

ANALYSIS OF CERRO PRIETO WELL LOGS: SOME RESULTS AND PROBLEMS

J. E. Noble

Lawrence Berkeley Laboratory, University of California
Berkeley, California, USA

A. Abril G.

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

INTRODUCTION

The systematic exploration and development of the Cerro Prieto geothermal resource by the Comisión Federal de Electricidad (CFE) has resulted in a vast accumulation of data. These data provide a rare opportunity to conduct a case study of the exploitation of a geothermal system. In 1975, a working relationship was established between CFE and Lawrence Berkeley Laboratory (LBL) to conduct such a study. In the same year, LBL began to collect available data on the geology, hydrogeology, geochemistry, and reservoir characteristics of the Cerro Prieto geothermal field.

The Cerro Prieto data have been placed in open-file repository, accessible to the geothermal community. A report was issued (Lippmann, et al., 1977) documenting the data collected to that date. A revised report will be issued in 1979.

In addition to collecting the Cerro Prieto data, LBL began a project to analyze the data and develop geological, hydrogeological, geochemical, and numerical reservoir models of the Cerro Prieto geothermal system. An integral part of this project has been the analysis of the geophysical well logs. This paper will discuss LBL's efforts to apply various interpretation methods to the Cerro Prieto well logs, present a resulting geologic model, summarize the major interpretation problems encountered, and outline the general direction of future well-log interpretation studies.

METHOD OF INVESTIGATION

The usefulness of well logs in stratigraphic and structural studies has been limited by the high cost of manual interpretation techniques and by the biases of the well-log analyst. Because manual analysis of well logs is a time consuming and costly operation, few logs were thoroughly analyzed before computers were applied to the problem of well-log interpretation. Standard practice was to make a cursory examination of the entire well log, identify zones of interest, and concentrate the analysis on those zones.

With the advent of the modern, high-speed computer, new methods of data storage, retrieval,

and manipulation became available to earth scientists. For the well-log analyst, the computer provides an expedient way to study numerous types of logs, either singularly or in combination. In addition, the computer allows the analyst to use various statistical methods in stratigraphic and structural studies.

Given the volume of Cerro Prieto well-log data to be analyzed and the acknowledged advantages of computer well-log interpretation, computer analysis of the data was judged necessary to expedite the use of the logs. Computer analysis would provide, in addition, an opportunity to evaluate the usefulness of various computer interpretation techniques and statistical methods for developing models of an operating liquid-dominated geothermal field. The majority of these techniques and methods have been developed for oil and gas applications.

Systematic digitization of selected logs began in late 1976 in order to permit computer analysis of the Cerro Prieto well logs. As logs were received from Mexico, they were digitized and a reproducible sepia copy was made of each log. Whenever possible, a copy of the original digital well-log tape, supplied by the well-logging service company, was obtained and read directly into the LBL open-file well-log repository. This procedure continues today.

The original logs selected for digitization were chosen to permit the construction of two perpendicular cross sections through the geothermal field (Figure 1). Before any computer techniques were applied, the cross sections were constructed by visual log-matching techniques. These sections were subsequently compared with cross sections constructed using the auto-correlation program, COR4LOG (Rudman and Blakeley, 1976).

COR4LOG is a cross-correlation method of comparing time series. Given two time series, or two pairs of time series, COR4LOG uses cross correlation to determine the relative displacement and the stretch factor between the series. The measure of similarity between time series can be expressed as:

$$\phi_{XY}(S, \tau) =$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{L_1} X_i Y_{i+\tau} - L_1 \bar{X} \bar{Y}_\tau}{\left[\left(\sum_{i=1}^{L_1} X_i^2 - L_1 \bar{X}^2 \right) \left(\sum_{i=1}^{L_1} Y_{i+\tau}^2 - L_1 \bar{Y}_\tau^2 \right) \right]^{1/2}}$$

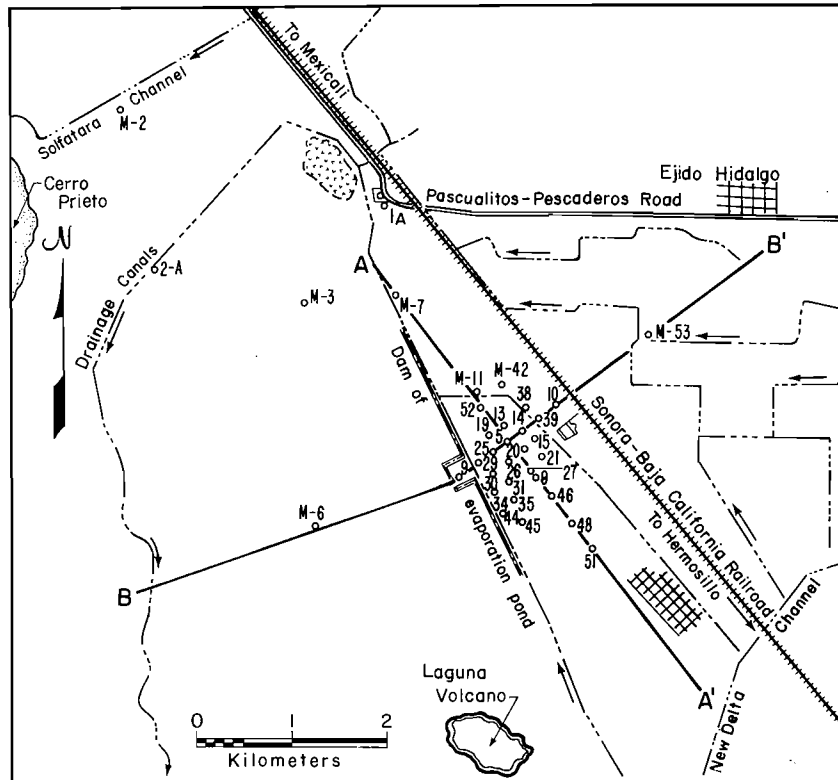
$$\bar{X} = \frac{1}{L_1} \sum_{i=1}^{L_1} X_i \quad \bar{Y} = \frac{1}{L_1} \sum_{i=1}^{L_1} Y_{i+\tau}$$

where $\phi_{XY}(S, \tau)$ is a measure of the similarity between time series $X(t)$ of length L_1 and $Y(t)$ of L_2 ; S is the amount a series is stretched; and τ is the amount a series is shifted. If $\phi_{XY}(S, \tau) = 1$, X and Y are perfect matches; if $\phi_{XY}(S, \tau) = 0$, they do not correlate; and if $\phi_{XY}(S, \tau) = -1$, they correlate with inverted phase.

