

GEOLOGICAL INTERPRETATION OF SELF-POTENTIAL DATA FROM THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD

Robert F. Corwin
Engineering Geoscience
University of California
Berkeley, California 94720

David V. Fitterman
U. S. Geological Survey
Box 25046
Denver, Colorado 80225

ABSTRACT

A source mechanism based on concepts of irreversible thermodynamics and consisting of heat or fluid flow along a north-south trending zone of faulting is proposed for the self-potential anomaly measured over the Cerro Prieto geothermal reservoir. The source region is represented by a vertical plane of that separates regions of differing streaming potential or thermoelectric coupling coefficients. The coupling coefficient contrast could be caused by vertical offset of rock units along faults. The depth to the top of the source plane is about 1.3 km, its vertical extent is about 11 km, and its length along strike is about 10 km. Geological, geophysical, and mineralogical evidence support the existence of an important north-south geological trend roughly corresponding in location to the proposed self-potential source plane.

INTRODUCTION

The dipolar self-potential anomaly measured over the Cerro Prieto geothermal field (Corwin et al., 1979) may be caused by upward heat or fluid flow along a north-trending fault zone across which there is a change in thermoelectric or electrokinetic coupling coefficient. In this paper we present the results of an analytical study of the source region geometry for the Cerro Prieto anomaly and discuss the geological, mineralogical, and geophysical evidence for a zone of faulting corresponding to the inferred self-potential source region.

