EXTENSION DEL CAMPO DE CERRO PRIETO Y FUTURAS ZONAS CON PROBABILIDADES GEOTERMICAS EN EL VALLE DE MEXICALI

H. L. Fonseca L., A. de la Peña L., I. Puente C., y E. Díaz C.
Comisión Federal de Electricidad
Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto
Mexicali, Baja California, México

RESUMEN

En una evaluación general de las condiciones geológico-estructurales dentro de su marco tectónico regional, y con la integración de los trabajos geológicos y geofísicos realizados en el Campo de Cerro Prieto, se intenta establecer la posible extensión del mismo, así como otras zonas que podrían tener probabilidades de desarrollo geotérmico dentro del Valle de Mexicali.

Este trabajo tiene como antecedente la información obtenida de los pozos construídos a la fecha, y la información geológica y geofísica disponible con lo cual se esta contribuyendo a la formación del modelo geológico que en forma generalizada establece la geometría de lo que podría constituir el yacimiento geotérmico del campo de Cerro Prieto.

En lo que respecta a las áreas con probabilidades geotérmicas dentro del Valle de Mexicali, se ha tomado como apoyo inicial para los subsiguientes estudios, las manifestaciones de temperaturas anómalas detectadas en los pozos construídos para riego. En base a esa primera información, se procedió a realizar trabajos de gravimetría y magnetometría, para continuar con los de Sísmica de Reflexión y Refracción, así como la construcción de pozos de uso múltiple de $\pm$ 1200 m de profundidad.

Al describir los resultados en la integración final de estos trabajos junto con la geología de la región, se sugiere interés exploratorio en las áreas de Este de Cerro Prieto, Tulecheck, Riíto, Aeropuerto-Algodones y San Luís Río Colorado, Son.

INTRODUCCION

Después de 15 años de detalladas investigaciones, estudios técnicos e ininterrumpido esfuerzo y la experiencia obtenida con la operación de la Central Geotermoeléctrica de Cerro Prieto de 180,000 KW de capacidad, se demostraron los beneficios de la utilización de la energía geotérmica para la generación de electricidad. El exámen de dichos resultados ha motivado asimismo que la Comisión Federal de Electricidad decidiera desarrollar un programa de construcción de nuevas centrales geotermoeléctricas en Cerro Prieto mediante las cuales se contará en 1984 con una capacidad instalada de éste tipo de 620,000 KW.

Simultaneamente, se han venido realizando diversas exploraciones en el Valle de Mexicali cuyos programas tienen como objetivo principal estimar la potencialidad de algunas áreas de anomalías térmicas, que de resultar comercialmente explotables, y en adición a las reservas ya conocidas, se estima que habrá suficiente vapor para instalar una capacidad de generación geotermoeléctrica del orden de 1000 MW en el Valle de Mexicali.

Con el afán de contribuir al desarrollo de las obras geotérmicas de ésta región, en el presente trabajo se exponen algunas condiciones geológico-estructurales propicias para la existencia de ambientes geotérmicos y la relación de ciertas anomalías geofísicas con zonas que podrían tener probabilidades de desarrollo geotérmico incluyendo la posible extensión del Campo de Cerro Prieto.

Cabe mencionar que algunas áreas interpretadas como prospectos geotérmicos, han sido señaladas tomando en cuenta la posición geográfica e información respecto a los campos geotérmicos del Valle Imperial y, la característica común de éstos, de encontrarse en máximos gravimétricos, cuando unicamente Salton Sea tenía termalidad superficial (Fig. No. 1). Asimismo, se hizo un estudio riguroso de los máximos observados en el Valle de Mexicali, obteniendo como conclusión que no todos ellos son de prospección ya que algunos son representativos unicamente de elevaciones del basamento.

ANTECEDENTES GEOLOGICOS GENERALES

El Valle de Mexicali en el cual se encuentra el Campo de Cerro Prieto, forma parte de la provincia fisiográfica del Golfo de California. Topográficamente es una superficie plana en donde sobresale unicamente la prominencia conocida como el Volcán de Cerro Prieto de 225 msnm*.

Es parte de la región del Delta del Río Colorado cuyos sedimentos Cuaternarios y Terciarios están constituídos predominantemente por rocas clásticas, de orígen Deltáico y de Piedemonte. Los sedimentos deltáicos, se han diferenciado en dos unidades litológicas: sedimentos no consolidados y consolidados, siendo en éstos últimos, en donde se encuentran los acuíferos sobrecalentados. Estas rocas consolidadas (Lutitas y Areniscas), sobreyacen a su vez discordantemente a un basamento granítico y metasedimentario del Cretásico Superior (Fig. No. 2).

Estructuralmente el Valle está caracterizado por una serie de grabens y horsts resultantes de zonas de apertura cortical asociados a movimientos de rumbo NO-SE de las fallas Cerro Prieto, Imperial y San Andrés (Fig. No. 3).

Estas fallas y las del área en general son parte del sistema San Andrés que penetra en el Golfo como un cortejo de grandes fallas dispuestas en echelón (Fig. No. 4) que a su vez componen una red global de cadenas volcánicas, grietas en el

* msnm= Metros sobre el nivel del mar.

suelo oceánico y profundas fosas oceánicas. Todo ello representan los límites entre las amplias placas móviles del Pacífico y Americana (Fig. No. 5).

Esta es una zona que se ha caracterizado por una tectónica con geometrías de cuencas de régimen transformado, de gran actividad sísmica y terremotos de foco somero, en donde la corteza terrestre ha sufrido adelgazamiento, y por consecuencia acercamiento de material ígneo del manto, originando con ello algunas áreas de alto flujo térmico.

Dado que el Golfo de California se ubica entre la zona de dispersión de las placas, éstas en su movimiento han provocado esfuerzos en la corteza y el manto, trayendo como consecuencia el desplazamiento de grandes bloques (Fig. No. 6) lo que que ha dado lugar a la formación de fosas como la Wagner que se conecta a través de la falla Cerro Prieto con el Valle de Mexicali.

Es importante hacer notar que la base geológica más relevante de este trabajo, es partir primeramente de un bosquejo de apertura de corteza y desprendimiento continental cuyos efectos han dado lugar a la formación del Golfo de California. Partiendo de panoramas regionales y agrupando argumentos y datos se ha comprendido el modelo geológico cuyo semblante principal es: originalmente en tiempos del Plioceno (?) la Península de Baja California formaba parte de un macizo granítico continental, pero debido a complejos esfuerzos de la corteza y del manto, y del movimiento de las placas Americana y del Pacífico, se inició su separación (Anderson, D. 1971). Esto ha traído como consecuencia que durante el proceso de distensión dió y continúa dando lugar al agrietamiento, desplazamietno de grandes bloques, descubrimiento del piso oceánico, y penetración de magma cuyas evidencias mucho se han publicado.

Un aspecto local respecto de lo anterior es que en el caso de los Valles de Mexicali e Imperial, justo en la porción noroccidental del Golfo de California; con el sistema de fallas San Andrés como tenor, se han manifestado una serie de fenómenos tectónicos que incluyen alta sismicidad en la zona, desprendimientos basamentarios en los flancos al SO y NE de los valles, fallas transformadas con desplazamietnos vertical y horizontal, intrusiones magmáticas, existencia de volcanes, y una variedad de zonas de alto flujo térmico, que son los que propician los ambientes geotérmicos. Esto último ha motivado las exploraciones tanto en el Valle Imperial como en el Valle de Mexicali dando como resultado en el primero el descubrimiento de ocho regiones geotérmicas denominadas Salton Sea, Heber, East Mesa, North Brawley, East Brawley, Glamis, Dunes y Border, algunas de las cuales recién empiezan su explotación (Fig. No. 7).

Respecto al Valle de Mexicali, aunque su explotación geotérmica se inició en 1973 con el campo de Cerro Prieto, a la luz de las últimas exploraciones se ha interpretado que el campo se extiende hacia el oriente de su actual localización, y se detectaron además cuatro áreas prospectivas denominadas: Tulecheck, Riíto, Aeropuerto-Algodones y San Luís R.C.

En la geología local del campo de Cerro Prieto se ha analizado y entendido que la falla Cerro Prieto (ó San Jacinto) de rumbo NO-SE tiene su evidencia en diferentes estudios desde el Golfo de California hasta el volcán de Cerro Prieto y contrariamente a lo que antes se pensaba, no es aportadora de fluídos sino mas bién actúa como límite del campo.

Al norte del campo principal en producción con base a estudios de geofísica y correlación de pozos se determinó otra falla denominada Morelia con orientación SO-NE (Fig. No. 8) y está considerada asimísmo como limitante . Dicha falla forma parte de un sístema llamado Volcano de orientación general SO-NE que cuenta además con tres zonas de fallas denominadas Delta, Pátzcuaro e Hidalgo. Este sístema de afallamientos, oblícuo al patrón tectónico regional de orientación NO-SE, es una clara evidencia del desplazamiento en echelón característico de las fallas transformes en el Valle de Mexicali. Ello hace pensar que las fallas del sístema Volcano al encontrarse en lo que se ha sugerido como un centro de dispersión; se pueden considerar como principales conductoras de calor y de fluídos sobrecalentados.

POSIBLE EXTENSION DEL CAMPO DE CERRO PRIETO

Numerosos autores han llevado a cabo estudios de diferente naturaleza sobre el Campo de Cerro Prieto. Contribuciones notables han sido hechas y mucho se ha discutído sobre los límites del yacimiento. No obstante, aunque éste ha sido delimitado al SO por la falla Cerro Prieto, al NO por una franja que pasaría por los pozos M-3, M-172 y H-2, al SE por el S-262, M-92 y M-189, queda pendiente la delimitación hacia el E (Fig. No. 8). En base a lo anterior, dado que las temperaturas son altas hacia ese rumbo, se estima que las perforaciones exploratorias deberán ser enfocadas con esta orientación y ese es uno de los primeros argumentos que soportan el atractivo al Este de Cerro Prieto al Oriente del Ejido Nuevo León.

