

ESTUDIOS GRAVIMETRICOS, MAGNETOMETRICOS Y DE SISMICA DE REFLEXION EN EL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO

Héctor Luis Fonseca López y Antonio Razo Montiel

Comisión Federal de Electricidad

Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto

Mexicali, B. C.

Del conocimiento geológico regional previo, interpretado con gravimetría y magnetometría, en correlación con la información disponible de otros trabajos, se ha observado que, de los métodos empleados, la sísmica de reflexión es el que ha proporcionado los mejores resultados. Este método, que ha servido para afinar las interpretaciones del basamento y fallas geológicas, también parece sugerir que algunas zonas de dispersión o atenuación de los reflejos sísmicos que se presentan en el campo pueden estar relacionados con áreas probablemente de gran metamorfismo o de altas temperaturas.

Con el fin de ampliar el conocimiento de las condiciones geológico-estructurales que gobiernan la actividad geotérmica se ha efectuado la correlación de los diferentes métodos de gravimetría, magnetometría y sísmica de reflexión realizados en el campo de Cerro Prieto. Estudios anteriores señalan la relación de la actividad geotérmica con estructuras geológicas activas. Anteriormente se pensaba que en la mayoría de los casos, estos métodos tenían aplicación sólo como una herramienta para la determinación de las estructuras geológicas. En la actualidad, estudios realizados en Imperial Valley demuestran que algunas anomalías gravimétricas, además de sugerir la forma y tendencia regional del basamento de la serie sedimentaria, presentan una estrecha relación con áreas de altos gradientes de temperatura medidos en pozos. Probablemente por algún efecto secundario de estas altas temperaturas pueden originarse cuerpos metamórficos contrastantes en densidad. Situaciones similares parecen presentarse en el campo geotérmico de Cerro Prieto y, en general, en el Valle de Mexicali. Dichos cuerpos metamórficos parecen interferir también sobre las anomalías magnéticas; esto puede ser por la alteración hidrotérmica de los minerales característicos de las rocas intrusivas y encajonantes o de la serie sedimentaria; especialmente de aquellos que son los que producen las anomalías magnéticas.

INTRODUCCION

Durante el periodo comprendido entre julio y diciembre de 1977, en la porción norte del Valle de Mexicali, se

establecieron 71 estaciones base de gravedad con estaciones auxiliares intermedias cada 500 m, a lo largo de 5 líneas espaciadas entre sí de 8 a 10 km (con un total de 156 km), distribuidas en un área aproximada de 1250 km². En la parte de magnetometría las mediciones fueron efectuadas simultáneamente con la gravimetría, pero cada 250 m sobre las mismas líneas. El estudio sísmológico se efectuó en 8 líneas distribuidas en un total de 118 km. Se incluye en este reporte el análisis de algunas secciones sísmológicas con los mapas de gravedad y magnético y su probable correlación con el basamento y fallas regionales existentes en él, así como con algunas anomalías geotérmicas observadas.

TRABAJOS DE CAMPO Y GABINETE

En las observaciones de gravedad el método de operación consistió en efectuar circuitos entre las estaciones base, incluyendo lecturas en las estaciones intermedias, los cuales tuvieron una duración máxima de 2 1/2 horas; esto con el fin de disminuir los errores ocasionados por la fatiga del sistema elástico del gravímetro empleado (Worden-Master), así como el efecto de las mareas terrestres. Posteriormente, las correcciones de elevación y latitud fueron aplicadas al valor de la gravedad observada, resultando de ello los valores de anomalías de Bouguer.

En las observaciones magnéticas el método de operación consistió en efectuar circuitos similares a los de gravimetría con el objeto de observar y corregir, en los datos de campo, la deriva propia del magnetómetro (Geometrics G-816 de campo total) y de la variación diurna. A estos datos les fue removido el campo magnético regional, obteniendo finalmente el mapa de anomalías magnéticas residuales.

El apoyo topográfico para la localización de las estaciones se efectuó con telurómetro y estadía, usando la información existente de la Dirección de Estudios del Territorio Nacional (DETENAL). En la nivelación se admitió un error máximo de 0.0084 m por km, que corresponde a una de 2o. orden. Dada la precisión con que se efectuaron los levantamientos el error estimado de la anomalía

de Bouguer en las estaciones de gravedad es de ± 1.0 U. gravimétricas. En las estaciones magnéticas el error puede ser de ± 5 gamas.

En el levantamiento sismológico, habiendo utilizado como fuente de propagación de energía camiones vibradores "Vibroseis", el procesamiento convencional para obtener condiciones óptimas de los datos de campo fue aplicado. Posteriormente a los parámetros obtenidos de los registros o secciones definitivas de reflexión les fueron efectuados algunos cálculos de velocidades de intervalo, velocidades promedio y profundidades a fin de establecer las condiciones apropiadas para la interpretación.

ANTECEDENTES GEOLOGICOS

El Valle de Mexicali forma parte de la provincia fisiográfica del Golfo de California. Topográficamente es una superficie plana en donde sobresale únicamente la prominencia conocida como el Volcán de Cerro Prieto, de 225 msnm. Es parte de la región del Delta del Río Colorado cuyos sedimentos de origen Cuaternario se han depositado intermitentemente sobre otros del Cenozoico, los que a su vez sobreyacen a un basamento granítico y metasedimentario del Cretácico Superior (Fig. 1). Tectónicamente está caracterizado por una serie de grabens y horsts resultantes de zonas de distensión cortical asociados al movimiento de rumbo NO-SE de las fallas Imperial y Cerro Prieto, que a su vez forma parte del sistema San Andrés (Fig. 2). Esta es una zona de gran actividad sísmica en la cual la corteza ha sufrido adelgazamiento con acercamiento de material ígneo del manto, que origina zonas de alto flujo térmico (Fig. 3).

INTERPRETACION GRAVIMETRICA

Con la interpretación gravimétrica se pretende determinar las características y posición de los cuerpos geológicos que se encuentran en el subsuelo, básicamente con las variaciones laterales de la atracción gravitatoria, originadas por cambios en la densidad de esos cuerpos. Así, en el presente trabajo la interpretación se ha enfocado considerando que las anomalías son originadas por el contraste de la densidad en el subsuelo, ocasionado por movimientos estructurales, cambios en la composición mineralógica (metamorfismo) y compactación de las formaciones.

Tomando en cuenta lo anterior, un simple análisis del mapa de anomalías de Bouguer, de la porción N del Valle de Mexicali (Fig. 4), indica que la configuración de las anomalías presenta ciertos alineamientos NO-SE en concordancia con el patrón tectónico regional del área. Es indudable que gran parte de estos alineamientos son representativos de la configuración del basamento, pero por ser esta una área en la cual la corteza terrestre sufre adelgazamiento, algunas anomalías pueden tener efecto de

cuerpos más profundos, cuya posición está relacionada con procesos isostáticos.

La correlación gravimétrica con la geología de la región y los datos aportados por pozos profundos en el campo de Cerro Prieto permiten señalar que en la parte NO del área cubierta por el levantamiento las anomalías de Bouguer manifiestan una clara correspondencia con la configuración del basamento granítico de la serie sedimentaria.

Un máximo gravimétrico, localizado al NO del volcán de Cerro Prieto, con su cima 4 km al O de Michoacán de Ocampo, parece ser una prominencia del basamento granítico detectado en el campo geotérmico de Cerro Prieto, en los pozos M-3 y M-96, a profundidades de 2547 m y 2723 m respectivamente. Este máximo, que al NO desciende suavemente, al N y NE manifiesta un gradiente pronunciado, posiblemente originado por una falla del sistema NO-SE, que puede ser la misma identificada en el campo geotérmico como falla Michoacán. Esta falla, a la que se ha estimado un salto mayor de 1000 m en las rocas del basamento, debió favorecer el engrosamiento de paquete sedimentario al NE, hacia el Ejido Jalisco, donde se presenta un mínimo gravimétrico. Un apófisis de este máximo gravimétrico se extiende al SE, hasta el campo de Cerro Prieto, para formar un horst limitado al NE por la falla Michoacán, al SE por una falla de rumbo SO-NE, que pasa por el Ejido Pátzcuaro, del cual recibe su nombre, y al SO por otra falla que se alinea con la de Cerro Prieto de rumbo NO-SE.

Diez kilómetros al NO del mínimo gravimétrico del Ejido Jalisco se presenta un máximo gravimétrico que, por su relación con la falla Imperial, se le ha denominado horst Imperial. Este máximo, que se extiende al SE por más de 10 km para unirse con otros de mayores dimensiones, configura un horst de 2.5 km por más de 5 km de ancho, en el cual la falla que lo limita al SO es la Imperial. El gradiente de la anomalía hacia el NE, donde existe un bajo gravimétrico, manifiesta la posible existencia de otra falla sensiblemente paralela a la Imperial, de la cual se separa al aproximarse a otro máximo localizado al E del Ejido Nuevo León.

Este máximo al oriente del Ejido Nuevo León no presenta con claridad, en el gradiente de su flanco al SO, la prolongación de la falla Imperial; sin embargo es posible, por algunos rasgos superficiales, que ésta continúe hasta las proximidades del Poblado General Francisco Murguía.

Un mínimo gravimétrico entre las Estaciones del FF.CC. Delta y Guadalupe Victoria manifiesta una depresión estructural en forma de graben, limitada al NE por la falla Imperial, al NO por la falla Pátzcuaro y al SO por

la falla Cerro Prieto. La correlación de los pozos S-262 y M-189 del campo geotérmico, indica que la falla Cerro Prieto podría tener un salto de 2500 m en el basamento granítico.

Al NO del graben Delta Guadalupe Victoria la falla Cerro Prieto es parte de otro horst, llamado de Laguna Volcano, en el que se localizó el pozo S-262 del campo geotérmico, habiendo cortado el basamento a 1473 m de profundidad.

El horst de Laguna Volcano y la prolongación hacia el Valle, debajo de los sedimentos aluviales, de las rocas intrusivas que constituyen la Sierra de Cucapás, incluso con la falla que lleva el mismo nombre, delimitan un mínimo gravimétrico denominado graben Nayarit. Este graben, que se extiende al NO por debajo de los abanicos aluviales de la Sierra de Cucapás, y hasta el volcán de Cerro Prieto, está separado del máximo gravimétrico de Michoacán de Ocampo por una falla de rumbo NE-SO, paralela a las estructuras que presenta superficialmente el volcán de Cerro Prieto.

Un análisis general de la configuración de anomalías de Bouguer revela la existencia de dos grandes depresiones estructurales, cuyos ejes mayores se alinean paralelamente al sistema San Andrés, pero que presentan un desplazamiento en echelón de rumbo SO-NE, coincidente con el sistema denominado Volcano.

Este desfasamiento en las depresiones se ha asociado con un posible centro de dispersión en una zona de fallas transformadas (Fig. 2) que al encontrarse en una zona donde la corteza ha sufrido adelgazamiento con acercamiento del material ígneo del manto pudieron causar intrusiones que han originado el alto flujo térmico provocando con ello metamorfismo en el medio circundante. Este posible centro de dispersión se localiza en el alto gravimétrico que se observa entre el horst de Cerro Prieto y el Ejido Nuevo León, y con él podría estar relacionado genéticamente el campo de Cerro Prieto.

Estudios realizados en Imperial Valley demuestran que las anomalías gravimétricas, además de sugerir la forma y tendencia regional del basamento, en algunos casos presentan una estrecha correlación con las áreas de altas temperaturas medidas en pozos.

De acuerdo con los estudios de mineralogía realizados por Elders y otros, en 1978, en el sistema hidrotérmico de Cerro Prieto se ha producido una gran variedad de minerales cuya ocurrencia puede ser indicadora de zonas de baja y alta temperatura. Dichos minerales se pueden clasificar dentro de tres grupos: el primero formado por aquellos que ocurren como cementantes rellenando los poros de las areniscas, por ejemplo, cuarzo, calcita, do-

lomita, feldespatos potásico, pirita y pirrotita. El segundo, constituido por epidota, prehnita, actinolita, wairakita, y que incluye los productos por reacciones de descarbonatación que involucran la destrucción de calcita y micas potásicas. Un tercer grupo consta de una secuencia de minerales que incluyen la illita, clorita y biotita.

