

GENERAL OVERVIEW OF GEOPHYSICAL STUDIES AT CERRO PRIETO

N. E. Goldstein
Lawrence Berkeley Laboratory, University of California
Berkeley, California, USA

A. Razo M.
Comisión Federal de Electricidad, México, D.F., México

A tectonically active region of the earth's crust having scientific bearing on plate tectonic theory, the Salton Trough has been under study by geophysicists for many years (Kovach et al., 1962; Biehler, et al., 1964). Interest in the Mexicali Valley portion of the trough and in Cerro Prieto for geothermal energy development, began about 20 years ago (Reed, 1976).

THE CFE PROGRAM

The earliest work conducted by CFE and others mainly consisted of regional seismicity, aeromagnetic and gravity surveys. Little detail geophysics was done, but as early as 1962, CFE commissioned Geólogos Consultores Asociados (GEOCA) to conduct five lines of seismic refraction over the Cerro Prieto area. This survey may be one of the first of its type to be used in geothermal exploration, and some interpreted results are discussed by Ernest Majer (these proceedings).

Although the first indications of a commercial geothermal reservoir were obtained by means of drilling in 1964 (Noble et al., 1977), a more thorough examination of the area, using geophysical techniques, did not begin until recently. This work was prompted by the realization that the reservoir potential, size and geological characteristics were not understood. The first significant electrical exploration survey was made by CFE in 1973-75, when 1330 Schlumberger soundings were made over an area of 1600 km². Results reported by Garcia (1976) showed a large resistivity low, covering a 70 km² area, encompassing the field. The depth of exploration achieved by the survey was limited, and we see in retrospect that the resistivity anomaly was due to highly conductive alluvium and sediments at or near the surface. The cause of the conductive zone, which corresponds closely with the thermal manifestations at surface, is believed to be seepage of ascending saline fluids from depth. Nevertheless, the electrical survey can be considered a technical success in terms of locating the general reservoir area. However, we also now know that the conductive surficial area and the productive reservoir at depth are offset somewhat.

Current geophysical studies at Cerro Prieto are listed in Table 1. Encouraged by the first electrical survey, CFE recently completed 184

Table 1. Current geophysical activities at Cerro Prieto.

Study	Institution
Interpretation of Existing Data	CFE, LBL
Passive Seismic Monitoring	LBL, CICESE
Reflection Seismology	CFE
Electrical Resistivity	
Schlumberger Soundings	CFE
Dipole-Dipole	LBL
Magnetotellurics	LBL
Self Potential	LBL, CFE
Gravity	
Reconnaissance	CFE
Precision	LBL

additional Schlumberger resistivity soundings over a 500-km² area. Detailed soundings were made over the field for geological information; soundings along more widely spaced lines were made over the surrounding areas for exploration purposes. By using a more powerful transmitter than in the earlier work, CFE increased maximum current electrode separation from 4000 to 10,000 m and the depth of exploration was increased proportionately. Gravity and ground magnetic surveys were also made along the resistivity lines, providing more information than previously available. Approximately, 156 line kilometers were surveyed along five long lines, spaced 8 to 10 km apart. Interpretations show horst-like structures associated with both the Cerro Prieto and Imperial faults (Razo and Fonseca, 1978). Results and the interpretation of the recent CFE electrical surveys and the correlation to gravity structures are presented by Antonio Razo (these proceedings). The regional electrical survey shows evidence for a concealed target area 10 km southeast of the field (Razo and Arellano, 1978). CFE now has evidence for three additional geothermal target areas outside the Cerro Prieto field: Tule Check northwest of Cerro Prieto, Cerro Prieto South, and Mesa de Andrade.

Other recent geophysical activities have been in seismology. Sponsored by the Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), a seven-station seismic network has been operated near Cerro Prieto (Reyes, 1977) by Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE). Locations of regional earthquakes and the level of regional seismicity were determined. Earthquakes were recorded originating from along the Imperial and Cerro Prieto fault systems and from a possible transform fault linking the two major northwest-southeast fault systems. The Cerro Prieto field lies at the intersection of the Cerro Prieto fault system and the transform fault. Alfonso Reyes describes the CICESE study and the results (these proceedings).