En este resúmen se agrupan resultados de un análisis efectuado a diversos estudios geológico-geofísicos llevados a cabo por la C.F.E. en el Campo de Cerro Prieto y zonas adyacentes, apoyando tecnicamente el interés exploratorio hacia el oriente y se describen a continuación algunas características geológicas que se esperan detectar conforme se realícen las perforaciones. Dichas características se pueden resumir en lo siguiente:

1.- Se ha postulado que el Campo de Cerro Prieto se localíza en un centro de dispersión activo producto del movimiento lateral derecho de las fallas transformadas Cerro Prieto e Imperial (Elders, et al, 1972). Como consecuencia del movimiento relativo de estas fallas, se formó otro sistema aparentemente perpendicular, al que se le ha denominado Volcano (Calderón 1962, Puente, 1978) con rumbo general SO-NE y las fallas que aquí intervienen son de tensión y por consiguiente abiertas, por las que es factible el ascenso del material calorífico que calienta el agua almacenada en los sedimentos permeables. Actualmente no se ha comprobado esta teoría, sin embargo, la zona de pozos construídos,

clasificados como productores, queda ubicada en esta área y pendiente a la exploración queda la franja hacia el ENE, al E, y hacia el ESE.

Aunque los afallamientos en áreas de centros de dispersión son complejos y difíciles de determinar, hasta el momento, con apoyo en los diferentes estudios geológicos y geofísicos que se han realizado, se infirieron en el área de Cerro Prieto cuatro fallas del sistema Volcano: Morelia, Hidalgo, Pátzcuaro y Delta y se ha deducido que podrían estar relacionadas con la génesis del campo. Las isotermas de máximas temperaturas registradas en el campo manifiestan similitud con éste patrón de orientación (ENE) (Fig. No.8).

2.- Un posible atenuante al párrafo anterior es el hecho de que estas fallas (Volcano) no fueron detectadas con claridad en los recientes estudios sísmicos de Reflexión y Refracción (GYMSA, 1980). Sin embargo, éstas podrían tener un efecto suave en los patrones de reflexión (Fig. No. 9) o cambiar a rumbo E como ocurre con la falla Delta en la cercanía del pozo NL-1 (al Sur), y también las curvas de isotermas podrían cambiar al mismo rumbo, no obstante tomando en cuenta lo mencionado en el párrafo No. 1 respecto al centro de dispersión y contemplando la información gravimétrica en su correlación con la sismología y los pozos profundos, permiten suponer que ubicándose dentro del marco de localización de éste centro de dispersión, un efecto local del metamorfismo hidrotermal creado podría ser un incremento en la densidad de los sedimentos debido a la presencia de sílice y carbonatos en las porosidades intergranulares que en proceso convectivo de las salmueras sobrecalentadas se depositaron dando lugar a la generación del máximo gravimétrico en forma de domo que se observa entre el campo de Cerro Prieto y el Ejido Nuevo León y se extiende hacia el Este (Fig. No. 10) y con el podría relacionarse asimismo la posible extensión del campo.

3.- La información aportada por los estudios recientes de sísmica de Reflexión y Refracción al Este del campo de Cerro Prieto (GYMSA, 1980) indica que la cima de los sedimentos consolidados en el área propuesta como extensión del campo puede esperarse a $\mp$ 2500 m de profundidad, y en lo que se refiere al ambiente estructural se manifiesta el afallamiento mas intenso al Sur dentro de este marco de localización hacia donde dicho contacto puede encontrarse mas profundo.

Es evidente el atractivo exploratorio del sector oriental del campo. Se exponen algunas bases técnicas en apoyo a éstas propuestas con el objeto de observar o decidir, de los problemas ejidales que aquí se presentaran para la construcción de pozos. Sin embargo, es importante hacer notar que al no poderse precisar la extensión hacia el oriente, durante las construcciones que aquí se realizaran deberá darse prioridad a las localizaciones más cercanas al pozo NL-1 (al Este), dado que con ello se contribuiría a incrementar las posibilidades de éxito para la perforación de cualquier pozo que se construya cercano a la falla Imperial ya que hacía ese sector no existe actualmente alguna evidencia de temperatura anómala. Podría implicar que esta zona está inactiva hidrotermalmente, o bién las capas superficiales no consolidadas son tan permeables que las infiltraciones o el flujo de los acuíferos subterráneos del Río Colorado no permiten la presencia térmica superficial.

AREA DE TULECHECK

El interés geotérmico en el Area de Tulecheck se originó por la presencia de manifestaciones hidrotermales que se exhiben en forma de manantiales de agua caliente, fumarolas y hervideros de lodos, aproximadamente 17 Km al NO del volcán de Cerro Prieto (Fig. No. 11).

Esta anomalía geotérmica se ha denominado "Tulecheck", porque el área comprende las manifestaciones hidrotermales en los drenes de riego Huisteria y Tulecheck, y las temperaturas altas (165°C) de algunos pozos perforados para uso múltiple a 1200 m de profundidad en los alrededores.

Dentro del marco de la geología regional, la zona geotérmica se localiza 6 Km al Noreste del complejo granítico que forma la Sierra de los Cucapás, a escasos 150 m al Noreste del contacto que forman los sedimentos arcillo-arenosos más recientes que afloran en el Valle de Mexicali y los sedimentos de piedemonte que le subyacen y afloran en una amplia faja paralela a las estribaciones de la Sierra de los Cucapás.

Los sedimentos de piedemonte en los que predominan clásticos angulosos y fragmentos de granito micáceo, presentan un echado general al Noreste cuya disposición en capas con estratificacion cruzada varía de 0°a 12° (Razo, 1967).

Las primeras perforaciones realizadas en la zona, indican que el plano de contacto entre los sedimentos de piedemonte y los depósitos aluviales que le sobreyacen tiene una inclinación aproximada a la del buzamiento de los sedimentos de piedemonte.

Tectónicamente, el área se sitúa en la zona de influencia de la falla San Jacinto. Aunque la traza principal se localiza a 6 Km aproximadamente al NE su constante actividad debió contribuir al fracturamiento en los bloques de basamento granítico (?) situando parte del área como un horst con una profundidad de $\mp$ 1500 m (Fig. No. 12).

Desde el punto de vista comercial, el interés geotérmico de esta zona no radica precisamente en el área de manifestaciones ya que aquí es unicamente la zona de disipación térmica en superficie.

Referente a las estimaciones geológicas, en estos estudios se indica que la disipación termal ocurre en forma inclinada a través de los depósitos de piedemonte por su mayor permeabilidad, lo cual indica que los depósitos arcillo-arenosos que forman los sedimentos aluviales actúan como sello a dichas disipaciones. El problema principal es el orígen del calor.

Teoricamente el flujo calorífico debería provenir de alguna fuente cercana a la falla Cerro Prieto (San Jacinto). Sin embargo, los resultados del pozo M-4 construído a 2004 m de profundidad no evidencian lo anterior (60°C a 2000 m).

Continuando con el análisis estructural, los estudios gravimétricos indican que el basamento del área forma parte de la prolongación a profundidad de las rocas predominantemente graníticas que afloran en la Sierra Cucapá y el Mayor (Fig. No. 13). Lo anterior se deduce del ordenamiento de contornos de anomalías de Bouguer mismas que sugieren la presencia de una sierra sepultada cuya morfología tiene su máxima expresión 9 Km al NO del Volcán de Cerro Prieto en las inmediaciones del campo de Cerro Prieto y el Area de Tulecheck. Argumentando favorablemente lo descrito, los pozos S-262, M-3 y M-96 cortaron granítica a profundidades que varían desde 1470 m hasta 2730 m.

Las manifestaciones superficiales en el Area de Tulecheck hacen pensar en situaciones virtualmente semejantes a las de la Laguna Volcano en el Area de Cerro Prieto, en donde resumidamente se tiene, una zona de disipación térmica en superficie, la falla Cerro Prieto que limita a profundidad al bloque de granito al Oriente y la zona del yacimiento geotérmico en el bloque de basamento caído al Oriente de la falla,

En Tulecheck, la zona de disipación es de menores dimensiones y aunque no sería la falla Cerro Prieto la que limita al basamento muy bien podría ser otra que de acuerdo a los contornos gravimétricos tiene orientación aproximada O-E, Referente a la zona propuesta como de probabilidades de desarrollo geotérmico, si bien los puntos anteriores cumplen con las condiciones iniciales de un campo geotérmico, hasta ahora los estudios de prefactibilidad realizados en la zona de Tulecheck no lo sitúan como buen campo. Ello puede deberse a que se ha estado explorando en las proximidades del cruce de la falla O-E con el contacto entre los sedimentos permeables e impermeables donde la energía se ha estado disipando, No obstante, partiendo de la base de que las fallas en el basamento y el efecto de éstas hasta ciertos niveles estratigráficos hacen posible el ascenso de fluídos de origen magmático, éstos al mezclarse con acuíferos de otros niveles, son los que originan el vapor, Tomando en cuenta lo anterior, se sugiere el origen del calor en la periferia de la estructura basamentaria en el bloque caído de la falla O-E, al norte de Tulecheck,

Con éste concepto aún no se ha resuelto cual zona sería dentro del área de Tulecheck la de mayor interés, En ésta área existe el inconveniente de que no se ha descubierto un estrato que reúna las condiciones de sello, Por otra parte, su proximidad a las estribaciones de la Sierra Cucapá hace suponer un espesor considerable de depósitos de piedemonte, No obstante, por razones de carácter hidrotermal es posible que éste sello exista a profundidad,

Considerando que los altos gravimétricos que se localizan en el Ejido Xochimilco y en los Virreyes, al Norte de Tulecheck, podrían haber sido producidos en la misma forma que el máximo gravimétrico observado en el Campo Geotérmico de Heber (por sedimentos plegados, densificados y alterados hidrotermalmente), uno de ellos ubicado 8 Km al Sur de Heber continúa desde el norte y corresponde con un máximo de temperaturas observado en el mapa de isotermas a 450 m de profundidad (Fig, No, 14), Esto implica que podría existir alguna interconexión entre el campo de Heber y Tulecheck, Ello se deduce porque el área tiene estimado un espesor de ± 4500 m de sedimentos y por la forma de las anomalías gravimétricas es difícil que éstas representen la morfología del basamento,

Dado lo anterior, se proponen exploraciones de detalle en el área norte de Tulecheck (Fig, No, 13) con estudios geofísicos de Sismología de Reflexión, y construcción de más pozos de uso múltiple de ± 1200 m de profundidad, con lo cual se formaría un criterio mejor definido en la propuesta de localización de pozos exploratorios profundos hacia ese sector,

AREA DE RIITO

El interés exploratorio en el área de Río, Son. se originó por la presencia de temperaturas superiores a la normal detectadas en pozos construídos para riego (Fig, No, 15),

En base a esa primera información se han realizado diversos estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos que incluyen desde la geología superficial, potencial espontáneo y muestreo geoquímico, hasta las perforaciones someras (± 600 m) para uso múltiple y los estudios sismológicos de Reflexión y Refracción,

Por lo que respecta a la geología superficial, esta región de Río es parte del Delta del Río Colorado cuyos sedimentos estan constituídos predominantemente por rocas clásticas de orígen deltáico.