Con base en esta serie de análisis y extrapolando las condiciones a aquellos lugares en los que se presentaría la ocurrencia, las condiciones de densidad de las rocas pueden cambiar originando con ello anomalías en el campo gravitatorio. Este efecto, que ha sido observado en las anomalías de "Dunnes", "Salton Sea", "North Brawley", "Heber" y "East Mesa" de Imperial Valley, donde se presentan algunos máximos gravimétricos, parece presentarse también en el campo de Cerro Prieto, B. C., en el horst y en el alto gravimétrico que separa los mínimos Delta-Guadalupe Victoria y Jalisco, donde existen evidencias de altas temperaturas y cierto metamorfismo en las rocas de la serie sedimentaria. El alto gravimétrico en el que se encuentra el horst Imperial puede resultar de interés comprobándose el mismo origen.

INTERPRETACION MAGNETICA

En este trabajo se considera que las rocas están magnetizadas en dirección del campo magnético del área, y que las rocas del basamento tienen mayor efecto magnético que las rocas sedimentarias, que las sobreyacen con sus correspondientes excepciones en zonas localmente alteradas.

Dentro del sistema de interpretación empleado se propone la existencia de dos grupos de anomalías; el primero, que consiste de aquellas en donde se asume que las rocas del basamento tienen una mayor susceptibilidad magnética que las rocas sedimentarias, y que en ambas no ha habido alteraciones; y un segundo grupo constituido por aquellas en las que un cambio en la susceptibilidad magnética de los sedimentos o del basamento, por metamorfismo, intrusiones, o depositación de materiales de alta susceptibilidad, puede confundirse con un cambio en el relieve del mismo basamento.

En el mapa de las anomalías magnéticas del Valle de Mexicali (Fig. 6), se ha observado que las del primer grupo se presentan en la porción NO del área estudiada, entre la Sierra de Cucapás y las fallas Cerro Prieto y Michoacán. Estas anomalías presentan gran similitud con las de gravedad y se han interpretado como representativas del basamento, el cual no ha sufrido ni depositación de materiales de mayor susceptibilidad, ni cambios en sus propiedades físicas. Por consiguiente, sus campos potenciales tanto gravimétrico como magnético no están alterados. El pozo S-262, que se encuentra en un máximo gravimétrico que coincide con uno magnético, tocó ba-

samento a 1473 m de profundidad y parece presentar lo anterior.

Al NE del pozo Prián, un mínimo magnético está asociado con el máximo gravimétrico denominado horst Imperial; al SE del pozo NL-1, un máximo magnético se asocia con un mínimo gravimétrico, y en la zona del pozo M-3 un mínimo magnético se asocia con un máximo gravimétrico. Se considera que esas anomalías magnéticas, que corresponden al segundo grupo, puede ser importante señalarlas en el Valle de Mexicali y más aún si están relacionadas con altos gravimétricos ante la posibilidad de que estos últimos representen zonas de un metamorfismo local que en algunos casos podría estar asociado con la actividad geotérmica.

Heartherton y otros (1965) sugirieron que en Nueva Zelandia algunos mínimos magnéticos son causados por el remplazamiento de magnetita por pirita. Griscom y Muffler (1971) atribuyeron, asimismo, que algunos máximos magnéticos observados en los Valles Imperial y de Mexicali son originados por la presencia de metamorfismo en los sedimentos.

Otros máximos magnéticos observados en el Valle de Mexicali pueden ser causados también por la intrusión de rocas volcánicas de alto contenido de minerales ferromagnesianos.

SISMOLOGIA DE REFLEXION

Con el fin de detallar las interpretaciones geológicas existentes, utilizando el sistema "Vibro seis", se empleó el método geofísico de Sismología de Reflexión.

Esta técnica aprovecha la propiedad de los estratos del subsuelo de servir como medio de transmisión a ondas acústicas producidas artificialmente, las cuales son reflejadas, detectadas, grabadas e interpretadas mediante su registro en la superficie. Se describe en términos generales su aplicación, mostrando los resultados con algunas secciones sismológicas localizadas en el área del campo de explotación e intentando establecer una correspondencia entre ellas.

El fenómeno de reflexión ocurre cuando las ondas acústicas que viajan en un medio de características determinadas penetran en otro diferente. Esta situación básicamente queda controlada por la velocidad de propagación de las ondas y la densidad del medio en el que se desplazan.

Ante la presencia de valores altos de densidad y/o velocidad en los estratos del subsuelo, se originan reflejos de gran amplitud que son fácilmente diferenciables en las secciones sismológicas. Del análisis de las variaciones en la amplitud y posición de los reflejos es posible determinar

las condiciones que las originan, ya que su presencia generalmente es atribuida a la morfología de los estratos y a la composición y compactación de los mismos.

En este trabajo la interpretación se apoyó clasificando los reflejos dependiendo de la claridad con la que éstos se presentaron. Así, partiendo de lo anterior, fueron agrupados aquellos que se observaron bien diferenciados y de gran amplitud y tendencia horizontal. Se les consideraron como representativos de una estratificación de cierta homogeneidad y buena respuesta sismológica.

Aquellos reflejos no uniformes, afectados ocasionalmente por difracciones, reflexiones múltiples y en general de poca diferenciación, pero capaces de contribuir en el análisis estructural, fueron de gran ayuda en la localización de las principales fallas geológicas existentes en el campo.

Reflejos pobres o atenuados que se presentaron en todas las secciones, en condiciones normales y sin fallas en el procesamiento de los datos de campo, generalmente son originados por materiales de baja consolidación, característicos de áreas de grandes espesores sedimentarios. Cuando esto ocurre no tienen mayor importancia al resultar incapaces de insinuar la morfología en el subsuelo. Sin embargo, cuando se presentan bajo el paquete de horizontes reflectores no relacionado con basamento, en áreas con posibilidades geotérmicas y en máximos gravimétricos, puede ser de gran interés ante la posibilidad de representar a cuerpos metamórficos.

En ciertas áreas, aunque hubo gran separación de las líneas sismológicas con el aporte de la información geológica existente y de algunos trabajos geofísicos realizados, las fallas interpretadas en secciones se orientaron considerando el mismo rumbo de los sistemas de fallamiento de Cerro Prieto y Volcans.

Tomando en cuenta lo anterior, los reflejos mejor definidos, que desafortunadamente sólo se presentaron al SO de las líneas D (Fig. 7) y E, fueron atribuidos a un ambiente aislado, de estratigrafía uniforme e inclinación descendente hacia la Sierra de Cucapás. El basamento de composición granítica, que aquí fue estimado de 1500 m a 2250 m de profundidad, así como las profundidades a las que los pozos M-3, M-96 y S-262 lo tocaron, ha sido la guía para identificar los reflejos que podrían corresponder al mismo en el resto del trabajo. Con base en ello y a algunas profundidades calculadas por sísmica de refracción (Calderón, 1963) y gravimetría (Fig. 5), se elaboró su configuración (Fig. 8).

Mediante la correlación de pozos la configuración obtenida de los sedimentos de mayor consolidación (Cima de la Unidad B) concuerda con las fallas y la morfología

gía del basamento interpretadas por este método. Ello implica que los efectos tectónicos que han desplazado al basamento, y por consiguiente a los estratos que lo sobreyacen, son claramente reflejados.

La falla Cerro Prieto, que ha reflejado su continuidad en la mayoría de las secciones, parece haber provocado un acúñamiento en los sedimentos como el observado en la línea A (Fig. 9), en la zona del pozo 92. Ello significa que si se hiciera un análisis comparativo de la calidad y posición de los horizontes reflectores que se observaron en la zona del campo con los que se presentan en la parte SO, hacia la Sierra de Cucapás, indicaría que existen distintas condiciones estratigráficas y que esta falla podría actuar como frontera entre ambas. En la Estación Delta los reflectores observados presentan ligeras diferencias en ambos lados de la falla. Sin embargo, a 4 km aproximadamente al SE de la estación se insinúa una estratificación cuyo espesor tiende a disminuir, calculándose el basamento de ésta entre 2750 m de profundidad; mientras que a 4 km al S, coincidente en su localización con un pequeño máximo magnético, fue situado a 1500 m. En el área de la planta generadora fue estimado a 2750 m, pero cercano a este lugar, en el Ejido Hidalgo, se calculó a 4750 m. En el pozo S-262 fue cortado a 1473 m y en el pozo 189 se atravesaron 3500 m de sedimentos sin haberlo encontrado. Estas diferencias de nivel del basamento, que presentan una inclinación pronunciada, son características de los efectos secundarios del mecanismo de fallamiento transformado.

Algunas de las fallas inferidas (Fig. 10), que fueron detectadas utilizando reflejos regularmente definidos, evidencian preliminarmente su existencia al resultar concordantes con las fallas Delta, Pátzcuaro e Hidalgo, de rumbo SO-NE, y con algunas otras del mismo rumbo detectadas por la correlación de las columnas litológicas de los pozos.

Este sistema de fallamiento, oblicuo al patrón tectónico regional de rumbo NO-SE, es una clara evidencia del desplazamiento en echelón característico de las zonas de fallas transformadas como es el Valle de Mexicali. Ello hace pensar que estas fallas, al encontrarse en lo que se ha sugerido como un centro de dispersión y al adecuarse al movimiento del flujo convectivo del vapor endógeno, podrían ser relacionadas también con la génesis del campo.

Los reflejos pobres o atenuados, que fueron observados en todas las secciones, resultaron de particular interés cuando se presentaron bajo el paquete de horizontes reflectores. Este evento, que solamente fue observado en la zona de producción, se ha denominado zona de atenuación de reflejos (ZAR).

De un estudio sísmológico efectuado en el campo geotérmico de "East Mesa" (Howard J. y otros, 1978) se

sugiere que esta zona (ZAR) se origina por sedimentos densos altamente alterados y cementados que han estado sujetos a procesos de alteración dependiente de la temperatura. Se menciona también que si disminuye el contraste de velocidades entre las lutitas y las areniscas que forman parte de la columna estratigráfica del campo, las reflexiones se atenúan, contribuyendo en el proceso las condiciones de porosidad, permeabilidad y el grado de fracturamiento existente cuyo efecto ocasionaría dispersión de energía sísmica. También se encontró una buena correlación con un máximo gravimétrico.

En el caso del campo de Cerro Prieto, ZAR fue observada en la zona de producción y aparentemente se extiende al E-NE, entre los Ejidos Hidalgo y Nuevo León (Fig. 11), ubicándose dentro del máximo gravimétrico con el que se ha relacionado el campo.

No obstante la gran separación de las líneas sísmológicas, la configuración obtenida de la correlación preliminar de estos datos difusos (ZAR) señala semejanza con unas secciones de isothermas elaboradas tomando las temperaturas máximas registradas en el campo con los pozos en reposo (Figs. 12, 13, 14 y 15). Asimismo, indica también, en forma general, similitud con las profundidades a las que se encuentra el contacto de los sedimentos de mayor consolidación (Cima de la Unidad B).

Aunque es prematuro señalar, por la ausencia de mayor información, si estos datos realmente representan a los sedimentos de mayor consolidación, por la forma y condiciones en que se observan, permiten compararlos con los observados en "East Mesa", en donde sí los representan. Ello puede significar que, al igual que en el campo geotérmico vecino, en el campo de Cerro Prieto están representando a rocas densas, porosas, permeables y de altas temperaturas que ocasionan atenuación en los reflejos y pueden constituir el yacimiento geotérmico.

Por último, bajo el límite de la zona de atenuación de reflejos (LZAR), al no poderse diferenciar cuáles reflejos representarían al basamento, las profundidades y morfología de éste, se ha estimado tentativamente (Fig. 8) siguiendo la tendencia de los estratos reflectores suprayacentes.

CONCLUSIONES

El análisis de los resultados obtenidos en los levantamientos gravimétrico y magnetométrico, y su correlación con la información proporcionada por la sísmología de reflexión, permite concluir que:

1. El mapa de anomalías de Bouguer representa regionalmente la configuración del basamento de la serie sedimentaria que rellena el valle.

2. Los alineamientos de las anomalías tienen una estrecha relación con los sistemas estructurales que afectan la región.

3. Con base en la gravimetría se ha podido definir que la falla Imperial es parte de un horst NO-SE de 2.5 km a más de 5 km de ancho, que se extiende por más de 30 km, desde la frontera México-EUA, hasta un máximo gravimétrico que inicia su gradiente hacia el SE del Ejido Saltillo.

4. Parte del campo geotérmico de Cerro Prieto se localiza en un horst, limitado al NE por la falla Michoacán, al SE por la falla Pátzcuaro y al SO por una falla NO-SE que se alinea con la de Cerro Prieto. Este horst es una extensión de un alto estructural de un máximo gravimétrico localizado al O de Michoacán de Ocampo.

