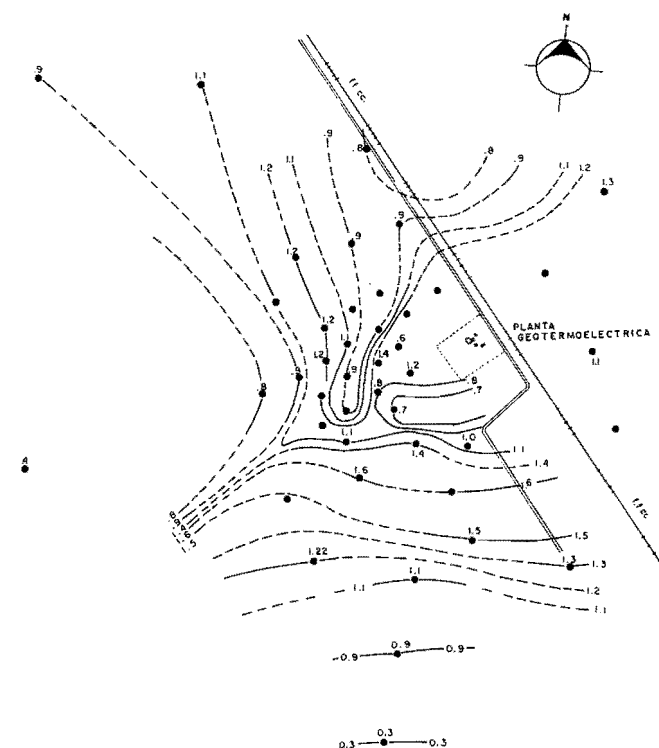
Por otro lado, se confirma la posibilidad de flujo de agua de menor temperatura de la parte Oeste del campo (M-9 con 7000 ppm de cloruros), hacia la parte central del mismo.

DISTRIBUCION DE POTASIO EN EL ACUIFERO (1978)

La solubilidad del potasio se incrementa en función directa de la temperatura, aunque no nos dice mucho acerca de la temperatura del fluido en el acuífero, ya que más que el valor absoluto de su concentración, ésta depende de su relación con el sodio.

La distribución del potasio en el acuífero del campo, se muestra en la fig. 5. En términos generales, se confirman los modelos de distribución propuestos para la temperatura base Na-K-Ca, y el índice Na-K-Ca.

Se observan nuevamente en el centro del campo grandes contrastes, originados por un abatimiento no uniforme o descenso de agua de menor temperatura.



XBL 796-10286

Figura 5.3 Distribución de potasio en el acuífero, mg/l x 10³ (1978).

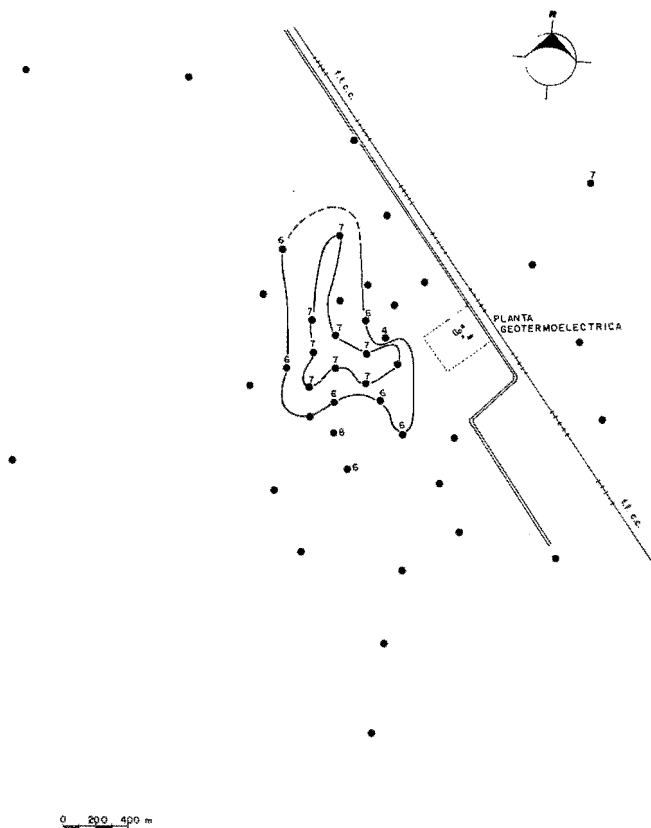
ra. Se tiene el caso del pozo M-20, situado en el centro del campo, en el que se ha incrementado el potasio hasta 1400 ppm contra 600 ppm en el pozo M-15A.

