

MEASURED CRUSTAL STRAIN, CERRO PRIETO FIELD, BAJA CALIFORNIA, MEXICO

Bruce L. Massey
U. S. Geological Survey
Denver, Colorado

ABSTRACT

The first resurvey of both the regional and local horizontal-control networks established in 1978 in the Cerro Prieto geothermal area indicate that ground-surface movement is occurring. The portion of the local net covering the geothermal production zone shows a NW-SE contraction that may be as great as 31μ strain/year. The regional net resurvey showed a small expansion on all axes with a maximum of about 0.7μ strain/year in a NE-SW direction.

INTRODUCTION

The Cerro Prieto geothermal area is approximately 30 km southeast of Mexicali, Baja California, in the Mexicali Valley. Eighteen production wells clustered in an area of nearly 2 km² discharge approximately 2,500 tons hour of water steam mixture (March 1979 data; oral commun., Ing. Bernardo Domínguez, Comisión Federal de Electricidad, Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto). This production rate is the equivalent of about 11 meters of water over the area of the well field each year. This water leaves the area by canal or evaporation; none is reinjected.

The withdrawal of large volumes of fluids from subsurface reservoirs is accompanied by the development of large stresses within the reservoir formations.^{1/2} The resulting strains at depth within the reservoir tend to be transmitted to the surface, resulting in measurable deformation of the land surface. From an analysis of measured surface changes, insight is obtained on the nature of subsurface deformation and also on the mechanical and recharge characteristics of the reservoir system.

Three networks of precise geodetic control were established in 1977-78 to measure the natural tectonic and induced surface deformation around the geothermal area. A first-order leveling network was established by DETENAL (Dirección General de Estudios del Territorio Nacional, México, D.F., México) to measure vertical changes from the international border south through the geothermal field. In order to measure horizontal

deformation, two networks were established by the U.S. Geological Survey. These are (1) a regional trilateration net by the Survey's Topographic Division that is a southward extension of the pre-existing crustal-strain net, and (2) a local network of horizontal control established by the Water Resources Division in the vicinity of and through the production area.

This report is concerned only with the measurement and analysis of horizontal surface changes.

NETWORK LAYOUT

Figure 1 shows the regional trilateration net that was extended southward from the existing crustal-strain net north of the border. Stations on the local net (solid triangles) that were tied to stations on the regional net (open triangles) are also shown as is the location of the production area.

SURVEYING EQUIPMENT USED

Lines on the local net were measured with a medium range (up to 12 km under good conditions) Keuffel & Esser Ranger III. (The use of brand names in this report is for identification only and does not imply endorsement by the U. S. Geological Survey.) The regional net was measured with a long range (up to 40 km) Spectra-Physics Model 3G Geodolite. This instrument was also used in tying local net stations to stations on the regional net. Both instruments use a modulated helium-neon laser beam in the visible spectrum. The accuracy of the measurements using the Geodolite⁴ is $\pm (3\text{mm} + 0.2\text{ppm})$, whereas the accuracy of the measurements using the Ranger III² is $\pm (5\text{mm} + 3\text{ppm})$. The retro-reflectors used when measuring both nets are commercially available units of conventional design. This design is such that a light ray or beam projected from an instrument is returned to the instrument along the path of propagation.

MEASURED GROUND - SURFACE MOVEMENTS

The initial measurement of the regional net was made

TABLE 1. MEASURED DISTANCES, REGIONAL NET
(See Figure 1)