5. La configuración de anomalías de Bouguer señala la existencia de dos depresiones estructurales cuyos ejes principales se alinean paralelamente al sistema San Andrés, pero que presentan un desplazamiento en echelón de rumbo SO-NE. Este desplazamiento de las depresiones se ha relacionado con un posible centro de dispersión en una zona de fallas transformadas.

6. El campo geotérmico de Cerro Prieto se localiza en el área de este centro de dispersión, el cual está representado por un máximo gravimétrico entre el horst de Cerro Prieto y el Ejido Nuevo León, que se extiende al E-SE hacia otro de mayores dimensiones.

7. Los estudios realizados en Imperial Valley demuestran que las anomalías gravimétricas, además de sugerir la forma y tendencia regional del basamento, en algunos casos presentan estrecha correlación con las áreas de altas temperaturas. En el caso del campo de Cerro Prieto, el máximo gravimétrico en el que se encuentra también se ha asociado con altas temperaturas. Al encontrarse en un área donde la corteza ha sufrido adelgazamiento con probable acercamiento del material ígneo del manto, los movimientos tectónicos sucedidos pudieron provocar intrusiones que han originado el alto flujo térmico causando con ello metamorfismo en el medio circundante y, consecuentemente, anomalías en el campo gravitacional.

El alto gravimétrico en el que se encuentra el horst Imperial puede resultar de interés comprobándose el mismo origen.

8. El mapa de anomalías magnéticas indica que en la porción noroccidental del área estudiada, entre la Sierra de Cucapás y las fallas Cerro Prieto y Michoacán, las anomalías presentan gran similitud con las de gravedad. Se han interpretado como representativas de un basamento que no ha sufrido ni depositación de materiales que alte-

ren sus campos potenciales, ni cambios en sus propiedades físicas y ello podría reflejar ausencia de acción hidrotérmica.

9. Al NE del pozo Prian un mínimo magnético está asociado con el máximo gravimétrico denominado horst Imperial, al SE del pozo NL-1 un máximo magnético se asocia con un mínimo gravimétrico, y en la zona del pozo M-3 un mínimo magnético se asocia con un máximo gravimétrico. Se considera que estas desigualdades en la asociación de anomalías es importante señalarlas en el Valle de Mexicali y más aún cuando una de dichas anomalías es un alto gravimétrico ante la posibilidad de que este último represente una zona de metamorfismo local que podría estar asociado con la actividad geotérmica.

10. Reflejos sísmicos bien definidos solamente se observan al SO de las líneas D y E. Fueron atribuidos a un ambiente aislado de estratigrafía uniforme con inclinación descendente hacia la Sierra de Cucapás.

11. La falla Cerro Prieto, que ha reflejado su continuidad en la mayoría de las secciones, ha provocado un acúñamiento en los sedimentos como el observado en la línea A en la zona del pozo 92.

12. Por la calidad y posición de los horizontes reflectores observados en la zona del campo y los que se presentan al SO, rumbo a la Sierra de Cucapás, se considera que existen distintas condiciones estratigráficas y que la falla de Cerro Prieto actúa como frontera entre ambas. Ello concuerda con lo mencionado en el punto 8.

13. Las fallas Delta, Pátzcuaro, Hidalgo y algunas otras de rumbo SO-NE son una clara evidencia del desplazamiento en echelón mencionado en el punto 5. Estas fallas, al encontrarse en lo que se ha sugerido como un centro de dispersión y al adecuarse al movimiento del flujo convectivo del vapor endógeno, podrían relacionarse también con la génesis del campo.

14. La zona de atenuación de reflejos (ZAR) fue observada en la zona de producción y se continúa (?) rumbo al E-NE, entre los Ejidos Hidalgo y Nuevo León, ubicándose dentro del máximo gravimétrico con el que se ha relacionado el campo.

15. Mediante la gravimetría se ha podido distinguir la posición regional de las principales estructuras que afectan el área y la sismología de reflexión ha señalado su posición local. Por otra parte, el enfoque al aspecto geotérmico efectuado a la gravimetría y magnetometría, correlacionadas con la sismología, permite indicar que, por ser el metamorfismo un parámetro cuya influencia es definitiva en los tres métodos, los resultados preliminares recomiendan programar las exploraciones futuras en el

Valle de Mexicali, sobre los máximos gravimétricos que no coincidan con los magnéticos y que mediante la sísmica se correlacionen con ZAR, en donde en este último, aunque aún se encuentre en etapa de investigación, se presenten zonas de mayor fracturamiento.

REFERENCIAS

- Applegate, James K. y Paul R. Donaldson, "Seismic Reflection for Geothermal: Techniques and Case History", *Geothermal Resources Council, Transactions*, vol. 3, septiembre de 1979.
- Biehler, S. y J. Combs, "Correlation of gravity and geothermal anomalies in the Imperial Valley, Southern California" (Abs.) *Geol. Soc., Amer Abstracts with programs*, vol. 4, no. 3, 1972.
- Biehler, S. "Gravity Studies in the Imperial Valley", en *Cooperative geological-geophysical-geochemical investigation of geothermal resources in the Imperial Valley area of California*, Riverside, Univ. Calif. Education Research Service, 1971.
- Caín, J.C., W. E. Daniels y D. C. Hendricks, "Computation of the main geomagnetic field from Spherical harmonic expansions", *Goddard Space Flight Center*, reimpression X-611-64-316, 1964.
- Caín, J. C. y S. J. Caín, "Derivation of the international Geomagnetic Field", *A report to IAGA Commission II, Working Group 4*, Goddard Space Flight Center, reimpression X-612-68-501, 1968.
- Combs, J., "Heat flow and geothermal resources estimate for the Imperial Valley", en *Cooperative Geophysical Geochemical Investigations of California*, Riverside, Univ. Calif., 1971.
- De la Peña, L. A. y C. I. Puente, "El campo geotérmico de Cerro Prieto", *92nd meeting, San Diego. Geological Society of America. Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto*, Comisión Federal de Electricidad, 1979.
- DeJongh Roger P. y Robert L. Kovack, "Seismic Reflection Investigation in a Geothermal Area", *Geothermal Resources Council, Transactions*, vol. 1, mayo de 1977.
- Dobrin M. B., *Introducción a la prospección geofísica*, 2a. imp., Ed. Omega, 1969, pp. 266-292.
- Elders, W. A., R.W. Rex, T. Robinson y S. Biehler, "Crustal Spreading in Southern California", *Science*, 178, 1972.
- Elders, W.A., J. R. Hoagland, E. R. Olson, S.D. McDowell y P. Collier, *A compressive study of samples from geothermal reservoirs: petrology and light stable isotope geochemistry in the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, México*, UCR/IGPP 78/26, 1978.
- Fonseca, H.L. y M.A. Razo, "Prospección gravimétrica y magnetométrica en el valle de Mexicali, B.C.", *Informe 5-78*, (sin pub.) Brigada del Eje Neovolcánico, CFE, 1978.
- Gastil, G.R., E.C. Allison y R.P. Phillips, *Reconnaissance geologic map of the state of Baja California*, preparado por los estudiantes y el equipo de investigadores de la Universidad Autónoma de Baja California y el San Diego State College, 1971.
- Geólogos Consultores Asociados, *Levantamiento sismológico de refracción en la zona geotérmica de Cerro Prieto, Municipio de Mexicali, Estado de Baja California*, (sin pub.), Archivo de la CFE, 1962.
- Griscom, A. y L.J.P. Muffler, *Salton Sea aeromagnetic map*, U.S.G.C., Washington, D.D. Map GP-754, 1971.
- Heartherton, T., W.J.P. MacDonald y G.E.K. Thompson, "Geophysical Methods in Geothermal Prospecting in New Zealand", *Bull. Volcanol.*, vol. 29, 1966, pp. 485-497.
- Howard J., J.A. Apps, et al., *Geothermal resource and reservoir investigations of U.S. Bureau of reclamation Lease holds at East Mesa, Imperial Valley, California*, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, octubre de 1978.
- Kovack, R.L., C.R. Allen y F. Press, "Geophysical Investigations in the Colorado Delta Region", *Jour. Geophys. Res.*, vol. 67, pp. 2485-2871, 1962.
- Lambert, W.D. y F.W. Darling, "Values of Theoretical Gravity on the International Ellipsoid", *Bull. Geodesique*, no. 32, octubre, noviembre y diciembre de 1931.
- Meidav, T. y J.H. Howard, "An Update of Tectonics and Geothermal Resource Magnitude of the Salton Sea Geothermal Resource", *Geothermal Resource Council, Transactions*, vol. 3, septiembre de 1979.
- Meidav, T. y W.R. Rex, "Geophysical Investigations for Geothermal Energy Sources, Imperial Valley, California", *Phase I: 1968 Field Project*, 1970.
- Nettleton, L.L., *Gravity and magnetics in oil prospecting*, Nueva York, McGraw-Hill, 1976.
- Puente, C.I., "Geology of the Cerro Prieto Geothermal Field (abs.)", *Abstracts, 1st., Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México*, Lawrence Berkeley Laboratory Rept. LBL-7098 ABS, 1978, p. 6.
- Rex, R.W., E.A. Babcock, S. Biehler, J. Combs, T.B. Coplen, W.A. Elders, R.B. Fugerson, Z. Garfunkel, T. Meidav y P.F. Robinson, "Cooperative geological", *Geophysical-geochemical investigations of geothermal resource in the Imperial Valley area of California*, UCR/IGPP, 1971.
- Talwani Manick, Lamar Worzel J. y Mark Landisman, "Rapid Gravity Computations for Two-Dimensional Bodies with Application to the Medocine Submarine Fracture Zone", *Jour. Geophys. Res.*, vol. 64, 1959, pp. 49-59.
- Velasco Hernández, J. y J.J. Martínez Bermúdez, *Levantamiento Gravimétrico en la Zona Geotérmica de Mexicali, B.C.*, Consejo de Recursos Naturales no Renovables, 1963, 24 p.

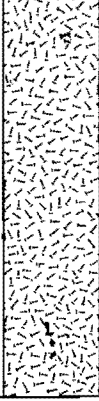
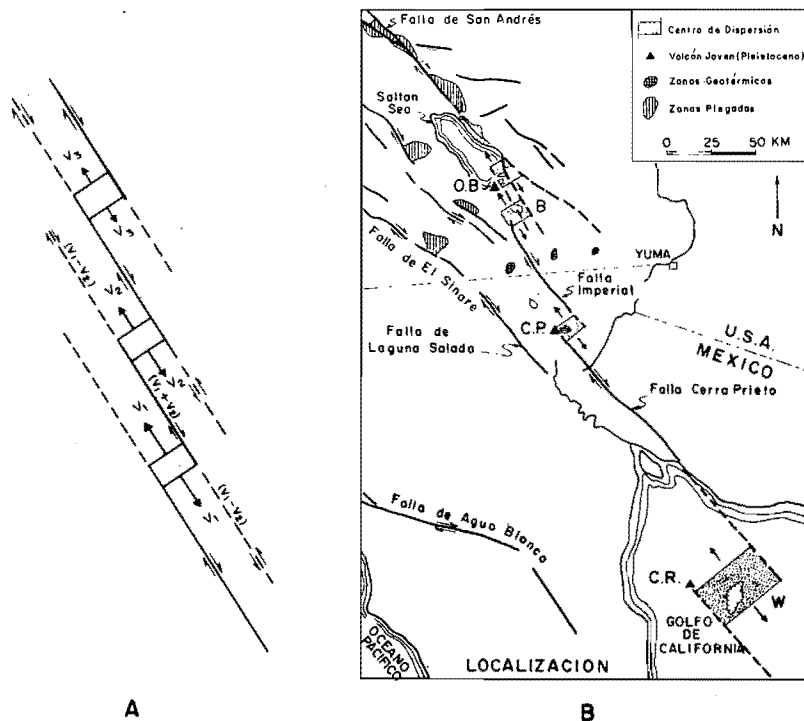
ERAS	PERIODO	EPOCA	PETROLOGIA	ESPESOR	DESCRIPCION LITOLOGICA
CENOZOICA	CUATERNARIO	HOLOCENO		DE 500 A 2300 m.	ANDESITAS, ARCILLAS, ARENAS DE FINAS A GRUESAS, DE CUARZO, SILICE, FELDESPATOS Y ESCASAS GRAVAS. DIABASA
		PLEISTOCENO		DE 0.0 A 100 m.	LODOLITAS LIMOSA DE COLOR CAFE CON INTERCALACIONES DE ARENA Y ARENISOA DE COLOR CREMA, POBREMENTE CEMENTADAS, MODERADAMENTE CLASIFICADAS.
	TERCIARIO			100 m.	LUTITAS, LUTITAS LIMOLITICAS Y LIMOLITAS DE COLOR CAFE, LAMINARES, FISILES INTERCALADAS CON ARENISCAS DE COLOR CREMA, DE MODERADAMENTE A BIEN CLASIFICADAS.
MESOZOICA	CRETACICO	SUPERIOR		MAYOR DE 2200 m.	LUTITAS, LUTITAS LIMOLITICAS Y LIMOLITAS DE COLOR GRIS A NEGRO (A MAYOR METAMORFISMO LA ROCA ES MAS OSCURA) DE LAMINAR A MASIVA, PRESENTA ESTRUCTURAS DE ASENTAMIENTO, INTERCALADAS CON ARENISCAS (ARCOSAS) DE CUARZO Y ESCASO FELDESPATO DE GRANO MUY FINO A MUY GRUESO PREDOMINANDO LAS DE GRANO FINO Y MEDIO DE SUBANGULOSO A SUBREDONDEADO, BIEN CLASIFICADO DE COLOR BLANCO Y BLANCO GRISACEO. ESTA UNIDAD PRESENTA UN ECHADO DE 10-15°
				?	GRANITO DE BIOTITA

Figura 1. Columna estratigráfica del área geotérmica Cerro Prieto.