Tectónicamente esta región queda también en la zona de influencia del sistema de fallas San Andrés, En consecuencia, ésta es una zona de gran actividad sísmica (Fig, No, 16),

Uno de los rasgos de mayor interés observado en ésta área, es el hecho de que aquí tiene su expresión en superficie, en la Mesa de Andrade, la falla Cerro Prieto, De ello se deriva que, la constante actividad de la falla, y el sistema al que pertenece en general, han contribuído a la formación de estructuras paralelas a la orientación de ésta (SE-NO) y algunas otras como la Río de rumbo SO-NE visible también superficialmente en la Mesa de Andrade,

Esto podría implicar que la situación estructural necesaria para la formación de un ambiente geotérmico, queda cubierta al poder ser posible el movimiento del flujo hidrotérmico,

En los estudios gravimétricos realizados, las anomalías indican que al E de Río; donde fué observado un gran máximo (Fig, No, 17) este puede ser interpretado como el reflejo de una zona densificada.

Diez Km al SO (de Río), un mínimo gravimétrico en el Ejido Oviedo Mota, refleja la prolongación al NO de una gran depresión estructural provenientedel Golfo de California, Este mínimo que parece señalar un área de considerable espesor sedimentario (Superior a 7000 m) se ha interpretado por su ubicación como una gran fosa; quizá la prolongación de la cuenca Wagner en cuyos sedimentos la densificación

hidrotermal ha sido tênue o tiene poco efecto gravimêtrico.

En base a lo anterior, el interés exploratorio en el área de Riíto sería mayor hacia el máximo que hacia la depresión. Sin embargo, es conveniente mencionar que este máximo, dadas sus dimensiones, puede tener orígen isostático y no reflejar coherentemente una densificación de sedimentos. En consecuencia, el siguiente paso ha sido el de definir, ya sea en las prominencias o en las estribaciones de dicho máximo el sítio que reúna las mejores condiciones estructurales. Esto se ha inferido en parte en base a la interpretación de los mismos estudios gravimêtricos y sismológicos de Reflexión y Refracción en los que fué detectada una falla con caída hacia el SO diez Km al oriente de Riíto (Fig. No. 17) que se observa paralela a la Cerro Prieto y podría ser propicia para alguna actividad hidrotermal. Se sugiere la construcción de uno o más pozos exploratorios al SO de ésta falla en su localización sismológica.

En lo que se refiere a los regístros de Reflexión estos manifiestan una estratificación buzante en general hacia el SO (Fig. No. 18).

En la zona de interés propuesta, al SO de la falla, los estratos reflectores se presentan uniformes y homogêneos hasta los 900 m y subyacientes a éstos, se inicia la atenuación de dichos reflectores. De aquí se interpreta que a ± 900 m exíste una diferencia en el grado de consolidación de los sedimentos y podría representar la cima de un paquete de consolidados con espesor hasta de 1500 m, a cuya profundidad (± 2400 m); en donde se observa el último horizonte reflector, se podría marcar el contacto de un cuerpo más denso y compacto.

Ya que en ésta área, sugerida de interés exploratorio, es difícil detectar el basamento a ± 2400 m de profundidad, se proponen que los pozos que se perforen se construyan, a 3500 m con el fín de conocer la estratigrafía y termalidad de la zona.

En lo que respecta a la magnetometría aquí, las anomalías no observan correspondencia con las de Bouguer (Fig. NO. 19). Ello significa que no son originadas por la misma fuente. Empero, dos pequeños máximos magnéticos observados, uno en el Ejido Plan de Ayala y el otro en el pueblo de Riíto, se correlacionan con los mapas de 2º Derivada y Residuales gravimêtricos, (Figs. 20, 21). En este caso, se han interpretado por su ubicación junto a la falla Cerro Prieto, como el reflejo de posibles cuerpos de orígen ígneo, de alto contenido de minerales ferromagnesianos, densos y de alta suceptibilidad magnética.

Cabe mencionar que aunque es difícil decidir la profundidad de los cuerpos causantes de dichas anomalías magnéticas, dada la termalidad del área éstos podrían ser la fuente de calor. Por consiguiente en donde se localízan, implican interés exploratorio. Como un apoyo a lo anterior, en el campo geotérmico "Salton Sea" (350°C) el pozo Elmore Nº 1 penetró en un cuerpo ígneo de composición intermedia con abundante contenido de magnetita a 2123 m de profundidad (Griscom y Muffler, 1971) y en el campo de "Heber" (215°C) el pozo Holtz Nº 1 alcanzó diabasa a 1366 m (Browne, 1977). Ambos campos se encuentran en máximos magnéticos por lo que el orígen de éstas anomalías ha sido atribuído a cuerpos ígneos relativamente jovenes actualmente en etapa de enfriamiento (Randall, 1968).

Es evidente que lo anterior deberá complementarse con otros estudios de detalle lo cual reduce los argumentos para la inmediata localización de pozos exploratorios profundos en estas áreas. No obstante, las perforaciones someras (± 600 m) para uso múltiple llevados a cabo por ésta C.F.E., indícan temperaturas de hasta 64°C a los 450 m cuyos gradientes varían desde 1,59 C/30 m hasta 3,49 C/30 m (Fig. No. 22).

Los párrafos mencionados son con el fín de sustentar otras propuestas de localización en esta área de Riíto que se encontrarían en el flanco suroccidental del máximo gravimêtrico, en la prominencia del máximo magnêtico y cercano a la traza de la falla Cerro Prieto.

El caso del máximo magnético del Ejido Plan de Ayala no se contempla en esta propuesta dado que la información que se tiene de ese sítio no es suficiente, pero deben programarse mas estudios de exploración dado que también ahí existen evidencias de termalidad.

AREA AEROPUERTO - ALGODONES

Aeropuerto-Algodones se ha denominado así porque comprende dos zonas con probabilidades geotérmicas: una al Oeste del Aeropuerto Internacional Rodolfo Sánchez Taboada, y la otra, entre dicho aeropuerto y el pueblo de Algodones.

El interés exploratorio de la zona Aeropuerto Oeste se originó por la presencia de temperaturas superiores a la normal detectadas en pozos construídos para riego y por su ubicación junto a la falla Imperial que reúne parcialmente los requisitos estructurales ya que podría ser propicia para la existencia de alguna actividad geotérmica. Por otra parte, la cercanía al Campo Geotérmico de Heber en el Valle Imperial, y la posible continuación de la anomalía térmica de Heber hacia el Valle de Mexicali, parece indicar que podría tener alguna relación con el máximo gravimêtrico que se presenta como una elevación estructural al poniente de la falla Imperial en las proximidades del aeropuerto (Fig. No. 13).

Partiendo de lo anterior, se comenta la información geofísica y geológica existente, sustentando las propuestas de localización de pozos exploratorios en el área.

Por lo que respecta a la gravimetría, en estudios anteriores se interpreta la posible existencia de un horst (Fonseca y Razo, 1978, Reyes Z., 1979). Por otra parte, las temperaturas superiores a la normal registradas en la zona sugieren que este máximo gravimêtrico de orientación NO-SE, limitado en su flanco Suroccidental por la falla Imperial pudo ser provocado no por una elevación del basamento, sino por una densificación de los sedimentos. Ello podría significar que el máximo se produjo por las altas temperaturas de las aguas de formación que en un proceso convectivo, en su migración y enfriamiento depositaron sílice y carbonatos en las porosidades intergranulares de los sedimentos

incrementando así la densidad de los mismos y consecuentemente el campo gravitacional.

Esto se ha relacionado porque también en los campos geotérmicos de Heber, East Mesa, Brawley, Salton Sea y Dunnes etc., aunque no serían las mismas condiciones estructurales, existen máximos gravimétricos que han sido interpretados en forma similar. En base a lo anterior, la zona del máximo sugiere interés exploratorio.

En éste lugar, la información preliminar suministrada por los estudios recientes de sísmica de Reflexión y Refracción (GYMSA, 1980) indica en el área un ambiente estructural bastante irregular quizá originado por la constante actividad de la falla Imperial (Fig. No. 23). Por otra parte, de acuerdo a la gravimetría se ha podido definir una alineación en los valores de anomalías de Bouguer de orientación NE-SO que podría implicar la presencia de otra falla. Un detalle interesante observado aquí, es que en la intersección de ésta falla con la Imperial, fué localizado el epicentro del sismo de magnitud 6,6 ocurrido en octubre de 1979 (CICESE, 1979) (Fig. No. 16).