El valor más bajo observado, ha sido en el pozo M-101 (300 ppm), y el más alto en el pozo M-45- (1600 ppm).

DISTRIBUCION DE SILICE EN EL ACUIFERO DE CERRO PRIETO (1978)

La sílice es un compuesto reactivo, que al igual que el potasio depende de la temperatura del agua en sistemas geotérmicos dominados por agua. La figura 6 que ilustra la distribución de SiO_2 en el acuífero, indica que su contenido es bastante uniforme, si se aproximan los valores a + 100 ppm, observándose un contenido de 700 ppm en el centro y 600 ppm en la periferia del campo. Se observan además dos anomalías, una con contenido bajo de sílice (400 ppm) en el pozo M-15A, y otra con contenido elevado (800 ppm) en el pozo M-35.

De los nuevos pozos perforados durante 1977 y 1978, no se cuenta aún con suficiente información analítica.



XBL 796-10287

Figura 6. Distribución de sílice en el acuífero, $\text{mg/l} \times 10^2$ (1978).

VARIACIONES CON EL TIEMPO DEL INDICE Na-K-Ca

La fig. 7 muestra las variaciones que han ocurrido con el tiempo en el índice Na-K-Ca en el acuífero de Cerro Prieto, en cada uno de los pozos geotérmicos desde el inicio de su desarrollo.

Desde el principio de la explotación, se observan dos grupos de pozos: los que presentan índices mayores de 0.7 unidades (baja entalpia) y los que muestran índices con valores menores de este valor (elevada entalpia). Diecinueve pozos presentan índices cuyos valores oscilan entre 0.7 y 0.5 unidades.

La tendencia general observada es de un incremento en su valor, lo que significa un decremento en la temperatura.

El pozo M-20 es un caso interesante, ya que originalmente sus características lo colocaban en el grupo de los pozos de baja entalpia y gradualmente se ha mejorado hasta superar a algunos de los pozos de elevada entalpia.

Los dos pozos que más han sido afectados por la explotación o por posibles roturas son el M-9 y el M-15A, que presentan índices Na-K-Ca cercanos a 1.0.

En el pozo M-5, se observa que su índice se ha mantenido casi constante durante cinco años, desde que ha estado en producción, suministrando vapor a la planta, con un índice promedio de 0.68 unidades. (± 0.01 unidades de desviación estándar).

CAMBIO DE TEMPERATURA

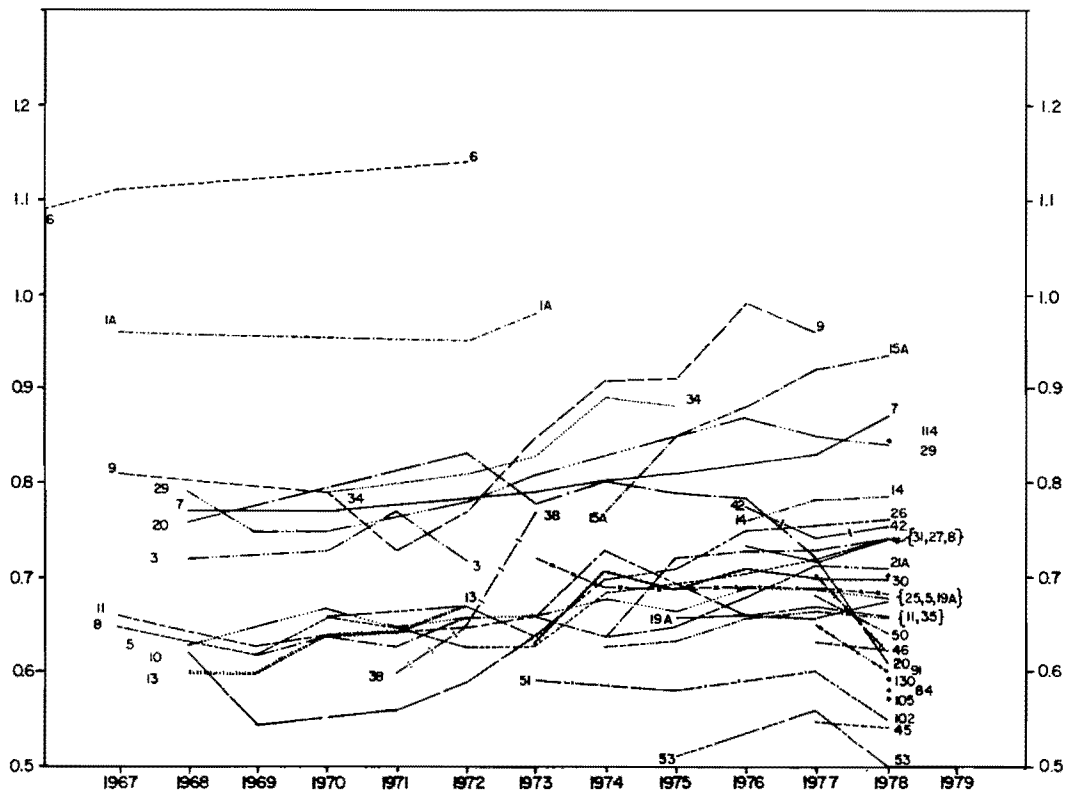
La fig. 8 muestra las variaciones de temperatura, calculadas con el uso del geotermioindicador "Na-K-Ca", ocurridas en varios de los pozos de Cerro Prieto, durante su explotación.