A.— Modelo de Fallas transformantes y Centros de Dispersión propuesto por Lomnitz, W. Elders y otros (1972)

B.— Localización de afloramientos en los Valles Imperial y Mexicali

Figura 2.

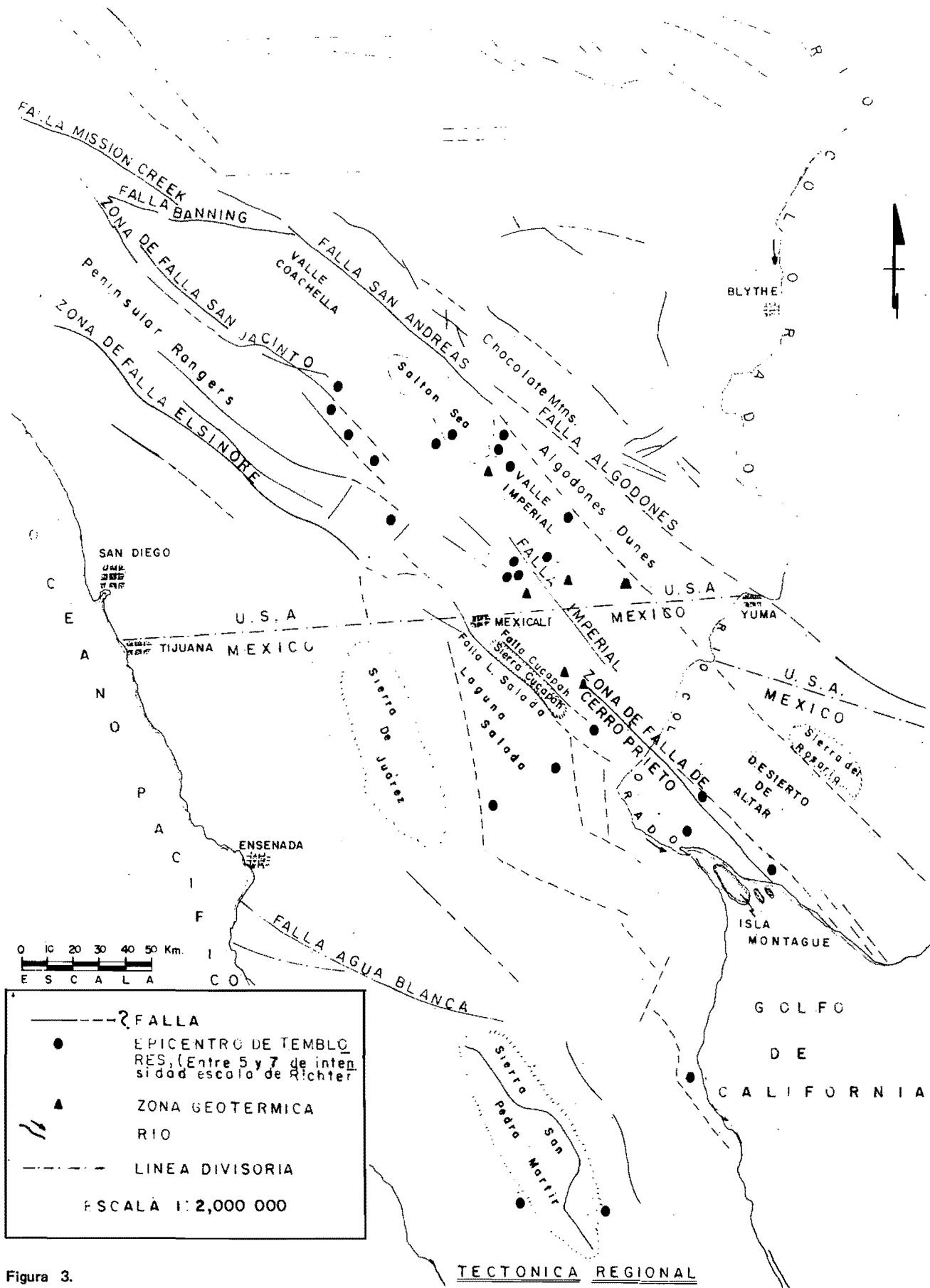


Figura 3.

Figura 4. Plano de anomalías de Bouguer del Valle de Mexicali, Baja California.

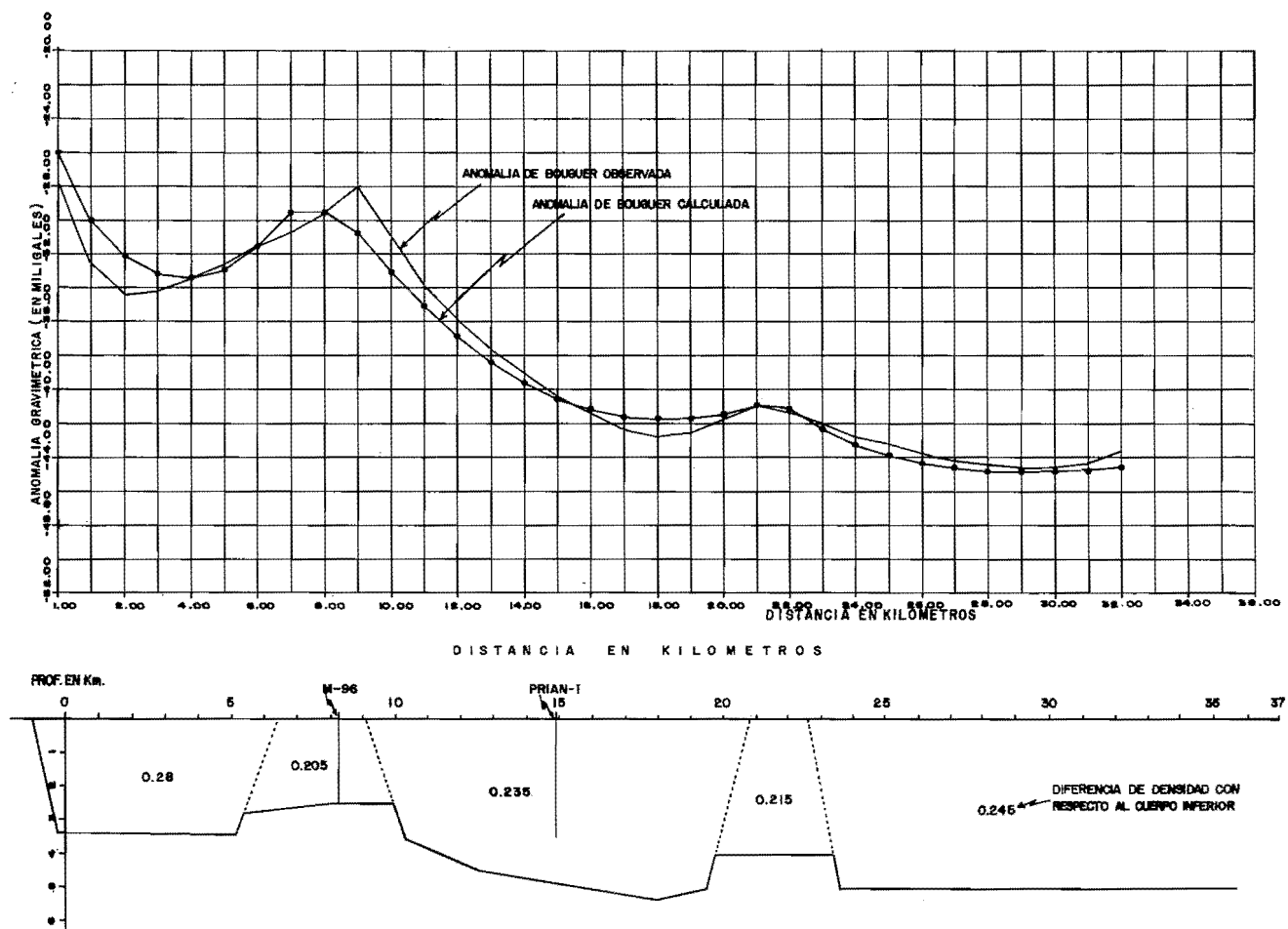


Figura 5. Modelo gravimétrico de la línea 1.

Figura 6. Plano de anomalías magnéticas del Valle de Mexicali, Baja California.

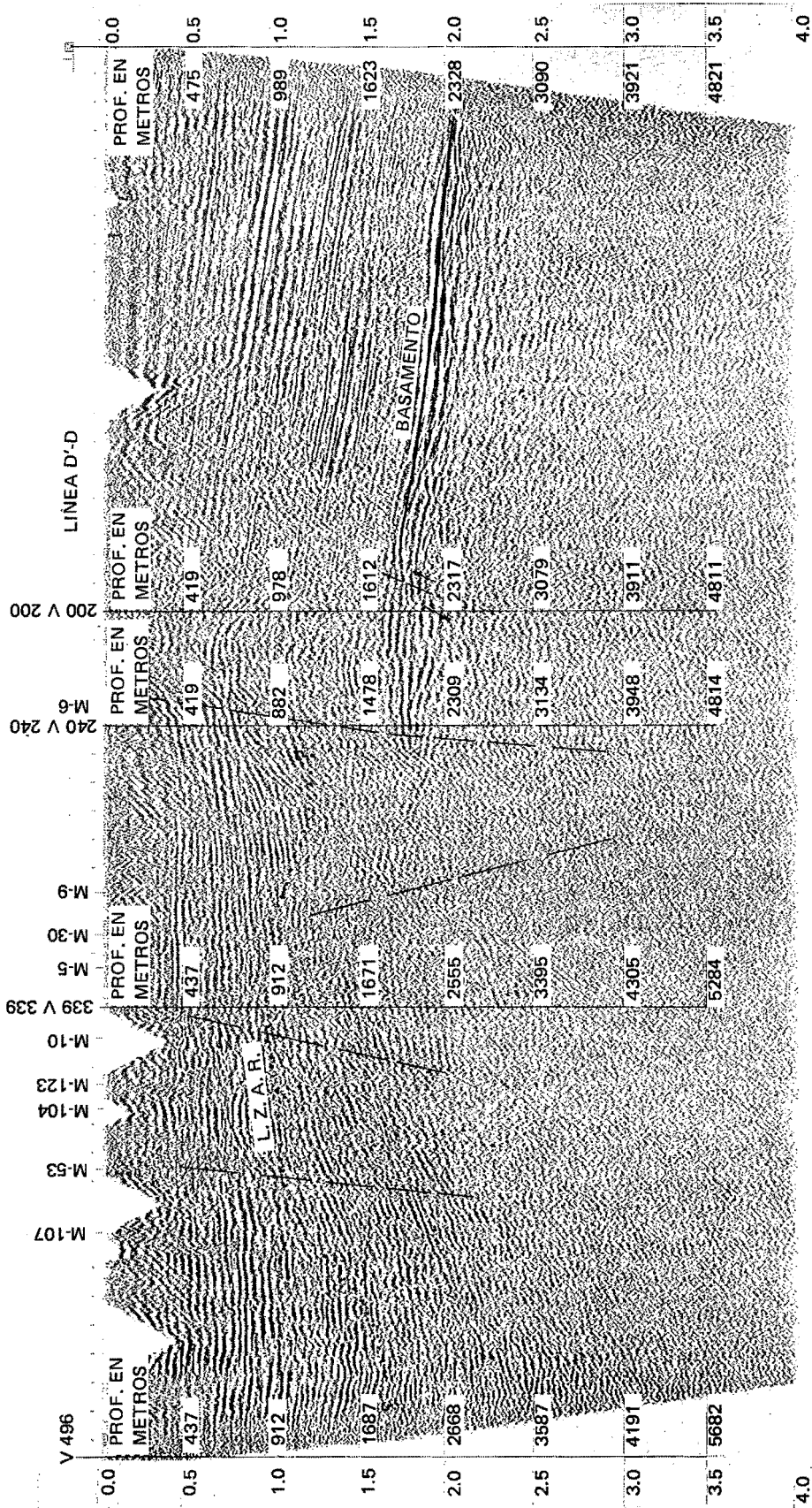


Figura 7. Línea D'-D.