Three days ago the first of several planned seismic reflection lines was completed by Geología y Minería S.A. (GYMSA) for CFE. Sweep-frequency mechanical vibrator sources were used. Results from Line D (10.4-km long) crossing the production area are displayed in the lobby of this conference room. Although no interpretation is yet available, the data seem to show evidence for faulting and a loss of reflections from within the production region.

Until now, temperature-gradient and heat-flow surveys have not been an important part of the CFW exploration program. This has been due to the abundance of surface manifestations and the success of deep exploratory and development drilling. However, because the scope of exploration is being broadened, CFE is now planning to conduct shallow temperature measurements in 3-m-deep auger holes, 250 m apart along the established geophysical survey lines. Approximately 340 such measurements will be made. In addition, temperature gradient studies in deeper holes of 100-150 m are also planned.

THE LBL PROGRAM

The LBL geophysical field work began early this year to assist with reservoir delineation and characterization, and to provide baseline data against which future studies could be compared. Although geophysical exploration techniques were used, exploration was not the primary objective of the work. The techniques chosen were those previously used by LBL/University of California, Berkeley (UCB) in investigations elsewhere, and which we believe would provide useful information on the reservoir.

Electrical Resistivity Surveys

Electrical resistivity surveys, consisting of dipole-dipole dc resistivity and magnetotelluric methods, were used to determine how well the reservoir or controlling geologic structures could be defined. Permanent electrodes were emplaced so that repeat measurements can be made in the future to detect resistivity changes caused by changing reservoir conditions. Computer modeling was done to interpret observed data and determine the accuracy needed to resolve changes in reservoir bulk resistivity. Because the electri-

cal basement is difficult to resolve beneath the thick section of conductive sediments, magnetotelluric studies were conducted to provide supplementary deep structural information.

The geophysicists, and I hope others here today, will recognize and appreciate the amount of detail extracted from the dc resistivity data. These efforts, described by Michael Wilt (these proceedings) were difficult and time-consuming. Interpretation to this degree is seldom done outside research organizations. However, we wish to impress upon geothermal developers that attention to detail can be extremely important. The extra costs required to assure good data quality and proper data interpretation are justifiable when complete drill-hole information is not available. One of the key aspects of the resistivity work has been to demonstrate that the dipole-dipole method can resolve a subtle increase in resistivity associated with the reservoir area. This feature, undetectable by means of the Schlumberger resistivity array, can be correlated with gravity and well-log resistivity results.

The magnetotelluric (MT) results discussed by Thomas Gamble, were obtained by the reference magnetometer technique. This is a new approach to MT data acquisition, which Gamble developed as a graduate student at UCB (Gamble, et al., 1978). This technique differs from conventional MT in that a second magnetometer at a remote site is operated simultaneously with the local magnetometer. Earth impedances are determined using the remote data to eliminate uncorrelated noise arising from the electronics, man-made sources, or digitization and data processing. Although his interpretation is preliminary, the data quality is extremely good despite the proximity of the stations to sources of electromagnetic noise. Two-dimensional modeling generally agrees with other resistivity results.

Self-potential surveys were performed because they are easy to conduct and often yield provocative and valuable results (Corwin and Hoover, 1978).

Robert Corwin's findings, discussed in these proceedings are a "text-book" example of the self potential (SP) method for geothermal exploration and reservoir delineation. Encouraged by the preliminary results, CFE has begun using self potential for geothermal exploration outside the known field. SP measurements made northwest of Cerro Prieto in the Tule Check area are discussed by Sergio Díaz (these proceedings).

Passive Seismic Surveys

Passive seismic surveys were conducted in two phases. First a microearthquake study was conducted to establish the level and nature of seismicity within the production zone and for comparison with regional values. Sometimes used in the exploration phase to map faults, microearthquake survey results may be useful in detecting changes in reservoir conditions such as temperature, pressure, fluid saturation and subsidence.

In a second phase of the work, wave propagation studies were made. Propagation characteristics, such as V_p , V_s , Poisson's ratio and amplitude attenuations, were determined within the reservoir area and compared with values outside the reservoir boundaries. These characteristics, which were derived from recorded regional earthquake signals, help to define the field boundaries. The encouraging results obtained at Cerro Prieto are presented by Ernest Majer.