Una aparente inconvenencia referente a la localización de un pozo en ésta área es que de acuerdo a la información existente del Valle Imperial éste máximo en el lado americano continúa en parte y aunque si manifiesta gradientes de temperaturas anómalos no se ha descubierto ninguna evidencia de temperaturas comercialmente explotables. Se podría entender como una antigua zona de intenso metamorfismo hidrotermal actualmente de menor actividad. Esto se interpreta en su correlación con la magnetometría al no presentarse ninguna anomalía fuerte o representativa de basamento o de algún intrusivo ígneo capaz de alterar el campo magnético del área lo cual argumenta favorablemente a la presencia de un cuerpo metamorfico como productor de ésta anomalía gravimétrica.

Sumado a lo descrito otros trabajos geofísicos realizados en años anteriores en el Valle Imperial, manifiestan espesores de hasta 6000 m para el paquete sedimentario (Fig. No. 24).

Por lo expuesto en los párrafos anteriores, aunque no se tenga termalidad comercial en la localización de éste máximo en el lado americano, los gradientes de temperaturas que se incrementan hacia el SE en el lado mexicano, el virtual cuerpo metamórfico observado aquí, con algo de temperatura detectada de acuerdo a la información de los pozos A-1 (80° C) y A-2 (85°C) construídos hasta 1100 m de profundidad (Fig. No. 13), así como la estratigrafía atravezada por éstos que indícan a dicha profundidad el inicio de la zona de la de transición de los sedimentos no consolidados con los consolidados, y la situación estructural, manifiestan en el área interés de perforación exploratoria.

Dentro de ésta misma Area de Aeropuerto-Algodones, en un análisis tectónico efectuado a los recientes estudios de gravimetría y magnetometría de la porción oriental del aeropuerto, se detectaron cuatro fallas que han sido correlacionadas con las detectadas en el lado americano y corresponden a las denominadas Algodones, San Andrés, Calipatria y Brawley.

La falla Algodones cuyo reflejo superficial resulta evidente al Oeste de Pilot Knob en el pueblo de Los Algodones, manifiestan en el mapa de Anomalías de Bouguer un plano de fractura con escalonamiento hacia el centro de la depresión del macízo predominantemente granítico que aflora en el Cerro mencionado (Fig. No. 25). Con caída al SO de éste basamento superficial, se estima su salto de $\pm$ 800 m, de profundidad.

Aunque a ésta falla se le ha relacionado con el campo geotérmico de Glamis en el Valle Imperial, dado su corto paso en la porción mexicana cercano al pueblo de los Algodones y la ausencia de actividad termal en el área, en ésta posición dicha falla no tiene interés exploratorio.

La falla de San Andrés cuya evidencia en superficie se manifiesta 17 Km al Oeste del Pilot Knob, queda bién delimitada por la gravimetría en la porción estudiada. Asimísmo, indíca un salto mayor a los 2000 m al SO en los bloques del basamento cuya profundidad se estima superior a los 6000 m y de composición desconocida.

La falla Calipatria tiene una marcada correspondencia con el alineamiento de los contornos de anomalías de Bouguer y forma parte de una aparente elevación estructural en el flanco occidental de un máximo gravimétrico.

Este máximo es la prolongación al SE del observado en la zona geotérmica denominada "Border" en el Valle Imperial, misma que es continuación isotermal del Area de "East Mesa".

En base a lo anterior, y tomando en cuenta que existe termalidad en la zona (Fig. No. 26), ésta anomalía gravimétrica que se le ha denominado Aeropuerto Este representa interés ya que se ha supuesto originada en la misma forma que los máximos gravimétricos observados en los campos geotérmicos mencionados. Es decir, el hidrotermalismo ha incrementado la densidad de los sedimentos alterando con ello el campo gravitacional y la falla Calipatria podría ser el conducto que propícia dicho proceso.

AREA DE SAN LUIS RIO COLORADO

El Area de San Luís R.C. se ha considerado como prospecto geotérmico por la actividad termal observada en una serie de pozos construídos para riego.

Con esos antecedentes se han realizado muestreos geoquímicos con cuyos geotermoindicadores Na-K y Na-K-Ca se determinaron temperaturas de 130°C. Por otra parte, un pozo construído a 3217 m de profundidad con objetivos petroleros, hacia el NE justo en la frontera internacional (Fig. No. 25), reveló una temperatura de 138°C.

Esta temperatura podría considerarse como gradiente normal, pero una serie de circunstancias inducen a pensar que este pozo es un importante indicador de actividad geotérmica ya que su proximidad al Río Colorado y el área de afectación de sus acuíferos subterráneos a profundidad, pudieron haber influído a que no se registraran temperaturas superiores. Asimísmo, es importante mencionar que éste pozo se localíza en el flanco Occidental de una depresión siendo la parte más levantada al Oeste de San Luís R.C.

En un resúmen desde el punto de vista tectónico, aunque la zona de influencia de apertura de corteza y separación de la península es muy amplia, en la zona que abarca el Valle de Mexicali al NE del Campo de Cerro Prieto el mayor relleno sedimentario ocurre entre las fallas Cerro Prieto y San Andrés en el área estudiada. Consistentemente, por esfuerzos tensionales y caída gravitacional, los bloques del basamento tienen un escalonamiento desde donde afloran en las Sierras Cucapá, el Mayor y el Pilot Knob, hasta las fallas indicadas.

Lo anterior es con el fín de señalar que en la porción central del Valle de Mexicali tanto al SO de la falla Cerro Prieto, como al NE de la falla San Andrés, las anomalías de gravedad y magnéticas ubicadas en éstos sítios, tienen estrecha relación y su orígen ha sido atribuído al relieve y concentración de minerales magnéticos del basamento mencionado.

Estructuralmente hablando, éstos son los primeros datos que se tienen del área de San Luís R.C. y sus alrededores.

Los sítios que se han clasificado aquí como atractivos exploratorios, se han relacionado a altos gravimétricos observados entre las fallas San Andrés y Cerro Prieto en donde ocurre el mayor depósito sedimentario. Con fundamento en ello, los máximos gravimétricos observados uno al Oeste de San Luís R.C. y otro en el pueblo de Paredones, dada la igual correspondencia con máximos magnéticos (Fig. No. 27) y su posición respecto a la falla San Andrés, se han asociado a intrusiones ígneas intrasedimentarias con posible alteración metamórfica según se manifiesta en la termalidad del área detectada por geoquímica y en el pozo construído a 3217 m de profundidad.

En el máximo gravimétrico que se encuentra al SO de San Luís R.C. en Lagunitas Norte, no hay correspondencia con algún alto magnético lo cual podría implicar que el de gravedad fué causado por densificación hidrotermal en los sedimentos que puede ser el reflejo de un cuerpo metamórfico sin fuerte magnetismo ignorándose si tenga actividad termal.

Es importante mencionar que en toda esta región de San Luís R.C. la capa areno-arcillosa superficial y la infiltración de los acuíferos del Río Colorado pueden contribuir a enmazcarar las anomalías térmicas en superficie o bién estas no exísten, por lo cual, se proponen exploraciones sismológicas y pozos de uso múltiple (hasta ± 1200 m), hacia los altos gravimétricos, que normen y actualícen un mejor criterio en la futura localización de pozos exploratorios profundos hacia esa zona.

CONCLUSIONES

El contexto geológico que es la base de la selección de sítios considerados en este trabajo como prospectos geotérmicos, ha sido un análisis regional de las evidencias geológico-estructurales observadas en el Valle de Mexicali que es una zona de dispersión de corteza causada por grandes esfuerzos ocurridos como producto de mecanismos tridimensionales provocados por la separación de la península, de la placa continental. Así, al hacer analogías geomorfológicas y asociar rasgos geológicos que afloran en las sierras de los alrededores del Valle de Mexicali, en éste reporte se ha creado una hipótesis sobre la formación de la Laguna con el objeto de comprender mejor la tectónica regional que coadyuvaría a un mejor apoyo en las interpretaciones que aquí se exponen. Dado lo anterior, los datos geológicos, geofísicos, termales, e información de pozos se han integrado resultando de ello que:

Las Sierras Cucapá y El Mayor derivan isostáticamente a partir de la Sierra de Juárez con un desplazamiento de orientación no bién definido sobre una cubierta simaica dando lugar a la formación de nuevos centros de apertura cortical como la Laguna Salada. Estas Sierras han deslizado cizallantemente algunos bloques periféricos con raíces de menor resistencia a los esfuerzos tensionales ocasionando una caída gravitacional de esos bloques hacia los centros de apertura cuyos ejes de elongación son las actuales trazas de fractura observadas en diferentes estudios.

En el marco téctonico del Valle de Mexicali se manifiestan tales desprendimientos en forma escalonada hacia el centro de la depresión quedando ésta situación expuesta en los mapas de Anomalías de Bouguer y Magnético al representar fielmente dichas anomalías el relieve del basamento a profundidad que aflora en las Sierras Cucapá y El Mayor. Por otra parte, una serie de mínimos gravimétricos que se encuentran circunvolucionando a ese basamento, son una clara evidencia de las inconsistencias de masa provocadas por un fuerte contraste de lateral de densidad al iniciarse una caída abrupta de dicho basamento que marca el principio del área de mayor depósito sedimentario. Un ejemplo de lo anterior es la porción oriental del campo de Cerro Prieto.

Hacia el otro lado de la depresión, en el área Suroccidental del pueblo de Algodones, otro desplazamiento de bloques resulta similar ya que partiendo aparentemente de la Sierra Cargo Muchacho Mountains y el Pilot Knob hacia la depresión, en la falla de Algodones principia otro escalonamiento hasta la falla San Andrés, y las anomalías de Bouguer y Magnéticas reflejan la morfología del basamento de esa área.

En la selección de sítios clasificados en éste reporte como atractivos geotérmicos, éstos se han relacionado a máximos gravimétricos que no representan al basamento, ubicados en las áreas de mayor relleno sedimentario, postulando el orígen de algunos de ellos a densificación de sedimentos por hidrotermalísmo generado en un proceso convectivo de acuíferos sobrecalentados dada la termalidad detectada en algunos de esos sítios. Asimísmo, otros máximos han sido relacionados a intrusiones ígneas intrasedimentarias ubicadas junto a las grandes fallas por su particular correspondencia con máximos magnéticos.