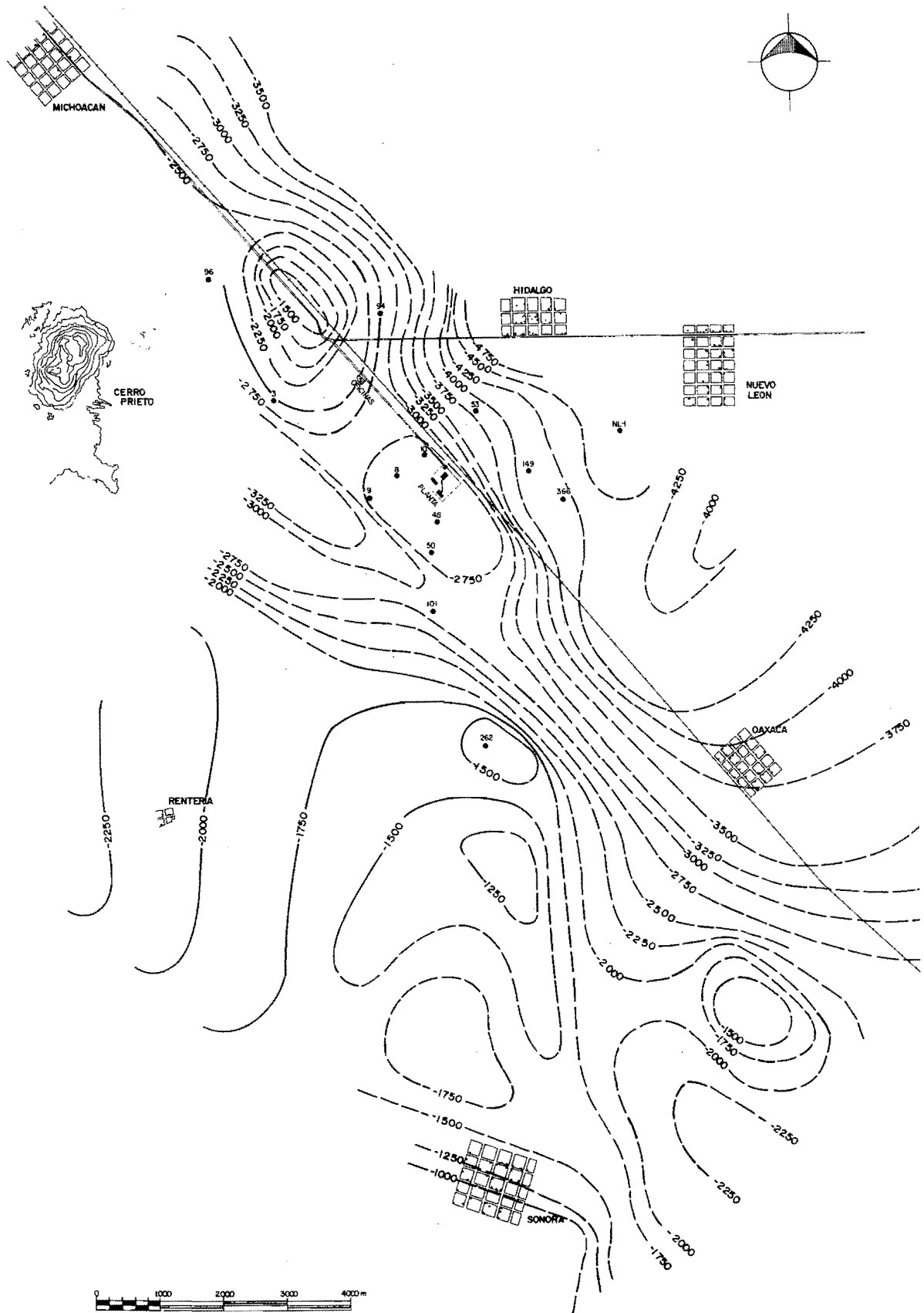


Figura 8. Configuración tentativa del basamento.

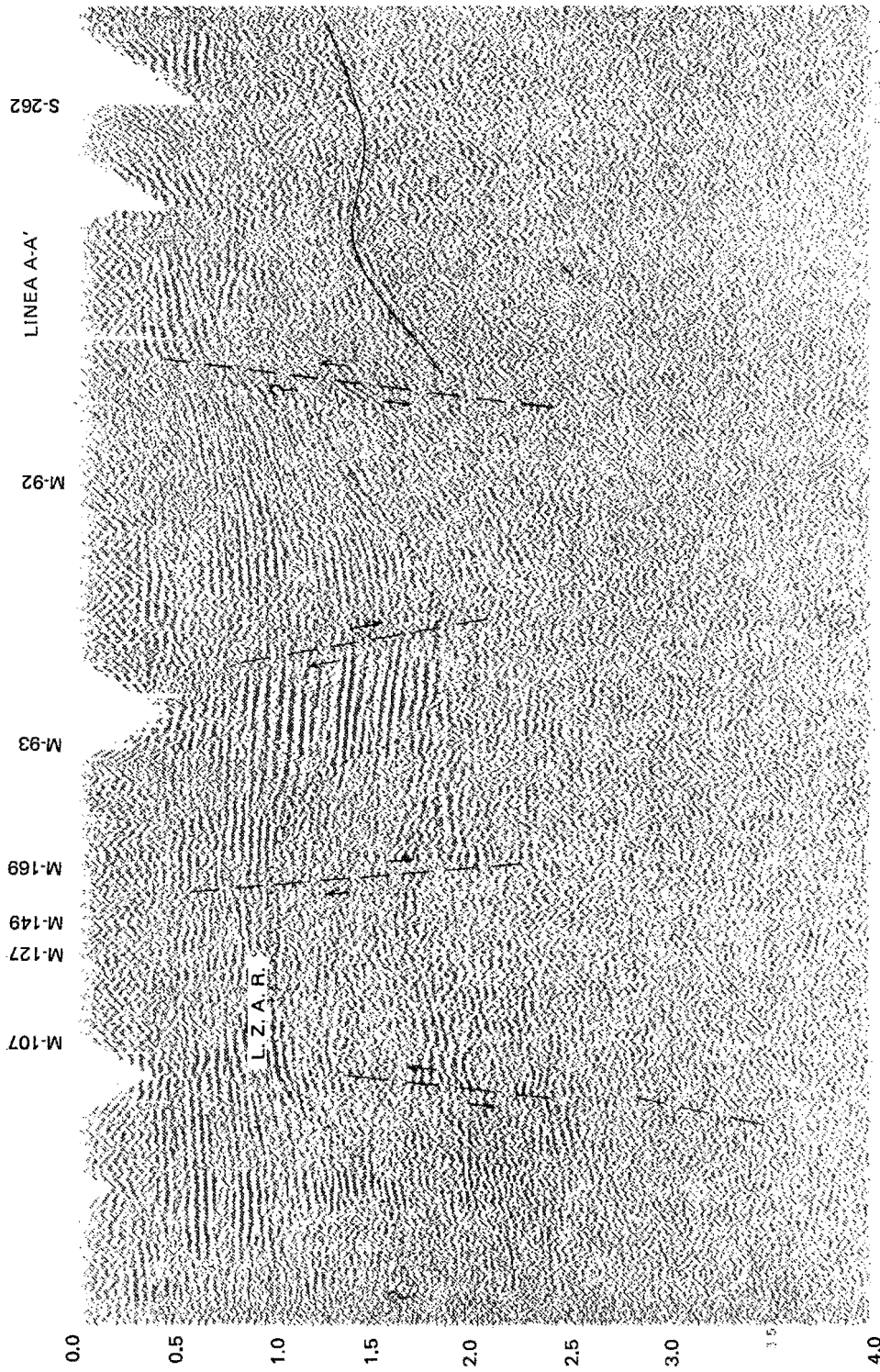


Figura 9. Línea A-A' (1/2).

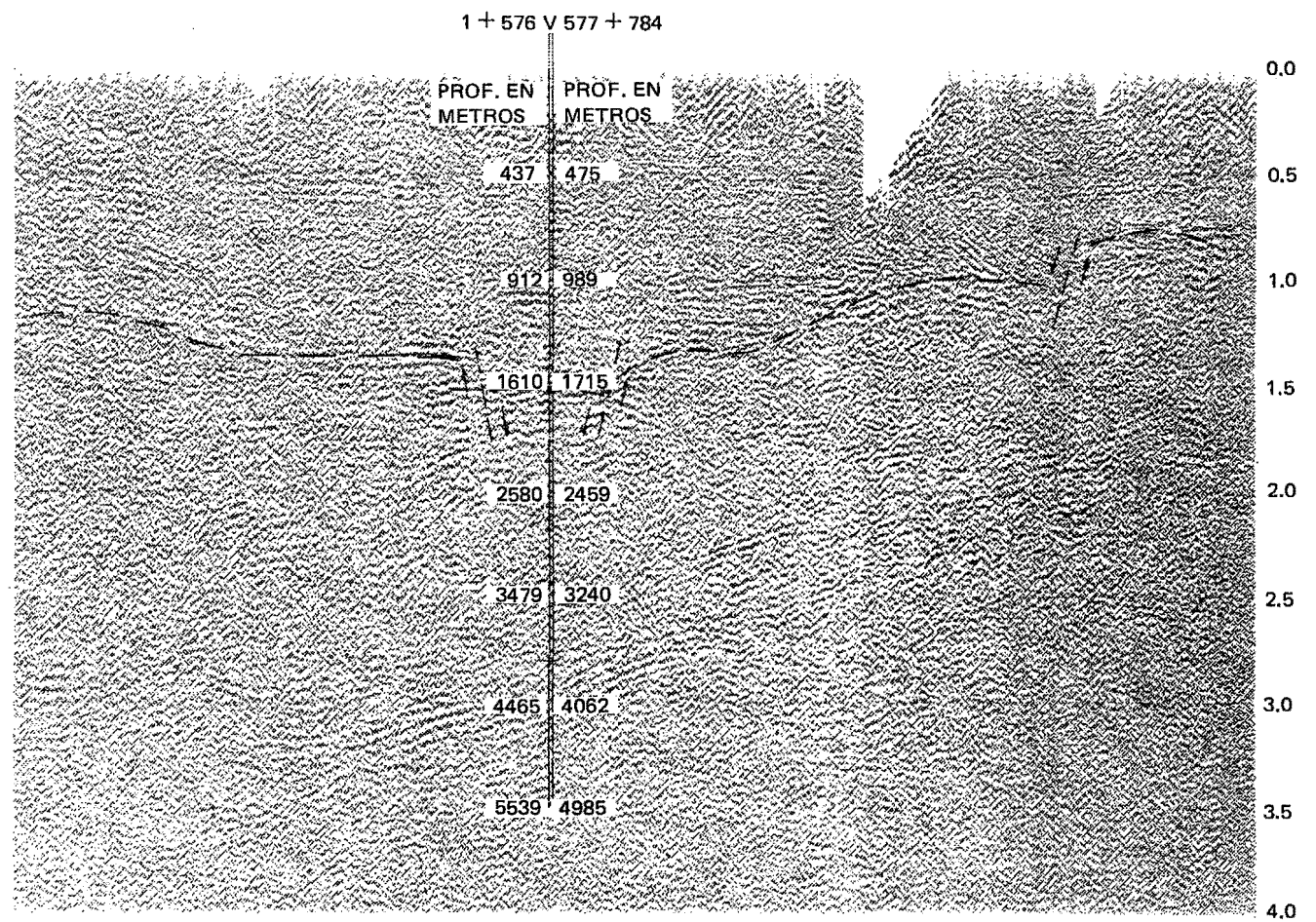


Figura 9. Línea A-A' (2/2).

