

RESISTIVITY MONITORING AT CERRO PRIETO

Michael J. Wilt and Norman E. Goldstein
University of California
Lawrence Berkeley Laboratory
Berkeley, California 94720

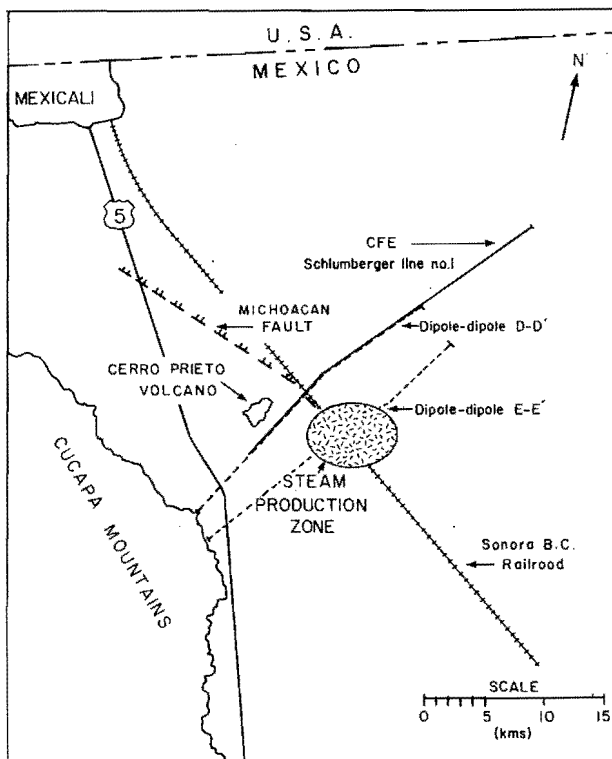
ABSTRACT

In 1978 Lawrence Berkeley Laboratory, in cooperation with Comisión Federal de Electricidad, began a program of dipole-dipole resistivity monitoring at the Cerro Prieto geothermal field. Dipole-dipole measurements were first made in 1978, then repeated in 1979: (a) to determine whether the field boundaries could be defined by surface resistivity measurements; and (b) to determine if changes in reservoir conditions due to production may be monitored by surface measurements.

In 1979 data accuracy was improved to where estimated measurement errors were less than 3%. In addition, data coverage on a line over the field was expanded by 40% for greater depth of investigation and more information on the newer, eastern part of the field. Resistivity modeling of the expanded 1979 profile indicates that the resistive body associated with the zone of production (Wilt et al., 1978) dips steeply eastward, and may underlie the eastern part of the field. The model also shows a thin steeply dipping conductor adjacent to the resistive body that may be associated with faulting and fluid movement. Model perturbation studies have shown that small changes associated with cold-water influx, fault zone migrations, and formation of a steam zone would all be detectable with precision dipole-dipole measurements. Telluric profile measurements taken along line E-E' were found to yield a significant amount of reconnaissance information but are unsuitable for monitoring purposes.

INTRODUCTION

In 1978 Lawrence Berkeley Laboratory, in cooperation with Comisión Federal de Electricidad, began a program of dipole-dipole resistivity studies at the Cerro Prieto geothermal field. For collecting geophysical data, two east-west survey lines were established; one (E-E') crossing the central part of the production area near the power plant, and the other (D-D') about 4 km north of the plant, passing immediately south of the Cerro Prieto volcano (Fig. 1). Dipole-dipole resistivity measurements were then conducted in 1978 and 1979. The utmost care was taken



XBL 788-1632

Figure 1. Project location map, LBL resistivity project.

to achieve the best accuracy obtainable with the available instrumentation.

The goals of this project are to construct a resistivity model of the Cerro Prieto region consistent with known geology, and to determine if changes in reservoir conditions due to production (e. g. formation of a vapor zone, changes in porosity at the periphery of the reservoir) may be monitored by means of accurate surface resistivity measurements.

Results of the 1978 survey were presented in an earlier paper (Wilt et al., 1979); a summary of the significant findings is given below.

1. The production region at Cerro Prieto is characterized by a resistivity high relative to the surrounding rocks. Average formation resistivities are 2.0 ohm-m or less, increasing to at least 4.0 ohm-m within the zone. Analyses of well logs and drill cuttings (Elders and Hoagland, 1979) suggest that the increase is primarily due to the formation of reduced porosity zones caused by hydrothermal metamorphism within the reservoir region.

2. Modeling studies showed that resistivity variations with time are theoretically detectable by means of surface dipole-dipole measurements. However, the degree of accuracy needed to observe such variations must be greater than 5%; a better accuracy than we could achieve at large electrode spacings in 1978.

PROGRESS IN 1979

In 1979 line E-E' was remeasured with 1-km dipoles but with significantly greater accuracy than in 1978, providing better modeling constraints and establishing a reliable baseline for future observations of resistivity changes. The LBL 25-kW motor generator was used as the power source in both years, but greater accuracy was achieved in 1979 because of superior receiver instrumentation, mechanical improvements to the power source, and the experience gained from the previous year. New signal-averaging receivers were used to average 10 cycles of the 40-sec-period square-wave pulse supplied to the ground by the transmitter. At each point of measurement a minimum of 70 cycles were averaged and the mean and standard deviations were computed. The 40-sec period was selected as the best compromise for speed of survey and avoidance of electromagnetic coupling effects. Improvements to the transmitter in 1979—namely a reconditioned engine, new cable, and lower contact resistance at electrodes—allowed us to inject up to 40 A compared with 15 to 25 A in 1978.

In 1979 dipole-dipole measurements were extended 4 km farther eastward and the maximum transmitter receiver separations were increased from $N = 6$ to $N = 8$, thereby yielding a greater depth of exploration. In addition telluric profile measurements were made along line E-E' to test the applicability of this relatively fast and inexpensive method for resolving subsurface structure.

Following data acquisition, the expanded and more accurate results were used to develop an improved two-dimensional resistivity cross-section for line E-E' (Figs. 2 and 3). New model perturbation studies were performed to identify points of maximum likely interest, such as points where reservoir changes might be most easily recognized, and to examine the magnitude of resistivity change for several possible reservoir changes. An analysis of measurement errors was done with the 1978 and 1979 data and the two sets were compared to see if (a) new measurements (1979) fall within the predicted errors and

(b) if data accuracy is sufficient to isolate any changes in reservoir conditions.

Telluric data taken in 1979 were analyzed, and errors were evaluated to determine if it is possible to use this method for resistivity monitoring.

DIPOLE-DIPOLE RESULTS

Dipole-dipole apparent resistivity data taken in 1979 and the accompanying two-dimensional resistivity model are shown in Figure 3. The agreement between calculated apparent resistivities and observed data is good. About 20 trial-and-error iterations were required, however, to reach the model shown, even though the initial model was the final one developed in 1978 (Figs. 2). In general, the 1978 and 1979 models are very similar, although in 1979 the dimension of the pseudosection was increased by 40%. Additional measurement points were needed to provide coverage over the newly discovered eastern part of the field, and to obtain information to greater depths than the 1.5 km obtained in the 1978 survey.

Analysis of the differences in calculated apparent resistivity between 1978 and 1979 data sets indicates that variations to as much as 25% exist between the two sets (Figs. 2 and 3). Most of this variation is probably due to inaccuracies in the 1978 data set since all deviations fall within the predicted scatter for those points (Will et al., 1979). Because of the large scatter, we made no attempt to interpret resistivity changes due to changing reservoir conditions. Standard error for the 1979 data is considerably lower than for 1978 data. However, errors for most data are less than 3% and for all data, less than 10%.

A comparison of the bottom section of Figures 2 and 3 show where the 1978 and 1979 resistivity models differ. The important differences include a redefinition of the resistive body within the production zone, a more accurate estimate of the resistivity of the deeper horizons, and some new information over the newer, eastern part of the field.

The newer data indicate that the resistive body, which we associate with the zone of intense hydrothermal alteration and the reservoir units, dips eastward by approximately 30 to 50 degrees, deepening in the region of new production east of the power plant; the dipole-dipole method is not, however, particularly sensitive to the dip of inclined bodies. The data also suggest that this zone is fairly extensive and exists as a flat-lying horizon in the eastern portion of the field. The western boundary of this unit lies about halfway between kilometers 9 and 10, which corresponds to a point about 0.5 km west of well M-9. The bottom of this zone cannot be accurately fixed because of the insensitivity of the model to changes at great depth. For the same reason

the position of the basement is not accurately determined; the data do suggest that the basement lies at least 3 and 4 km below the surface, respectively west and east of the power plant. The positions of the step faults shown in Figure 3 are poorly determined.