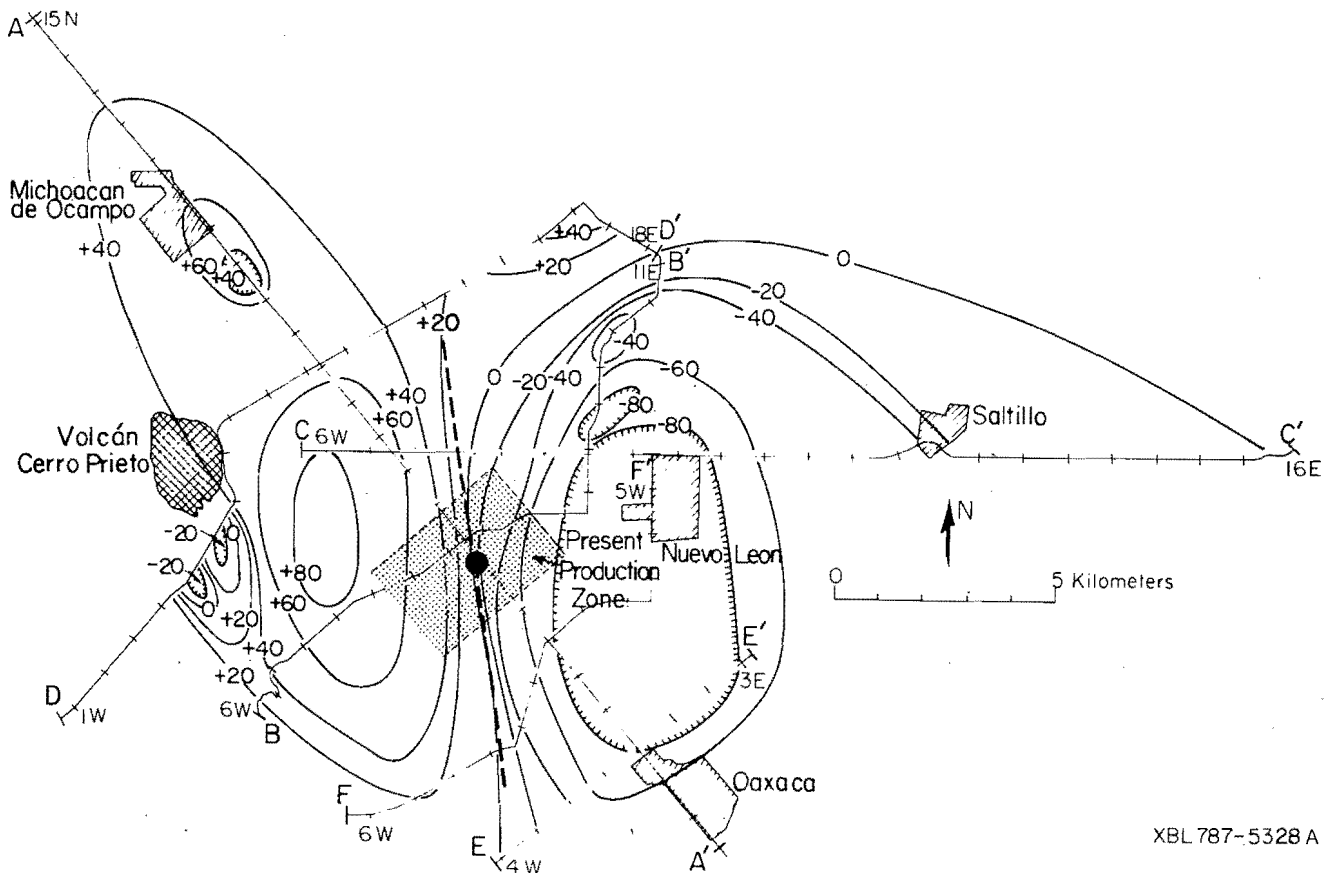
DISCUSSION

The field procedure and data analysis used to determine the self-potential anomaly at Cerro Prieto are given in Corwin et al. (1979). The relationship of the anomaly to the geography of the Cerro Prieto area is shown in Figure 1. The mechanism by which dipolar surface self-potential anomalies are generated by heat or fluid flow along a vertical fault that separates regions of differing thermoelectric or electrokinetic coupling (streaming potential) coefficients is discussed by Fitterman (1979). Briefly, the fault or fracture zone is approximated by a vertical plane of continuous, constant dipolar charge

which is maintained by the interaction of the heat or fluid flow with the coupling coefficient boundary. Given the depth and strike extent of the plane and the potential difference and conductivity contrast across the plane, the surface self-potential anomaly can be calculated. Using this approach along with a linear least-squares inversion technique, a source plane configuration giving a reasonable fit to the Cerro Prieto data was obtained (details of the inversion procedure are discussed in a paper by Fitterman and Corwin, 1980). The location of the source plane with respect to the geothermal field and the self-potential anomaly is shown by a dashed line in Figures 1 and 2. The top of the plane is at a depth of 1.3 ± 0.2 km (error estimates are one standard deviation) and its vertical extent is 11 ± 3 km. The strike length of the plane is 9.9 ± 0.4 km. The source intensity is -340 ± 40 mV, and the electrical conductivity on the east side of the plane is 80% of that to the west (the asymmetry of the anomaly could also be caused by a nonvertical dip angle of the source plane rather than a lateral conductivity contrast).

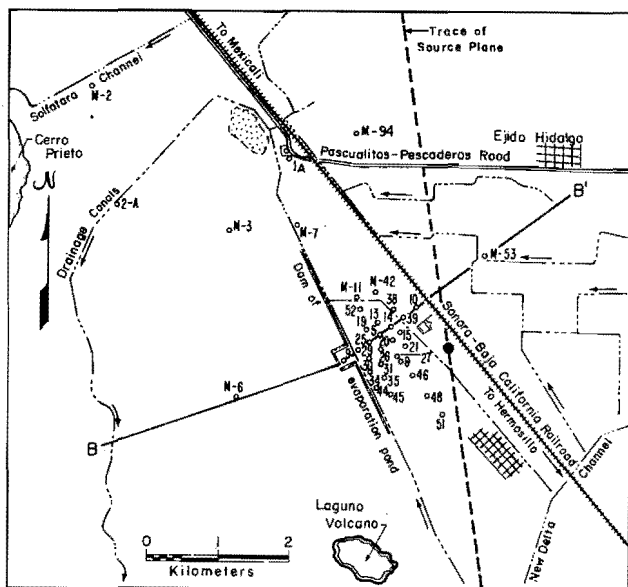
There appears to be considerable geological, mineralogical, and geophysical evidence for the existence of a north trending zone of faulting that corresponds to the inferred self-potential source plane. The depth to the top of the source plane, 1.3 ± 0.2 km, agrees well with the known depth of about 1 km to the top of the reservoir (Mañón et al. 1977). Wilt et al. (this volume) present electrical resistivity data showing a zone of high conductivity located between wells M-9 and M-53 (Fig. 2) and dipping to the east, under the trace of the source plane. Although the strike of this zone has not yet been determined, such a zone could be representative of extensive faulting. Magnetotelluric data given by Gamble et al. (this volume) also show evidence of a conductive zone in the same general area described above. Additional magnetotelluric data in the northern part of the field indicate that this conductive zone may run in a roughly northerly direction.

Vonder Haar and Puente Cruz (1979) used microseis-



XBL 787-5328 A

Figure 1. Self-potential contours in the Cerro Prieto area. Contour interval is 10 mV. The heavy dashed line represents the trace of the inferred self potential source plane. Lines labelled A-A' through F-F' are survey lines. ● = center of the source region.