Precision Gravity Surveys

Precision gravity surveys, performed at regular intervals in conjunction with first-order leveling, have been used at The Geysers (Isherwood, 1977) and Wairakei (Hunt, 1970). Used also with electrical resistivity and seismic propagation characteristics surveys, precision gravity techniques could be exceptionally promising for monitoring changes in reservoir conditions. These changes would include

- (a) densification due to changes in temperature-dependent water-rock chemical reactions; and
- (b) formation of a steam zone due to lowered pressure or fluid withdrawal without compensating recharge.

Roswitha Grannell describes the gravity work at the 55 monuments installed in and around the field by CFE for this purpose (these proceedings). Dirección General de Estudios del Territorio Nacional, México (DETENAL) has conducted the first-order leveling surveys around the area, and CFE has tied gravity monuments into the network. A simple Bouguer gravity map, uncorrected for terrain effects, is shown.

REFERENCES

- Biehler, S., Kovach, R.L. and Allen, C. R., 1964. Geophysical framework of the northern end of the Gulf of California structural province, in: Van Andel, T., and Shor, G., eds., Marine geol. of Gulf of California. Am. Assoc. of Petrol. Geol. Mem. 3, pp. 126-296.
- Corwin, R. F. and Hoover, D. B., 1978. Self potential method in geothermal exploration. Berkeley, Lawrence Berkeley Lab., LBL-7075.
- Gamble, T. D., Goubau W. M. and Clarke, J., 1978. Magnetotellurics with a remote magnetic reference, Berkeley, Lawrence Berkeley Lab., LBL-7032.
- García D., S., 1976. Estudio geoelectrico de la zona geotermica de Cerro Prieto, Baja California, Mexico, in Proceedings, second U. N. symposium on the development and use of geothermal resources, v. 2, pp. 1003-1011.
- Hunt, T. M., 1970. Net mass loss from the Wairakei geothermal field, New Zealand, in Proceedings, U. N. symposium on the development and utilization of geothermal resources, Pisa. Geothermics, Spec. Iss. 2, v. 2, part 1, pp. 487-491.
- Isherwood, W. F., 1977. Reservoir depletion at The Geysers, California. Geoth. Res. Council, Transaction, v. 1, p. 149.
- Kovach, R. L., Allen, C. R., and Press, F., 1962. Geophysical investigations in the Colorado delta region. J. Geophys. Res., v. 67, pp. 2845-2871.
- Noble, J. E., Mañon M., A., Lippmann, M. J., and Witherspoon, P. A., 1977. A study of the structural control of fluid flow within the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico. 52nd Annual Meeting Soc. of Pet. Engr. of AIME, Denver, Colorado (SPE-6763).
- Razo M., A., and Arellano G., F., 1968. Prospección eléctrica de la porción norte del Valle de Mexicali y campo geotérmico de Cerro Prieto, Baja California. CFE Report 6-78, Subgerencia de Ingeniería Básica, Brigada de Estudios del Eje Néovolcánico.
- Razo M., A., and Fonseca L., H., 1978. Prospección gravimétrica y magnetométrica en el Valle de Mexicali, B. C. CFE Report 5-78, Subgerencia de Ingeniería Básica, Brigada de Estudios del Eje Néovolcánico.
- Reed, M., 1976. Geology and hydrothermal metamorphism in Cerro Prieto, in Proceedings, second U.N. symposium on the development and use of geothermal resources, v. 1, pp. 539-547.
- Reyes Z., C. A., 1977. Primer informe preliminar del estudio de microsismicidad del sistema de fallas transformadas Imperial--Cerro Prieto. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Report IIE/FE G3, Ensenada, Baja California, Mexico.

PANORAMA GENERAL DE ESTUDIOS GEOFISICOS EN CERRO PRIETO

La Depresión de Saltón, como región tectónicamente activa de la corteza terrestre relacionada científicamente con la teoría de tectónica de placas, ha sido estudiada por geofísicos durante muchos años (Kovach y otros, 1962; Biehler y otros, 1964). Hace aproximadamente veinte años surgió el interés en la parte de la depresión correspondiente al Valle de Mexicali y a Cerro Prieto, para el desarrollo de energía geotérmica (Reed, 1976).