En el grupo de los pozos de entalpia elevada, la tendencia general ha sido de disminución, con valores de temperatura iniciales de 300°C y decremento gradual hasta el orden de 280°C en 1978. Se tienen excepciones, como el caso del pozo M-20, explicado por su terminación, el cual originalmente, (1973), tenía condiciones de producción malas, 268°C , pero a partir de 1977 se ha incrementado su temperatura hasta 314°C . Por otro lado, se conservan constantes los pozos de mejores características que aún no han sido grandemente explotados.

Actualmente se tienen en producción seis pozos con temperaturas mayores o iguales a 300°C (M-20, M-35, M-45, M-46, M-50, M-53), se tienen diez pozos con temperaturas en el rango de 270°C a 300°C (M-5, M-8, M-11, M-19A, M-21A, M-25, M-26, M-30, M-31 y M-42) y tres pozos con temperaturas menores a 270°C (M-14, M-15A y M-29).

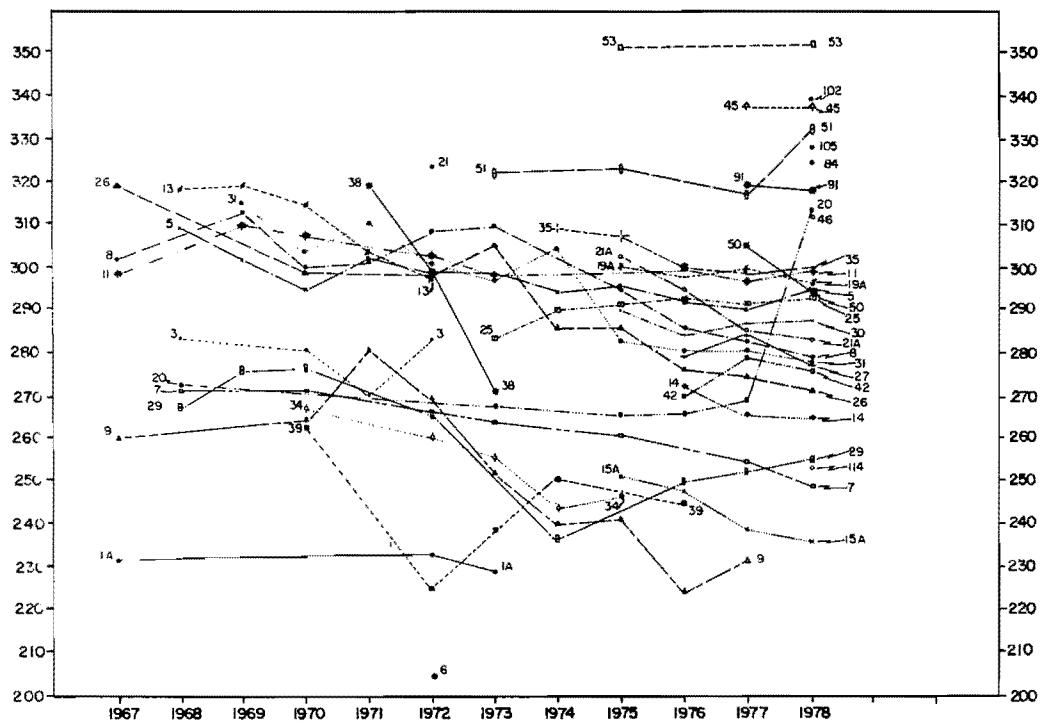
VARIACIONES DEL CONTENIDO DE CLORUROS EN EL ACUIFERO

En la fig. 9 se muestran las variaciones ocurridas en la concentración de cloruros en el acuífero de Cerro Prieto para algunos pozos del campo. Los valores graficados son los promedio anuales observados.