Finalmente, con el apoyo de éstas interpretaciones el Campo de Cerro Prieto se extiende hacia el oriente de su actual localización sin precisar su dimensión a través de un máximo gravimétrico en forma de domo, y en las Areas de Tulecheck, Ríito, Aeropuerto-Algodones y San Luís Río Colorado ha quedado señalado lo atractivo de un programa de exploración geotérmica que incluya

pozos de uso múltiple hasta ± 1200 m, Sismología de Reflexión y pozos exploratorios profundos según se propone en las páginas anteriores.

BIBLIOGRAFIA

Anderson Don L., Noviembre, 1971. "Deriva Continental y Tectónica de placas. La Falla de San Andrés" Selecciones de Scientific American.

Biehler, S. and J. Combs, 1972 Correlation of gravity and geothermal anomalies in the Imperial Valley, Southern California (Abs) Geol. Soc. , Amer Abstracts with rograms, v. 4., No. 3.

Biehler, S. 1971 Gravity Studies in the Imperial Valley, In Cooperative Geological-Geochemical investigations of geothermal resources in the Imperial Valley area of California, Univ. Calif. Riverside, Education Research Service.

Browne, 1977, Occurrence and hydrothermal alteration of diabasa, Heber Geothermal Field, Imperial Valley, California, Institute of Geophysics and Pla-etary Physics University of California, Riverside , California. 92521. UCR/IGPP-77/79.

Carey, S.W., 1961, In Continental Drift (Geology. Dept. Symp,, Univ. of Tasmania, Hobart, Aust., 1958),pp. 177-355; W. Halminton, Bull. Geol. Soc. Amer., 72, 1307.

Calderon, A., Geólogos Consultores Asociados (1962), "Levantamiento Sismológico de Refracción en la Zona Geotérmica de Cerro Prieto, Municipio de Mexicali, Estado de Baja California"; Inédito; Archivo de la Comisión Federal de Electricidad.

Combs. J., 1971, Heat Flow Geothermal Resources estimate for the Imperial Valley, In Cooperative Geophysical Geochemical Investigations of Californ-a (Univ. Calif. Riverside).

Crowell, J.C., 1974, Origin of late Cenozoic brines of Southern California in "Tectonics and Sedimentations"' Soc. of Economic Paleon, and Mineralogists Spec, Pub. No. 22, W.R. Dickinson, Ed., pp. 190-204.

De la Peña L.A. y Puente C.I. 1979, "El Campo Geotérmico de Cerro Prieto", 92nd meeting, San Diego. Geological Society of America. Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto, Comisión Federal de Electricidad.

Dobrin M.B. "Introducción a la prospección Geofísica. P-266-292. Ed Omega 1969. Segunda Impresión.

Elders, W.A., R.W. Rex, T. Robinson and S, Biehler, 1972, Crustal Spreading in Southern California; Science, 178.

Elders, W.A., J.R. Hoagland, E.R. Olson, S.D. Mcdowell and P. Collier, 1978, A. Comprenhensive Study of sample from geothermal reservoirs: Petrology and light stable Isotope Geochemistry in the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México UCR/IGPP 78/26.

Fonseca L., H.L. Davenport C., Puente C.I., y De la Peña, A., Cerro Prieto Geothermal Field, CFE'S Geophysical Studies 51th Anual International Meeting And Exposition Society of Exploration Geophysicists, Los Angeles, Ca, 1981.

Fonseca L., H.L. y Razo M.A., 1979 "Estudios Gravimétricos, Magnetométricos y de Sísmica de Reflexión en el Campo Geotérmico de Cerro Prieto. 2o. Simposio sobre el Campo Geotérmico de Cerro Prieto. Comisión Federal de Electricidad.

Gastil, G.R., Allison, E.C., Phillips, R.P., 1971 Reconnaissance geologic map of the State of Baja California: Prepared by the Students and Staff of the Universidad Autónoma de Baja California and San Diego State College.

Griscom, A., and L.J.P. Muffler, 1971, Salton Sea Aeromagnetic Map, U.S.G.C., Washington D.C. Map GP-754.

GYMSA Fotogrametría, S.A. Estudio Sismológico de Reflexión y Refracción en las áreas de "Cerro Prieto Este", "Tule CHeck", y "Riíto", Mexicali, B.C. Marzo 1981

Heartherton, T., W.J.P. MacDonald, and G.E.K. Thompson, 1966, Geophysical Methods in Geothermal Prospecting in New Zeland, Bull. Volcanol., v, 29. pp-485-497.

Howard J., Apps. J.A., et al 1978, "Geothermal Resource and Reservoir Investigations of U.S. Bureau of Reclamation Lease holds at East Mesa, Imperial Valley, California," October, 1878, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, California.

Kovack, R.L., Allen, C.R., and Press F., 1962. "Geophysical Investigations in the Colorado Delta Region"; Jour Geophys, Res., v. 67, p-2485-2871.

Lambert, W.D. and Darling, F.W. "Values of Theoretical Gravity on the International Ellipsoid", Bull, Geodesique, No. 32, October, November, December, 1971.

Lomnitz, C., F. Mooser, C. Allen, J.N. Bruce and W. thatchr, 1970, Seismicity of the Gulf of California Region, México - Preliminary Results; Geofis. Inst. 10,37.

Meidav, T. and Howard J.H., 1979 "An Update of Tectonics and Geothermal Resource Magnitude of the Salton Sea Geothermal Resource", Geothermal Resource Cou-cil, Transactions, vol. 3, September, 1979.

Meidav, T. y Rex W.R. 1970, "Geophysical Investigations for Geothermal Energy Sources, Imperial Valley, California", Phase I:1968 Field Project.

Nettleton, L.L., 1976, Gravity and Magnetics in Oil Prospecting, New York, McGraw-Hill.

Puente, C.I., 1978, Geology of the Cerro Prieto Geothermal Field (abs.): Abstracts, 1st. Simposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México: Lawrence Berkeley Laboratory Rept. LBL-7098 ABS,p.6.

Randall, W. An Analysis of the Subsurface Structure and Stratigraphy of the Salton Sea Geothermal Anomaly, Imperial Valley, California, Ph.D. Dissertation, University of California, Riverside (1974).

Rex, R.W. E.A. Babcock, S. Biehler, J. Combs, T.B. Coplen, W.A. Elders, R.B.Fugerson, Z. Garfunkel, T. Meidav and P.F. Robinson, 1971, Cooperative Geologycal, Geophysical-Geochemical Investigations of Geothermal Resource in the Imperial Valley Area of California. UCR/IGPP.

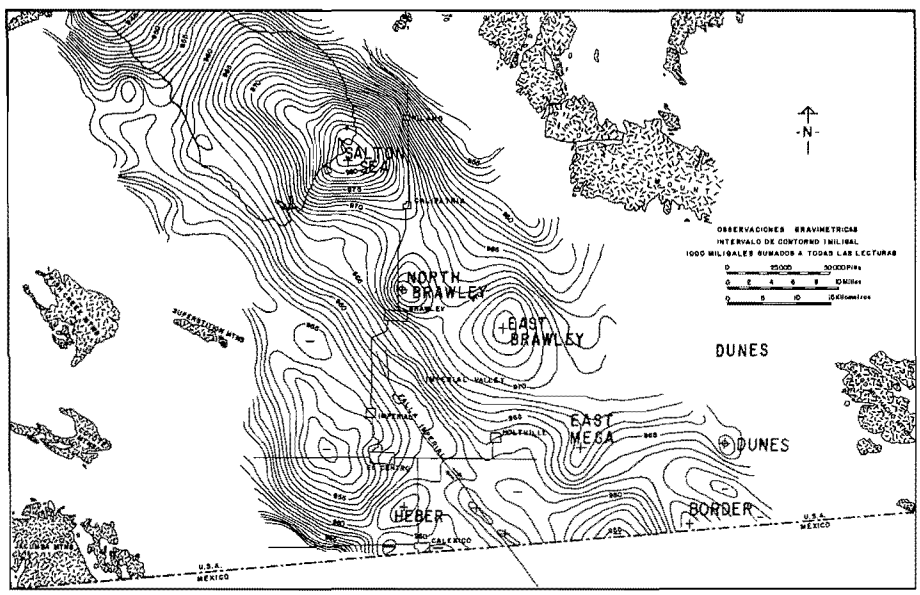
Reyes, Z.C.A., 1979, Estudio de Microsismicidad del Sistema de fallas transformadas Imperial-Cerro Prieto. Informe Técnico GE079-01, Centro de Investigacion Científica y de Educación Superior de Ensenada.

Reyes, Z.C.A., 1980 Reporte Preliminar del Sismo "Victoria" Baja California Norte del 8 de Junio de 1980 (ML=6,7) Informe Técnico GE080-02, C.I.C.E.S.E., Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Junio, 1980.

Silva Saldivar Pedro, 1977, Separación Regional-Residual y Segunda Derivada Vertical en Gravimetría, Tesis apra obtener la maestria en Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias Instituto de Geofísica.

Talwani Manick, Worzel J. Lamar and Landisman Mark, "Rapid Gravity Computations for Two-Dimensional Bodies with Application to the Medocine Submarine Fracture Zone".

Velasco Hernández, J., y Martínez Bermúdez, J.J., 1963 "Levantamiento Gravimétrico en la Zona Geotérmica de Mexicali, B.C."; Consejo de Recursos Naturales no Renovables, 24 p. inedit.



XBL 823-8775

Figura 1. Anomalía de Bouguer del Valle Imperial (tomado de Biehler, 1971).

Figure 1. Bouguer anomaly map of the Imperial Valley (taken from Biehler, 1971).