EL PROGRAMA DE CFE

Los primeros trabajos llevados a cabo por CFE y otros, eran principalmente del tipo de reconocimiento; sismicidad regional, levantamientos aeromagnéticos y de gravedad. Al comienzo pocos trabajos de geofísica de detalle fueron realizados, pero en 1962 CFE contrató a Geólogos Consultores Asociados (GEOCA) para completar cinco líneas de refracción sísmica en el área de Cerro Prieto. Este estudio podría ser uno de los primeros levantamientos de este tipo aplicados a la exploración geotérmica. La interpretación de algunos de los resultados de este trabajo será presentada por Ernest Majer (en estas actas).

Aunque las primeras indicaciones de un yacimiento geotérmico de interés comercial se obtuvieron por medio de perforaciones llevadas a cabo en 1964 (Noble y otros, 1977), sólo recientemente se iniciaron estudios detallados del área utilizando técnicas geofísicas. Estos trabajos fueron impulsados al comprenderse que no se conocía el potencial del yacimiento, su tamaño, ni sus características geológicas. El primer levantamiento de exploración eléctrica de importancia fue llevado a cabo por CFE en 1973-1975, cuando se realizaron 1330 sondeos Schlumberger sobre un área de 1600 km². Los resultados presentados por García (1976) mostraron un gran bajo de resistividad, que cubría un área de 70 km², y abarcaba el campo. La profundidad de exploración lograda por el levantamiento fue limitada y en retrospectiva vemos que la anomalía de resistividad se debía a sedimentos y aluvio altamente conductivo en o cerca de la superficie. Se cree que la causa de la zona conductiva, que coincide con las manifestaciones termales en la superficie, es la percolación ascendente de fluidos salinos profundos. No obstante, el estudio eléctrico puede considerarse como un éxito desde el punto de vista técnico en lo que respecta a la localización del área general del yacimiento. Sin embargo, ahora también sabemos que el área conductiva superficial y el yacimiento productivo profundo están algo desplazados entre sí.

En la Tabla 1 se enumeran los estudios geofísicos que se están llevando a cabo actualmente en Cerro Prieto. Alentada por el primer levantamiento eléctrico, CFE recientemente completó 184 sondeos adicionales de resistividad Schlumberger cubriendo un área de 500 km². En el campo se hicieron sondeos de detalle para obtener información geológica y en áreas circundantes con propó-

Tabla 1: Actividades Geofísicas Actuales en Cerro Prieto.

Estudio	Organización*
Interpretación de Datos Existentes	CFE, LBL
Sísmica Pasiva	LBL, CICESE
Sísmica de Reflexión	CFE
Resistividad Eléctrica	
Sondeos Schlumberger	CFE
Dipolo-Dipolo	LBL
Magnetotelúrica	LBL
Potencial Natural	LBL, CFE
Gravimetría	
De Reconocimiento	CFE
De Precisión	LBL

sitos de exploración, sondeos a lo largo de líneas más espaciadas. Utilizando un transmisor más potente que el empleado en los trabajos anteriores, CFE aumentó el espaciado máximo entre electrodos de corriente de 4000 m a 10,000 m, aumentando proporcionalmente la profundidad de exploración. También se hicieron levantamientos magnéticos y de gravedad a lo largo de las líneas de resistividad, lo que proporcionó información adicional. Se hicieron levantamientos a lo largo de cinco líneas (longitud total ~ 156 km), con una separación de 8 a 10 km entre ellas. Las interpretaciones muestran estructuras de tipo horst asociadas tanto con la falla de Cerro Prieto como con la de Imperial (Razo y Fonseca, 1978). Los resultados y la interpretación de los recientes levantamientos eléctricos de CFE, y la correlación con las estructuras determinadas por gravimetría son presentados por Antonio Razo (estas actas). El levantamiento eléctrico regional muestra evidencias de un área de interés 10 km al sureste del campo (Razo y Arellano, 1978). CFE tiene ahora evidencias de tres potenciales áreas geotérmicas fuera del campo de Cerro Prieto: Tule Check, al noroeste de Cerro Prieto, Cerro Prieto Sur, y Mesa de Andrade.