XBL 796-10288

Figura 7. Variación del índice Na-K-Ca en el acuífero de Cerro Prieto.



XBL 796-10289

Figura 8. Variaciones de temperaturas calculadas con el geotermoindicador Na-K-Ca (°C).

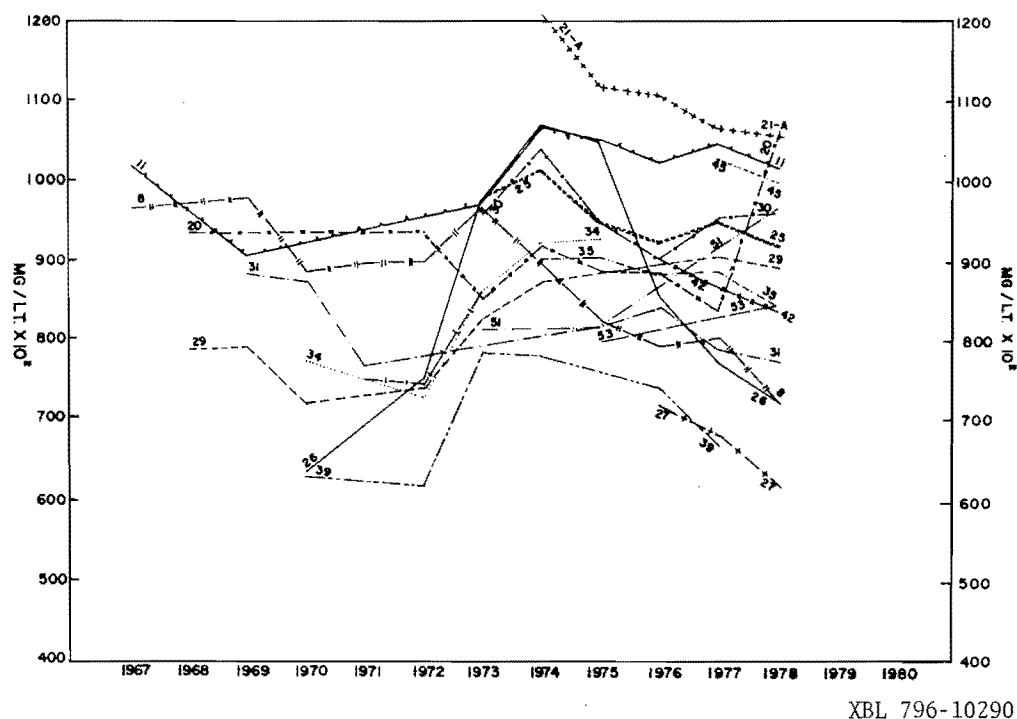


Figura 9. Variaciones del contenido de cloruros en el acuífero mg/l.

En la gráfica mostrada se pueden observar disminuciones, desde la fecha en que se inició la explotación del campo, siendo los primeros valores (hasta 1973) dudosos, debido a que los pozos no estaban en producción y las muestras fueron tomadas fluyendo por orificios de diámetros pequeños, por lo tanto se considera que no representan la respuesta del yacimiento. Tomando en cuenta esa observación, el contenido de cloruros alcanzó el máximo valor entre 1973, 1974 y 1975 para la mayoría de los pozos, con una posterior disminución a valores que oscilan entre 6000 mg/lt y 10000 mg/lt.

Los pozos en los que se observa mayor disminución son: el M-26 (670 ppm por año), el M-27 (502 ppm por año), el M-42 (371 ppm por año), y el M-21 A (310 ppm por año). El pozo M-20 es un caso no común, ya que su contenido de cloruros se incrementó 1350 ppm entre 1977 y 1978. Algunos otros pozos han mantenido su concentración prácticamente constante, tales como el M-5, el M-35 y el M-19A.

BIBLIOGRAFIA

Mercado S. (1968). "Localización de Zonas de Máxima Actividad Hidrotermal por medio de Proporcio-

nes Químicas, Campo Geotérmico de Cerro Prieto, México". Tercer Congreso Mexicano de Química, México.

Mercado S. (1975). "Migración de Fluidos Geotérmicos y Distribución de Temperaturas en el Subsuelo del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, B. C., México". U.N. Symposium, San Francisco, EUA.