In COR4LOG, the longer of the two time series is held fixed as the shorter series is moved along it and a $\phi_{XY}(S, \tau)$ is computed at each data point. To allow for stretch between time series, additional values are interpolated into the shorter

series at regular intervals. This new series is then moved along the series being held fixed and $\phi_{XY}(S, \tau)$ is again computed at each data point. The amount a series is stretched is operator defined, up to a maximum of the ratio between the time series. The amount of each stretch step is also operator defined. The stretching and computational procedure continues until the predetermined maximum stretch is reached. The stretch and log value at which the greatest value of $\phi_{XY}(S, \tau)$ is computed is the best correlation between the time series. A subroutine plots the time series and draws tie-lines between them to illustrate results of the cross correlation. Figure 2 shows a plot of the cross correlation between a 61-m interval (1159 m to 1220 m) of well M-9 (log 1) and a 183-m interval (1098 m to 1281 m) of well M-10 (log 2). Both are self-potential (SP) logs. The plot indicates a maximum correlation coefficient of 0.675 at a lag of 342 data points (52 m) and a stretch of 1.7. The correlation of four series, two logs from each of two wells, follows the steps described above. The value used to pick the best correlation between the two wells is the sum of the two cross correlation functions computed between identical type logs from the two wells.

Because of the repeated multiplications and additions involved in cross correlation of time series, the auto-correlation program simplifies the cross-correlation operation by transforming the series from the time domain to the frequency domain. The series are correlated in the frequency



XBL 776-1179

Figure 1. Location map of exploration and development wells and section lines A-A' and B-B'.

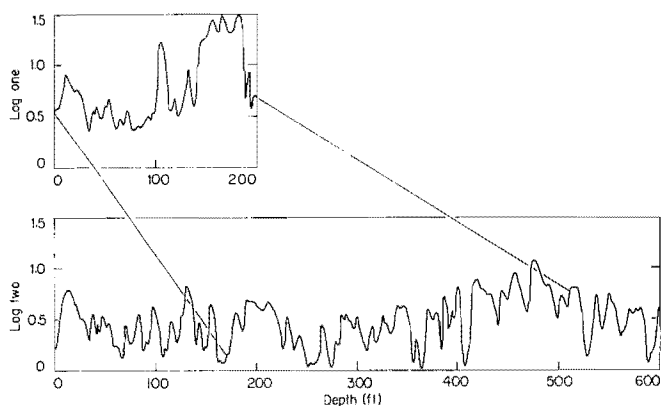


Figure 2. Plot of SP well-log correlation between wells M-9 and M-10 computed by auto-correlation program.

domain and transformed by an inverse Fourier transform to yield the desired cross correlation.

As mentioned before, the results of the auto-correlation program were used to corroborate correlations determined by visual log-matching techniques. In some cases, where visual techniques failed to be useful in determining correlations, the results of the auto-correlation program were used exclusively. Using the various methods, major lithologic units below a depth of 750 m were delineated across the Cerro Prieto geothermal field.

Figure 3 shows the major lithologic units that were delineated by visual well-log correlation techniques and the auto-correlation program, COR4LOG. The figure shows only the peripheral wells of the producing field and some outlying exploration wells. The figure also serves as a general model of the geothermal reservoir. The reservoir is formed by an interbedded sequence of deltaic sands and shales of variable thickness. These sands and shales, overlain by a claystone-siltstone caprock, can be divided into four major lithologic units by correlation of three, thick shale beds across the field. The individual units are characterized by an increasing percent of shale in their upper half and an increasing percent of sand in their lower half. The thickness of individual sand beds increases toward the bottom of each unit.

Wells in the southeastern part of the field were drilled into a fifth unit. This unit is typified by low sand counts and beds of relatively high resistivity. It is considered to have predominantly fracture-controlled porosity that permits the upwelling of geothermal fluids.

The correlation of units between wells have identified different magnitudes of offset, down to the east: (1) 420 m between M-10 and M-53; (2) 310 m between M-6 and M-9; and (3) 50 m between M-7 and M-3. As a result of these correlations, we postulate that the field is bound by two northwest-trending normal faults, one to the east between wells M-10 and M-53, and the other to the west between wells M-3 and M-7 and wells M-6 and M-9. Both faults are downthrown to the

east. Deposition has been contemporaneous with faulting as evidenced by the thickening of the lithologic units toward the east.

In addition to the well-log study, a study was made of various temperature logs available for each well. Selected logs were digitized and several temperature-distribution profiles were compared with the structural cross sections; a general (structure) influence on temperature and fluids distribution in the reservoir was evident.

The upwelling of high-temperature fluids is centered to the southeast of the field, around the intersection of a south-bounding fault and an east-bounding fault. Fluids move vertically along these fault zones until they encounter fracture zones in the lower part of the Cerro Prieto reservoir. These fracture zones allow the fluids to migrate horizontally, and vertically, toward the central and northwestern parts of the field. Vertical fluid migration between major lithologic units is controlled by fractures in the shale beds. These fractures open and close as a consequence of regional tectonic activity and chemical precipitation. Consequently the direction of fluid flow in the reservoir varies, somewhat, over time. As fluids move toward the western part of the field, they migrate vertically and horizontally into porous sands.

West of the field, the cold water influx along the postulated boundary fault and through subsurface alluvium deposits forms a western thermal field boundary.

As additional well logs were received, each well was correlated into the reservoir model. Analyses were focused on the major structural units and attempts were made to subdivide the major units on a progressively finer scale until individual lithologic units could be correlated and various facies changes, unconformities, faults, mineralization zones, and stratigraphic zones defined. Following analytical procedures outlined by Poupon, et al. (1970), and Watt (1975), a program for log analysis of sand-shale sequences in sandstone reservoirs was developed. This two-phase program uses the neutron porosity, formation density porosity, and resistivity well logs to evaluate shale, silt, and sand proportions and water saturation values.

The program's first phase uses the neutron porosity, density porosity, and resistivity well logs as input data. It first produces a graphic overlay of neutron and density porosity together with a plot of neutron porosity minus density porosity. Figure 4 illustrates the start of the sand-shale program's analysis of well M-29 over the interval of 3446 to 3546 ft. This is followed by a cross plot of neutron porosity versus density porosity, which is used to define a quartz-shale-water triangle and the neutron and density porosity of shale (Figure 5). The shale resistivity is defined from a cross plot of resistivity versus neutron porosity minus density porosity (Figure 6).