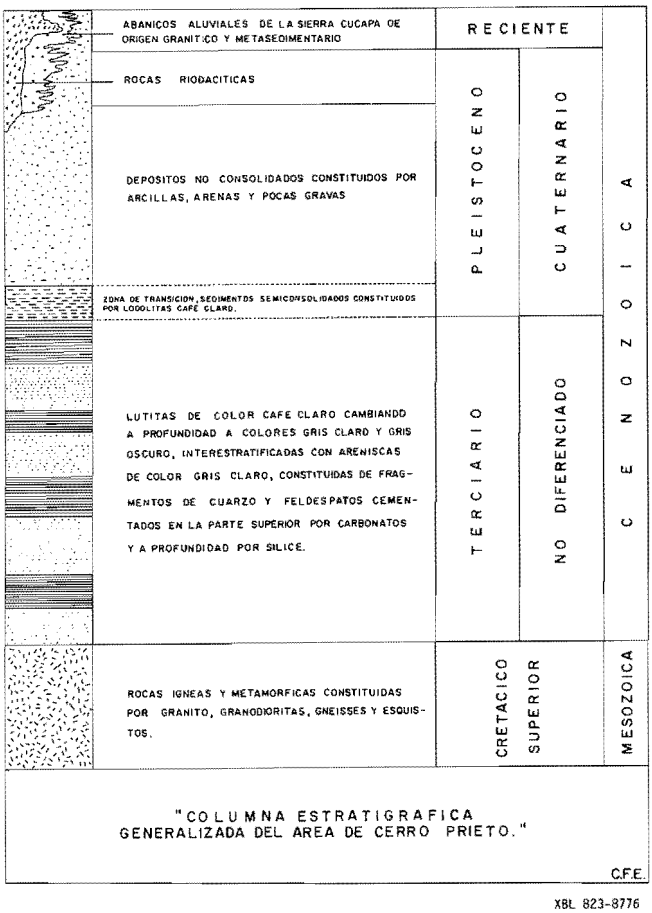


Figura 2. Columna estratigráfica generalizada del área de Cerro Prieto.

Figure 2. Generalized stratigraphic column of the Cerro Prieto area.

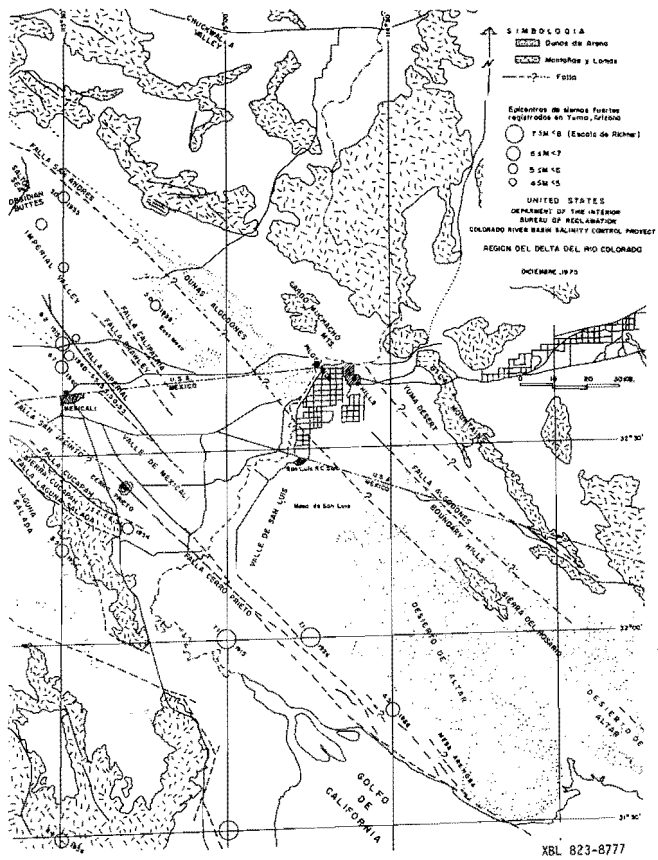
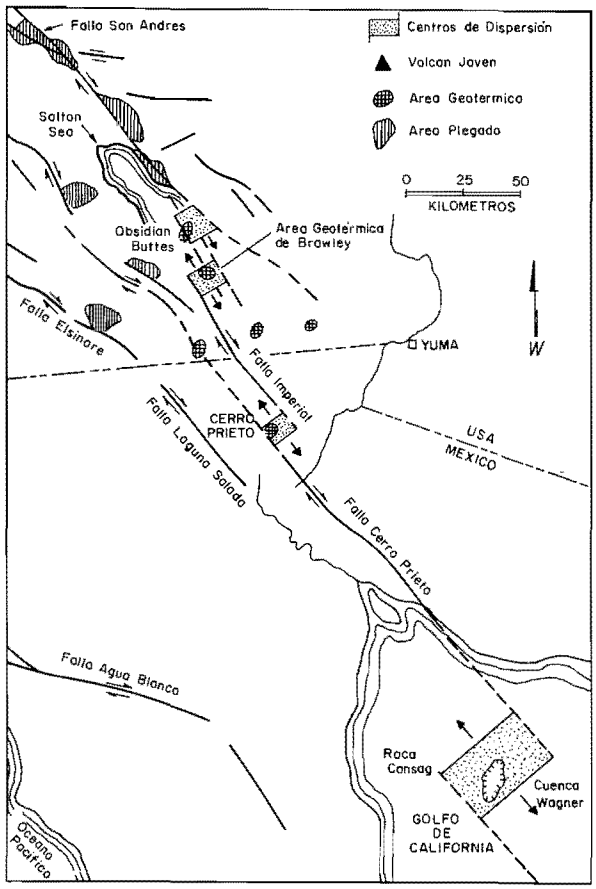


Figura 3. Mapa fisiográfico y tectónico de la región del delta del Rio Colorado.

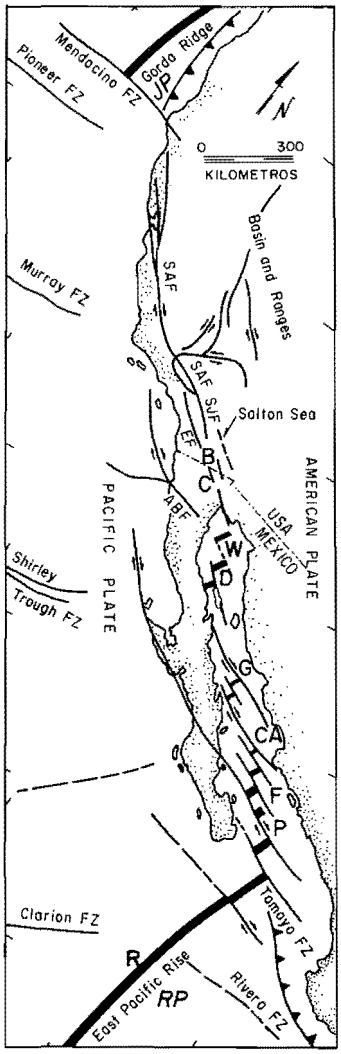
Figure 3. Physiographic and tectonic map of the Colorado River Delta region.



XBL 823-8778

Figura 4. Modelo de fallas transformes y centros de dispersión propuesto por Elders et al., 1972.

Figure 4. Transform fault and spreading center model proposed by Elders et al. (1972).



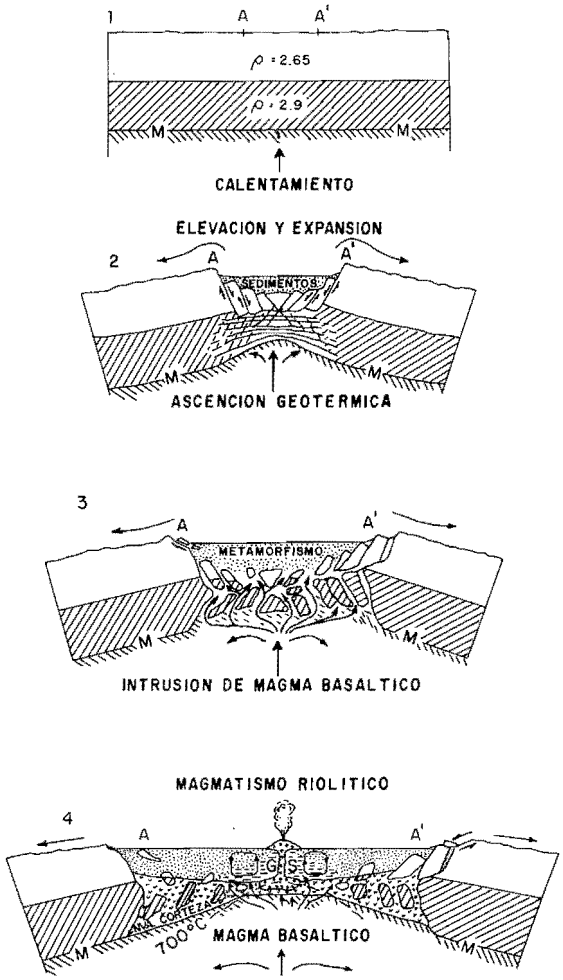
XBL 823-8778A

Figura 5. Ambiente tectonico general de la depresion Salton y el Golfo de California. La Costa del Pacífico en Norteamérica esta dominada por sistemas de fallas transformes y conecta a la triple union Mendocino con la triple confluencia Rivera. Asimismo, muestra las zonas de distension (pull apart basins) entre los segmentos de falla en Echelon en el Golfo de California.

Las zonas de fractura oceánica (FZ) y fallas continentales (F) son líneas negras continuas. Las que estan en duda son representadas por líneas discontinuas.