Adjacent to the resistive unit (Fig. 2) is thin eastward-dipping conductive body. This 1.5 ohm-m unit contrasts sharply with the 4.0 ohm-m body to the west and the 5.0 ohm-m body to the east. The body is approximately 1.5 km wide and dips eastward at between 30 and 50 degrees to a depth of between 2 and 2.5 km; east of this it appears to be flat lying. Because the dipping portion of this unit corresponds remarkably with the location of the planes of charge proposed by Corwin

(1979) on the basis of self-potential measurements, it possibly represents a zone of upward moving hot water that links the deeper eastern aquifers to the shallower production west of the power plant. If this assertion is correct, then changes associated with the deeper production in the east may be reflected in changes in the resistivity of this body. It would then be an excellent target for resistivity monitoring of changes in the newer production region.

Figure 3 also indicates that east of the power plant the rocks gradually become more resistive than the rocks west of the reservoir, by a factor of 5. These rocks are shown as a series of blocks dipping gently eastward to a depth of about 2 km. The major cause of the increase

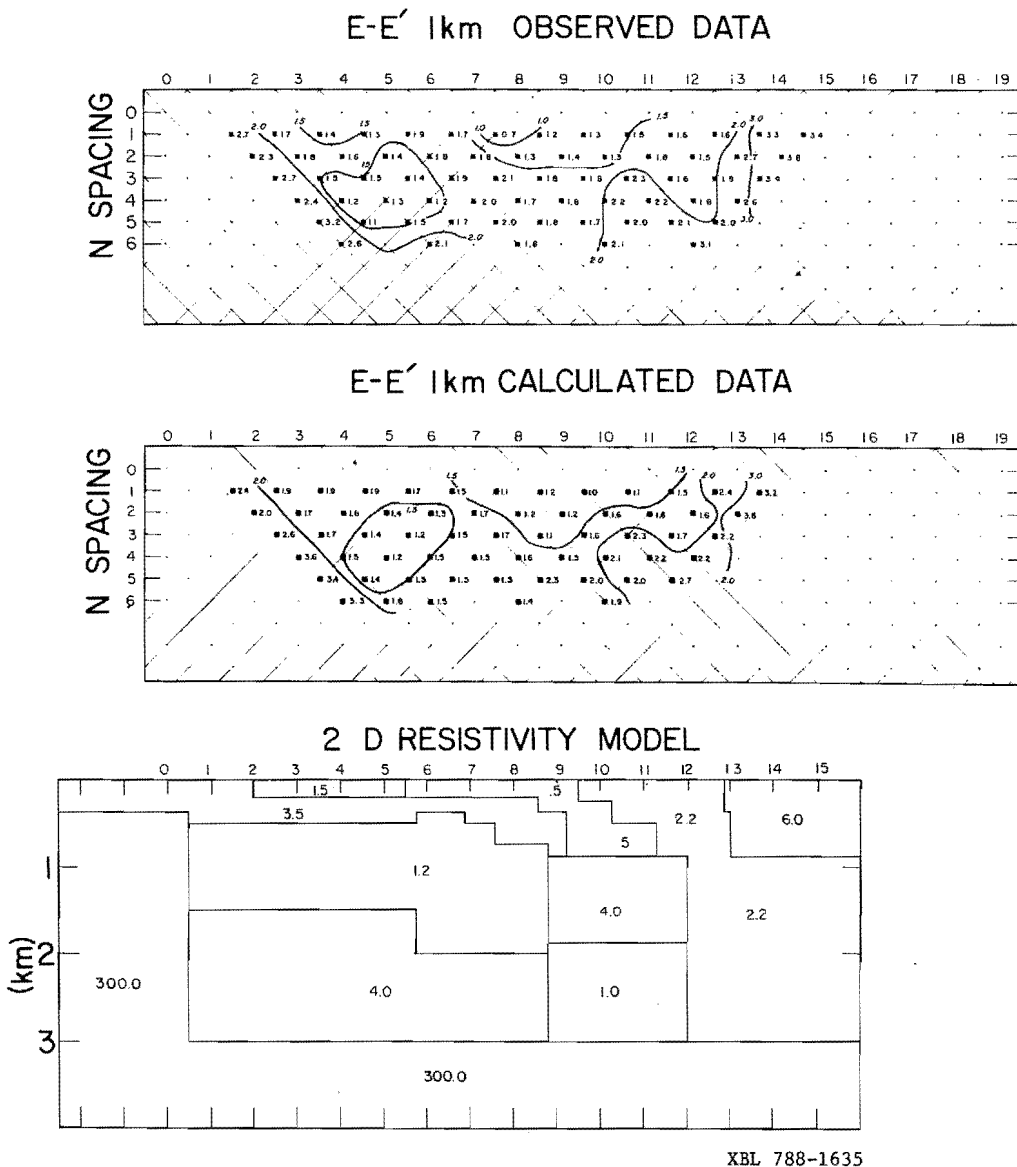
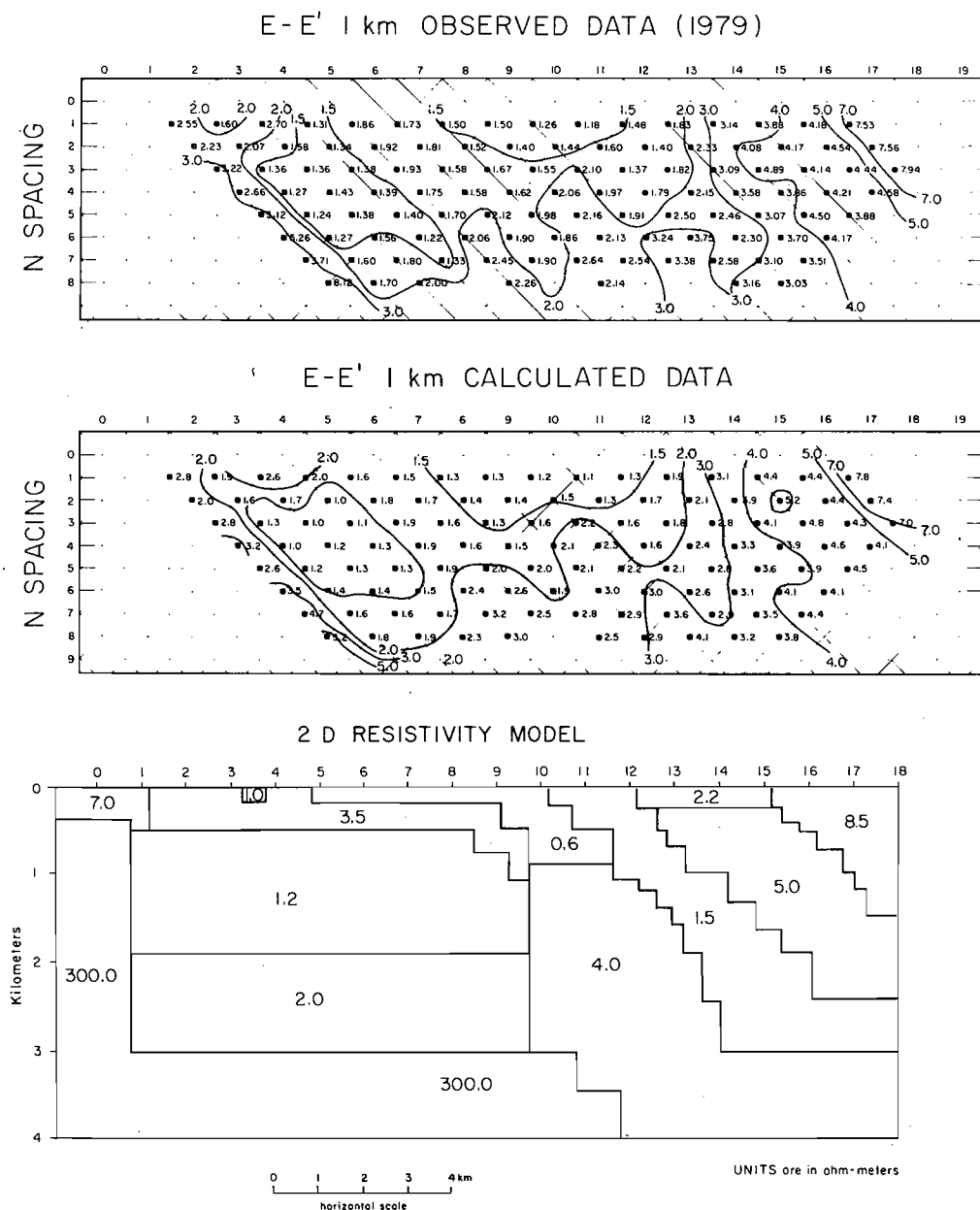


Figure 2. Dipole-dipole apparent resistivity pseudosection for 1-km dipoles along line E-E', 1978; field data, model-generated data, and two-dimensional resistivity model.