The purpose of these first-phase cross-plots is to define the properties of the shale in the section of interest. The shale-point neutron,

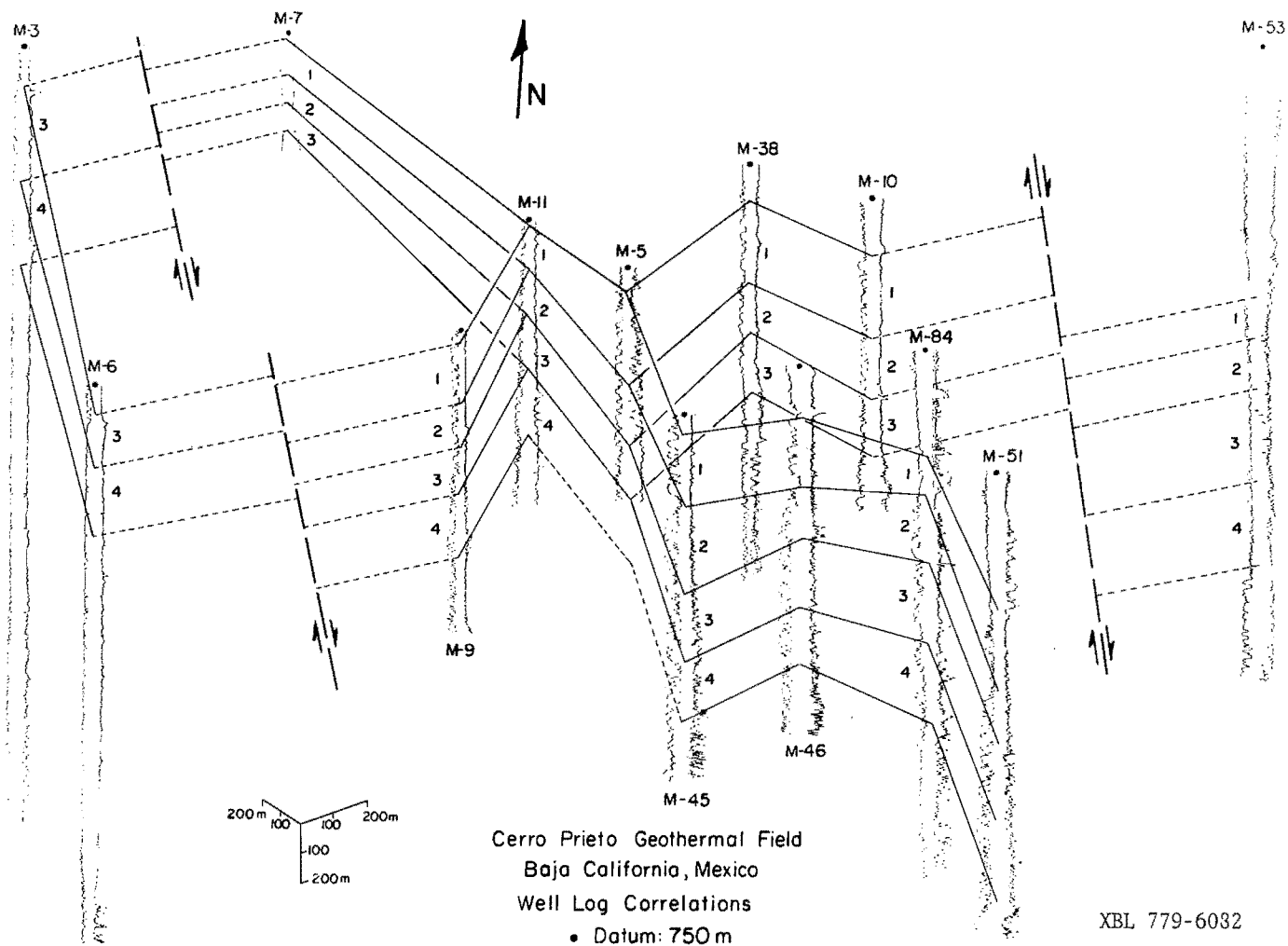


Figure 3. Major lithologic units delineated by well-log correlation.

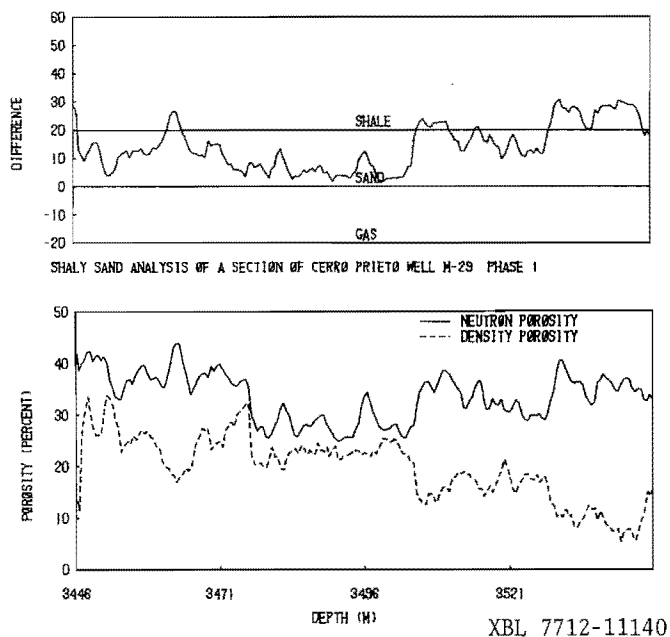


Figure 4. Overlay graph of neutron and density porosity and a plot of neutron porosity minus density porosity.