Fournier, R.O. y Truesdell, A.H. "An Empirical Na-K-Ca Geothermometer for Natural Waters". *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1973, Vol. 37, pp. 1255 to 1275. Pergamon Press. Printed in Northern Ireland.

Mercado, S. (1968) "Chemistry Changes in Geothermal Well M-20, Cerro Prieto, México". The Geological Society of America, Inc. 1968.

Mañón, A. et al (1977) "Extensive Geochemical Studies in the Geothermal Field of Cerro Prieto, México. Lawrence Berkeley Lab. Reporte LBL 7019, 113 pp.

Puente Cruz, I. (1978) Comunicación Personal.

PRELIMINARY GEOCHEMICAL MODEL OF THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD

SUMMARY

The distribution of the Na-K-Ca index values in the geothermal aquifer of Cerro Prieto indicates a probable cold-water recharge in the northern and western parts of the present producing field. In the central part of the field, the distribution of Na-K-Ca values is very irregular, due to the effect of percolation or the vertical descending flow of colder waters caused by apparent over-exploitation.

The large area with indices varying between 0.5 and 0.7 to the east, southeast, and south of the field confirm the presence of hotter geothermal waters than those observed in the present producing field. The limits of this hot aquifer have not yet been determined toward the east and southeast.

The temperature distribution in the Cerro Prieto aquifer confirms the conclusions reached using the Na-K-Ca index. The maximum temperature calculated was in well M-53 (350°C) and the minimum was in M-9 (250°C), when wells M-6 and M-1A, which have lower temperatures, are not taken into account.

The chloride distribution in the aquifer confirms the recharge of colder, less saline waters in the northern and western parts of the field. It was surprising to find that the chloride content in the aquifer was lower in the eastern part (M-53) than in the present field, even though the temperature is higher. Another interesting fact is the extremely low chloride content found in well M-101, with temperatures around 290°C.

The distribution of potassium and silica in the aquifer was not as useful for the interpretation of fluid movement as originally expected. Discrepancies were found with respect to the interpretations based on the Na-K-Ca index and the chloride content.

In regard to the changes in the Na-K-Ca index, in temperature, and in chloride content during the exploitation of the field, a gradual increase in Na-K-Ca index values was observed in wells with high and low enthalpy. In exceptional cases these values decrease or remain constant. This increase in the index has represented a 10 to 20°C temperature decrease with respect to the original values existing at the beginning of the exploitation of the field (1973). The chloride content in the aquifer has decreased at different rates, from 670 mg/l per year in M-26 to 371 mg/l per year in well M-42, even though in some wells (M-20) it has increased and in others (M-5) it has remained almost constant.

In order to decrease the rate of temperature and pressure reduction in the present producing field, it is recommended that production of low enthalpy wells be suspended and be replaced by new wells located in the periphery of the field,

preferably to the southwest and northeast. Thus, the production area would at least be doubled, in an attempt to avoid the percolation or vertical flow, which is apparently causing the cooling of the reservoir.

Another measure, which could help prevent a rapid drawdown, is to exploit the deeper hot aquifers that apparently exist in the center of the field. This would first have to be confirmed by an exploratory well or by deepening one of the present wells.

INTRODUCTION

A great wealth of information about the Cerro Prieto geothermal field has been accumulated since the beginning of its development, approximately 15 years ago. Data compiled about the chemical characteristics of geothermal fluids, which reach the surface either naturally or through wells, stand out because of their consistency. Through the selective use of that information and thanks to recent progress in understanding the geologic structure of the geothermal field, a preliminary geochemical model is proposed here. This model is necessary for an integral study of the field, and it will be of great assistance in predicting its future behavior during exploitation.

In order to develop the model, we used elements, compounds, and "reactive" indices, or indices with "memory," whose values are a function of the temperature of the aquifer water. Also used were "passive" or "conservative" elements that do not change with temperature but are useful for interpreting concentration or dilution processes that occur in the geothermal fluids as they move toward the surface.

To develop the model, values of the original concentrations, before they had undergone any concentration or dilution process, were calculated. This, in turn, depends upon knowledge of the aquifer temperatures, using for this purpose either measured temperatures or values obtained from the Na-K-Ca geothermometer.

One of the main problems in developing the model is that most of the producing wells at Cerro Prieto are fed by two aquifers. Fortunately, in the approximately 15 new wells drilled during the last 18 months, attempts were made to complete the wells in only one of the aquifers. This will allow the refinement of the proposed model.