XBL 7910-13040A

Figure 3. Dipole-dipole apparent resistivity pseudosection for 1-km dipoles along line E-E', 1979; field data, model-generated data, and two-dimensional resistivity model.

in resistivity is the transition from brackish pore water to fresher water (Lyons and van de Kamp, 1980). The configuration of these units suggests a transition zone from deltaic waters to more saline sea waters (Lyons and van de Kamp, 1980).

MODEL PERTURBATION STUDIES

Figure 4 is an expansion of that portion of the resistivity section corresponding to the region of fluid production; for reference, some well locations are plotted. Dashed

lines are plots of metamorphic mineral zonation (Lyons et al., 1980), the first occurrence of the metamorphic mineral epidote (Elders and Hoagland, 1979), and the boundary between unconsolidated and consolidated sediments in the wells (Puente C. and de la Peña L., 1979). The figure demonstrates the association between the above-mentioned resistive body and the occurrence of high temperatures and metamorphic minerals in the production region. It also suggests that changes in the reservoir would be reflected in a relatively restricted part

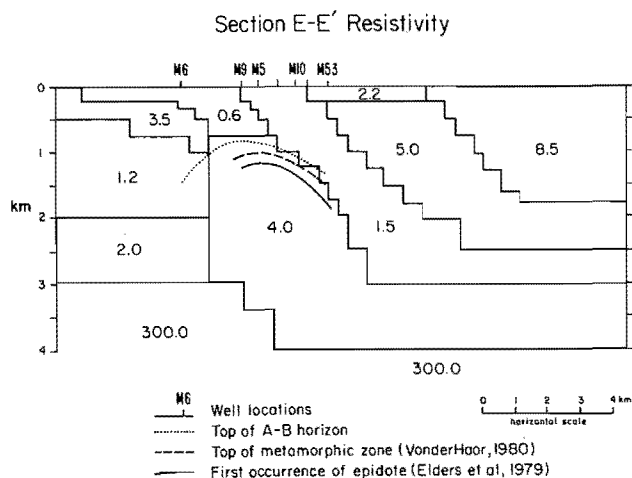
of the resistivity model, or that part associated with the reservoir and its recharge and discharge systems. This limits the "region of interest" to about 60 observation points from the original 133. For these points future observations should be particularly important.

To study the effect of certain possible reservoir changes on the apparent resistivity of the 60 points, we have considered the effects from several perturbation models. From these model studies, three cases were selected corresponding to three scenarios of possible reservoir changes (Figs. 5 to 7). At the bottom of each model the percent deviation from the original model is calculated and plotted. Our ability to detect and interpret resistivity changes should then depend on our ability to analyze these plots.

CASE 1: COLD WATER INTRUSION

Recent geochemical studies at Cerro Prieto have found that drawdown in some of the older producing wells is causing colder Colorado River water to move into the producing aquifer to replace produced fluid (Truesdell et al., 1979). Because the fresh river water is replacing more saline reservoir fluid, an increase in resistivity is expected in the producing region and in the rocks above it and to the east.

Figure 4 simulates this change on a fairly large scale. The expansion of the 4 ohm-m zone represents the region that would contain fresher water because of the incursion and thus an increase in the resistivity by a factor of about 2.5. The changes in calculated apparent resistivity are fairly dramatic, up to 20%, and they occur in banded



XBL 801-6761

Figure 4. Expanded version of the two-dimensional resistivity model E-E'. Some well locations are plotted along the top of the figure and positions of various mineralogical and sedimentary horizons, as determined from well cuttings and logs, are plotted below.

regions. The predominance of high variations for the closer separations suggests that the source of the change is fairly shallow and the banded nature of the plot makes it difficult to confuse such changes with random measurement error. Some points in the plot actually decrease in apparent resistivity even though the only model changes were increases in resistivity. This presents a signature for such a model making it easier to interpret apparent resistivity changes related to this type of reservoir change.

CASE 2: DISCHARGE ZONE MIGRATION

If the conductive 1.5 ohm-m zone shown in Figure 3 represents a region of upward flowing water, then changes in the resistivity of this zone can be expected as reservoir fluid is produced. One possible change from continuing production is the expansion of the 4.0 resistivity block eastward due to more mineral deposition and the inflow of lower salinity fluid and the subsequent eastward migration of the conductive region. If the conductive region represents a shear zone then this might correspond to an eastward migrating fault zone as the fluid moving through the shear zone deposits minerals and strengthens the rock matrix.

Figure 5 simulates such a case by shifting the eastward boundary of the resistive zone and the adjacent conductive region eastward by 500 m. This model represents a fairly extensive change that might not be expected to occur over a short time interval, but the model is useful for showing the effect of resistivity changes along thin linear fractures and establishing a pattern for such bodies. The percent variation of apparent resistivity ranges to 15% and maximum values occur in easternmost located points.

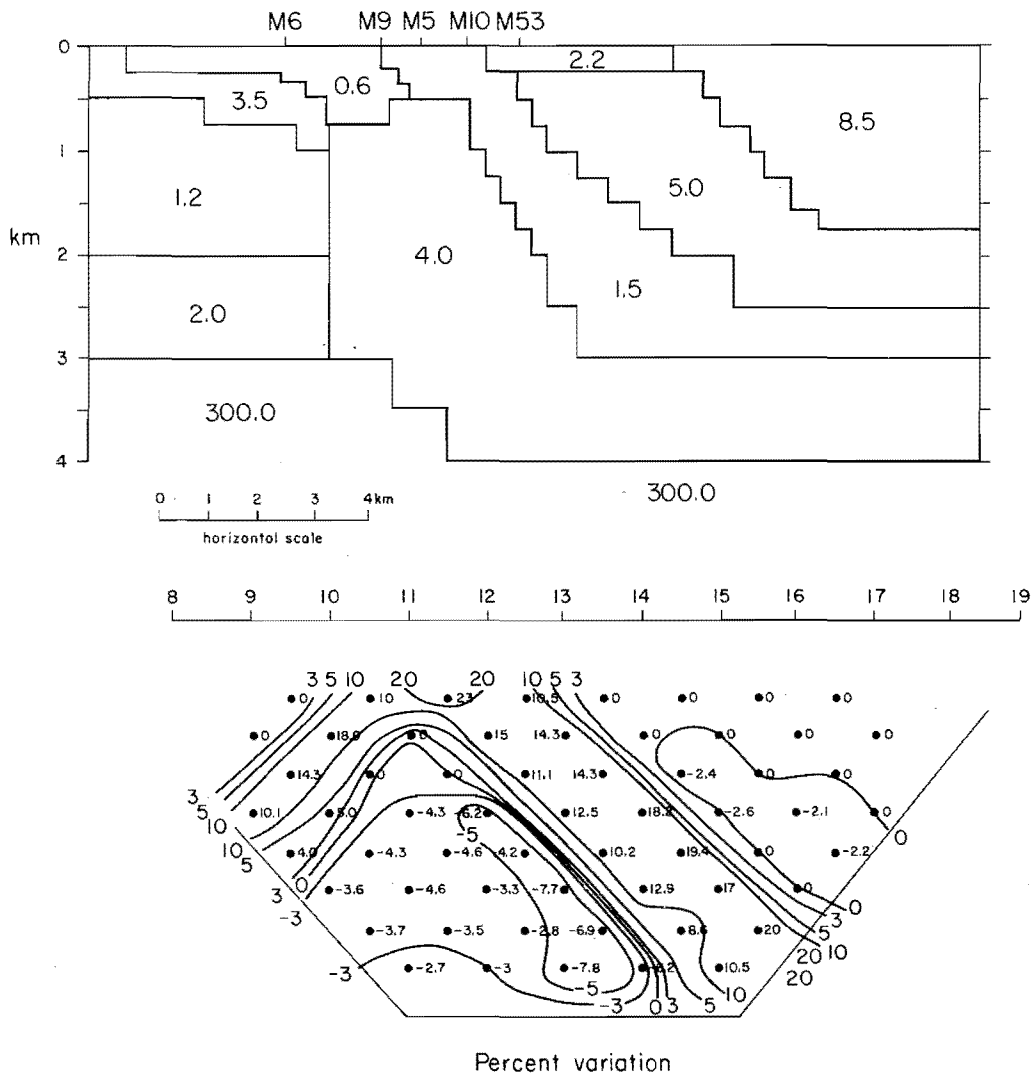
CASE 3: STEAM ZONE FORMATION

This case simulates the formation of a thin shallow steam zone in the upper part of the reservoir. Formation of such a zone follows from the observation that most of the wells near the power plant now produce a two-phase water-steam mixture, whereas the fluid originally produced was completely liquid (Truesdell et al., 1979). As this process continues the effect might be to reduce permeability because of local boiling and mineral deposition and to deplete the liquid water in the upper parts of the reservoir.