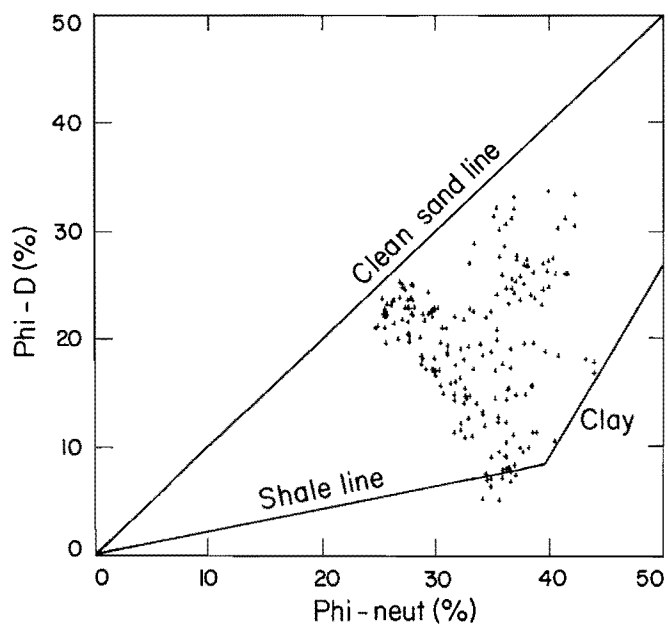
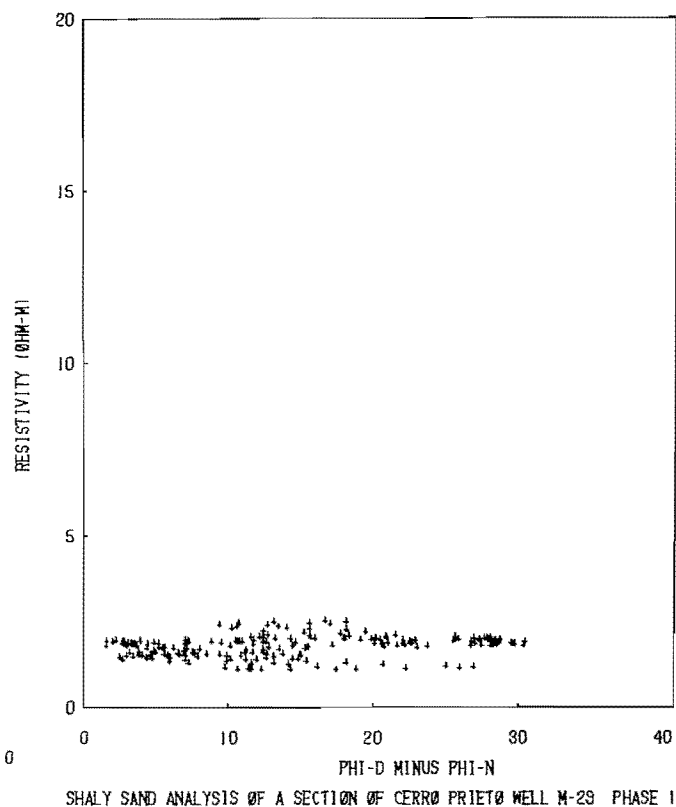


Figure 5. Neutron porosity versus density porosity cross plot.



XBL 7712-11141

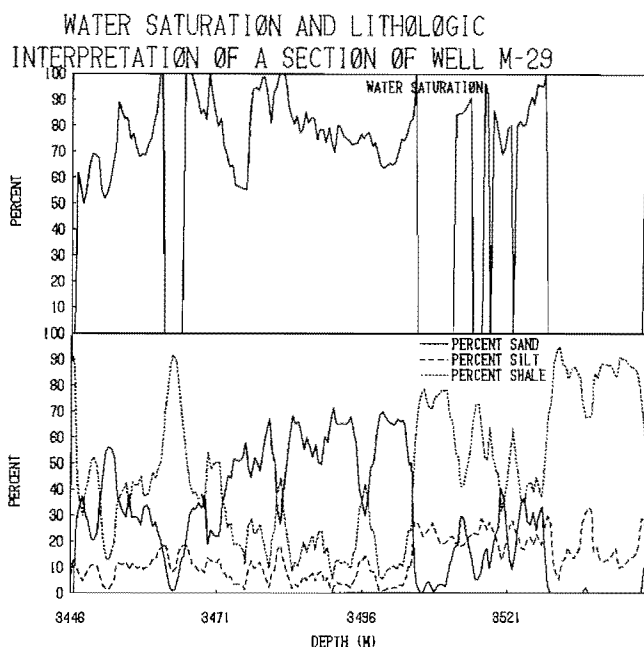
Figure 6. Resistivity versus neutron-density porosity difference.

density, and resistivity values are used as input for the second phase of the program along with a value for formation water resistivity.

The second phase of the sand-shale analytical program computes the proportions of sand, silt, and shale, and water saturation values in the interval of interest. The quartz proportion is divided between sand and silt by a conceptual model that sets all quartz on the quartz-shale line as 100% silt, and intermediate points as sand-silt mixtures on a pseudologarithmic scale. The solutions for shale proportions and porosity are introduced into the Schlumberger laminated shale water saturation equation and the water saturation value is computed.

PROBLEMS RAISED BY ANALYSIS

Figure 7 illustrates the results of the sand-shale program. The top plot illustrates the result of the water saturation computation and the bottom plot illustrates the computed distribution of sand, silt, and shale in the interval of interest. The results of the water saturation computation were surprising. It had been assumed that the saturation values in this interval should be near 100%. The computed average was between 70% and 80%, causing concern that the program was incorrectly computing the water-saturation values. A possible cause of the computation of lower saturation values could be the presence of various



XBL 7712-11138

Figure 7. Output of sand-shale program showing water saturation and interpreted lithology.

gas species. Geochemical analyses have indicated the presence of otherwise undetected gases in wells adjacent to M-29. Another concern about the accuracy of the sand-shale program developed when attempts were made to corroborate the log-derived lithologic interpretation of the interval of interest with lithologic strip charts made from the well-bore cuttings or with a lithologic interpretation of the SP logs.

Stimulated by these and other concerns about interpretation accuracy, a review was made of various problems that might limit the confidence in any quantitative interpretation of geophysical well logs from the Cerro Prieto geothermal field. These problems were divided into two categories: influences associated with well-drilling operations; and influences associated with the unique lithology and mineralogy of the Cerro Prieto geothermal field.

Influences Associated with Well Drilling

The following problems were identified:

1. Mud-circulation history. Knowledge of the formation temperature is required to accurately establish formation water resistivity. To determine the formation temperature, the temperature disturbance caused by mud circulated during drilling operations must be established. In addition, from the mud-circulation history, a radius of influence of the effect of cooling can be calculated and a temperature-distribution profile plotted for each logging run. This profile is then plotted against the depth of investigation for each tool, particularly the resistivity tools, to indicate the range of possible temperatures influencing the tool.

2. Impact of cooling operations before logging runs. Cerro Prieto well bores must be ice quenched immediately before logging runs in order to be able to run any log in the well. The icing creates extreme thermal gradients between the well bore and the surrounding formation. Knowledge of the effect of the icing is necessary in order to accurately compare formation properties derived from shallow investigating tools with properties derived from medium and deep investigating tools.

3. Total logging time. The effect of well-bore cooling is short lived. Once cooling stops, the formation thermally rebounds and begins to heat the wellbore. The sequence in which logs are run can have a marked effect on the value of their data.

4. Rate of wellbore thermal rebound. The rate at which the wellbore rebounds after cooling is a function of the thermal conductance of the formation. Investigators have suggested using the thermal rebound curve to derive a static formation temperature using a "Horner" plot (Edwardson et al., 1962; Messer, 1976; Dowdle and Cobb, 1975).