Station	to Station	1978 (Meters)	1979 (Meters)
Prieto	1	6041.4625	6041.4799
Prieto	10	12561.9499	12561.9533
Prieto	17	15538.4917	15538.4937
Prieto	24	9304.0319	9304.0343
Prieto	3	11013.3080	11013.3089
Prieto	36	19673.8300	19673.8476
Prieto	8	8421.8307	8421.8350
Prieto	9	11495.3487	11495.3576
Prieto	BNP10065	4157.7894	4157.8028
David	17	24674.6451	24674.6671
David	3	28622.2067	28622.2294
David	928	22405.8626	22405.8917
Puerta	24	14967.9753	14967.9835
Puerta	928	27418.6439	27418.6702
Puerta	Prieto	14742.7841	14742.7907
Fierro	9	34569.3719	34569.4033
Fierro	928	29359.8791	29359.9036
928	Diablo	22911.2760	22911.2877
Carrizo	Centinela	36452.3901	36452.4075
Centinela	Cila 6	27152.8553	27152.8661
Centinela	Diablo	37940.4189	37940.4393
Centinela	Dixie	20467.3180	20467.3361
Centinela	Fierro	23309.5298	23309.5404
Cila 6	Diablo	16296.2748	16296.2797
Cila 6	Fierro	33563.1467	33563.1615
Cila 6	Jacumba	35931.9735	35931.9754
David	Fierro	28587.8796	28587.8949
David	Puerta	17440.4635	17440.4737
Diablo	Fierro	33577.7706	33577.7953
Diablo	Puerta	39979.4911	39979.5187
Fierro	Prieto	24103.0237	24103.0435
Fierro	Puerta	12941.1589	12941.1704
Mayor	17	27651.0316	27651.0502
Mayor	3	34819.1085	34819.1282
Mayor	928	35758.8470	35758.8528
Mayor	David	18353.3876	18353.4016
Mayor	Prieto	36344.0586	36344.0608
Mayor	Puerta	34703.9619	34703.9664
Offset 225	Centinela	3352.7425	3352.7705
Offset 229	Centinela	20923.0393	20923.0561
Offset 229	Cila 6	20229.3157	20229.3195
Offset 229	Fierro	40191.7386	40191.7645

in January and February 1978, with a subsequent measurement conducted in March 1979. The local net was first measured in February and March 1978, with the second measurement conducted in March 1979. The lengths of the lines in both the regional and local nets are listed in Table 1 and Table 2 respectively.

The measurements made in 1978 and 1979 from both nets were analyzed using a least-squares strain anal-

TABLE 2. MEASURED DISTANCES, LOCAL NET
(See Figure 2)

Station	to Station	1978 (Meters)	1979 (Meters)
Volcano	3	10449.933	10499.924
Volcano	32	8754.654	8754.638
Volcano	21	9518.710	9518.450
Volcano	24	9551.576	9551.585
Volcano	Salado	1604.609	2604.602
Volcano	MOJ-6	4691.886	4691.897
Volcano	MOJ-5	4783.270	4783.270
Volcano	MOJ-4	5023.537	5023.532
Volcano	7	10971.736	10971.751
Volcano	M-3	3213.154	3213.168
Volcano	10	11892.135	11892.116
Volcano	30	8410.425	8410.416
Volcano	37	3991.452	3991.455
Volcano	8	7841.617	7841.629
Volcano	29	3893.782	3893.798
Volcano	34	6945.904	6945.912
Volcano	BNP10065	3448.201	3448.198
22	MOJ-6	1864.480	1864.473
22	MOJ-7	1405.206	1405.190
22	38	1092.476	1092.457
22	31	1157.141	1157.123
22	13	1897.392	1897.371
M-3	6	2747.375	2747.371
M-3	28	2307.706	2307.711
M-3	13	1910.646	1910.669
M-3	MOJ-6	2487.884	2487.842
M-3	38	2406.650	2406.650
M-3	MOJ-7	2346.150	2346.124
M-3	22	3473.331	3473.341
M-3	18	3222.790	3222.788

ysis developed by Prescott, Savage, and Kinoshita.³ The principal strain diagram for the regional net (Figure 3) suggests a very slight expansion. The values shown are annual strain rates and indicate less than 1ppm/yr expansion of the area covered by this net. Figure 4 shows the principal strain diagram for those lines covering the production zone. This strain diagram shows a significant movement inward toward the center of the production zone in a NW-SE direction and a slight expansion in a NW-SE direction. As in the diagram for the regional net, the values shown are annual strain rates.

CONCLUSIONS

Only two of the lines measured through the production zone with the Ranger instrument showed a change in length greater than the maximum probable error of $\pm (5 \text{ mm} + 3 \text{ ppm})$. However, nearly all of these lines showed a shortening which indicates that the ground

surface has moved toward the center of the production zone from the northwest and southeast. There are inadequate data to explain the apparent very slight expansion of the production zone in a NE-SW direction. It is probable this is not real but is an inaccuracy due to the net configuration which is weak to the northeast and southwest.

Experience in other areas has shown that a number of repeat surveys over a period of several years are usually required to secure definitive results. Subsequent resurveys should serve to refine or modify the trends suggested by the present data.