In Figure 6 this situation is simulated by increasing the resistivity by a factor of 2 for a 100-m-thick zone located at the top of the producing region. This represents a relatively minor change in reservoir conditions, but one that might occur over a short time interval.

The plot of percent variation (Figure 6) shows a maximum of 5% deviation due to the model perturbation.

Model Perturbation Case I - Cold Water Influx



XBL 801-6759

Figure 5. Model perturbation No. 1, corresponding to the resistivity change due to an influx of colder water into the shallower part of the system.

tion. These relatively small changes in apparent resistivity should be difficult to observe but they do occur at shallow separations when data accuracy is greatest and they are grouped so it would be easier to separate them from random measurement error.

TELLURIC PROFILE RESULTS

A 12-station telluric profile survey was measured along line E-E' in an attempt to delineate subsurface structure and to assess the usefulness of this reconnaissance method in resistivity monitoring.

The basis of the technique is the simultaneous measurement of natural electrical fields in two or more adjacent segments of a survey line and analysis of the

differences in observed amplitude and phase of the incoming signal. Because the source of these signals is the same, analysis of differences is useful for interpreting differences in geology beneath the measurement points. For a more complete discussion see Yungul et al., 1973.

Figure 7 shows a plot of the amplitude and phase ratios for survey line E-E'. The E-E' stations correspond to the same ones used for the dipole-dipole pseudosections (Fig. 3). The telluric signals were recorded at a period of 25 sec, which corresponds to a maximum depth of investigation of about 3 km; longer period signals would penetrate deeper, and shorter periods not as deep. The profile then gives a running ratio of the bulk resistivities beneath the line. The method is especially useful

Model Perturbation Case 2

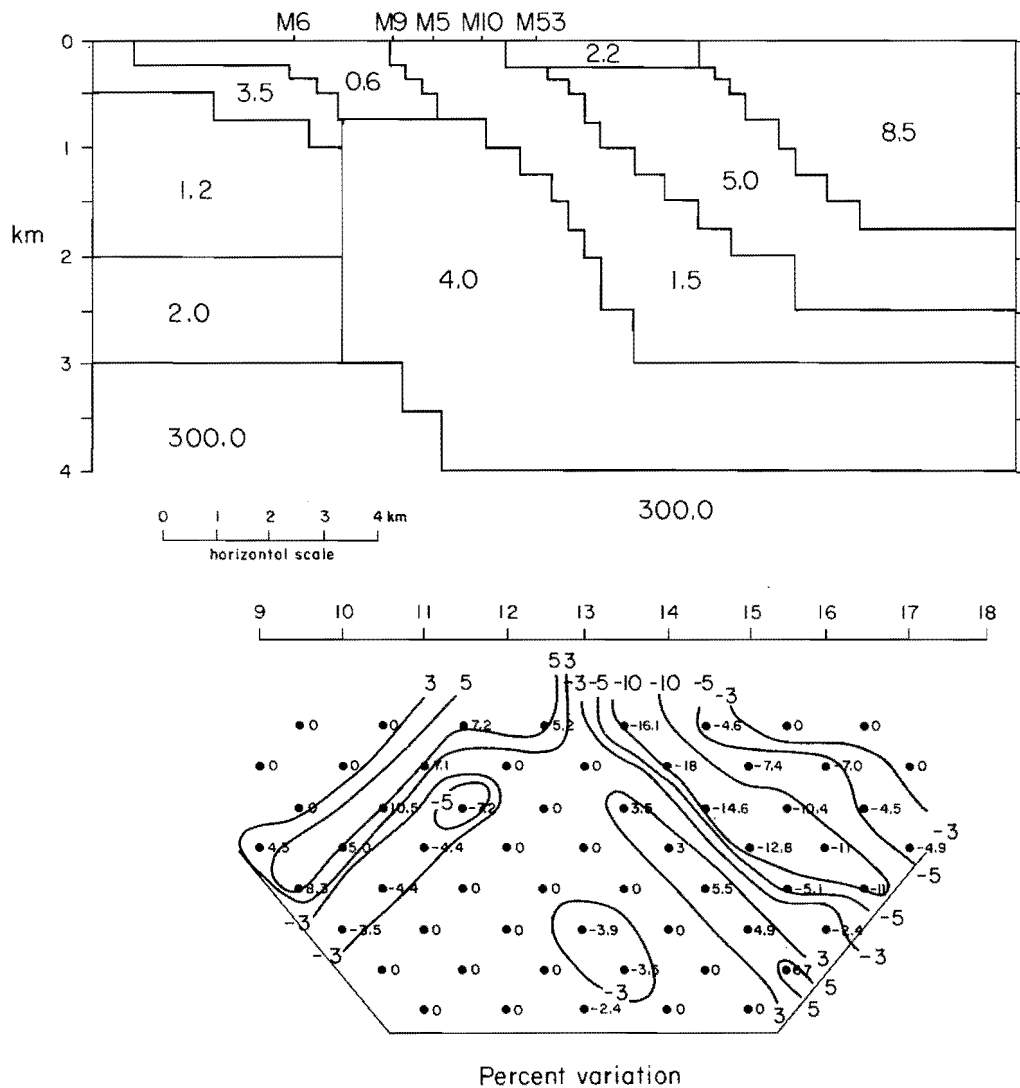


Figure 6. Model perturbation No. 2, corresponding to the expansion of the 4 ohm-m zone eastward due to reduced temperature and secondary mineral precipitation.

in detecting lateral resistivity contrasts since these form barriers to natural horizontal current flow. For this reason and because of the simplicity of this method it was chosen to be tested at Cerro Prieto.

A sample record for station 7 of line E-E' is shown in Figure 8. The amplitude and phase points are determined from the scattergram and vector plots by selecting the value that corresponds to the outermost cluster of the plotted observed values. This procedure is followed because a twodimensional earth energized by electric fields in all directions will yield telluric amplitude ratios with a bimodal distribution; ratios near 1 correspond to

geologic strike and the farthest cluster of points correspond to the direction perpendicular to strike. Since the profile was inclined approximately perpendicular to strike we chose values corresponding to that polarization.

An analysis of Figure 8 reveals a problem inherent to this method that limits its value where high accuracy is needed. Even in the absence of noise there is a natural scatter because of random field polarization. This introduces error into the estimation of ratios. This error may be significantly larger than the precision necessary for accurate monitoring. Another problem with this method is that the depth to the source of perturbations is diffi-