XBL 776-1179 A

Figure 2. Geothermal wells and the trace of the self-potential source plane in the Cerro Prieto geothermal production zone. A geologic section along line B-B' is shown in Mañón et al. (1977) ● = center of the source region.

mic and well log data to infer a north-trending zone of faulting and fracturing that approximately coincides with the self-potential source plane in the central portion of the field, and de la Peña and Puente (1979) infer a major north-trending fault in about the same location. Studies of density logs by Lyons and van de Kamp (1980) indicate that contours to the depth below which shale densities exceed 2.4 (indicative of hydrothermal alteration) trend roughly north-south in the central part of the field. The same authors show a zone of generally north-northeast-trending faults in the same area, which are thought to have formed at about the same time as the onset of thermal activity and the induration of sediments by hydrothermal alteration. Contours to depths of several other mineralogical changes indicative of hydrothermal alteration shown by Elders et al. (1978; this volume) follow a pattern similar to the shale alteration described above. These patterns have been used in a preliminary study by Elders et al. (1980) to infer flow patterns of hydrothermal fluids that show a north-south trending thermal plume under the central part of the field, possibly indicative of a basement fault or fracture (Elders, 1980 personal commun.).

CONCLUSIONS

Based on this self-potential study and other geological, geophysical, and mineralogical evidence, we conclude that a major geological feature runs in a north-south direction through the center of the Cerro Prieto production zone. An interpretation consistent with self-potential field data and source theory is a zone faulting or fracturing that extends from a depth of about 1.3 km to about 13 km. The -340 mV dipolar source potential is generated by heat or fluid flow within the faulted region, and the coupling coefficient discontinuity across which the source potential is generated is provided by vertical offsets along faults that bring different rock materials in contact. (The coupling coefficient contrast could also be caused by alteration of minerals, or even by the elevated temperature alone, within the zone of the most intense hydrothermal circulation.)

Until measurements of coupling coefficients under in-situ conditions are made, we do not know whether the -340 mV source potential is reasonable for the geologic materials and flows in the Cerro Prieto reservoir.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported in part by the U. S. Geological Survey under contract 14-08-0001-16546 and in part by the U. S. Department of Energy, Division of Geothermal Energy, under contract W-7405-ENG-48 to the Lawrence Berkeley Laboratory, Earth Sciences Division. We thank W. A. Elders, N. E. Goldstein, S. Vonder Haar, and personnel of the Comisión Federal de Electricidad, for their advice and assistance.

REFERENCES CITED

- Corwin, R. F., Morrison, H. F., Díaz C., S., and Rodríguez B. J., 1979, Self-potential studies at the Cerro Prieto geothermal field, in *Proceedings, First Symposium on the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico*, September 1978: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7098, p. 204-210.
- de la Peña L. A., and Puente C. I., 1979, The geothermal field of Cerro Prieto, in Elders, W. A., ed., *Geology and geothermics of the Salton Trough*: Riverside, University of California, Inst. of Geophys. and Planetary Phys., Report UCR/IGPP-79/23, p. 20-35.
- Elders, W. A., Hoagland, J. R., Olson, E. R., McDowell, S. D., and Collier, P., 1978, A comprehensive study of samples from geothermal reservoirs: Riverside, Univ. of Calif., Inst. of Geophys. and Planetary Phys., Report UCR/IGPP-78-26.
- Elders, W. A., Hoagland, J. R., Vallette, J. N., Barker, C., and Collier, P., 1980, A comprehensive study of samples from geothermal reservoirs: petrology and geochemistry of subsurface and surface samples from the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico: Riverside, University of California (report in preparation).
- Fitterman, D. V., 1979, Calculations of self-potential anomalies near vertical contacts: *Geophysics*, v 44, p. 195-205.
- Fitterman, D. V., and Corwin, R. F., 1980, Inversion of self-potential data from the Cerro Prieto geothermal field, Mexico: *Geophysics*, in press.
- Gamble, T. D., Goubau, W. M., Goldstein, N. E., Miracky, R., Stark, M., and Clarke, J., 1980, Magnetotelluric studies at Cerro Prieto (this volume).
- Lyons, D. J., and van de Kamp, P. C., 1980, Subsurface geological and geophysical study of the Cerro Prieto geothermal field: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-10540 (in preparation).
- Mañón, A., Mazar, E., Jiménez, M., Sánchez, A., Fausto, J., and Zenizo, C., 1977, Extensive geochemical studies in the geothermal field of Cerro Prieto, Mexico: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory LBL-7019.
- Vonder Haar, S., and Puente Cruz, I., 1979, Hybrid transform faults and fault intersections in the southern Salton Trough geothermal area, Baja California, Mexico, in Elders, W. A., ed., *Geology and geothermics of the Salton Trough*: Riverside, University of California, Inst. of Geophys. and Planetary Phys., Report UCR/IGPP-79/23, Univ. of Calif., p. 95-100.
- Wilt, M. J., and Goldstein, N. E., 1980, Resistivity monitoring at Cerro Prieto (this volume).