Otra actividad geofísica reciente ha sido sismología. El Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), patrocinado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), ha estado operando una red sísmológica de siete estaciones en la vecindad de Cerro Prieto (Reyes, 1977). Se determinaron la localización de sismos regionales, y el nivel de sismicidad regional. Se registraron temblores

originados a lo largo de los sistemas de fallas Imperial y Cerro Prieto, así como también en una posible falla transformada que une los dos principales sistemas de fallas de rumbo noroeste - sureste. El campo de Cerro Prieto se encuentra en la intersección del sistema de fallas de Cerro Prieto y la falla transformada. Alfonso Reyes describe el estudio y los resultados obtenidos por CICESE (ver Albores, et al., estas actas).

Hace tres días Geología y Minería S.A. (GYM-SA) completó la primera de varias líneas de reflexión sísmica programadas por CFE. Se utilizaron fuentes de vibración mecánicas con barrido en frecuencia. Los resultados de la línea D, de 10.4 km de largo, que atraviesa el área de producción, se están exhibiendo en la antesala de este salón de conferencias. Aunque aún no se ha hecho una interpretación, los datos parecen mostrar evidencia de fallas y una pérdida de reflexiones en la región de producción.

Hasta la fecha, los estudios de flujo de calor y de gradiente térmico no han sido parte importante del programa de exploración de CFE. Esto se ha debido a la abundancia de manifestaciones superficiales y al éxito de las perforaciones profundas de exploración y desarrollo. Sin embargo, como se está ampliando el alcance de la exploración, CFE está planeando medir temperaturas superficiales en pozos de 3 m de profundidad hechos con barrenos, a 250 m uno del otro, a lo largo de las líneas de levantamiento geofísico ya establecidas. Se harán aproximadamente 340 mediciones de este tipo. Además, se están programando estudios de gradiente térmico en pozos de 100 a 150 m de profundidad.

EL PROGRAMA DE LBL

El trabajo geofísico de campo correspondiente a LBL que se inició a principios de este año, fue diseñado para ayudar a delinear y a caracterizar el yacimiento, y para obtener datos de base que puedan compararse con resultados de estudios futuros. Aunque se utilizaron técnicas de exploración geofísica, la exploración, como tal, no ha sido el objetivo principal del trabajo. Las técnicas elegidas han sido las utilizadas anteriormente por LBL/Universidad de California, Berkeley, en estudios de otras áreas, y que creemos podrán proporcionar información útil sobre el yacimiento.

Estudios de Resistividad Eléctrica

Se emplearon levantamientos de resistividad de corriente continua dipolo-dipolo y métodos magnetotelúricos, para determinar que bien pueden definirse el yacimiento o las estructuras geológicas que lo controlan. Se colocaron electrodos permanentes para poder repetir las medidas en el futuro y así detectar cambios en la resistividad que pudieran ocurrir debido a cambios en las condiciones del yacimiento. Se prepararon modelos de computadora para interpretar los datos observados y para establecer la precisión requerida para determinar cambios en la resistividad global del yacimiento. Como el basamento definido desde el punto de vista eléctrico es difícil de resolver debajo del espeso paquete de sedimentos conductivos, se hicieron estudios magnetotelúricos para propor-

cionar información suplementaria sobre las estructuras profundas.

Los geofísicos, y espero que algunas otras personas presentes el día de hoy, reconocerán y apreciarán la cantidad de detalles extraídos de los datos de resistividad de corriente continua. Estos esfuerzos, descritos por Michael Wilt (estas actas), fueron grandes y requirieron mucho tiempo. Rara vez se interpretan los datos tan detalladamente, salvo en organizaciones de investigación. Sin embargo, deseamos insistir ante los que están a cargo del desarrollo de la geotermia que la atención al detalle puede ser sumamente importante, y que los costos adicionales requeridos para obtener datos de buena calidad, y su interpretación adecuada son necesarios y justificables cuando no existe información completa de perforaciones. Uno de los aspectos claves del trabajo de resistividad ha sido demostrar que el método dipolo-dipolo puede resolver un aumento sutil en la resistividad asociado con el área del yacimiento. Esta característica, no detectable por medio del arreglo de resistividad de Schlumberger, puede correlacionarse con los resultados de gravimetría y resistividad obtenida de registros de pozos.