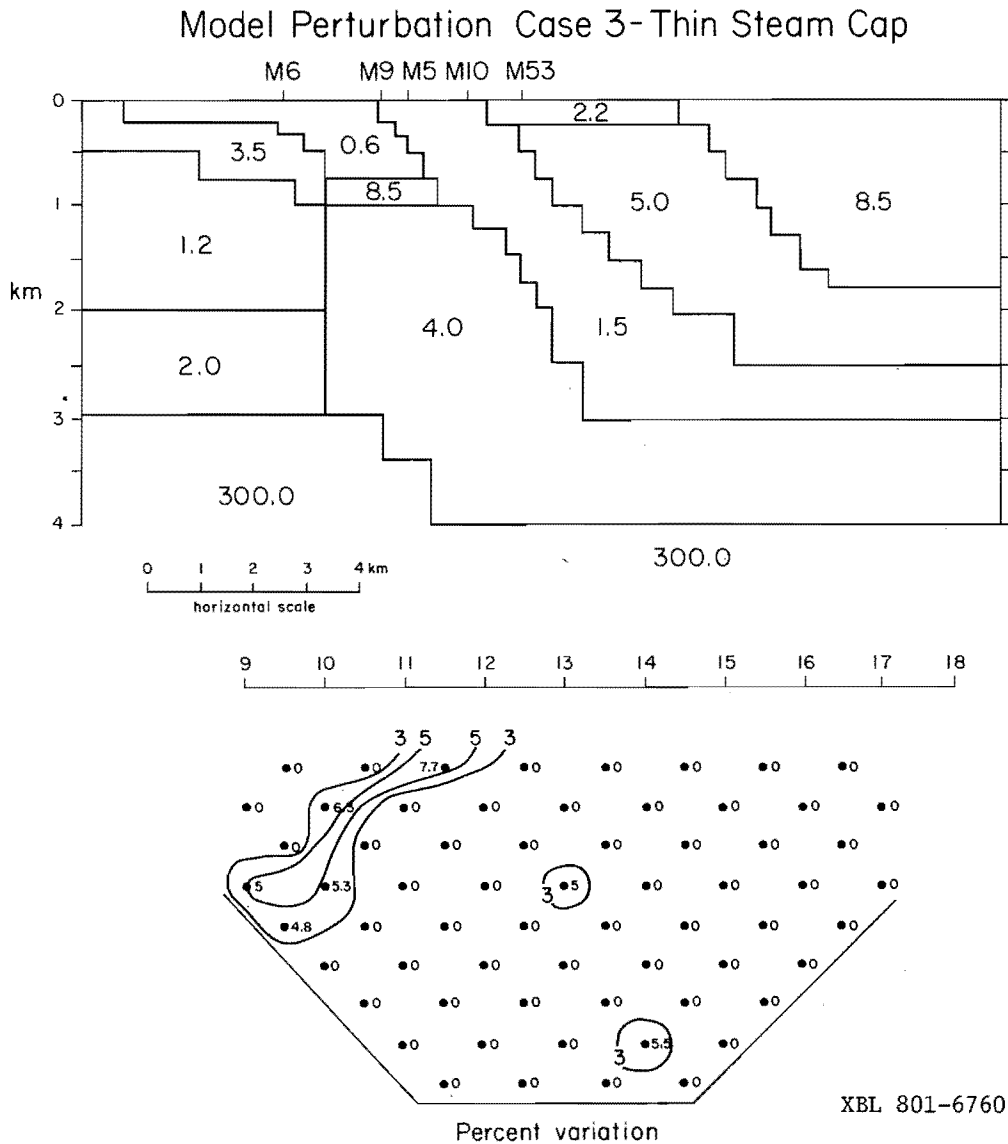


Figure 7. Model perturbation No. 3, corresponding to the formation of a shallow steam zone.

cult to determine because the measurement is done at only one frequency.

An analysis of Figure 9 reveals some of the features of the Cerro Prieto field detectable with telluric profile measurements. The steep decline in the first several measurements indicates the effect of the Cucapa range (located 2 km west of station 1) first. A discontinuity is evident between stations 9 and 10. This corresponds to the western boundary of the geothermal field and correlates well with the location determined from a detailed interpretation of dipole-dipole results. The problem with measurements taken with 1-km dipoles, however, is that the resolution of lateral features is no better than the dipole length. Therefore, it is impossible to tell exactly where discontinuities occur unless the dipoles are made small. Another discontinuity is evident between stations

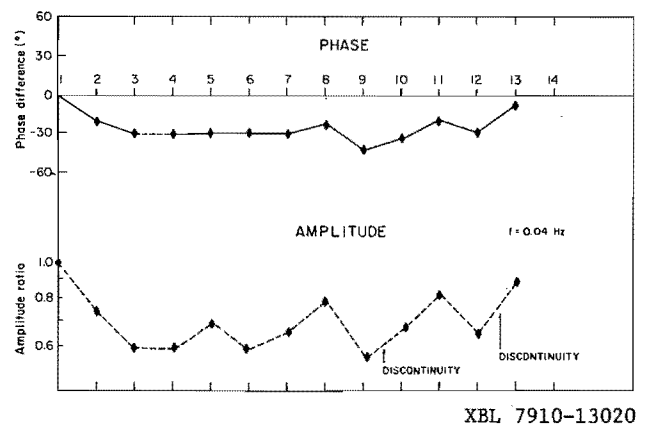


Figure 8. Plot of amplitude and phase ratios from telluric profile plot E-E'.

TELLURIC DATA LINE E-E' STATION 7

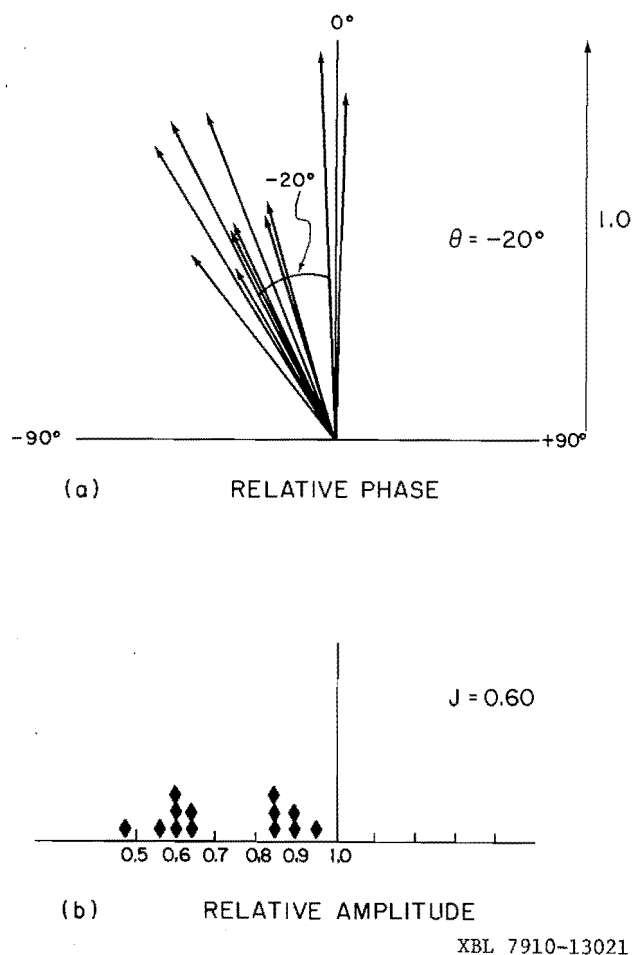


Figure 9. Scattergram and vector plot from a typical telluric profile station. Plotted points correspond to individual measurements.

12 and 13. This correlates well with the area of steep decline of the resistive body interpreted with dipole-dipole data and may relate to a zone of faulting.

The telluric measurements suggest a slight increase and resistivity over the reservoir region, but since several faults are crossed by the widely spaced stations the lateral effects cannot be totally separated from the vertical. In general the phase changes closely follow the amplitude changes giving more credence to the interpretation but not supplying any new information.

Since the profile was measured in two days by two people and very little equipment was necessary, the amount of reconnaissance information obtainable is significant. It does not seem likely, however, that this method is well suited for resistivity monitoring.

CONCLUSIONS

The following is a summary of some of our findings:

1. The dipole-dipole data-gathering technique was improved in 1979 to where estimated measurement errors are less than 3% for most points. This is sufficient accuracy to observe small scale changes in resistivity that may occur over short time intervals.

2. Resistivity modeling of the expanded 1979 profile has better defined the resistivity structure of the eastern part of the field. The models suggest that the resistive body associated with the producing zone dips eastward at 30 to 50 degrees to a depth of greater than 2.0 km. A narrow, steeply dipping conductive zone lies immediately east of the resistive body and may be associated with a zone of recharge or faulting.

3. The resistivity modeling suggests a deep source of fluid in the eastern part of the field. There is also some evidence of a connection between the older, shallower and the newer, deeper production.

4. Model perturbation studies show that apparent resistivity changes due to model variations normally run as banded or grouped areas of anomalous apparent resistivities. The signature of such models may allow detection and identification of changes in the presence of noise. The study also helped define an "area of interest" of 60 measurement points particularly associated with changes in the reservoir formation.

5. Interpretation of telluric profile measurements done over line E-E' yields a significant amount of reconnaissance information about the field. Because of inherent measurement uncertainty however, the method seems unsuitable for monitoring purposes.

ACKNOWLEDGMENTS

Work performed for the U. S. Department of Energy, Division of Geothermal Energy, under contract W-7405-ENG-48.