INTERPRETACION DE LOS DATOS DE POTENCIAL ESPONTANEO DEL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO

RESUMEN

Se propone un mecanismo fuente que se base en conceptos de termodinámica irreversible y que consista en un flujo de fluido o calor a lo largo de una zona de fallas con dirección aproximada N-S, para la anomalía de potencial espontáneo medida sobre el yacimiento geotérmico de Cerro Prieto. Un plano vertical que separa las regiones de distinto potencial electrodinámico o distintos coeficientes de acoplamiento termoeléctrico representa la región fuente. El desplazamiento vertical de unidades litológicas a lo largo de las fallas puede causar el contraste en el coeficiente de acoplamiento. La profundidad hasta la parte superior del plano fuente es de aproximadamente 1.3 km, su extensión vertical de 11 km y su longitud a lo largo del rumbo de 10 km. Hay evidencia geológica, geofísica y mineralógica que sugiere la existencia de un importante rasgo geológico en dirección N-S cuya ubicación corresponde aproximadamente al plano fuente propuesto para el potencial espontáneo.

INTRODUCCION

La anomalía dipolar de potencial espontáneo medida sobre el campo geotérmico de Cerro Prieto (Corwin *et al.*, 1979) puede causarse por medio de una corriente ascendente de calor o fluido a lo largo de una zona de fallas de dirección N, a través de la cual existe un cambio en el coeficiente de acoplamiento termoeléctrico o electrodinámico. En este trabajo se presentan los resultados de un estudio analítico de la geometría de la región fuente para la anomalía de Cerro Prieto y se discute la evidencia geológica, mineralógica y geofísica para la zona de fallas correspondiente a la región fuente de potencial espontáneo propuesta.

ANALISIS

Los procedimientos de medición y análisis de datos que se utilizan para determinar la anomalía de autopotencial en Cerro Prieto se describen en Corwin *et al.* (1979). En la figura 1 se muestra la relación de la anomalía con la geografía del área de Cerro Prieto. Fitterman (1979) analiza el mecanismo por medio del cual se generan anomalías superficiales dipolares de potencial espontáneo causadas por corrientes de calor o fluido a lo largo de una falla vertical que separa regiones de diferentes coeficientes de acoplamiento termoeléctrico o electrodinámico (potencial espontáneo). Brevemente, la zona de fallas o fracturas se aproxima por un plano vertical de carga dipolar conti-

nua y constante que se mantiene por medio de la interacción del flujo de calor o de fluido con el límite de los coeficientes de acoplamiento. Dada la profundidad y la extensión del plano en la dirección del rumbo y la diferencia de potencial y contraste de conductividad a través del plano puede calcularse la anomalía de potencial espontáneo en la superficie. Al usar este enfoque y una técnica lineal de inversión por cuadrados mínimos se obtuvo una configuración del plano fuente que tiene una concordancia razonable con los datos de Cerro Prieto (los detalles del procedimiento de inversión se analizan en el trabajo de Fitterman y Corwin, 1980). La ubicación del plano fuente con respecto al campo geotérmico y la anomalía de potencial espontáneo se muestra en las figuras 1 y 2 con línea cortada. La parte superior del plano está a una profundidad de 1.3 ± 0.2 km (los errores estimados corresponden a una desviación estándar) y su extensión vertical es 11 ± 3 km. La longitud del plano en la dirección del rumbo es 9.9 ± 0.4 km. La intensidad de la fuente es -340 ± 40 mV y la conductividad eléctrica en el lado E del plano es 80% de aquella del lado O (la asimetría de la anomalía podría causarse también por medio de un ángulo no vertical con respecto al horizonte del plano fuente en lugar de por contraste en la conductividad lateral).