5. Cumulative influence of several separate logging runs. The influence on well logs that were run later to greater depths is an accumulation of the thermal impact of previous mud-circulation times and logging runs. In order to be able to accurately analyze these deeper zones, an accurate record of previous mud circulation and logging histories is essential.

Influences Associated with Cerro Prieto

The following problems related to the unique lithology and mineralogy of Cerro Prieto were identified.

1. Electrical conductivity of shaly sands varies as a function of temperature. The work of several investigators indicates that the electrical conductivity and formation factors of a shaly sand are shale-volume and temperature dependent (Kern et al., 1977; Warman and Thomas, 1974; Brannan and Von Goten, 1973; Sanyal et al., 1972). The lack of temperature data and lithologic samples correctly collected for shale volume analyses results in unreliable formation-resistivity and formation-factor calculations.

2. Redox state of formation influences SP curve. "Drifts" in the SP baseline due to changes in the redox state of the formation reduces the reliability of SP-based calculations.

3. Radioactive and mafic minerals influence porosity evaluation. The shaly-sand analyses typically calculated a lower-than-expected porosity value. Other researchers have noted similar results from their analyses and attribute the variance to the influence of potassium feldspar and various mafic minerals (Nyberg et al., 1978). By not considering the mineral composition of the formation, erroneous interpretation of the logs result.

4. Anomalous resistivity values caused by conductive mafic minerals deposited in a hydrothermal system. Their concentration and distribution can influence the resistivity of the formation.

SOME HOPE FOR THE FUTURE

Progress is being made to resolve some of the aforementioned problems by research currently supported by the cooperative Cerro Prieto study. Reexamination of selected wellbore cuttings using binocular microscope, thin sections, and x-ray diffraction analysis are being done by the University of California, Riverside. These studies may help to resolve some of the discrepancies between the shaly-sand log analysis and the lithologic charts.

In order to help resolve some of the more important problems outlined above, the following four studies are proposed:

1. Calibrate the thermal impact of drilling operations on the wellbore.
2. Calculate the radius of cooling around the wellbore and the temperature profile for each logging run.
3. From the well used for the above two studies, collect core for detailed petrophysical, lithologic and mineralogic analysis.
4. Examine the SP logs, corroborated by petrologic and mineralogic studies, to evaluate changes in the redox state.

Analysis of the Cerro Prieto well logs can continue without the benefit of these studies. The usefulness of such analysis will be questionable, though, unless a program is started to detail how the problems discussed above influence analyses of Cerro Prieto well logs.

REFERENCES CITED

- Brannan, G.O., and Von Goten, W.D., 1973. The effect of temperature on the formation resistivity factor of porous media, paper U in SPWLA 14th Annual Logging Symposium, May 6-9, 1973 Proceedings. Houston, Soc. Prof. Well Logging Analysts.
- Dowdle, W.L., and Cobb, W.M., 1975. Static formation temperatures from well logs: an empirical method. Jour. Petroleum Tech., v. 27, pp. 1326-1330.
- Edwardson, M.J., Girner, H.M., Parkison, H.R., Williams, C.D., and Matthews, C.S., 1962. Calculation of formation temperature disturbances caused by mud circulation. Jour. Petroleum Tech., v. 14, pp. 416-426.
- Kern, J.W., Hoyer, W.A., and Spann, M.M., 1977. High temperature electrical conductivity of shaly sands, paper U in SPWLA 18th Annual Logging Symposium, June 5-8, 1977, Proceedings. Houston, Soc. Prof. Well Logging Analysts.

- Lippmann, M.J., Domínguez A., B., Wollenberg, H.A., and Witherspoon, P.A., 1977. Open file data on the Cerro Prieto geothermal field. Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-6321.
- Messer, P.H., 1976. Estimate of static reservoir temperature during drilling operation, in *Summaries, Second Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, December 1-3, 1976, Stanford, Stanford University, pp. 136-142.
- Nyberg, O., Lindberg, P.A., Lien, K., and Smistad, J.K., 1978. Mineral composition, an aid in classical log analysis used in Jurassic sandstone of the northern North Sea, paper M in SPWLA 19th Annual Logging Symposium, June 13-16, 1978, Proceedings. Houston, Soc. Prof. Well Logging Analysts.
- Poupon, A., Clavier, C., Dumanoir, J., Gaymand, R., and Misk, A., 1970. Log analysis of sand-shale sequences: a systematic approach. *Jour. Petroleum Tech.*, v. 22, pp. 867-881.
- Rudman, A.J., and Blakely, R.F., 1976. FORTRAN program of correlation of stratigraphic time series. Indiana Geological Survey, Department of Natural Resources. Geological Survey Occasional Paper 14.
- Sanyal, S.K., Marsden, S.S., Jr., and Ramey, H.J., Jr., 1972. The effect of temperature on electrical resistivity of porous media, paper I in SPWLA 13th Annual Logging Symposium, May 7-10, 1972, Proceedings. Houston, Soc. Prof. Well Logging Analysts.
- Watt, H.B., 1975. Epilogs, a complete analysis of complex and sandstone reservoirs. Dresser Atlas Tech. Memorandum, v. 6, no. 1.
- Waxman, M.H., and Thomas, E.C., 1974. Electrical conductivities in shaly sands: II, the temperature coefficient of electrical conductivity. *Jour. Petroleum Tech.*, v.xx, pp. 218-225.

ANÁLISIS DE REGISTROS GEOFÍSICOS DE POZOS DE CERRO PRIETO: ALGUNOS RESULTADOS Y PROBLEMAS

INTRODUCCION

La exploración y el desarrollo sistemático de los recursos geotérmicos de Cerro Prieto por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) han dado como resultado una vasta acumulación de datos. Estos datos proporcionan una oportunidad excepcional para estudiar un caso práctico de explotación de un sistema geotérmico. En 1975 se estableció una relación de trabajo entre la CFE y el Lawrence Berkeley Laboratory (LBL) para llevar a cabo dicho estudio, y LBL empezó a recopilar, en el mismo año, los datos disponibles sobre la geología, hidrogeología, geoquímica y demás características del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto.

Los datos de Cerro Prieto se encuentran en un archivo abierto, accesible a la comunidad geotérmica. Se preparó un informe documentando los datos recolectados hasta abril de 1977 (Lippmann, et al, 1977). En 1979 se publicará un informe actualizado.

Además de recopilar los datos de Cerro Prieto, LBL comenzó a analizar los mismos y desarrollar modelos geológicos, hidrogeológicos, geoquímicos, y numéricos del sistema geotérmico de Cerro Prieto. El análisis de los registros geofísicos de pozos constituyó una parte integral de este proyecto. Este trabajo presenta los esfuerzos de LBL para aplicar diversos métodos de interpretación a los registros de Cerro Prieto, para presentar el modelo geológico resultante, resumir los principales problemas de interpretación encontrados, y delinear la dirección general de los estudios futuros de interpretación de registros de pozos.