REFERENCES

1. Lofgren, B. E., and Massey, B. L., 1978. Monitoring trustal strain, Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico: U.S. Geological Survey Open-File Report 79-204.
2. Massey, B. L., 1978, Regional and local networks of horizontal control, Cerro Prieto Geothermal Area, Mexico: U.S. Geological Survey Open-File Report 78-929.
3. Prescott, W. H., Savage, J. C., and Kinoshita, W. T., 1978, Strain accumulation rates in the western United States between 1970 and 1978: J. Geophys. Res., Sept. 10, 1978, Vol. 84, p. 5423-5435.
4. Savage, J. C., and Prescott, W. H., 1973, Precision of geodolite distance measurements for determining fault movements: J. Geophys. Res., Vol. 78, p. 6001-6008.

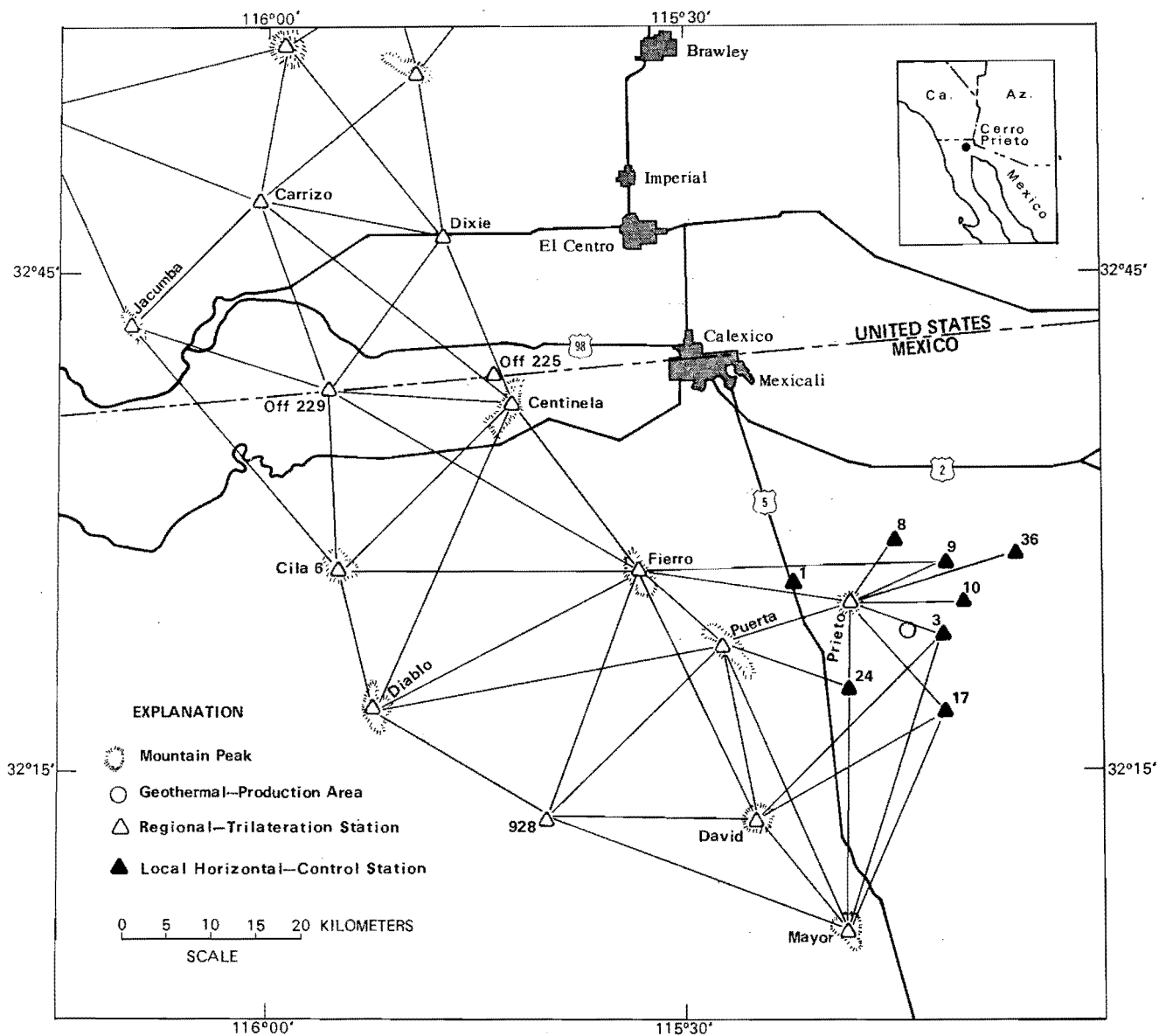


Figure 1. Regional-Trilateration network of horizontal-control and bedrock ties, Cerro Prieto geothermal area, Mexico.