WELLS DRILLED IN THE CERRO PRIETO FIELD

The location of most of the wells drilled to date in Cerro Prieto are shown in Figure 1. Nine exploration wells are not shown: M-1A, M-2, M-2A, M-4, M-93, M-94, M-96, S-262, and Prian. Nineteen wells at the center of the field supply steam to the 75-MW plant presently

in operation (M-5, M-8, M-11, M-14, M-15A, M-19A, M-20, M-21A, M-25, M-26, M-27, M-29, M-30, M-31, M-35, M-42, M-45, M-46, and M-53). Eleven additional wells located south and east of the present area have been drilled to supply steam to the two new 37.5-MW units, which will go on line in 1979 (M-48, M-50, M-51, M-84, M-90, M-91, M-101, M-102, M-103, M-104, and M-105). The steam conduction lines are interconnected, enabling the wells to feed either units 1 and 2, or 3 and 4. In addition, four replacement wells have been completed for units 1 and 2 (M-43, M-114, M-130, and M-181). These will ensure the operation of the present plant at nominal capacity, since a slow decrease in the total steam production from the central area of the field has been observed due to scaling and temperature or pressure reduction in the reservoir.

Fluids from wells M-3, M-6, M-7, and M-92, and the nine aforementioned exploratory wells have not been used to generate electrical power. Another seven wells (M-10, M-13, M-15, M-21, M-34, M-38, and M-39) have been abandoned due to casing mechanical problems. There is also a well (M-9) that is being descaled by mechanical means, and wells M-107 and M-123 are being drilled.

This gives a general idea of the enormous amount of information compiled on the Cerro Prieto geothermal wells.

TEMPERATURES IN THE AQUIFER CALCULATED USING THE Na-K-Ca GEOTHERMOMETER

The temperature of the aquifer must be known in order to calculate the original concentration of the different components in the Cerro Prieto hydrothermal brine feeding the geothermal wells. Several techniques are available to evaluate this temperature; one of them uses chemical geothermometers and is based on the chemical equilibrium between the existing reactive solutes in the geothermal fluids and the reservoir rocks.

Several chemical geothermometers have already been developed. Fournier and Truesdell (1973) have shown that, under favorable conditions, the concentration of Na, K, and Ca in natural waters can be utilized to calculate the reaction equilibrium temperatures between the water and the rocks. They showed that the temperature and concentration data from the majority of geothermal fluids cluster near a straight line when they are plotted as a function of $\log \text{Na/K} + B (\log \sqrt{\text{Ca/Na}})$ against the reciprocal of the absolute temperature, where B is a constant with a value of 1/3 or 4/3 depending on whether the water is in equilibrium above or below 100°C, respectively.

Values calculated using the Na-K-Ca index were used to calibrate the empiric geothermometer applicable to the Cerro Prieto fluids. For this purpose, existing analytical data on the molal concentrations of Na, K, and Ca and a value of 1/3 for B were used. These values were plotted against measured well bottom-hole temperatures.

The data used to establish the equation are shown in Table 1, which gives the flow conditions

of the wells, their number, and the year when the bottom-hole temperature was measured. The measured temperatures and the Na-K-Ca values, calculated using analytical data, are also shown. The resulting equation is:

$$T(^{\circ}\text{C}) = (1176.9/1.393 + \text{Na-K-Ca}) - 273.15 \quad (1)$$

This equation is certainly not the most representative of those that might be developed for all the Cerro Prieto wells. It is nevertheless important to find a standard method to calculate the original concentration and carry out the geochemical interpretation. The correlation index obtained for this equation was 0.88.

CONCENTRATIONS OF THE AQUIFER CHEMICAL CONSTITUENTS

The concentration of chemical constituents of the geothermal waters of the Cerro Prieto wells depends on the sampling conditions, but above all on the pressure and temperature at which the sample is collected.

One of the goals of this paper was to determine the chemical changes that occurred throughout the years in the reservoir. To this end, the values of the original concentrations had to be calculated, based on the concentrations measured at atmospheric pressure since at Cerro Prieto most of the water samples are collected under these conditions.

The equation $C_a = C_{pa} (1 - f)$ was used to calculate the concentrations in the aquifer where C_a is the concentration of any chemical component in the aquifer, C_{pa} is the concentration at atmospheric pressure up to 100°C, and f is the fraction of evaporated water or the fraction in weight of steam when the water changes from aquifer temperature to atmospheric pressure conditions, assuming adiabatic and isenthalpic cooling. The value of f will have to be calculated using the relation $f = (h_o - h_a)/h_{fa}$, where h_o is the enthalpy of the aquifer water obtained from the Na-K-Ca temperature using equation (1); h_a is the enthalpy of water at 100°C and atmospheric pressure, and h_{fa} is the latent heat of vaporization at 100°C.