METODO DE INVESTIGACION

La utilidad de los registros geofísicos de pozos en estudios estratigráficos y estructurales se ha visto limitada por el alto costo y la gran cantidad de tiempo requerido por las técnicas de interpretación manual, y por la ecuación personal de quien interpreta los registros. Debido a que el análisis manual de los registros de pozos es una operación costosa que requiere mucho tiempo, muy pocos registros fueron analizados a fondo antes de que se aplicaran las computadoras al problema de interpretación. Se acostumbraba hacer un análisis superficial de todo el registro, identificando las zonas de interés y concentrando el análisis en dichas zonas.

Con el advenimiento de la computadora moderna de alta velocidad, fue posible para los geofísicos contar con nuevos métodos de almacenamiento, recuperación y manipulación de datos. Para el análisis de registros de pozos, la computadora sirve convenientemente para estudiar numerosos tipos de registros, ya sea individualmente o en combinación. Además, la computadora permite al analista utilizar en estudios estratigráficos y estructurales diversos métodos estadísticos.

Dado el volumen de datos, correspondientes a registros geofísicos de pozos de Cerro Prieto, por analizar, y las reconocidas ventajas de la interpretación de registros por computadora, se consideró necesario dicho tipo de análisis para agilizar el uso de los registros. Este tipo de análisis proporcionaría, además, una oportunidad de evaluar la utilidad de diversas técnicas de interpretación y métodos estadísticos por computadora para desarrollar modelos de un campo geotérmico.

predominado por líquido en explotación. La mayoría de estas técnicas y métodos fueron desarrollados para la exploración de petróleo y de gas.

La digitalización sistemática de algunos registros seleccionados se inició a fines de 1976 para permitir el análisis por computadora de los registros de pozos de Cerro Prieto. Los registros eran digitalizados, haciéndose además una copia se-
pia reproducible para cada uno, al recibirse de México. Siempre que fue posible, se obtuvo de la compañía que lleva a cabo los registros una copia de la cinta digital original, y se la transfirió directamente al archivo abierto de registros de pozos mantenido por LBL. Dicho procedimiento se continúa actualmente.

Los registros originales seleccionados para digitalización fueron elegidos para permitir la elaboración de dos secciones transversales perpendiculares a través del campo geotérmico (Figura 1). Antes de aplicar cualquier técnica de computadora se prepararon las secciones transversales con técnicas visuales de correlación. Posteriormente estas secciones fueron comparadas con secciones transversales construídas utilizando el programa de autocorrelación, COR4LOG (Rudman y Blakeley, 1976).

COR4LOG es un método de correlación cruzada para comparar series de tiempo. Con dos series de tiempo, o dos pares de series de tiempo, COR4LOG utiliza la correlación cruzada para determinar el desplazamiento relativo y el factor de estiramiento entre las series. La medida de similitud entre las series de tiempo puede expresarse como:

$$\phi_{XY}(S, \tau) = \frac{\sum_{i=1}^{L_1} X_i Y_{i+\tau} - L_1 \bar{X} \bar{Y}_\tau}{\left[\left(\sum_{i=1}^{L_1} X_i^2 - L_1 \bar{X}^2 \right) \left(\sum_{i=1}^{L_1} Y_{i+\tau}^2 - L_1 \bar{Y}_\tau^2 \right) \right]^{1/2}}$$

$$\bar{X} = \frac{1}{L_1} \sum_{i=1}^{L_1} X_i \quad \bar{Y}_\tau = \frac{1}{L_1} \sum_{i=1}^{L_1} Y_{i+\tau}$$

donde $\phi_{XY}(S, \tau)$ es una medida de la similitud entre las series de tiempo $X(t)$ de longitud L_1 e $Y(t)$ de longitud L_2 ; S es la cantidad que se estira una serie, y τ es la cantidad que se desplaza una serie. Si $\phi_{XY}(S, \tau) = 1$, X e Y ajustan perfectamente; si $\phi_{XY}(S, \tau) = 0$, no se correlacionan; y si $\phi_{XY}(S, \tau) = -1$, se correlacionan pero con fases opuestas.

En COR4LOG la serie de tiempo más larga se mantiene fija, conforme la serie más corta se mueve a lo largo de ella y se computa un $\phi_{XY}(S, \tau)$ en cada punto. Para permitir estiramiento entre las

series de tiempo, se interpolan en las series más cortas, a intervalos regulares, valores adicionales. Esta nueva serie se mueve entonces a lo largo de la serie que se ha mantenido fija, y se computa nuevamente $\phi_{XY}(S, \tau)$ en cada punto. La cantidad de estiramiento de una serie la define el operador, hasta un máximo igual a la relación entre las longitudes de las series de tiempo. La cantidad de estiramiento de cada paso también la define el operador. El procedimiento de estiramiento y de computación continúa hasta alcanzar el estiramiento máximo predeterminado. Los valores de estiramiento y de registro correspondientes al mayor valor calculado de $\phi_{XY}(S, \tau)$, indican la mejor correlación entre las series de tiempo. Una subrutina grafica las series de tiempo y traza líneas de unión entre las series para ilustrar los resultados de la correlación cruzada. La Figura 2 muestra una gráfica de correlación cruzada entre un intervalo de 183 m (1159 m a 1220 m) del pozo M-9 (registro 1) y un intervalo de 183 m (1098 m a 1218 m) del pozo M-10 (registro 2). Ambos son registros de potencial espontáneo (SP). La gráfica indica un coeficiente de correlación máximo de 0.675 para un desfase de 342 puntos (52 m) y un estiramiento de 1.7. La correlación de cuatro series, dos registros por pozo, sigue los pasos descritos anteriormente. El valor utilizado para elegir la mejor correlación entre los dos pozos es la suma de las dos funciones de correlación cruzada computadas entre registros de tipo idéntico.

Debido a las repetidas multiplicaciones y sumas involucradas en la correlación cruzada de las series de tiempo, el programa de autocorrelación simplifica la operación transformando las series del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Las series se correlacionan en el dominio de la frecuencia y se transforman por medio de una transformada de Fourier inversa, para dar la correlación cruzada deseada.

Como se mencionó, los resultados del programa de autocorrelación se utilizaron para corroborar las correlaciones determinadas por técnicas visuales. En algunos casos donde no fueron útiles las correlaciones por medio de técnicas visuales, se utilizaron exclusivamente los resultados del programa de autocorrelación. Utilizando los diversos métodos se delinearon importantes unidades litológicas en el campo geotérmico de Cerro Prieto, a profundidades mayores de 750 m.