Los resultados magnetotelúricos (MT) que son presentados por Thomas Gamble (estas actas) se obtuvieron por medio de la técnica de magnetómetro de referencia, un nuevo enfoque a la adquisición de datos MT desarrollado por el Dr. Gamble cuando era estudiante de postgrado en la Universidad de California, Berkeley (Gamble y otros, 1978). Esta técnica difiere de la MT convencional en que simultáneamente con el magnetómetro local, se opera un segundo magnetómetro en un punto remoto. Se determinan impedancias utilizando los datos remotos para eliminar ruido no correlacionado resultante de la electrónica, fuentes producidas por el hombre, o introducido a través de la digitalización y procesamiento de datos. Aunque su interpretación es preliminar la calidad de los datos es extremadamente buena a pesar de la proximidad de las estaciones a fuentes de ruido electromagnético. Por lo general los modelos bidimensionales están de acuerdo con otros resultados de resistividad.

Se utilizó el método de potencial natural porque es relativamente fácil de usar y porque frecuentemente los estudios han generado resultados valiosos y estimulantes (Corwin y Hoover, 1978). Los hallazgos de Robert Corwin, discutidos en estas actas, son como un ejemplo de un libro de texto del método de potencial natural para exploración y delineación de yacimientos geotérmicos. Alentada por los resultados preliminares, CFE ha comenzado a utilizar el potencial natural en la exploración geotérmica fuera del campo ya conocido. Las mediciones de potencial natural realizadas al noroeste de Cerro Prieto en el área de Tule Check son presentadas por Sergio Díaz (estas actas).

Estudios de Sísmica Pasiva

Estudios de sísmica pasiva se llevaron a cabo en dos fases. Primero se realizó un estudio de microsismos para determinar el nivel y tipo de sismicidad dentro del área bajo producción, y para fines de comparación con los valores regionales.

Utilizados algunas veces durante la fase exploratoria para hacer mapas de fallas, los resultados de estudios microsísmicos pueden ser aplicables a la detección de cambios en las condiciones del yacimiento, tales como cambios en la temperatura, presión, saturación de fluidos, y asentamiento del terreno.

En una segunda fase del trabajo se hicieron estudios de propagación de ondas. Se determinaron características de propagación, tales como V_p , V_s , coeficiente de Poisson y atenuaciones de amplitud en el área del yacimiento, y se compararon a los valores fuera de los límites del mismo. Estas características, derivadas de registros de sismos regionales ayudan a definir los límites del campo. Los alentadores resultados obtenidos en Cerro Prieto son presentados por Ernest Majer (estas actas).

Estudios Gravimétricos de Precisión

Se han utilizado estudios gravimétricos de precisión, llevados a cabo a intervalos regulares, en combinación con nivelaciones de primer orden en The Geysers (Isherwood, 1977) y Wairakei (Hunt

1970). Realizados también con estudios de resistividad eléctrica y características de propagación sísmica, la gravimetría de precisión podría ser una técnica excepcionalmente prometedora para registrar cambios en las condiciones del yacimiento, como ser:

- (a) Densificación debida a cambios en las reacciones químicas entre aguas y rocas, dependientes de la temperatura.
- (b) Formación de una zona de vapor debido a una reducción de presión o a la extracción de fluidos sin recarga que la compense.

Roswitha Grannell describe (estas actas) el trabajo de gravimetría realizado en 55 mojoneras instaladas con este propósito por CFE en el campo y sus alrededores. La Dirección General de Estudios del Territorio Nacional (DETENAL) ha llevado a cabo alrededor del área levantamientos de nivelación de primer orden, y CFE ha ligado las mojoneras del estudio de gravedad dentro de la red. Se presenta un mapa de gravedad Bouguer, no corregido por efectos del terreno.