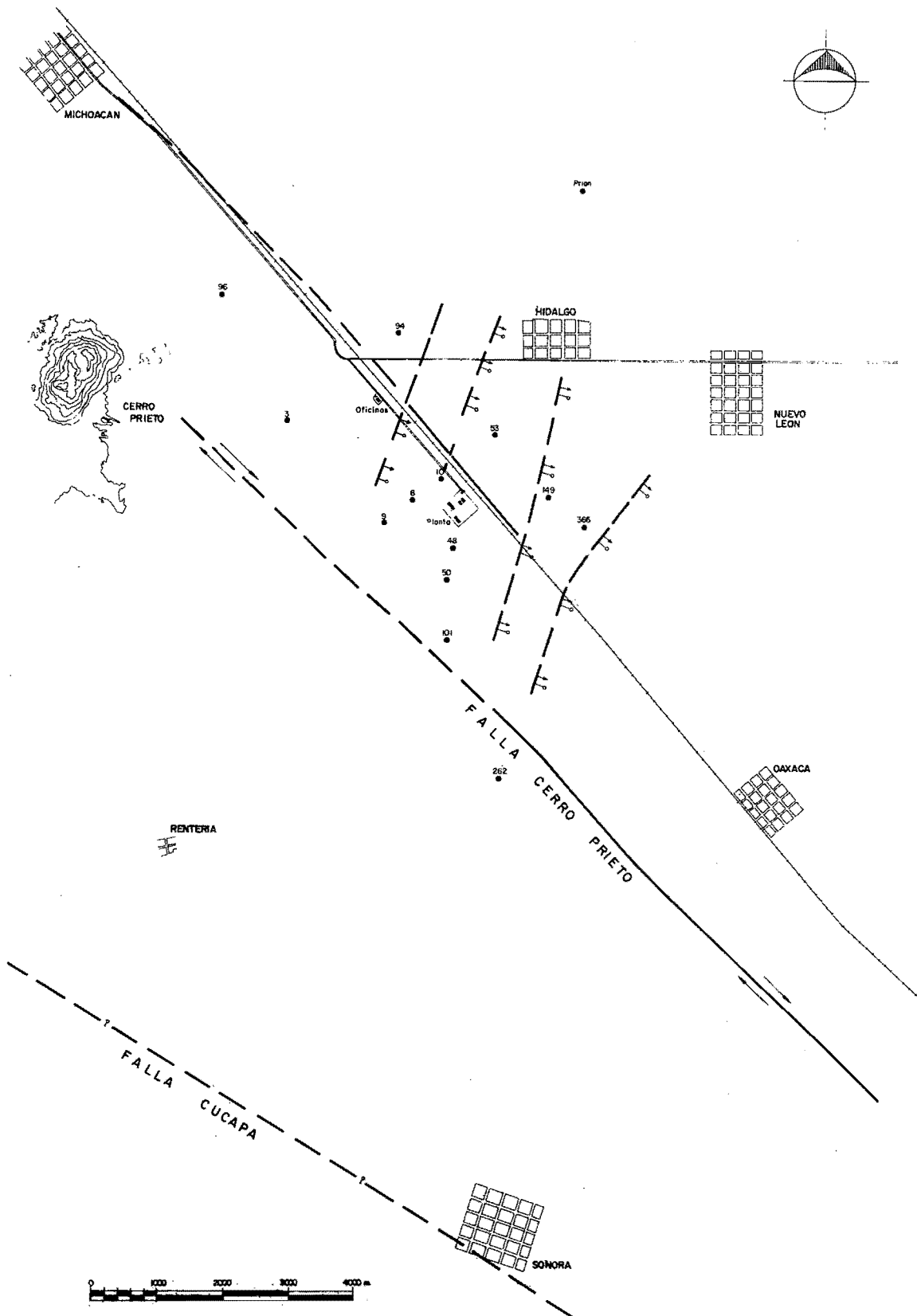


Figura 10. Plano estructural con base en sísmica de reflexión.

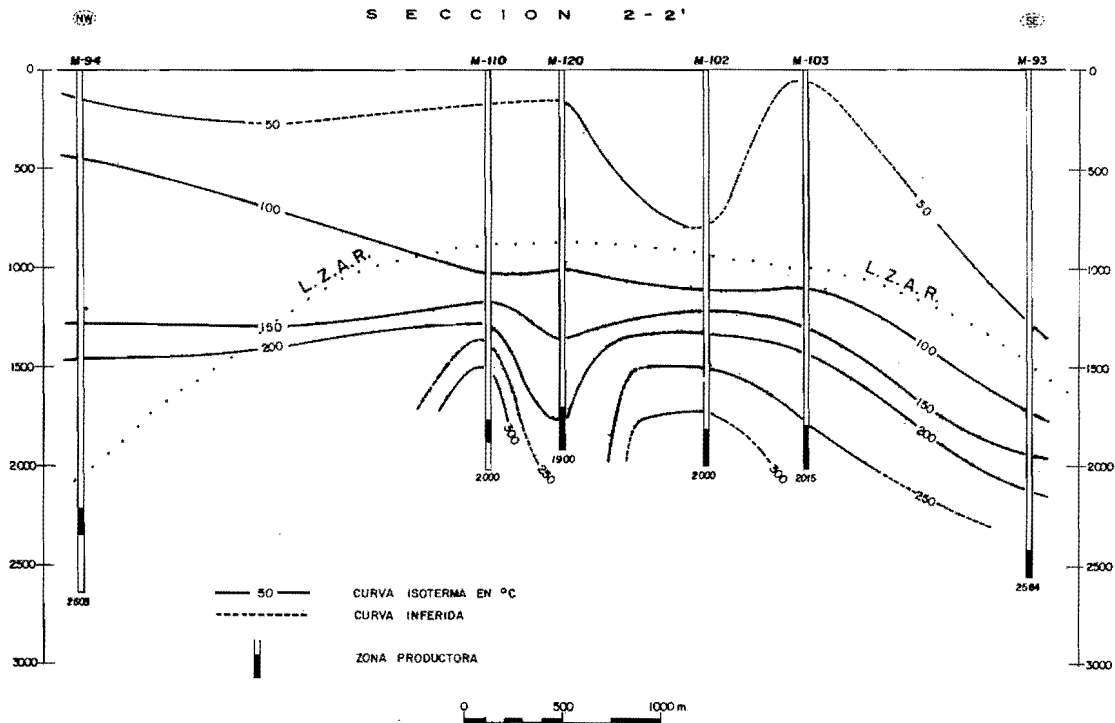


Figura 12. Perfil de isotermas de 50° a 300°C. LZAR es el límite de la zona de atenuación de los reflejos sísmicos.

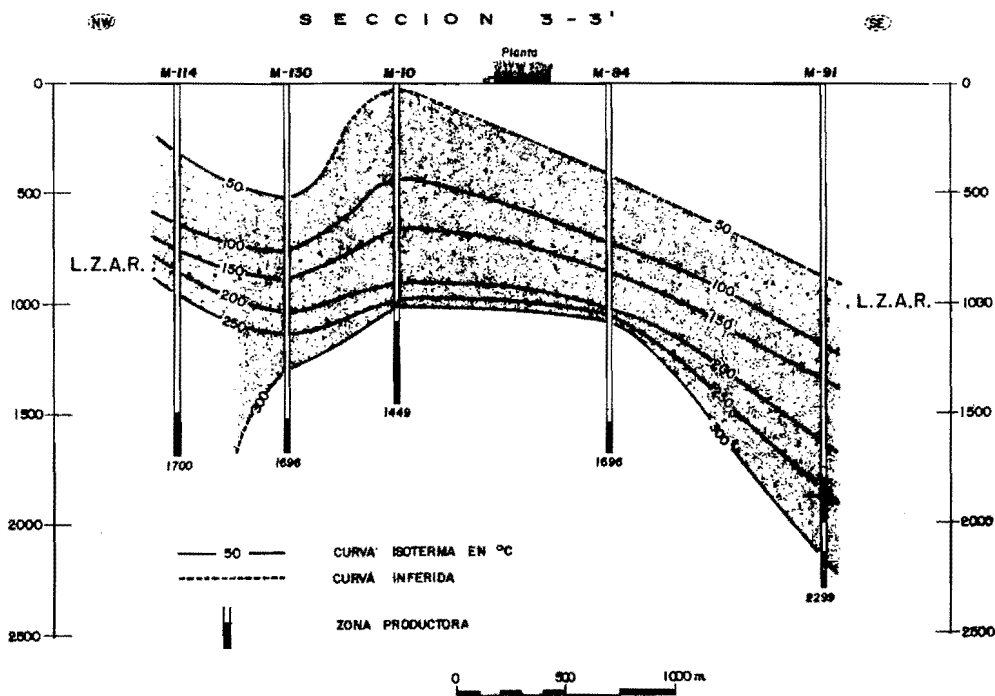


Figura 13. Perfil de isotermas de 50° a 300°C. LZAR es el límite de la zona de atenuación de los reflejos sísmicos.

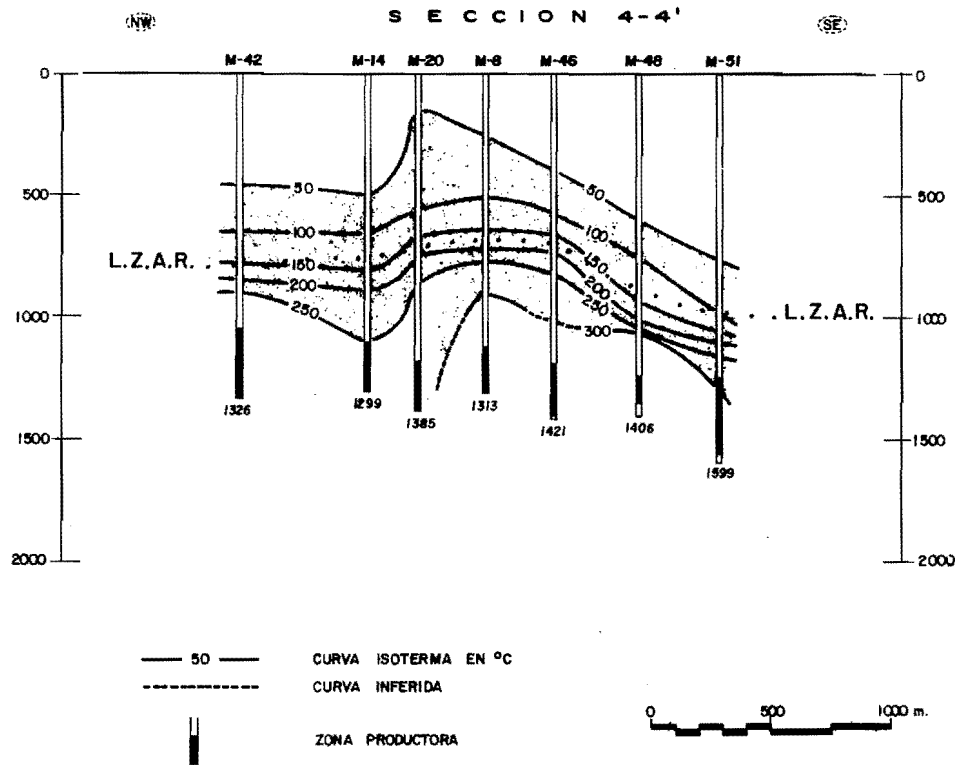


Figura 14. Perfil de isotermas de 50° a 300°C. LZAR es el límite de la zona de atenuación de los reflejos sísmicos.