La Figura 3 muestra las principales unidades litológicas que se delinearon utilizando técnicas visuales de correlación de registros geofísicos de pozos y el programa de autocorrelación COR4LOG. La figura muestra solamente los pozos periféricos del campo productor, y algunos pozos de exploración exteriores al mismo. La figura también sirve como modelo general del yacimiento geotérmico. El yacimiento está formado por una secuencia interestratificada de arenas y lutitas deltaicas de espesor variable. Estas arenas y lutitas, cubiertas por una sello de arcilitas y limolitas, puede dividirse en cuatro unidades litológicas principales correlacionando tres gruesos estratos de lutita a través del campo. Las unidades individuales se caracterizan en su parte superior por un mayor porcentaje de lutita y en su parte inferior por un mayor porcentaje de arena. El espesor de los es-

tratos arenosos individuales aumenta hacia la base de cada unidad.

Algunos pozos en la parte sudeste del campo penetraron una quinta unidad. Dicha unidad se caracteriza por un bajo contenido de arena y por tener estratos de resistividad relativamente alta. Se considera que su porosidad está controlada predominantemente por fracturas que permiten el ascenso de fluidos geotérmicos.

La correlación de las unidades entre los pozos ha permitido identificar diferentes magnitudes de desplazamiento descendente, hacia el este; 1) 420 m entre los pozos M-10 y M-53; 2) 310 m entre el M-6 y el M-9; 3) 50 m entre el M-7 y el M-3. Como resultado de estas correlaciones se postula que el campo está limitado por dos fallas normales de rumbo noroeste, una situada al este que pasa entre los pozos M-10 y M-53, y la otra al oeste, entre los pozos M-3 y M-7 y los pozos M-6 y M-9. La sedimentación ha sido contemporánea con las fallas, según lo demuestra el engrosamiento de las unidades litológicas hacia el este.

Además del estudio de los registros geofísicos de pozos, se hizo un estudio de diversos registros de temperatura disponibles para cada pozo. Se digitalizaron algunos registros seleccionados, y se compararon varios perfiles de distribución de temperatura con las secciones transversales estructurales, haciéndose evidente una influencia general de la estructura sobre las distribuciones de temperatura y fluidos en el yacimiento.

El ascenso de fluidos de altas temperaturas se centra al sudeste del campo, alrededor de la intersección de una falla que sirve de límite al sur y una falla que sirve de límite al este. Los fluidos se mueven verticalmente a lo largo de estas zonas de falla, hasta que encuentran zonas de fractura en la parte inferior del yacimiento de Cerro Prieto. Estas zonas de fractura permiten la migración horizontal y vertical de los fluidos hacia las partes central y noroeste del campo. La migración vertical de fluidos entre unidades litológicas importantes es controlada por fracturas en los estratos de lutita. Estas fracturas se abren y cierran como consecuencia de la actividad tectónica regional y de la precipitación química. Por lo tanto, la dirección del flujo del fluido en el yacimiento varía un poco con el tiempo. Al moverse los fluidos hacia la parte occidental del campo, éstos migran vertical y horizontalmente hacia arenas porosas.

Al oeste del campo, la recarga de agua fría a lo largo de la falla límite postulada y a través de los depósitos de aluvio subterráneos forma el límite térmico occidental del campo.

Al recibirse registros adicionales, cada pozo se incorporó al modelo del yacimiento. Los análisis se enfocaron en las unidades estructurales principales, y se hicieron intentos de subdividir las unidades principales en una escala progresivamente más detallada hasta poder correlacionar las unidades litológicas individuales y definir los diferentes cambios de facies, discordancias, fallas, zonas de mineralización y zonas estratigrá-

ficas. Siguiendo los procedimientos analíticos delineados por Poupon, et al. (1970), y Watt (1975), se desarrolló un programa para el análisis de registros de secuencias de lutita y arena en yacimientos de arenisca. Este programa arena-lutita consta de dos fases que utiliza los registros de "neutron porosity", "formation density porosity", y resistividad para evaluar las proporciones de lutita, limo y arena, y los valores de saturación de agua.

La primera fase del programa utiliza como datos de entrada los registros de "neutron porosity", "density porosity", y resistividad. Primero se superpone en una gráfica en función de profundidad los valores de "neutron porosity" y "density porosity" y sus diferencias. La Figura 4 ilustra el comienzo del análisis del pozo M-29 con el programa de arena-lutita para el intervalo 3446'-3546'. Esto es seguido por una gráfica de "neutron porosity" versus "density porosity" de la lutita (Figura 5). La resistividad de la lutita se define a partir de una gráfica de resistividad versus "neutron porosity" menos "density porosity" (Figura 6).

El propósito de estas gráficas de la primera fase es definir las propiedades de la lutita en el intervalo de interés. Los valores de resistividad, de densidad, y de neutrones correspondientes al punto de lutita se utilizan como datos de entrada para la segunda fase del programa junto con un valor de la resistividad del agua de la formación.

La segunda fase del programa analítico de arena-lutita computa para el intervalo de interés las proporciones de arena, limo y lutita y los valores de saturación de agua. La proporción de cuarzo se divide entre arena y limo por medio de un modelo conceptual que fija en una escala semi-logarítmica todo el cuarzo en la línea cuarzo-lutita como 100% de limo, y puntos intermedios como mezclas de arena y limo. Las soluciones para porosidad y proporciones de lutita se introducen en la ecuación de Schlumberger de saturación de agua para lutitas laminadas, y se computa el valor de saturación de agua.

PROBLEMAS SURGIDOS EN EL ANALISIS

La Figura 7 ilustra los resultados del programa arena-lutita. La gráfica superior ilustra el resultado del cómputo de saturación de agua, y la inferior la distribución computada de arena, limo y lutita en el intervalo de interés. Los resultados del cómputo de saturación de agua fueron sorprendentes. Se había supuesto que los valores de saturación en este intervalo debían estar cerca del 100%. El promedio computado fue entre 70% y 80%, lo que indujo a pensar que el programa podría estar calculando incorrectamente los valores de saturación de agua. Una posible causa de la computación de menores valores de saturación podría ser la presencia de diversos tipos de gas. Los análisis geoquímicos han indicado la presencia de gases no detectados en los pozos adyacentes al M-29. Surgió un nuevo motivo de preocupación acerca de la precisión del programa de arena-lutita cuando se intentó corroborar la interpretación litológica, correspondiente al intervalo de inte-

rés derivada de los registros, con las columnas litológicas preparadas a partir de los recortes de la perforación, o con una interpretación litológica de los registros de potencial espontáneo (SP).