Parece haber una considerable evidencia geológica, mineralógica y geofísica de la existencia de una zona de fallas con dirección N que corresponde al plano fuente de potencial espontáneo propuesto. La profundidad hasta la parte superior del plano fuente, 1.3 ± 0.2 km, concuerda con la profundidad conocida de aproximadamente 1 km hasta la parte superior del yacimiento (Mañon *et al.*, 1977). Wilt *et al.* (este volumen) presentan datos de resistividad eléctrica que revelan una zona de alta conductividad localizada entre los pozos M-9 y M-53 (Fig. 2) que se inclina hacia el E, por debajo de la traza del plano fuente. Aunque el rumbo de esta zona no se determina aún, podría representar un extenso afallamiento. Datos magnetotélúricos presentados por Gamble *et al.* (este volumen) muestran también evidencia de una zona conductora en la misma área general arriba descrita. Datos magnetotélúricos adicionales correspondientes a la parte N del campo indican que esta zona conductora correría aproximadamente en dirección N.

Vonder Haar y Puente Cruz (1979) usaron datos microsísmicos y de registros de pozos para deducir una zona

de afallamiento y fracturas con dirección N que coincide aproximadamente con el plano fuente de potencial espontáneo en la porción central del campo, y de la Peña y Puente (1979) dedujeron una falla importante con dirección aproximada N en el mismo sitio, aproximadamente. Estudios de registros de densidad hechos por Lyons y Van de Kamp (1980) indican que los contornos hasta la profundidad bajo la cual las densidades de lutita exceden 2.4 (lo que indica alteración hidrotérmica) tienen una dirección aproximada N-S en la parte central del campo. Estos autores señalan, en la misma área, una zona de fallas en la dirección general N-NE. Se piensa que estas fallas se formaron simultáneamente con el comienzo de la actividad térmica y la induración de sedimentos por alteración hidrotérmica. Elders *et al.* (1978, este volumen) muestran que los contornos hasta las profundidades de otros varios cambios mineralógicos indicadores de alteración hidrotérmica presentan una configuración similar a la descrita más arriba para la alteración de las lutitas. Estas configuraciones se utilizan en un estudio preliminar por Elders *et al.*, (1980) para deducir configuraciones de corrientes de fluidos hidrotérmicos que presentan un penacho térmico de dirección N-S bajo la parte central del campo, indicando posiblemente fracturas en el basamento (Elders, Comunicación personal, 1980).

CONCLUSIONES

Basado en este estudio del potencial espontáneo y en otras evidencias geológicas, geofísicas y mineralógicas se concluye que un importante rasgo geológico de dirección aproximada N-S corre a través de la zona de producción de Cerro Prieto. La interpretación de que existe una zona de fallas o fracturas que se extiende desde una profundidad de 1.3 km hasta 13 km aproximadamente se adecua a los datos de potencial espontáneo y a la teoría de las fuentes. El potencial dipolar de la fuente de -340 mV se genera por medio de corrientes de calor o fluido dentro de la región

de fallas, y la discontinuidad del coeficiente de acoplamiento, a través de la cual se genera el potencial de la fuente, se debe a desplazamientos verticales a lo largo de las fallas que ponen en contacto distintos materiales rocosos. (El contraste de coeficientes de acoplamiento podría también causarse por alteración de minerales, o aun, sólo por la alta temperatura, dentro de la zona de circulación hidrotérmica más intensa.)

Hasta que se hagan mediciones de coeficientes de acoplamiento bajo las condiciones predominantes *in situ*, no se sabrá si el potencial de la fuente de -340 mV es razonable para los materiales geológicos y corrientes en el yacimiento de Cerro Prieto.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias a fondos proporcionados en parte por el U. S. Geological Survey bajo contrato 14-08-0001-16546 y en parte por el U. S. Department of Energy, Division of Geothermal Energy, bajo contrato W-7405-ENG-48 con el Lawrence Berkeley Laboratory, Earth Sciences Division. Se agradece a W. A. Elders, N. E. Goldstein, S. Vonder Haar y al personal de la Comisión Federal de Electricidad por sus consejos y ayuda.

TITULOS DE FIGURAS

- Figura 1. Contornos de potencial espontáneo en el área de Cerro Prieto. El intervalo entre contornos es de 10 mV. La línea gruesa cortada representa la traza del plano fuente de potencial espontáneo propuesto. Las líneas A-A' hasta F-F' son líneas del levantamiento.
● = centro de la región fuente.
- Figura 2. Pozos geotérmicos y traza del plano fuente de potencial espontáneo en la zona de producción geotérmica de Cerro Prieto. En Mañón *et al.* (1977) se muestra una sección geológica a lo largo de la línea B-B'.
● = centro de la región fuente.