DISTRIBUTION OF THE Na-K-Ca INDEX IN THE AQUIFER (1978)

The present (1978) distribution of the Na-K-Ca geothermal index in the aquifer is shown in Figure 2; this can be used to interpret the water movement in the Cerro Prieto aquifer. To date, the lowest index value (0.50) is that of well M-53, and the highest (1.2) is that of well M-6. In the center of the field there are great variations in the Na-K-Ca index values, from 0.61 (M-20) to 0.93 (M-15A). These can be explained by the effects of colder waters leaking from higher strata.

The region with low indices extends at least 2 km to the east, southeast, and south of the present field. The most interesting area is situated to the south and southwest, where wells M-48, M-50, M-51, M-84, M-90, M-91, M-101, M-102, and M-103 are located.

The Na-K-Ca distribution model points to a probable cold-water recharge from the north, where well M-114 has an index of 0.84.

Another area of probable recharge or at least of lower temperature waters, lies west of the field (M-9, M-6), where the highest indices are observed.

TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD (1978)

The temperature of the water feeding the geothermal wells was calculated utilizing Equation (1). Figure 3 shows the distribution of these temperatures in the producing aquifers of the Cerro Prieto field during 1978. As indicated before, great contrasts exist in the center of the field as a result of the intense exploitation and the proximity between the wells.

Different behaviors were observed. Wells M-5, M-11, M-19A, M-25, M-35, and M-46 maintain temperatures ranging between 290°C and 300°C. However, temperature reductions are observed, apparently due to cold-water percolation from higher strata in M-21A (283°C) and M-15A (240°C). Wells M-30 and M-35 have not been noticeably affected and maintain a temperature of 288 and 300°C respectively. A possible cold-water inflow is observed west of the field, as indicated by wells M-29 (260°C) and M-9 (250°C). Toward the south, the temperature increases up to 340°C (M-45), and gradually decreases to 290°C in well M-101, situated approximately 2000 m south of the present field. This makes the southern part of the field a high-temperature region, larger and more reliable than presently exploited area. To the east of the field even better conditions exist. For instance, in wells M-53 and M-102, temperatures of 350 and 340°C, respectively, were calculated using the same geothermal index.

In conclusion, the most interesting high-temperature anomaly is observed from near well M-45 toward the west to well M-181. The direction of this anomaly coincides with the fault line shown by geological cross sections (Puente, 1978). It also coincides with a line of springs, indicating that this is an area of high fracturing even though no great vertical displacement is observed. We believe this anomaly recharges the present field with an ascending flow of hot water.

CHLORIDE DISTRIBUTION IN THE CERRO PRIETO AQUIFER (1978)

Chlorides are possibly the most useful geochemical tracers for liquid-dominated geothermal fields. The isochloride contours can indicate the position of the hot water source at depths, the magnitude of dilution of the hot waters reaching the surface, and possibly the limits of the geothermal aquifer.

Figure 4 shows the chloride distribution in the Cerro Prieto aquifer, based on 1978 data. As shown in the figure, in the center of the present producing area and in the southern part of the

field, there is a uniform chloride concentration, (10,000 ppm) which extends to wells M-51 and M-91 and gradually decreases to 3000 ppm in well M-101.

Surprisingly, a low chloride concentration is observed in the eastern part of the field, 6000 ppm and 8000 ppm in wells M-102 and M-53, respectively. Although higher temperatures occur (350 and 340°C), this suggests that in this area the aquifer is still heating up and the reaction between rock and water has not yet reached equilibrium. These data will soon be confirmed when the wells that are scheduled to be drilled in this area go into production.

On the other hand, the possibility of cold-water flow from the west (M-9 with 7000 ppm chlorides) toward the central part of the field is confirmed.

POTASSIUM DISTRIBUTION IN THE AQUIFER (1978)

The solubility of potassium increases in direct proportion to temperature, although this does not give us much information about the temperature of the aquifer fluid, since the temperature is better given by the Na/K ratio than by the absolute concentration of potassium.

Figure 5 shows the distribution of potassium in the geothermal aquifer. Distribution models proposed for the temperature, based on Na-K-Ca, and for the Na-K-Ca index are generally confirmed.

Once more, great contrasts are observed in the center of the field due to a downward flow of colder water. A case in point is well M-20, located in the center of the present producing field, where potassium has increased up to 1400 ppm compared with 600 ppm in well M-15A.