Bajo el estímulo de éstas y otras preocupaciones acerca de la precisión de la interpretación, se consideraron diversos problemas que podrían afectar la confianza que se podría tener en cualquier interpretación cuantitativa de registros geofísicos de pozos del campo geotérmico de Cerro Prieto. Estos problemas se dividieron en dos categorías: influencias asociadas con las operaciones de perforación de pozos, e influencias asociadas con la litología y mineralogía particulares del campo geotérmico de Cerro Prieto.

Influencias Asociadas con la Perforación de Pozos

Los siguientes problemas fueron identificados:

1. Historia de circulación de lodo. Se requiere conocer la temperatura de la formación para establecer en forma precisa la resistividad del agua de la formación. Para determinar la temperatura de la formación, debe determinarse el cambio de temperatura causado por el lodo que circula durante las operaciones de perforación. Además, en base a la historia de circulación de lodo puede calcularse el radio de influencia del efecto de enfriamiento y graficarse un perfil de distribución de temperatura para cada corrida de registro. Este perfil se grafica después contra la profundidad de investigación para cada instrumento, especialmente los instrumentos de resistividad, para indicar el rango de posibles temperaturas que influyen sobre el instrumento.

2. Impacto de las operaciones de enfriamiento realizadas antes de las corridas de registro. En Cerro Prieto las perforaciones deben ser enfriadas con hielo inmediatamente antes de las corridas para poder correr cualquier tipo de registro en el pozo. El uso del hielo crea gradientes térmicos extremos entre el agujero y la formación circundante. Es necesario conocer dicho efecto para poder comparar con precisión las propiedades de la formación derivadas de instrumentos de investigación para profundidades pequeñas con las derivadas de los instrumentos para gran profundidad.

3. Tiempo total de registro. El efecto del enfriamiento de la perforación es de corta duración. Una vez que se interrumpe el enfriamiento la formación sufre un rebote térmico y empieza a calentar al agujero de perforación. La secuencia en que se corren los registros puede tener un marcado efecto en el valor de los datos obtenidos.

4. Tasa de rebote térmico del agujero perforado. La velocidad a la que el agujero sufre el rebote después del enfriamiento es función de la conductancia térmica de la formación. Algunos investigadores han sugerido que se use la curva de rebote térmico para derivar una temperatura de formación estática utilizando una "curva de Horner" (Edwards, et al., 1962; Messer, 1976; Dowdle and Cobb, 1975).

5. Influencia acumulativa de varias corridas de registro. La influencia sobre los registros de pozos que más tarde fueron corridas a mayores profundidades es una acumulación del impacto térmico de tiempos de circulación de lodo y corridas de registro previos. Para poder analizar con precisión estas zonas más profundas es importante conocer exactamente las historias previas de circulación de lodo y de registros.

Influencias Asociadas con Cerro Prieto

Se identificaron los siguientes problemas relacionados con la litología y mineralogía particulares de Cerro Prieto:

1. La conductividad eléctrica de las arenas lutíticas varía en función de la temperatura. El trabajo de varios investigadores indica que la conductividad eléctrica y los factores de formación de una arena lutítica dependen de la temperatura y volumen de lutita (Kern et al, 1977; Warman y Thomas, 1974; Brannan and Von Goben, 1973; Sanyal, et al, 1972). La falta de datos sobre temperatura y de muestras litológicas adecuadamente recolectadas para análisis de volumen de lutita resulta en en cálculos poco confiables del factor de formación y de la resistividad de formación.

2. El estado redox de la formación afecta la curva de potencial espontáneo (SP). Las derivas de la línea base para el potencial espontáneo debidas a cambios en el estado redox de la formación reducen la confiabilidad de los cálculos basados en el potencial espontáneo.

3. Los minerales máficos y radioactivos influyen sobre la evaluación de la porosidad. Los análisis de arena-lutita típicamente dieron valores de porosidad menores que lo esperado. Otros investigadores han notado resultados similares de sus análisis, y atribuyen la variabilidad a la influencia del feldespató potásico y varios minerales máficos (Nyberg, et al, 1978). Si no se considera la composición mineral de la formación pueden interpretarse erróneamente los registros.

4. Valores anómalos de resistividad debidos a minerales máficos conductivos depositados en un sistema hidrotermal. Su concentración y distribución pueden afectar la resistividad de la formación.

ALGO DE ESPERANZA PARA EL FUTURO

En investigaciones respaldadas por el estudio cooperativo de Cerro Prieto se está progresando en la resolución de algunos de los problemas mencionados. En la Universidad de California, Riverside, se están reexaminando algunos recortes de perforación utilizando microscopios binoculares, secciones delgadas y análisis de difracción de rayos X. Estos estudios podrán ayudar a resolver algunas de las discrepancias entre el análisis de registros de arena-lutita y las columnas litológicas.

Para ayudar a resolver algunos de los problemas importantes delineados anteriormente, se proponen los siguientes cuatro estudios:

1. Calibrar el impacto térmico de las operaciones de perforación sobre el pozo.
2. Calcular el radio de enfriamiento alrededor del agujero y el perfil de temperatura para cada corrida de registro.
3. Recolectar núcleos del pozo utilizado en los dos estudios anteriores para efectuar detallados análisis petrofísicos, litológicos y mineralógicos.
4. Examinar los registros de potencial espontáneo (SP), corroborados por estudios petrológicos y mineralógicos, para evaluar los cambios en el estado redox.

El análisis de los registros geofísicos de pozos de Cerro Prieto puede continuar sin el beneficio de estos estudios. Sin embargo, la utilidad de dichos análisis será dudosa, a menos que se inicie un programa para determinar como afectan los problemas mencionados anteriormente el análisis de los registros de Cerro Prieto.

Títulos de Figuras

Figura 1. Mapa de localización de los pozos de exploración y desarrollo; perfiles A-A' y B-B'.

Figura 2. Gráfica de la correlación de registros de potencial espontáneo (SP) entre los pozos M-9 y M-10, computada con el programa de autocorrelación.

Figura 3. Unidades litológicas principales delineadas por medio de correlaciones de registros geofísicos de pozos.

Figura 4. Gráfica en función de profundidad de los valores de "neutron porosity", "density porosity", y sus diferencias.

Figura 5. "Neutron porosity" versus "density porosity"

Figura 6. Resistividad versus la diferencia entre "neutron porosity" y "density porosity".

Figura 7. Resultado del programa arena-lutita indicando la saturación de agua y la litología interpretada.