Otras abreviaciones: SAF = Falla de San Andres; EF = Falla Elsinore; SJF = Falla San Jacinto; ABF = Falla de Agua Blanca; JP = Falla de Juan de Fuca; RP = Placa Rivera; W= Cuenca Wagner; D = Cuenca Delfín; G = Cuenca de Guaymas; CA = Cuenca Carmen; F = Cuenca Farallon; P = Cuenca Pescadero; ▲ Volcán holocenico; B = Salton Buttes; C = Cerro Prieto, y R = Revillagigedo (Tomado de Elders y otros, 1972, Lawver y Williams, 1979, y Dickson y Snider, 1979)

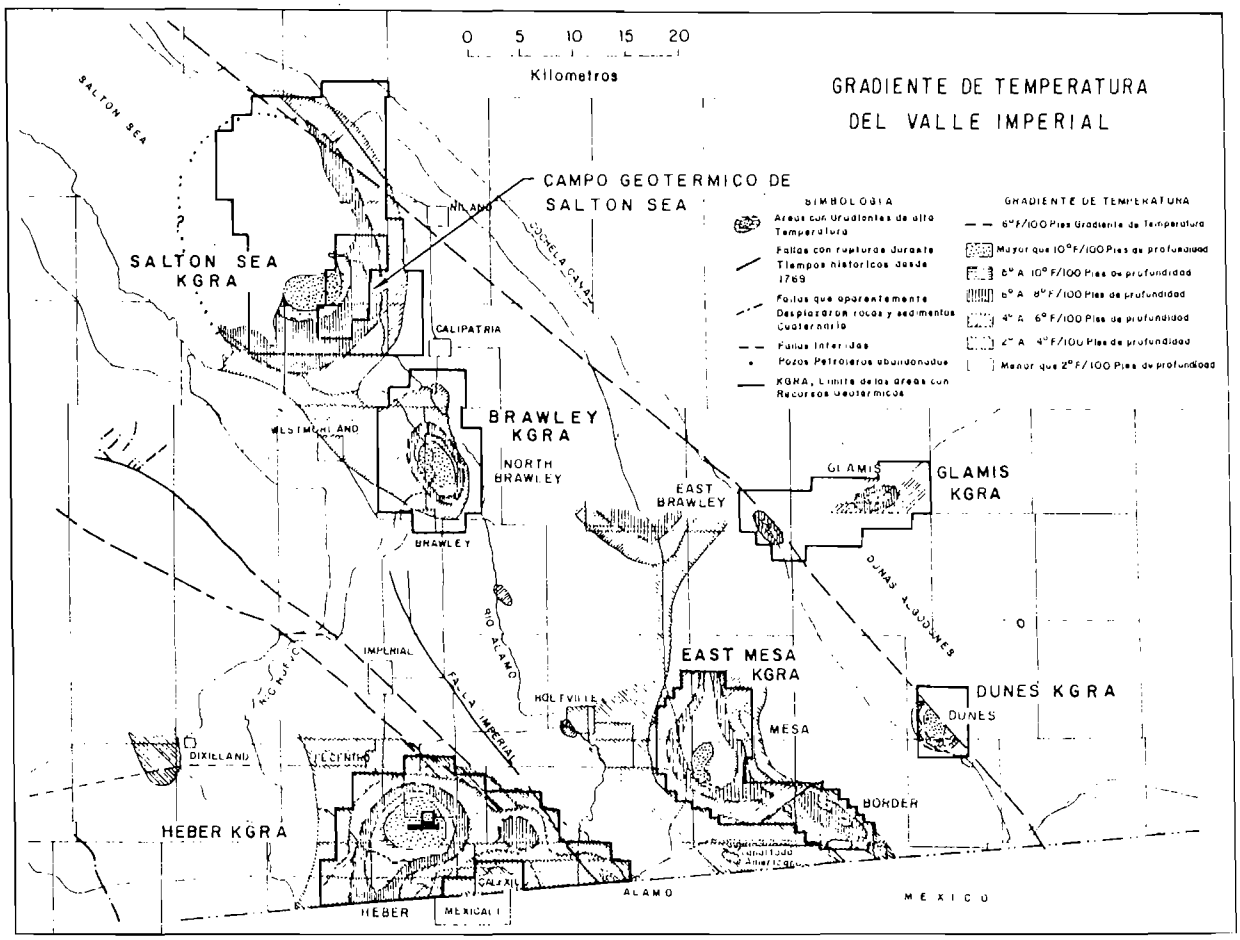
Figure 5. Gross tectonic environment of the Salton Trough. The Pacific Coast of North America is dominated by transform fault systems, which connect the Mendocino triple junction to the Rivera triple junction. Also shown are pull-apart basins between en echelon fault segments in the Gulf of California. Oceanic fracture zones (FZ) and continental faults (F) are solid black lines, dashed where uncertain. Other abbreviations: SAF = San Andreas Fault; EF = Elsinore Fault; SJF = San Jacinto Fault; ABF = Agua Blanca Fault; JP = Juan de Fucca Plat; RP = Rivera Plate; W = Wagner Basin; D = Delfin Basin; G = Guaymas Basin; CA = Carmen Basin; F = Farallon Basin; P = Pescadero Basin; ▲ = Holocene volcanoes; B = Salton Buttes; C = Cerro Prieto; and R = Revillagigedo. (From Elders, et al., 1972; Lawver and Williams, 1979, and Dickinson and Snyder, 1979).



XBL 823-8779

Figura 6. Modelo de agrietamiento y generación de magma. Las secciones son trazadas paralelas a las fallas de desplazamiento de rumbo. Paso 1: dos capas de la corteza descansan sobre una zona caliente en el manto. M, disconitnuidad Moho, AA', puntos de referencia para movimientos posteriores. Paso 2: expansión hacia arriba y lateral; una depresión se inicia y se llena parcialmente por sedimentos. Paso 3: la depresión es invadida por magma basáltico; luego ocurre el metemorfismo de los sedimentos y el deslizamiento gravitacional de las paredes en declive. Paso 4: derretimiento del basamento y la expulsión del magma riolitico. Salmuera caliente ascendente causa metamorfismo de esquistos verdes a profundidades superficiales (tomado de Elders, 1972).

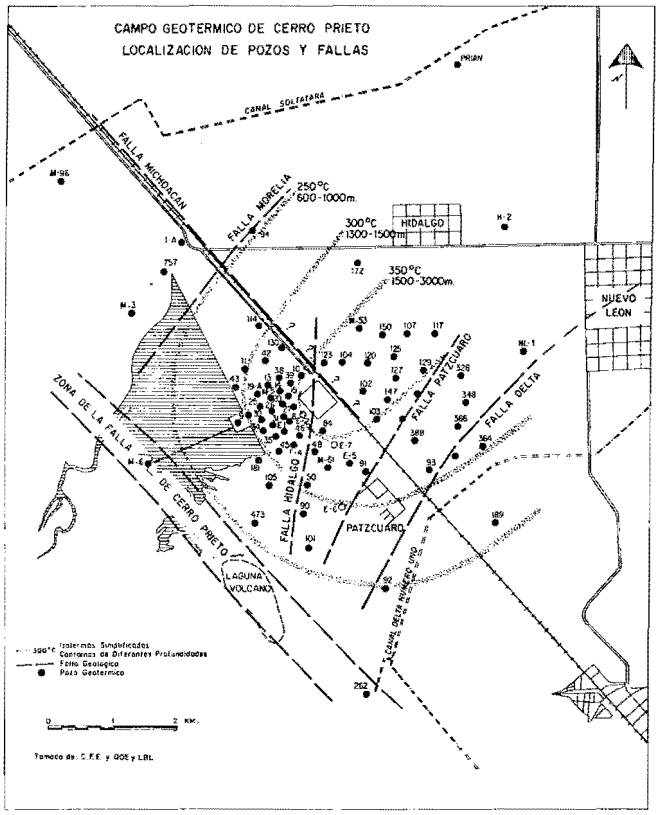
Figure 6. Model of rifting and magma generation. The sections are drawn parallel to strike-slip faults. Stage 1: Two layers of crust overlie a hot zone in the mantle. M, Moho discontinutity; A and A´, reference points for later movements. Stage 2: Upward and lateral expansion; a trough is initiated and partly filled in by sediments. Stage 3: The widening trough is invaded by basaltic magma; metamorphism of the sediments and gravitational sliding of the tilted walls occur. Stage 4: Melting of the basement and extrusion of rhyolitic magma. Ascending hot brines cause greenschist metamorphism (GS) at shallow depth.



XBL 823-8780

Figura 7. Plano de gradiente de temperatura del Valle Imperial, mostrando las áreas con recursos geotérmicos de la región del Salton Sea (tomado de Combs, 1971).

Figure 7. Temperature gradient map of the Imperial Valley, showing the geothermal resources of the Slaton Sea area (taken from Combs, 1971).



XBL 823-8781

Figura 8. Mapa de la zona del campo geotérmico de Cerro Prieto mostrando la localización de pozos y fallas.

Figure 8. Map of the Cerro Prieto area indicating faults and important isotherms.