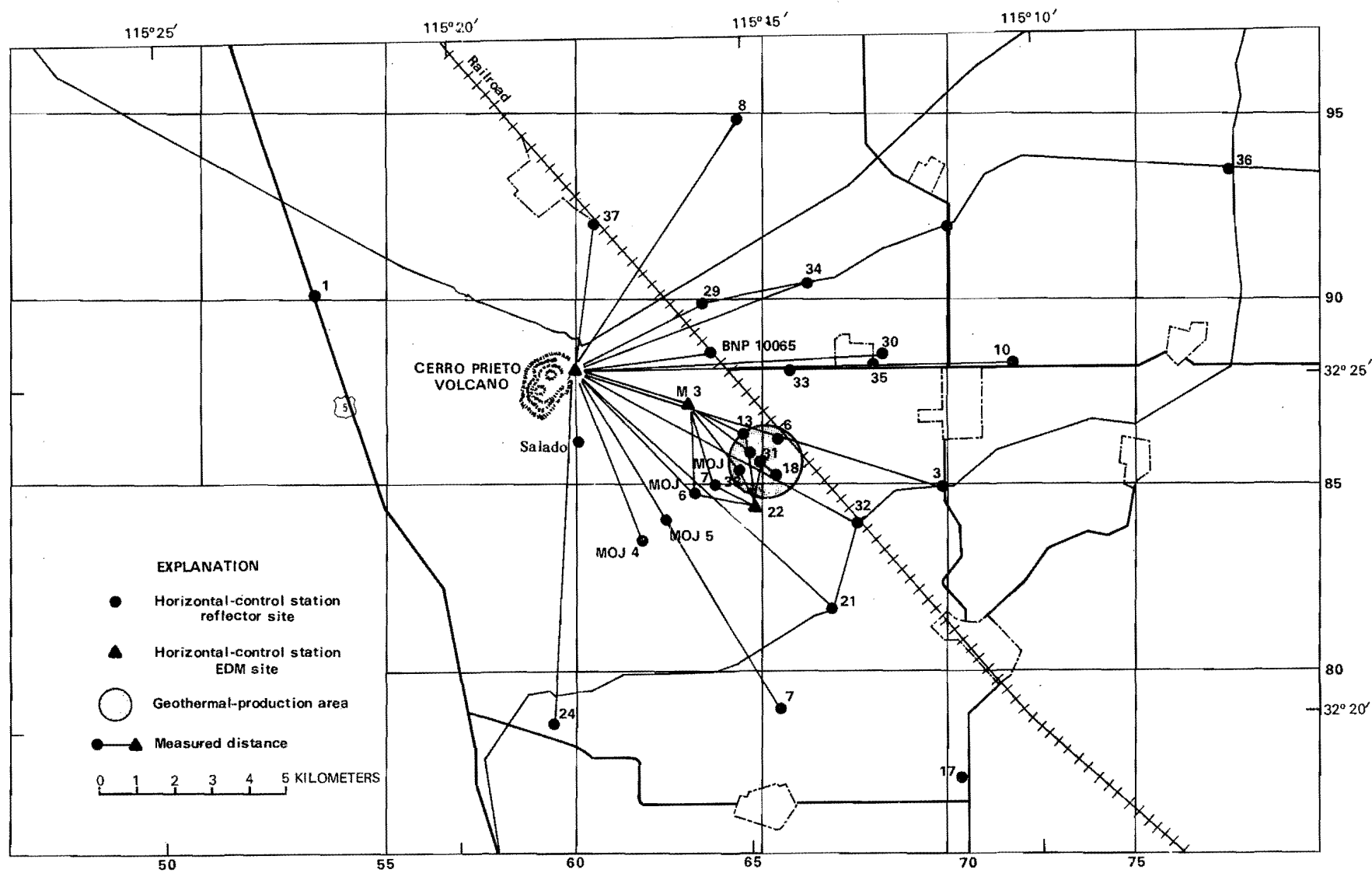


Figure 2. Local network of horizontal-control, Cerro Prieto geothermal area, Mexico.