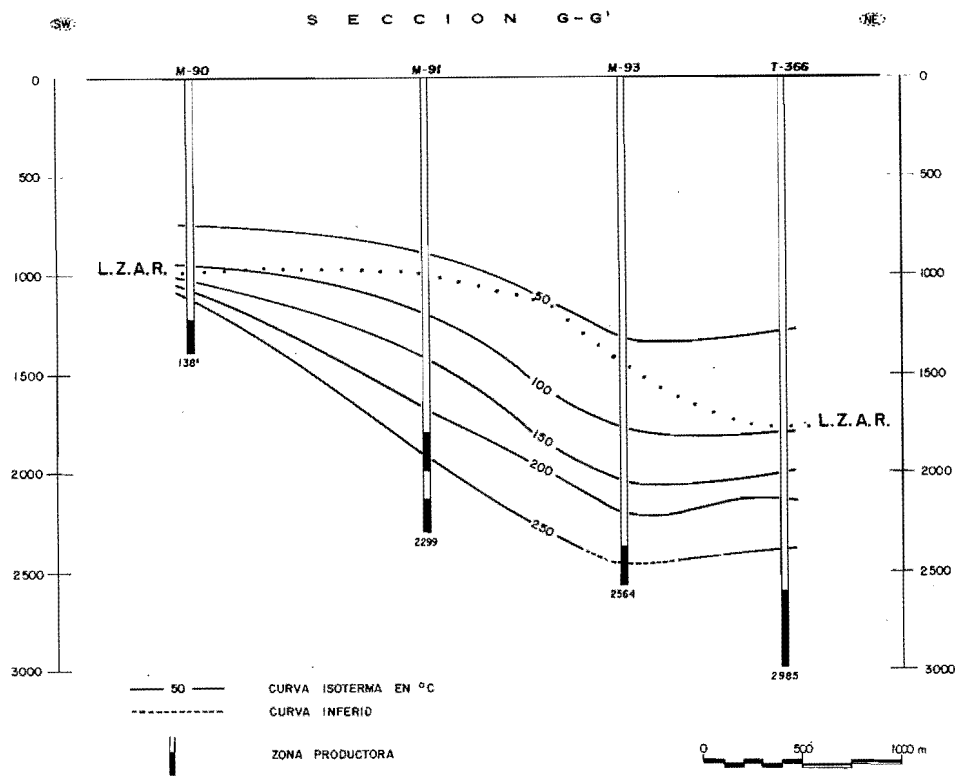


Figura 15. Perfil de isotermas de 50° a 300°C. LZAR es el límite de la zona de atenuación de los reflejos sísmicos.

GRAVITY, MAGNETICS, AND SEISMIC REFLECTION STUDIES AT THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD

Based on prior knowledge of regional geology determined from the interpretation of gravity and magnetic data, as well as information obtained from other studies, we have found that the seismic reflection method has provided the best results. This method has made the interpretation of basement and fault configuration more precise. It also seems to indicate that seismic dispersion and reflection attenuation zones in the area of the field may be related to areas of high metamorphism or high temperature.

In order to increase our knowledge of the structural and geologic conditions affecting geothermal activity, a correlation of gravity, magnetic, and seismic reflection results obtained at Cerro Prieto has been made. Previous studies have already pointed to the connection between geothermal activity and active geologic structures. It was previously thought that in most cases these methods were only useful as a tool in determining geologic structure. At the present time, studies carried out in the Imperial Valley have demonstrated that some gravity anomalies, in addition to suggesting the shape and regional trends of the basement underlying the sedimentary series, show a high correlation with zones with high temperature gradients, as measured in wells. Probably through a secondary effect, these high temperatures may create metamorphic bodies with contrasting densities. A similar situation appears to exist at the Cerro Prieto geothermal field and in the whole of the Mexicali Valley. These metamorphic bodies seem also to interfere with the magnetic anomalies. This may be due to the hydrothermal alteration of minerals in the intrusive and encasing rocks, and those of the sedimentary series, especially those minerals capable of producing magnetic anomalies.

INTRODUCTION

During the period between July and December 1977, 71 gravity base stations were established in the northern portion of the Mexicali Valley. Auxiliary stations were placed each 500 m along 5 lines 3 to 10 km apart (for a total of 156 km), distributed over an area of about 1250 km². For the magnetic survey, measurements were made at the same time as the gravity measurements, 250 m apart, and along the same lines. The seismic study was carried out over 8 lines with a total length of 118

km. This report discusses the analysis of some of the seismic sections in connection with the gravity and magnetic maps, and their probable correlation with basement and regional faults, as well as with some observed geothermal anomalies.

FIELD AND OFFICE WORK

The operating procedure used in the gravity observations was to carry out measurements in loops between the base stations, including readings at the intermediate stations, with a maximum duration of 2 1/2 hours; this in order to lessen the errors caused by fatigue in the elastic system of the gravimeter (Worden-Master), as well as the effect of earth tides. Afterwards, elevation and latitude corrections were applied to the observed values of gravity, resulting finally in Bouger anomaly values.

In the case of magnetic observations, the procedure consisted in making measurements using similar loops to those of the gravity measurements with the purpose of measuring and correcting the field data for magnetometer drift (Geometrics G-816 total field), and diurnal variation. The regional magnetic field was subtracted from the observed values, finally yielding a map of residual magnetic anomalies.

The stations were located topographically by means of a teliometer and stadia rods, and using information available from the Dirección de Estudios del Territorio Nacional (DETENAL). The maximum elevation errors accepted were 0.0084 m per kilometer, which corresponds to those of a 2nd order levelling survey. Given the accuracy of the surveys, the estimated error in the Bouger anomaly at the gravity stations is ± 1.0 gravimetric units. For the magnetic stations the error may be ± 5 gammas.

The seismic survey used "Vibroseis" trucks as the energy source. Conventional processing was used to obtain optimum results from the field data. Afterwards, some calculations of interval velocities, mean velocities, and depths were performed on the recordings of definitive reflection sections in order to establish the appropriate interpretation conditions.

GEOLOGIC ANTECEDENTS

The Mexicali Valley is part of the Gulf of California physiographic province. Topographically, it is a plane surface where only the protuberance known as the Cerro Prieto Volcano, elevation 225 m, projects above the surface. The valley is part of the Colorado River delta region, whose sediments of Quaternary origin have been laid intermittently over Cenozoic sediments, which in turn overlay a granitic and meta sedimentary basement of late Cretaceous origin (Figure 1). Tectonically, this region is characterized by a series of grabens and horsts appearing in the zone of crustal spreading associated with the NW-SE striking trend of the Imperial and Cerro Prieto faults, which in turn is part of the San Andreas fault system (Figure 2). This is a zone of high seismic activity in which the crust has undergone thinning which brings the surface closer to the mantle's igneous material, thereby giving rise to zones of high heat flow (Figure 3).

GRAVIMETRIC INTERPRETATION

The determination of the characteristics and location of subsurface geologic bodies can be made by means of the interpretation of gravity data. Basically, this method uses the lateral variations in gravitational attraction caused by density changes in those bodies. Thus, in the present work the interpretation has been considered to be due to the subsurface density contrasts caused by structural movements, changes in mineralogic composition (metamorphism), and compacting of geologic formations.

Taking the above into account, a simple analysis of the Bouguer anomaly map in the northern portion of the Mexicali Valley (Figure 4) shows that the arrangement of the anomalies exhibits some NW-SE alignments, in agreement with the tectonic pattern of the region. There is no doubt that part of these alignments are representative of the basement configuration, but since this is an area of crustal thinning, some anomalies may be due to deeper bodies whose position is related to isostatic processes.

The correlation of the gravity data with the geology of the region, and the data obtained from deep wells at the Cerro Prieto field point to the fact that in the northwestern portion of the area covered by the survey the Bouguer anomalies show a clear agreement with the configuration of the granitic basement of the sedimentary series.

A gravity high, located NW of the Cerro Prieto volcano, with its peak 4 km west of Michoacán de Ocampo, seems to be due to a protuberance of the granitic basement detected in the Cerro Prieto geothermal field, in wells M-3 and M-96, at depths of 2547 m and 2723 m respectively. This high, which descends gently to the NW, shows a pronounced gradient to the north and NE, possibly due to a fault belonging to the NW-SE fault system, and which

may be the same one identified at the geothermal field as the Michoacán fault. This fault, which is estimated to have a maximum jump of 1000 m in the basement rocks, must have favored the thickening of the sedimentary column towards Ejido Jalisco, where a gravity low can be noted. An extension of the gravity high extends to the SE as far as the Cerro Prieto field, to form a horst bounded to the NE by the Michoacán fault, to the SE by a SW-NE strike-slip fault which passes through Ejido Patzcuaro from which it takes its name, and to the SW by another fault with a NW-SE strike, and aligned with the Cerro Prieto fault.

Ten kilometers NW of the Ejido Jalisco gravity low there is a gravity high, which due to its relation to the Imperial fault has been named the Imperial horst. This high, which extends to the SE for more than 10 Km to merge with others of larger size, delineates a horst 2.5 Km to more than 5 Km wide, and bounded to the SW by the Imperial fault. The gradient of the anomaly toward the NE, where there is a gravity low, points to the possible existence of another fault, roughly parallel to the Imperial fault, from which it separates as it gets close to another high found to the east of the Ejido Nuevo Leon.

This gravity high to the east of Ejido Nuevo Leon does not display clearly the extension of the Imperial fault in its southwesterly gradient. Nonetheless, judging by some surface features, it is likely that this fault continues as far as the neighborhood of the Poblado General Francisco Murguía.

The gravity low between the Delta railroad station and Guadalupe Victoria suggests a structural depression in the shape of a graben, bounded to the NE by the Imperial fault, to the NW by the Patzcuaro fault, and to the SW by the Cerro Prieto fault. Correlation with wells S-262 and M-189 indicate that the Cerro Prieto fault may have a 2500 m jump in the granitic basement.

To the northwest of the Delta-Guadalupe Victoria graben is another horst, named the Laguna Volcano horst, of which the Cerro Prieto fault is a part. The geothermal field's S-262 well located on this horst intercepted the basement at a depth of 1473 m.

The Laguna Volcano horst and the extension under the alluvial sediments of the intrusive rocks which make up the Cucapa Range (including the fault of the same name) delimit a gravity low called the Nayarit graben. This graben, which extends to the NW under the Cucapa Range alluvial fans, which in turn extends to the Cerro Prieto Volcano, is separated from the Michoacán de Ocampo gravity high by a NE-SW trending strike-slip fault which is parallel to the structures of which the Cerro Prieto volcano is a surface feature.

An overall analysis of the configuration of the Bouguer anomalies reveals the existence of two large structural depressions whose major axes are aligned parallel to the San Andreas system, with an en-echelon displacement striking SW-NE and coinciding with the system called Volcano.

This shift in the depressions has been associated with a possible spreading center in a zone of transform faults (Figure 2); when located in a zone where the crust has experienced thinning, the attendant proximity to the mantle's igneous material produced the intrusions which have caused the high heat flow and along with it the metamorphism in the surrounding medium. This probable spreading center is located on the gravity high found between the Cerro Prieto and Ejido Nuevo Leon horsts, to which the Cerro Prieto field may be genetically related (De la Peña, 1979).

Studies carried out in the Imperial Valley have demonstrated that gravity anomalies, in addition to suggesting the shape and regional trend of the basement, sometimes exhibit a high correlation with zones of high temperatures measured in wells.

According to mineralogic studies by Elders and others (1978), a large variety of post-depositioned minerals have been produced in the Cerro Prieto hydrothermal system. Their occurrence may be an indicator of low and high temperature. These minerals can be classified into three groups. The first is made up of those which occur as cementing agents filling the sandstone pores, such as quartz, calcite, dolomite, potassium feldspars, pyrite and pyrrhotite. The second is made up of epidote, prehnite, actinolite, wairakite, and includes the products of decarbonation reactions involving the destruction calcite and potassic micas. A third group includes a mineral sequence which includes illite, chlorite, and biotite. Based on this analysis sequence, and extrapolating the conditions to those places where these conditions might exist, will lead to a change in the density conditions of the rocks, which give rise to anomalies in the gravitational field. This effect, which has been observed in the "Dunnes", "Salton Sea", "North Brawley", "Heber", and "East Mesa" anomalies of the Imperial Valley, where some gravity highs have also been noted, is also present in the Cerro Prieto field, in the horst, and in the gravity high which separates the Delta-Guadalupe Victoria and Jalisco minima. There is evidence of high temperature and of some metamorphism in the rocks of the sedimentary series. The gravity high in which the Imperial horst is located may be of interest if it can be verified to have the same origin.

MAGNETIC INTERPRETATION

In this work, rocks have been considered to be magnetized in the direction of the local magnetic field. Basement

rocks have a greater magnetic effect than the overlaying sedimentary rocks, with some exceptions in locally altered zones.

Within the interpretation scheme used in this work, two groups of anomalies are proposed; the first consists of those where the basement rocks are assumed to have a higher magnetic susceptibility than the sedimentary rocks, and with no alteration in either set of rocks. The second of anomalies consists of those in which a change in magnetic susceptibility of either the sediments or the basement, due to metamorphism, intrusions, or deposition of high susceptibility materials, can be confused with a change in basement relief.