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.
- Elders, W. A., and Hoagland, J. R., 1979, Studies of water/rock interaction in the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico, in *Abstracts, Second Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field Baja California, Mexico: Mexicali, Comisión Federal de Electricidad*.
- 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 press).
- Lyons, D. J., van de Kamp, P. C., Vonder Haar, S., Noble, J., and Howard, J. H., 1980, Subsurface stratigraphy at the Cerro Prieto geothermal field, *in* Second Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México: Mexicali, Comisión Federal de Electricidad (this volume).
- Puente C. I., and de la Peña L. A., 1979, Geología del campo geotérmico de Cerro Prieto, *in* Proceeding, First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, September 1978: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7098, p. 17-40.
- Truesdell, A. H., Nehring, N. L., Thompson, J. M., Coplen, T. B., DesMaris, D. J., Janik, C. J. and Mehl, D. C., 1979, Geochemical studies of the Cerro Prieto reservoir fluid, *in* Abstracts, Second Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México: Mexicali, Comisión Federal de Electricidad.
- Wilt, M. J., Goldstein, N. E., and Razo M. A., 1979, LBL Resistivity studies at Cerro Prieto, *in* Proceedings, First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, September 1978: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7098, pp. 179-188.
- Yungul, S. H., Hembree, M. R., and Greenhouse, J. P., 1973, Telluric anomalies associated with isolated reefs in the midland basins, Texas: Geophysics, vol. 38, pp. 545-556.

CONTROL DE RESISTIVIDAD EN CERRO PRIETO

RESUMEN

En 1978, el Lawrence Berkeley Laboratory, en colaboración con la Comisión Federal de Electricidad, comenzó un programa de control de resistividad dipolo-dipolo en el campo geotérmico de Cerro Prieto. Las mediciones dipolo-dipolo se efectuaron por primera vez en 1978 y se repitieron en 1979 con el objeto de: a) determinar la posibilidad de definir los límites del campo geotérmico por medio de mediciones de resistividad en la superficie y b) determinar si los cambios que causa la producción en las condiciones del yacimiento pueden observarse por mediciones en la superficie.

En 1979, se mejoró la precisión de los datos, de tal manera que los errores obtenidos en las mediciones son menores de 3%. Además, la recolección de datos sobre una línea que atraviesa el campo se expandió en 40% con el objeto de obtener mayor profundidad de investigación y más información acerca de la parte nueva del campo, la parte este. El modelado de resistividad de los perfiles expandidos de 1979 indica que el cuerpo resistivo que se asocia con la zona de producción (Wilt *et al.*, 1978) se sumerge rápidamente hacia el este y podría extenderse por debajo de la parte este del campo. El modelo muestra también la presencia de un conductor delgado, abruptamente inclinado, adyacente al cuerpo resistivo, que podría asociarse con afallamiento y movimiento de fluidos. Estudios de perturbación del modelo demuestran que peque-

ños cambios que se asocian con penetración de agua fría, migraciones de la zona de afallamiento y formación de una zona de vapor pueden detectarse por medio de mediciones precisas dipolo-dipolo. Mediciones del perfil telúrico que se tomaron a lo largo de la línea E-E' produjeron una cantidad significativa de información general pero resultaron inadecuadas para el control de la resistividad.

INTRODUCCION

En 1978, el Lawrence Berkeley Laboratory, en colaboración con la Comisión Federal de Electricidad, comenzó un programa de estudios de resistividad dipolo-dipolo en el campo geotérmico de Cerro Prieto. Con el objeto de recolectar datos geofísicos se establecieron dos líneas de relevamiento en dirección este-oeste; una de las líneas (E-E') cruza la parte central del área de producción cerca de la planta, y la otra (D-D') pasa aproximadamente a 4 km al norte de la planta e inmediatamente al sur del volcán Cerro Prieto (Fig. 1). En 1978 y 1979 se llevaron a cabo mediciones de resistividad dipolo-dipolo; éstas se realizaron cuidadosamente para obtener la mayor precisión posible con el instrumental disponible.

Los objetivos de este proyecto son construir un modelo de resistividad de la región de Cerro Prieto congruente con la geología conocida y determinar si pueden de-

TECTARSE cambios debidos a producción (por ejemplo, formación de una zona de vapor, cambios de porosidad en la periferia del yacimiento) en las condiciones del yacimiento por medio de mediciones precisas de resistividad en la superficie.

Los resultados del reconocimiento de 1978 se presentaron con anterioridad en el trabajo (Wilt *et al.*, 1979). A continuación se ofrece un resumen de los resultados más importantes.

1. La región de producción en Cerro Prieto se caracteriza por la alta resistividad relativa a las rocas vecinas. Las resistividades promedio de la formación son de 2.0 ohm-m, o menos, aumentando hasta por lo menos 4.0 ohm-m, dentro de la zona. Los análisis de registros de pozos y de recortes (Elders y Hoagland, 1979) sugieren que el aumento de resistividad se debe principalmente a la formación de zonas de porosidad reducida causadas por metamorfismo hidrotérmico dentro de la región del yacimiento.

2. Estudios de modelado demostraron que las variaciones temporales de resistividad son teóricamente detectables por medio de mediciones dipolo-dipolo en la superficie. Sin embargo, el grado de precisión necesario para observar dichas variaciones debe ser mayor de 5%; esta cifra representa un grado de precisión mayor que el que se obtuvo en 1978 con grandes espacios entre los electrodos.

PROGRESOS EN 1979

En 1979 se midió nuevamente la línea E-E' con dipolos de 1 km y se logró mayor precisión que en 1978. Estas mediciones produjeron condiciones de vínculo más precisas para los modelos y establecieron una base confiable para comparar futuras observaciones de cambios de resistividad. Tanto en 1978 como en 1979, se usó como fuente de potencia el motogenerador de 25 kW del LBL. En 1979 se obtuvo mayor precisión debido a una instrumentación receptora superior, a mejoras mecánicas en la fuente de potencia y a la experiencia adquirida en el año anterior. Se usaron nuevos receptores de señales para promediar 10 ciclos del pulso de onda cuadrada, de 40 s de periodo, integrado al suelo por medio de un transmisor. En cada punto de medición se promedió un mínimo de 70 ciclos y se calcularon la media y la desviación estándar. Se eligió el periodo de 40 s como el mejor convenio para obtener mayor rapidez en la ejecución del reconocimiento y al mismo tiempo evitar efectos de acoplamiento electromagnético. Mejoras hechas en el transmisor que se usó en 1979 —en particular, el reacondicionamiento del motor, cable nuevo y una resistencia de contacto más baja en los electrodos— permitió inyectar hasta 40 A comparado con una gama de 15 a 20 A en 1978.

En 1979, las mediciones dipolo-dipolo se extendie-

ron 4 km hacia el este, y la separación máxima entre transmisor y receptor se aumentó de $N = 6$ a $N = 8$, y así se obtuvo mayor profundidad de exploración. Además, se realizaron mediciones del perfil telúrico a lo largo de la línea E-E' para investigar la aplicabilidad de este método, relativamente rápido y económico, a la resolución de estructuras subterráneas.

Después de la adquisición de los datos, los resultados, más amplios y precisos, se utilizaron para desarrollar una sección transversal de resistividad bidimensional mejor para la línea E-E' (Figs. 2 y 3). Se ejecutaron nuevos estudios de perturbación del modelo para identificar puntos de interés probable máximo —tales como puntos donde puedan reconocerse más fácilmente cambios en el yacimiento— y para examinar la magnitud de los cambios de resistividad correspondientes a varios cambios posibles en el yacimiento. Se analizaron los errores de las mediciones correspondientes a los datos reunidos en 1978 y 1979 y se compararon las dos series para determinar: a) si las nuevas mediciones (1979) se encuentran dentro de los errores previstos y b) si la precisión de los datos es suficiente para aislar cambios en las condiciones del yacimiento.

Se analizaron datos telúricos reunidos en 1979 y se evaluaron los errores para determinar si es posible utilizar este método para el control de resistividad.

RESULTADOS DIPOLO-DIPOLO

En la figura 3 se presentan los datos de resistividad aparente dipolo-dipolo que se reunieron en 1979 y el correspondiente modelo de resistividad bidimensional. La concordancia entre las resistividades aparentes calculadas y los datos observados es buena. A pesar de ello, fueron necesarias más de 20 iteraciones para obtener el modelo que se presenta, aun cuando el modelo inicial fue el que se desarrolló como modelo final en 1978 (Fig. 2). En general, los modelos de 1978 y 1979 son muy similares, pero en 1979 la dimensión de la pseudosección se aumentó 40%. Se necesitaron puntos adicionales de medición para cubrir la parte este del campo, recientemente descubierta, y para obtener información de mayores profundidades que las alcanzadas durante el estudio de 1978 (1.5 km).