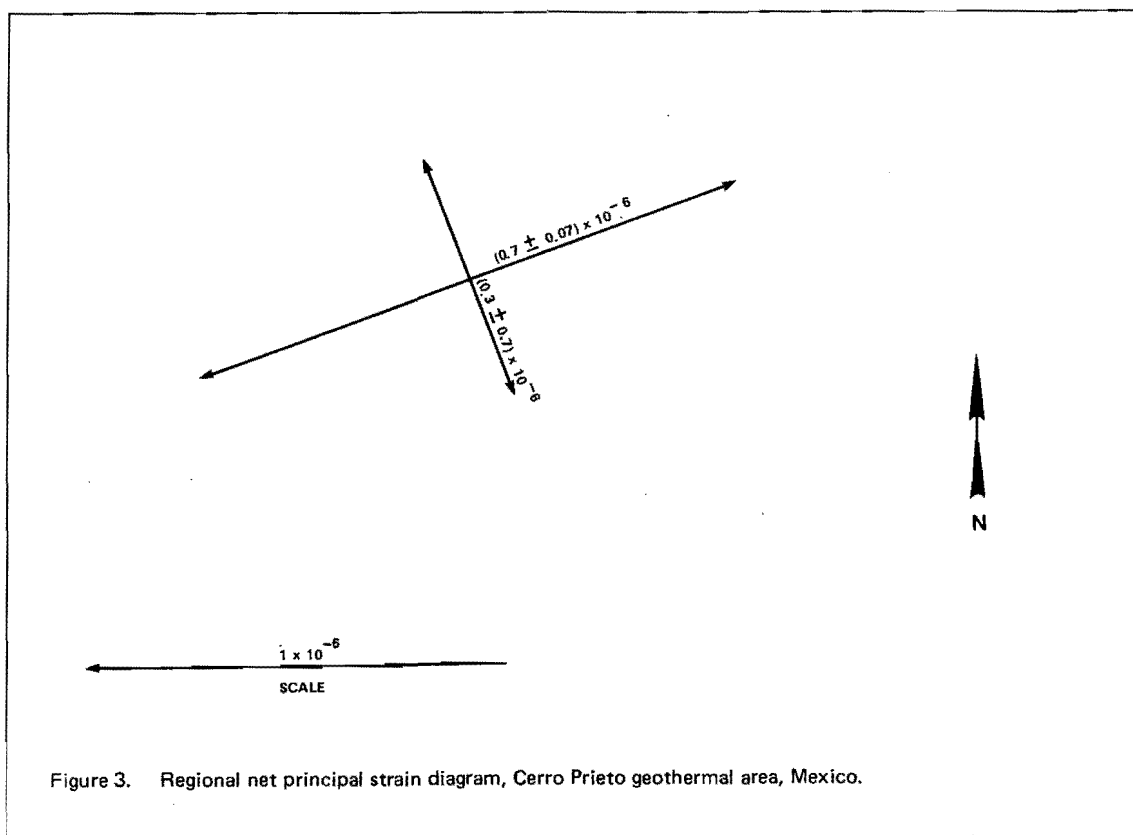


Figure 3. Regional net principal strain diagram, Cerro Prieto geothermal area, Mexico.