In the Mexicali Valley magnetic anomaly map (Figure 6) it has been observed that the anomalies of the first group are present in the northwestern portion of the area studied, between the Cucapa range and the Cerro Prieto and Michoacán range. These anomalies show a great resemblance to the gravity anomalies and they have been interpreted as being representative of a basement which has not undergone deposition of materials of greater susceptibility, nor changes in its physical properties. Consequently this basement's potential fields, both gravimetric and magnetic, are not altered. Well S-262, which is located where gravity high coincides with a magnetic high, reached basement at a depth of 1473 m, and apparently supports this hypothesis.

To the NE of the Prian well, a magnetic minimum is associated with the gravity maximum known as the Imperial horst. To the SE of well NL-1, a magnetic maximum is associated with a gravity minimum, and in the zone of well M-3, a magnetic minimum is associated with a gravity maximum. These anomalies are considered to belong to the second group. It is important to call attention to them in the Mexicali Valley, more so if they are associated with gravity highs, given the possibility that the latter represent a zone of local metamorphism which in some cases could be associated with geothermal activity.

Reatherston and others (1965) suggested that some magnetic minima in New Zealand are caused by the replacement of magnetite by pyrites. Griscom and Muffler (1971), likewise attributed some magnetic highs observed in the Imperial and Mexicali valleys to metamorphism of the sediments.

Other magnetic highs observed in the Mexicali Valley can also be caused by the intrusion of volcanic rocks with a high content of ferromagnetic minerals.

REFLECTION SEISMOLOGY

With the purpose of detailing the existing geologic inter-

pretations, the geophysical method of reflection seismology using the "Vibroseis" system was used.

This technique makes use of the property of the subsurface layers of acting as transmission media for artificially produced acoustic waves. These waves are reflected at depth, and detected and recorded at the surface, where after suitable processing they are interpreted. In this paper, we describe in general terms the application of this technique, showing the results obtained in some seismological sections located in the area of the producing field. Attempts to show the correspondence among these sections is made.

The reflection phenomenon takes place when acoustic waves traveling in a medium with certain characteristics penetrates another different medium. Basically, this situation is determined by the velocity of wave propagation and the density of the medium through which the waves travel.

In the presence of subsurface layers with density and/or velocity values, large amplitude reflections will occur which are easily discerned in the seismological sections. From an analysis of the variations in amplitude and the position of the reflections, it is possible to determine the conditions causing them, since their presence is generally attributed to the morphology, composition and compaction of the strata.

The interpretation in this work is based on a classification of the reflections depending on the clarity of their appearance. Thus, based on the above, those reflections which were clearly discernible, of large amplitude and clear horizontal tendency were grouped together. They are considered to be representative of a stratification with a certain degree of homogeneity and good seismic response.

Those reflections which were not uniform, occasionally affected by diffraction, multiple reflections, and in general hard to distinguish, but capable of contributing to the structural analysis, were of great help in locating the main geologic faults which exist in the field.

Poor or dampened reflections, which were present in all the sections under normal conditions and not due to problems in processing the field data, are generally caused by poorly consolidated materials which are characteristic of areas of large sedimentary thicknesses. When this happens, the fact that the morphology of the subsurface cannot be hinted at is of little importance. However, when this occurs under a group of reflecting horizons unrelated to the basement, in areas of likely geothermal potential and on gravity highs, this zone of poor reflections can be of great interest given the possibility that these reflections may represent metamorphic bodies.

In some areas where the seismic survey lines were far apart, existing geologic information and prior geophysical work aided the interpretation of faults seen in the sections. These faults were oriented taking into account the strike of the Cerro Prieto and Volcano fault systems.

Taking the above into account, the best defined reflections, which unfortunately were found only SW of the D and E survey lines (Figure 7), were attributed to an isolated environment, of uniform stratigraphy, dipping towards the Cucapa Range. The basement, of granitic composition, which at this location was estimated to be from 1500 m to 2250 m deep, as well as the depths at which wells M-3, M-96, and S-262 reached it, have served as a guide in identifying reflections that may correspond to this basement in the rest of the area covered by this work. The configuration of the basement has been worked out based on the above, as well as on some depth calculations derived from seismic refraction work (Calderón, 1963) and gravity (Figure 5).

The configuration of the better consolidated sediments (top of unit B) obtained from the correlation of well data agrees with the faults and the basement morphology interpreted from the seismic reflection method. This implies that the tectonic effects that have caused the displacement of the basement and its overlying strata, are clearly observable.

The Cerro Prieto fault, whose continuity can be verified in most sections, seems to have produced a wedging in the sediments, as the one seen in line A (Figure 9), in the zone of well 92. This means that if a comparative study were made of the quality and position of the reflecting horizons observed in the zone of the geothermal field, and those in the SW portion, towards the Cucapa Range, different stratigraphic conditions would be found. The Cerro Prieto fault may be found to be acting as a boundary between these regions. At Delta Station, the observed reflectors show slight differences on both sides of the fault. However, 4 Km SE of the station, the reflectors seem to suggest a decrease in the thickness of the strata. The basement is estimated to be at 2750 m, whereas 4 Km to the south, and coinciding with a small magnetic peak, the basement was reached at 1500 m. In the area of the generating plant it was estimated at 2750 m, and at Ejido Hidalgo, it was calculated at 4750 m. At well S-262 the basement was reached at 1473 m, and at well 189, 3500 m of sediment were drilled without reaching it. These differences in basement level, which point to a pronounced slope, are characteristic of secondary effects of a transform faulting mechanism.

Some of the inferred faults (Figure 10) which were detected using regularly defined reflections, provide

preliminary evidence for the existence of this area of transform faulting. These faults agree with the Delta, Pátzcuaro and Hidalgo faults, which strike SW-NE, and with some others of similar strike detected from the correlation of the well's lithologic columns.

This fault system, oblique to the NW-SE regional tectonic striking pattern, provides clear evidence of the en-echelon displacement characteristics of transform fault zones in the Mexicali Valley. This leads to the thought that these faults, when located in what has been suggested to be a spreading center, and in adapting to the convective flow of endogenous steam, may also be related to the genesis of the field.

The poor and dampened reflections, which were observed in all the sections, were of particular interest when they occurred under the group of reflecting horizons. This event, only observed in the production zone, has been named reflection attenuation zone (RAZ).

From a seismic study carried out in the "East Mesa" geothermal field (Howard and others, 1978), it was suggested that this zone (RAZ) is caused by dense sediments, highly altered and cemented, which have been subject to a temperature dependent alteration. It was also mentioned that if there is a decrease in the velocity contrast between the lutites and sandstones which make up the stratigraphic column, the reflections will be attenuated. The porosity and permeability conditions and the existing degree of fracturing whose effect would be to cause a dispersion of seismic energy also contribute to the process of damping the reflections. A good correlation with a gravity high was also found at these zones.

In the case of Cerro Prieto, RAZ was observed in the production zone, and it apparently extends E-NE between Ejido Hidalgo and Ejido Nuevo Leon (Figure 11), being located within the gravity high to which the field is related.

In spite of the large separation between the seismological stations, the configuration obtained by the preliminary correlation of these diffuse data (RAZ) across seismic survey lines displays a similarity with some isotherm sections produced by taking the maximum temperatures recorded at the field with the wells at rest (Figures 12, 13, 14, 15). Also, the RAZ profile generally agrees with the depth at which the contact with more consolidated sediments is found (top of Unit B).

Although in the absence of more information it may be premature to ascertain whether the data really represents the more consolidated sediments, their shape and the conditions in which they are observed allow them to be compared with those observed in "East Mesa", where

the data really represents more consolidated sediments. This may mean that, as in its neighboring geothermal field, in the Cerro Prieto field these data represent dense, porous, permeable and high temperature rocks which produce attenuation in the reflections and may constitute the geothermal reservoir.

Finally, under the boundary of the reflection attenuation zone (LRAZ), because it is not possible to discern which reflections represent the basement, its depth and morphology have been tentatively estimated (Figure 8), following the trends of the reflecting overlaying strata.

CONCLUSIONS

The analysis of the results obtained from the gravimetric and magnetic surveys, and their correlation with information furnished by the reflection seismic data, leads to the following conclusions.

1. The Bouger anomaly map represents the regional basement configuration of the sedimentary series which fills the valley.
2. The alignment of the anomalies has a close relation with the structural systems which affect the region.
3. Based on the gravimetry it has been possible to establish the fact that the Imperial fault is part of a NW-SE horst 2.5 Km to 5 Km wide, which extends more than 30 Km, from the Mexico-USA border to a gravity maximum with a gradient beginning towards the SE of Ejido Saltillo.
4. A portion of the Cerro Prieto geothermal field is located on a horst, bounded by the NE by the Michoacán fault, to the SE by the Pátzcuaro fault, and to the SW by a NW-SE fault aligned with Cerro Prieto. This horst is an extension of a structural high of a gravity maximum west of Michoacán de Ocampo.
5. The Bouger anomaly configuration points to the existence of two structural depressions whose principal axes are aligned to the San Andreas system, and which represent an en-echelon displacement striking SW-NE. This displacement of the depressions has been associated with a possible spreading center in a zone of transform faults.
6. The geothermal field of Cerro Prieto is located in the area of this spreading center which is represented by a gravity maximum between the Cerro Prieto horst and Ejido Nuevo Leon, and which extends E-SE towards another larger gravity high.
7. The studies carried out in the Imperial Valley

demonstrate that gravity anomalies, in addition to suggesting the shape and regional trend of the basement, in some cases show a close correlation with high temperature zones. In the case of the Cerro Prieto field, the gravity maximum in which it is located has also been associated with high temperatures. Since this field is located in a region where the crust has experienced some thinning, and where the igneous material from the mantle is closer to the surface, tectonic movements which have taken place in the area may have caused intrusions which have brought along a high heat flow. This heat flow caused metamorphism in the surrounding medium, and consequently, anomalies in the gravitational field.

The gravity high found on the Imperial horst may be of interest if found to have a similar origin.

8. The map of magnetic anomalies indicates that in the northwestern portion of the study area, between the Cucapa Range and the Cerro Prieto and Michoacán faults, the anomalies bear a great resemblance to the gravity anomalies. These magnetic anomalies have been interpreted as representing a basement which has not experienced either deposition of materials which would change its potential fields or changes in its physical properties; this could reflect an absence of hydrothermal action.

9. To the NE of the Priar well, a magnetic low is associated with the gravity high called the Imperial horst; to the SE of well NL-1, a magnetic high is associated with a gravity minimum, and in the area of well M-3, a magnetic low is associated with a gravity high. It is important to call attention to these apparent inconsistencies in the Mexicali Valley, the more so if there is the possibility that a gravity high may be related to a zone of local metamorphism which may be associated with the geothermal activity.

10. Well defined seismic reflections are observed only SW of lines D and E. They were attributed to an isolated region of uniform stratigraphy descending toward the Cucapa Range.

11. The Cerro Prieto fault, whose continuity has been observed in most of the sections, has caused a

wedging of the sediments as seen in line A in the area of well 92.

12. Given the difference in quality and location of the reflecting horizons observed in the zone of the geothermal field, and those to the SW, in the direction of the Cucapa Range, it is considered that these regions have different stratigraphic conditions. The Cerro Prieto fault acts as the boundary between them. This agrees with point 8.

13. The Delta, Pátzcuaro, Hidalgo and a few other SW-NE striking faults are clear evidence of the en-echelon displacement mentioned in point 5. This leads us to believe that these faults, finding themselves in what has been proposed to be a spreading center and adapting to the convective flow of endogeneous steam, could also be related to the genesis of the field.

14. The reflection attenuation zone (RAZ) was observed in the production zone and continues in a E-NE direction between Ejido Hidalgo and Ejido Nuevo Leon, being located within the gravity high with which the geothermal field is associated.

15. Through gravimetry, it has been possible to distinguish the regional placement of the main structures which affect the area; seismic reflection has pointed to their local position. On the other hand, focusing on the geothermal aspects of the Bouger and magnetic anomalies correlated with the seismological measurements seems to indicate that metamorphism is a factor which has a definite influence on the three methods. The preliminary results suggest that in planning future exploration activities in the Mexicali Valley, attention be given to those gravity highs which do not coincide with magnetic highs, and which can be correlated to RAZ zones seen with seismic techniques where there may be major fracturing. This should be done in spite of the fact that these RAZ zones and the processes therein are still under investigation.

FIGURE CAPTIONS

Figures 12, 13, 14 and 15. Profile of the 50°C to 300°C isotherms. LZAR is the boundary of the zone of attenuation of seismic reflections.