Se analizaron las diferencias en resistividades aparentes calculadas entre las series de datos reunidos en 1978 y 1979 y se encontró que existen variaciones de hasta 25% entre las dos series (Figs. 2 y 3). Estas variaciones se deben probablemente a imprecisiones en la serie de datos de 1978 ya que todas las desviaciones caen dentro de la dispersión anticipada para esos puntos (Wilt *et al.*, 1979). Debido a la gran dispersión no se intentó interpretar cambios de resistividad ocasionados por cambios en las condiciones del yacimiento. Los errores estándar de los datos reunidos en 1979 resultan considerablemente más bajos que los de 1978. Sin embargo, los errores, en la mayoría de

los datos, son menores de 3% y, en todos los datos, menores de 10 por ciento.

Una comparación de las secciones inferiores de las figuras 2 y 3 muestra dónde difieren los modelos de resistividad de 1978 y 1979. Las diferencias más importantes incluyen una redefinición del cuerpo de resistividad dentro de la zona de producción, una estimación más precisa de la resistividad en los horizontes más profundos y nueva información acerca de la parte más reciente del campo; la parte este.

Los datos más recientes indican que el cuerpo de resistividad, que se asocia con la zona de alteración hidrotermica intensa y con las unidades del yacimiento, se sumerge hacia el este con un ángulo de entre 30° y 50°, y se hace más profunda en la nueva región de producción situada al este de la planta; de cualquier modo, el método dipolo-dipolo no es particularmente sensible a la caída de cuerpos inclinados. Los datos indican también que esta zona es bastante amplia y que se presenta como un horizonte plano en la porción este del campo. El límite oeste de esta unidad se encuentra a mitad de camino, entre los kilómetros 9 y 10; corresponde a un punto situado alrededor de 5 km al oeste del pozo M-9. No puede fijarse con precisión la parte inferior de esta zona debido a que el modelo es insensible a cambios a grandes profundidades. Por consiguiente, no puede determinarse con precisión la posición del basamento, pero los datos sugieren que se localiza por lo menos 3 y 4 km debajo de la superficie al oeste y al este de la planta, respectivamente. La posición de las fallas escalonadas, que se muestran en la figura 3, no se determinó con exactitud.

Adyacente a la unidad resistiva (Fig. 2) hay un cuerpo conductivo delgado que cae hacia el este. Esta unidad de 1.5 ohm-m tiene un marcado contraste con el cuerpo de 4.0 ohm-m al oeste y el de 5.0 ohm-m al este. El cuerpo tiene aproximadamente 1.5 km de ancho y cae hacia el este en ángulo de entre 30° y 40° hasta una profundidad de 2 a 2.5 km; hacia el este parece asumir una forma plana. Debido a que la porción inclinada de esta unidad concuerda notablemente con la ubicación de los planos de carga propuestos por Corwin (1979) sobre la base de mediciones de potencial espontáneo, es posible que ella represente una zona de agua caliente que fluye hacia arriba y conecta los acuíferos profundos del este con la zona de producción más somera situada al oeste de la planta. Si esto fuera correcto, cambios asociados con la producción más profunda en el este podrían reflejarse en cambios de resistividad en este cuerpo. Por tanto, dicho cuerpo constituiría un objetivo, particularmente adecuado, para controlar cambios de resistividad en la región de producción más reciente.

La figura 3 también indica que al este de la planta

las rocas se hacen gradualmente cinco veces más resistivas que las rocas situadas al oeste del yacimiento. Estas rocas se presentan como una serie de bloques que cae suavemente hacia el este hasta una profundidad de aproximadamente 2 km. La causa principal del aumento de resistividad es la transición de agua salobre a agua más dulce (Lyons y van de Kamp, 1980). La configuración de dichas unidades sugiere una zona de transición de aguas deltaicas a aguas de mar más salinas (Lyons y van de Kamp, 1980).

ESTUDIOS DE PERTURBACION DEL MODELO

La figura 4 es una ampliación de la porción de la sección de resistividad que corresponde a la región de producción de fluido. Como referencia, se graficó la ubicación de algunos pozos. Las líneas cortadas son delineaciones de la zonificación mineral metamórfica (Lyons *et al.* 1980), la primera incidencia del mineral metamórfico epidoto (Elders y Hoagland, 1979), y el límite entre los sedimentos consolidados y no-consolidados en los pozos (Puente, C. y L. de la Peña, 1979). Esta figura demuestra la asociación entre el cuerpo resistivo mencionado más arriba y la ocurrencia de altas temperaturas y minerales metamórficos en la región de producción. También sugiere que los cambios en el yacimiento debieran reflejarse en una región relativamente restringida del modelo de resistividad, es decir, la parte asociada con el yacimiento y con sus sistemas de recarga y descarga. Esto limita la "región de interés" a unos 60 de los 133 puntos de observación originales. Se considera que futuras observaciones de estos puntos serán de particular importancia.

Para estudiar el efecto de algunos de los posibles cambios del yacimiento sobre la resistividad aparente de los 60 puntos se consideran los efectos de varios modelos de perturbación. Se seleccionaron de entre estos estudios tres casos que correspondieran a tres escenarios de posibles cambios en el yacimiento (Figs. 5 a 7). Al pie de cada modelo se calculó y graficó el porcentaje de desviación con respecto al modelo original. La habilidad para detectar e interpretar cambios de resistividad dependerá, entonces, de la habilidad para analizar estos planos.

CASO 1: INCURSION DE AGUA FRIA

En estudios geoquímicos que se realizaron recientemente en Cerro Prieto se encontró que el abatimiento de presión en algunos de los pozos productores más antiguos hace que las aguas más frías del Río Colorado se filtren en los acuíferos en producción para remplazar el fluido producido (Truesdell *et al.*, 1979). Debido a que el agua más dulce de río reemplaza los fluidos más salinos del yacimiento, se espera un aumento de resistividad en la región de producción y en las rocas situadas sobre ella y hacia el este de la misma.

La figura 4 simula este cambio en una escala bastan-

te grande. La ampliación de la zona de 4 ohm-m representa la región que contendría agua más dulce debido a la incursión y por tanto un incremento en la resistividad de aproximadamente 2.5. Los cambios en la resistividad aparente calculada son dramáticos, hasta de 20%, y ocurren en franjas. El predominio de altas variaciones en separaciones más cercanas indica que la fuente del cambio es bastante superficial. Debido a la distribución en bandas del plano resulta difícil confundir tales cambios con errores estocásticos de las mediciones. Algunos de los puntos en el plano realmente disminuyen en resistividad aparente, aunque los únicos cambios del modelo fueron aumentos de resistividad. Esto facilita la interpretación de cambios de resistividad aparente que se relacionan con este tipo de cambios en el yacimiento.

CASO 2: MIGRACION DE LA ZONA DE DESCARGA

Si la zona conductiva de 1.5 ohm-m, que se muestra en figura 3, representa una región de aguas que fluyen hacia arriba, pueden esperarse cambios en la resistividad de dicha zona a medida que se produce fluido del yacimiento. Como la producción es continua un cambio posible sería la ampliación del bloque de resistividad de 4.0 ohm-m hacia el este, porque existe una mayor deposición de minerales y es más baja la filtración de fluidos de salinidad, así como por la consecuente migración en esa dirección de la región conductiva. Si ésta representa una zona de corte, podría corresponder a una zona de afallamiento que migra hacia el este; a medida que el fluido que se mueve a través de la zona de corte deposita minerales y refuerza la matriz rocosa.

La figura 5 simula este caso cuando traslada el límite oriental de la zona de resistividad y la región conductiva adyacente 500 m hacia el este. Este modelo representa un cambio bastante amplio y no puede esperarse que ocurra en un periodo corto, sin embargo resulta útil para ejemplificar el efecto de los cambios de resistividad a lo largo de fracturas lineales delgadas y para establecer un patrón para tales cuerpos. La variación porcentual de la resistividad aparente alcanza 15% y los valores máximos ocurren en los puntos ubicados más al este.