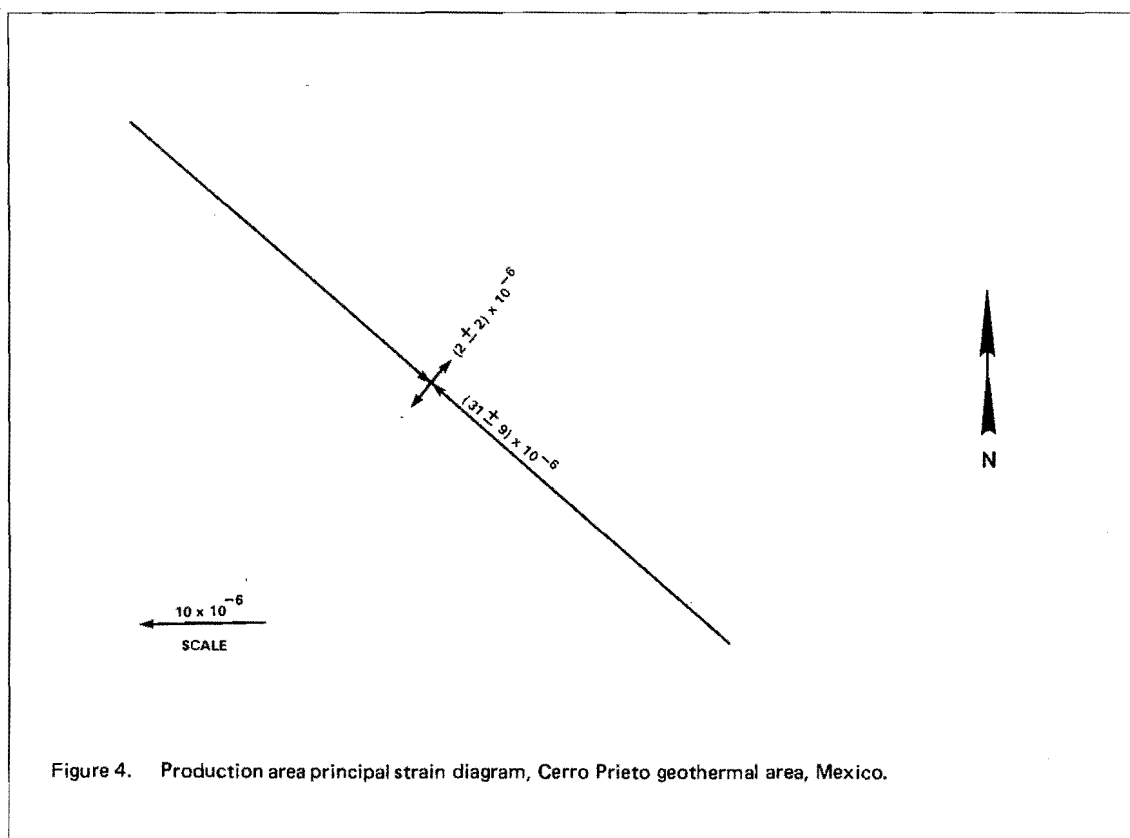


Figure 4. Production area principal strain diagram, Cerro Prieto geothermal area, Mexico.

MEDIDAS DE LAS DEFORMACIONES DE LA CORTEZA. CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO, BAJA CALIFORNIA, MEXICO

RESUMEN

El segundo relevamiento de las redes regional y local de control horizontal, establecidas en el área geotérmica de Cerro Prieto en 1978, indica la existencia de desplazamientos superficiales. La porción de la red local que cubre la zona de producción geotérmica muestra una contracción NO-SE que puede llegar a 31μ de deformación por año. El relevamiento de la red regional evidencia una pequeña expansión sobre todos los ejes con un máximo de alrededor de 0.7μ de deformación por año en dirección NE-SO.

INTRODUCCION

El área geotérmica de Cerro Prieto se encuentra aproximadamente a 30 km al sudeste de Mexicali, Baja California, en el Valle de Mexicali. Dieciocho pozos de producción agrupados en un área aproximada de 2 km^2 descargan alrededor de 2500 toneladas por hora de una mezcla de agua y vapor (datos de marzo de 1979; comunicación oral, ingeniero Bernardo Domínguez, Comisión Federal de Electricidad, Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto). Esta tasa de producción equivale aproximadamente a 11 m de agua por año sobre el área del campo abarcada por los pozos. El agua abandona la zona por canal o por evaporación: nada se reinyecta.

La extracción de grandes volúmenes de fluidos de los yacimientos subterráneos conlleva el desarrollo de grandes tensiones en las formaciones del yacimiento.^{1/2} Las deformaciones que resultan a profundidad dentro del yacimiento tienden a transmitirse a la superficie, por lo que son deformaciones medibles. Del análisis de los cambios superficiales medidos, se obtiene información acerca de la naturaleza de la deformación subterránea y sobre las características mecánicas y de recarga del sistema del yacimiento.

En 1977-1978, se establecieron tres redes de control geodético de precisión para medir las deformaciones tectónica natural e inducida de la superficie alrededor del

área geotérmica. La DETENAL (Dirección General de Estudios del Territorio Nacional, México) estableció una red de nivelación de primer orden para medir los cambios verticales que parte de la frontera internacional hacia el sur a través del campo geotérmico. Para medir deformación horizontal, el U. S. Geological Survey estableció dos redes, que son una red regional de trilateración establecida por la División Topográfica del U. S. Geological Survey (es una extensión hacia el sur de la red preexistente), y una red local de control horizontal establecida por el Water Resources Division en los alrededores y a través de la zona de producción. Este informe concierne sólo a las mediciones y los análisis de los cambios horizontales de la superficie.