The lowest value has been observed in well M-101 (300 ppm), and the highest in well M-45 (1600 ppm).

SILICA DISTRIBUTION IN THE CERRO PRIETO AQUIFER (1978)

Silica is a reactive compound, which in water-dominated geothermal systems (as in the case of potassium) depends on water temperature. Figure 6, which shows the SiO₂ distribution in the aquifer, indicates that silica content is rather uniform, if we approximate the values to ± 100 ppm. A content of 700 ppm in the center and 600 ppm in the periphery of the field can be observed. In addition, two anomalies are noticeable; one with a low silica content (400 ppm) in well M-15A, and another with a higher content (800 ppm) in well M-35.

Very little analytical data are available for the new wells drilled in 1977 and 1978.

CHANGES IN THE Na-K-Ca INDEX WITH TIME

Figure 7 shows the changes observed in the Na-K-Ca index for each well since the beginning of their development.

Two groups of wells are shown: those with indices greater than 0.7 (low enthalpy), and those with lower values (high enthalpy). Nineteen wells have indices with values ranging from 0.7 to 0.5 units. The general trend observed is toward an increase in value, indicating a decrease in temperature.

Well M-20 is an interesting case, since its original characteristics placed it among the group of low-enthalpy wells, but it has gradually improved to the point of surpassing some of the high-enthalpy wells.

Wells M-9 and M-15A, with Na-K-Ca indices close to 1.0, have been most affected by production or possibly casing damage.

Well M-5 has had a nearly constant index during the five years it has been in production, supplying steam to the plant. Its average index is 0.68 with a standard deviation of about 0.01.

TEMPERATURE CHANGES

Figure 8 shows the temperature variations in the Cerro Prieto wells calculated using the Na-K-Ca geothermal index.

In the high-enthalpy group of wells, the general trend has been toward a decrease, with initial temperature values of 300°C, and a gradual decrease to about 280°C, in 1978. Exceptions exist, as in the case of well M-20. In 1973, M-20 had poor production characteristics (268°C), but because of the way it was completed, beginning in 1977, the temperature increased to 314°C. On the other hand, the wells with better characteristics, which have not yet been produced in large scale, remain constant in temperature.

Six wells with temperatures of 300°C or higher are presently in production (M-20, M-35, M-45, M-46, M-50, and M-53). There are 10 wells with temperatures in the range of 270 to 300°C (M-5, M-8, M-11, M-19A, M-21A, M-25, M-26, M-30, M-31, and M-42) and three wells with temperatures lower than 270°C (M-14, M-15A, and M-29).

VARIATIONS IN THE AQUIFER CHLORIDE CONTENT

Figure 9 shows the changes in chloride concentration for some wells in the Cerro Prieto aquifer. The plotted values represent the annual

averages observed. This graph shows reductions that started when reservoir exploitation began. The first values (until 1973) are doubtful, because the wells were not in production and the samples were taken while the wells were flowing through small-diameter orifices. Therefore, these samples do not reflect the reservoir characteristics. In most of the wells the chloride content reached the highest value between 1973 and 1975. There was a subsequent decrease to values ranging between 6000 and 10,000 mg/l.

The wells showing the greatest reductions are: M-26 (670 ppm/yr), M-27 (502 ppm/yr), M-42 (371 ppm/yr), and M-21A (310 ppm/yr). Well M-20 is an unusual case since its chloride content increased 1350 ppm between 1977 and 1978. Some other wells, such as M-5, M-35, and M-19A, have shown essentially constant concentrations.

TABLE AND FIGURE CAPTIONS

Table 1. Data used for developing the Na-K-Ca index equation.

Figure 1. Location of wells in the Cerro Prieto field.

Figure 2. Distribution of the Na-K-Ca index in the aquifer (1978).

Figure 3. Temperatures for 1978, based on the Na-K-Ca index (indicated values should be multiplied by 100 to obtain °C).

Figure 4. Distribution of chlorides in the aquifer (1978). Indicated values should be multiplied by 1000 to obtain mg/l.

Figure 5. Distribution of potassium in the aquifer (1978). Indicated values should be multiplied by 1000 to obtain mg/l.

Figure 6. Distribution of silica in the aquifer (1978). Indicated values should be multiplied by 100 to obtain mg/l.

Figure 7. Variations in the Na-K-Ca index in the Cerro Prieto aquifer.

Figure 8. Variations in the temperature (°C) calculated based on the Na-K-Ca geothermal index.

Figure 9. Variations in the aquifer chloride content (mg/l).