CASO 3: FORMACION DE LA ZONA DE VAPOR

Este caso simula la formación de una zona de vapor delgada y superficial en la parte superior del yacimiento. La formación de dicha zona se deduce al observar que la mayoría de los pozos cercanos a la planta producen actualmente una mezcla bifásica de agua y vapor, en tanto que el fluido producido originalmente era completamente líquido (Truesdell *et al.*, 1979). La continuación de este proceso podría originar una reducción de la permeabilidad debido a ebullición local, a deposición de minerales y al agotamiento del agua líquida en las partes superiores del yacimiento.

En la figura 6 se simula esta situación al aumentar la resistividad por un factor de 2 en una zona de 100 m de espesor localizada por encima de la región de producción, lo que representa un cambio relativamente menor en las condiciones del yacimiento, pero que podría ocurrir en un periodo corto.

El plano de variación porcentual (Fig. 6) muestra una desviación máxima de 5% debida a la perturbación del modelo. Estos cambios relativamente pequeños de resistividad aparente deberían ser difíciles de observar pero ocurren en separaciones superficiales cuando la precisión de los datos es máxima y éstos se encuentran agrupados de tal modo que es más fácil distinguirlos de los errores estocásticos de las mediciones.

RESULTADOS DE PERFILES TELURICOS

Se hizo un reconocimiento del perfil telúrico, se ocuparon 12 estaciones a lo largo de la línea E-E' y se intentó así, delinear las estructuras subterráneas y determinar la utilidad de este método de reconocimiento para el control de resistividad.

La base de esta técnica es la medición simultánea de los campos eléctricos naturales en dos o más segmentos adyacentes de una línea de deslinde y el análisis de las diferencias de amplitud y fase observadas de la señal entrante. Debido a que la fuente de estas señales es la misma, el análisis de las diferencias resulta útil para interpretar las diferencias geológicas debajo de los puntos de medición. Para un análisis más completo ver Yungul *et al.*, 1973.

En la figura 7 se grafica la amplitud y razones de fase para la línea de deslinde E-E'. Las estaciones de E-E' corresponden a las que se usaron para las pseudosecciones dipolo-dipolo (Fig. 3). Las señales telúricas se registraron a un periodo de 25 s, que corresponde a una profundidad de investigación máxima de alrededor de 3 km; señales de periodos más largos penetrarían más profundamente pero no así los periodos más cortos. El perfil da, por tanto, un cociente aproximado de las resistividades de conjunto debajo de la línea. El método es especialmente útil para detectar contrastes de resistividad lateral ya que ellos forman barreras para el flujo de corrientes horizontales naturales. Por esta razón y por la simplicidad del método, se eligió para ensayarse en Cerro Prieto.

En la figura 8 se muestra un ejemplo de registro para la estación 7 de la línea E-E'. La amplitud y puntos de fase se determinan a partir del diagrama de dispersión y de los planos de vectores al seleccionar el valor que corresponde al agrupamiento más exterior de valores graficados observados. Se sigue este procedimiento pues un terreno bidimensional energizado por campos eléctricos en todas direcciones producirá razones de amplitud telúrica con

una distribución bimodal; las razones cercanas a 1 corresponden al rumbo geológico y el agrupamiento de puntos más externo corresponde a la dirección perpendicular al rumbo. Como el perfil se inclinaba aproximadamente perpendicular al rumbo se eligieron valores correspondientes a esa polarización.

Un análisis de la figura 8 revela un problema inherente a este método que limita su valor cuando se necesita alta precisión. Incluso con la ausencia de ruido hay una dispersión natural, debido a las polarizaciones estocásticas del campo. Esto introduce errores en la estimación de razones. Este error puede resultar significativamente más grande que la precisión necesaria para un control exacto. Otro problema con este método es que resulta difícil determinar la profundidad correspondiente a la fuente de perturbaciones debido a que la medición se hace sólo en una frecuencia.

Un análisis de la figura 9 revela algunos de los rasgos del campo de Cerro Prieto que pueden detectarse a través de mediciones del perfil telúrico. La abrupta declinación de las primeras mediciones indica el efecto de la Sierra de Cucapás (ubicada 2 km al oeste de la estación 1). Entre las estaciones 9 y 10 es evidente que existe una discontinuidad que corresponde al límite oeste del campo geotérmico y que concuerda con la ubicación determinada a partir de una interpretación detallada de los resultados dipolo-dipolo. Sin embargo, el problema con mediciones tomadas con dipolos de 1 km es que la resolución de rasgos laterales no es mejor que la longitud del dipolo. Por consiguiente, es imposible determinar exactamente dónde ocurren las discontinuidades, a menos que los dipolos se hagan pequeños. Entre las estaciones 12 y 13 es evidente otra discontinuidad; esto se correlaciona con el área de abrupta declinación del cuerpo resistivo interpretado con los datos dipolo-dipolo y puede relacionarse con una zona de afallamiento.

Las mediciones telúricas indican un pequeño aumento de resistividad sobre la región del yacimiento, pero como las estaciones, separadas por grandes distancias, cruzan varias fallas no es posible separar totalmente los efectos laterales de los verticales. En general, los cambios de fase siguen de cerca a los cambios de amplitud dando más credibilidad a la interpretación pero no nueva información.

Como dos personas midieron el perfil en dos días y se necesitó muy poco equipo, la cantidad de información de reconocimiento es significativa; sin embargo, no parece probable que sea un método adecuado para el control de la resistividad.

CONCLUSIONES

A continuación se resumen algunos de los hallazgos logrados:

1. En 1979 se mejoró la técnica de recolección de datos dipolo-dipolo y se logró que los errores estimados de medición resultaran menores que 3% para la mayoría de los puntos. Esta precisión es suficiente para observar pequeños cambios de resistividad que pueden ocurrir a intervalos cortos de tiempo.

2. El modelado de resistividad del perfil que se amplió en 1979, definió mejor la estructura de la resistividad en la parte este del campo. Los modelos indican que el cuerpo resistivo asociado con la zona de producción se sumerge hacia el este con un ángulo de entre 30° y 50° hasta una profundidad mayor de 2 km. Una zona conductiva angosta, de caída abrupta, yace inmediatamente al este del cuerpo resistivo y podría asociarse con una zona de recarga o afallamiento.

3. El modelado de resistividad indica que existe una fuente profunda de fluido en la parte este del campo. Hay también evidencia de una relación entre la producción más antigua y superficial y la más nueva y profunda.

4. Los estudios de perturbación del modelo demuestran que los cambios de resistividad aparente debidos a variaciones del modelo aparecen normalmente como áreas de grupos o bandas de resistividades aparentes anómalas. La característica de dichos modelos podría permitir la detección e identificación de cambios en presencia de ruido. El estudio ayudó también a definir un "área de interés" de 60 puntos de medición asociados, particularmente con cambios en la formación del yacimiento.

5. La interpretación de las mediciones del perfil telúrico ejecutadas sobre la línea E-E' produjo una cantidad significativa de información de reconocimiento sobre el campo. Sin embargo, debido a la incertidumbre inherente a las mediciones, este método no parece adecuado para propósitos de control.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue ejecutado por el U. S. Department of Energy, Division of Geothermal Energy, bajo contrato W-7405-Eng-48.

TITULOS DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del proyecto; proyecto de resistividad del LBL.

Figura 2. Seudosección de resistividad aparente dipolo-dipolo para dipolos de 1 km a lo largo de la línea E-E', 1978; datos recolectados en el campo, datos generados por el modelo y modelo bidimensional de resistividad.

Figura 3. Seudosección de resistividad aparente dipolo-dipolo para dipolos de 1 km a lo largo de la línea E-E', 1979; datos recolectados en el campo, datos generados por el modelo y modelo bidimensional de resistividad.

Figura 4. Versión ampliada del modelo de resistividad bidimensional E-E'. La ubicación de algunos de los pozos se grafica a lo largo de la parte superior de la figura y las posiciones de varios horizontes mineralógicos y sedimentarios, determinados a partir de recortes y registros de pozos, se grafican debajo.

Figura 5. Perturbación No. 1 del modelo, correspondiente al cambio de resistividad, debida al flujo de agua más fría en la parte más somera del sistema.

Figura 6. Perturbación No. 2 del modelo, correspondiente a la am-

pliación de la zona de 4 ohm-m hacia el este, debida a temperatura más baja y precipitación de minerales secundarios.

Figura 7. Perturbación No. 3 del modelo correspondiente a la formación de una zona somera de vapor.

Figura 8. Planos de la amplitud y las razones de fase del gráfico del perfil telúrico E-E'.

Figura 9. Diagrama de dispersión y gráfico del vector de una estación típica del perfil telúrico. Los puntos graficados corresponden a mediciones individuales.