DISPOSICION DE LA RED

La figura 1 muestra la red de trilateración regional que se extendió hacia el sur, a partir de la red de deformación de la corteza terrestre existente al norte de la frontera. También se muestran las estaciones de la red local (triángulos sólidos) que se vincularon con las estaciones de la red regional (triángulos abiertos), así como la ubicación de la zona de producción.

EQUIPO DE RELEVAMIENTO

Las líneas de la red local se midieron con un Ranger III Keuffel & Esser de alcance medio (hasta 12 km en buenas condiciones). (El uso de marcas comerciales en este informe es sólo para efecto de identificación y no implica la aprobación del U. S. Geological Survey.) La red regional se midió con un Geodolito Spectra-Physics modelo G 3 de largo alcance (hasta 40 km). Dicho instrumento también se usó para vincular las estaciones locales con las estaciones de la red regional. Ambos instrumentos utilizaron un laser de helio-neón modulado en el espectro visible. La precisión de las mediciones es $\pm (3 \text{ mm} + 0.2 \text{ ppm})$ usando el Geodolito,⁴ y si se usa el Ranger III² de $\pm (5 \text{ mm} + 3 \text{ ppm})$. Los retrorreflectores que se usaron en las mediciones de ambas redes son unidades comercialmente disponibles de diseño convencional. Este diseño es tal que un rayo de luz que se proyecta desde un instrumento, se devuelve al mismo a lo largo del camino de propagación.

MEDIDAS DE LAS DEFORMACIONES DE LA CORTEZA

La primera medición de la red regional se realizó en enero y febrero de 1978, y en marzo de 1979 se realizó la subsiguiente. La red local se midió por vez primera en febrero y marzo de 1978, la segunda medición se efectuó en marzo de 1979. Las longitudes de las líneas en ambas redes, regional y local, se especifican en las tablas 1 y 2, respectivamente.

Las mediciones de ambas redes realizadas en 1978 y 1979 se analizaron por medio de un análisis de deformaciones por cuadrados mínimos, que desarrollaron Prescott, Savage y Kinoshita.³ El diagrama de deformación principal para la red regional (Fig. 3) indica una expansión muy leve. Los valores mostrados son tasas de deformación anual e indican una expansión del área cubierta por esta red menor que 1 ppm por año. La figura 4 muestra el diagrama principal de deformación para las líneas que cubren la zona de producción. Dicho diagrama ejemplifica un movimiento interior importante hacia el centro del área de producción, en dirección NO-SE, y una pequeña expansión en dirección NO-SE. Al igual que en el diagrama de la red regional, los valores son tasas de deformación anual.

CONCLUSIONES

Sólo dos de las líneas medidas a través de la zona de pro-

ducción con el aparato Ranger mostraron cambios de longitud mayores que el máximo error probable de $\pm (5 \text{ mm} + 3 \text{ ppm})$. Sin embargo, casi todas estas líneas mostraron un acortamiento que indica que la corteza se ha movido hacia el centro de la zona de producción desde el noroeste y desde el sudeste. Los datos resultan inadecuados para explicar la pequeñísima expansión notada en la zona de producción en dirección NE-SO. Probablemente, esto no sea real sino una imprecisión debida a la configuración de la red que es débil hacia el NE y SO.

La experiencia en otras áreas ha demostrado que para asegurar resultados definitivos es necesario, generalmente, repetir los relevamientos determinada cantidad de veces a lo largo de varios años. Estudios posteriores deberían servir para refinar o modificar las tendencias sugeridas por los datos presentes.

TITULOS DE FIGURAS Y TABLAS

- Figura 1. Red de trilateración regional de control-horizontal y vínculos de lecho rocoso. Área geotérmica de Cerro Prieto, México.
- Figura 2. Red local de control-horizontal. Área geotérmica de Cerro Prieto, México.
- Figura 3. Diagrama de deformación principal de la red nacional. Área geotérmica de Cerro Prieto, México.
- Figura 4. Diagrama de deformación principal de la zona de producción. Área geotérmica de Cerro Prieto, México.
- Tabla 1. Distancias medidas, red regional (véase Fig. 1).
- Tabla 2. Distancias medidas, red local (véase Fig. 2).