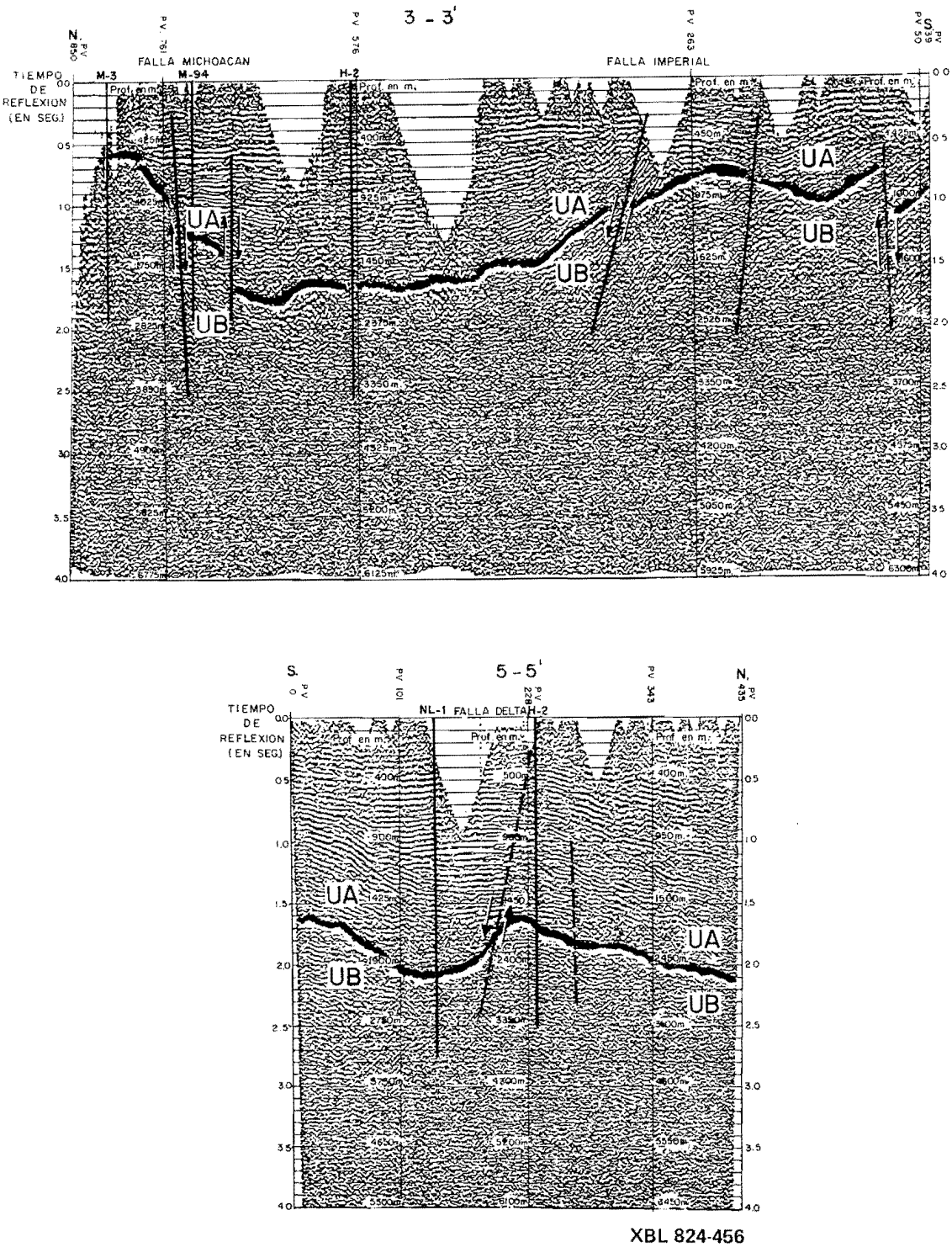


Figura 9. Línea de sísmica de reflexión mostrando las fallas Michoacán, Imperial y Delta. Ver la Figura 10 para localización.

Figure 9. Seismic reflection lines showing the Michoacán, Imperial, and Delta faults. See Figure 10 for the location of these profiles.

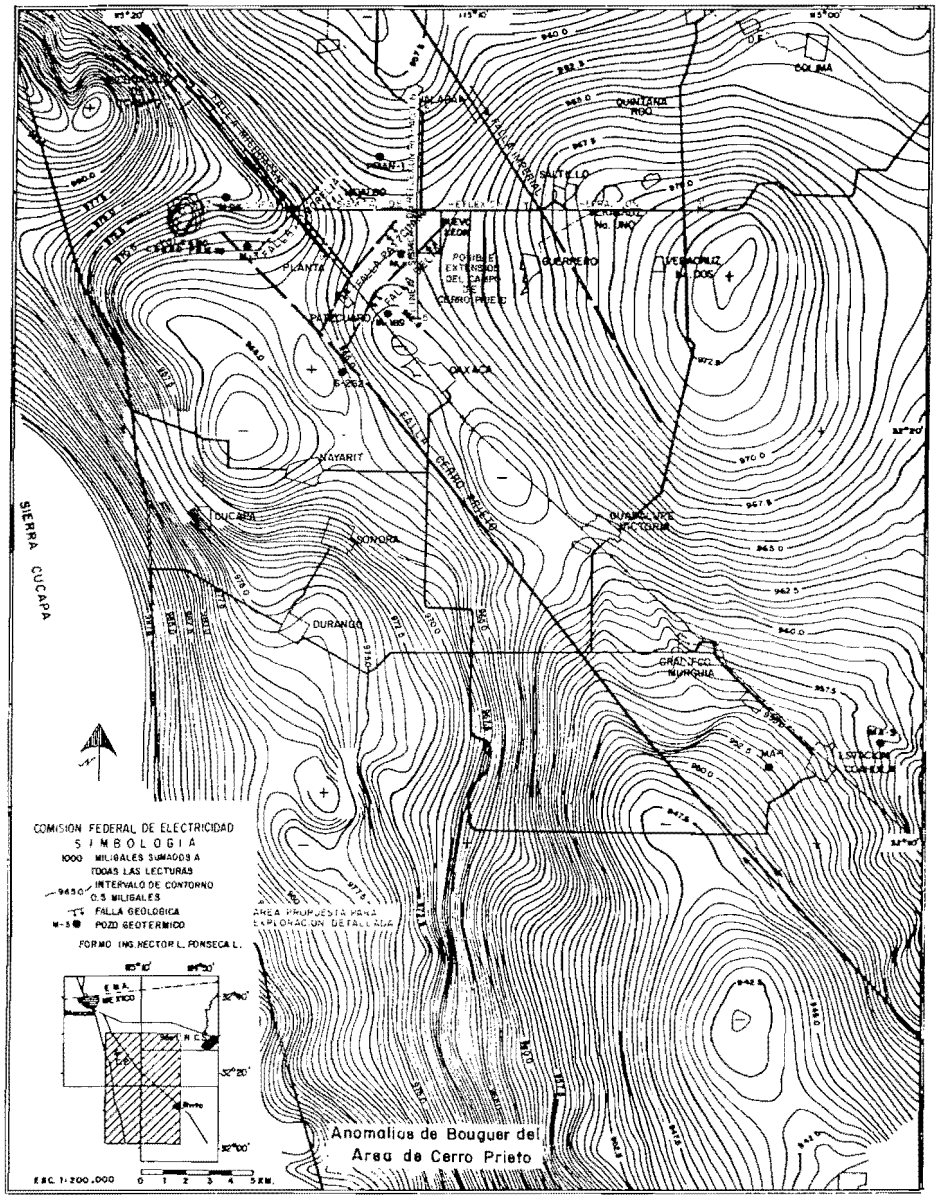
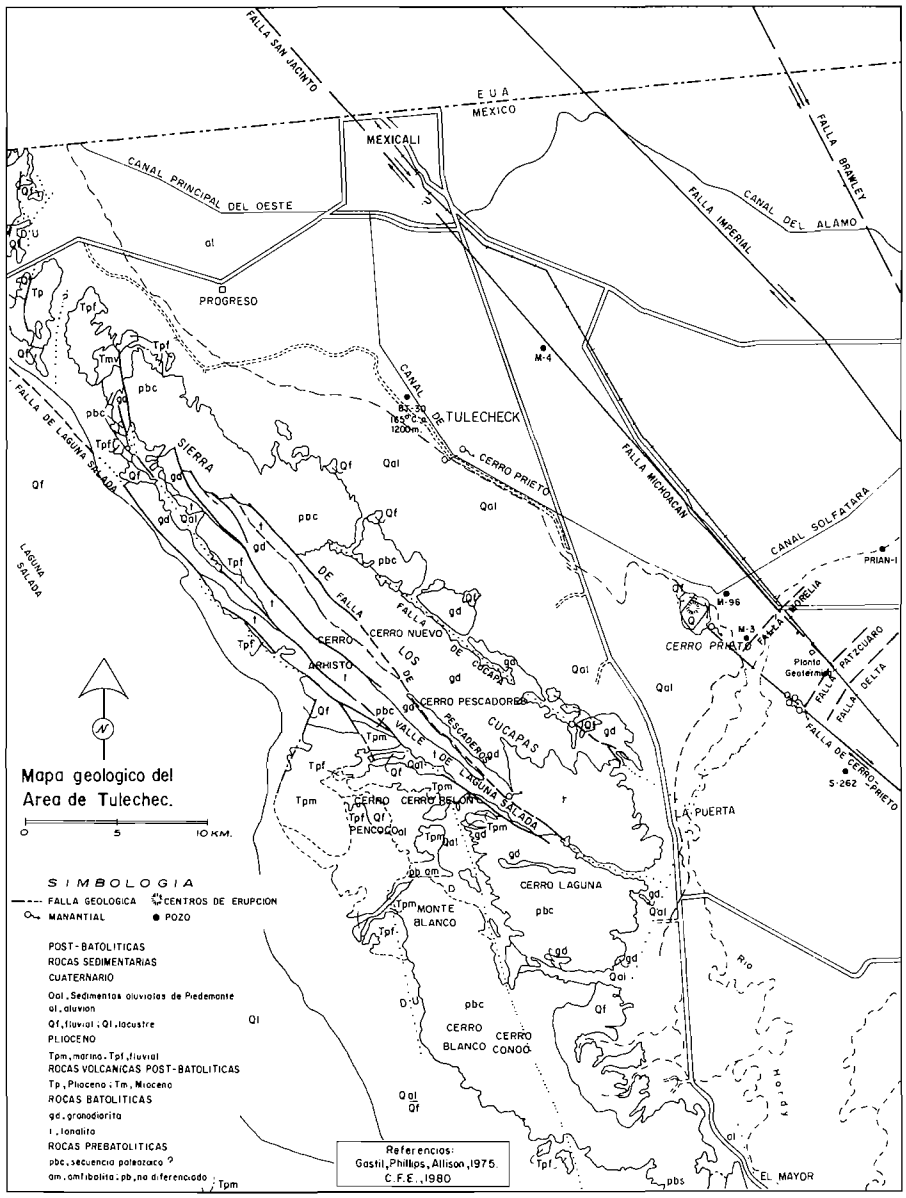


Figura 10. Mapa de las anomalías de Bouguer en el área de Cerro Prieto.

Figure 10. Bouguer anomaly map of the Cerro Prieto area.



XBL 823-8783

Figura 11. Mapa geológico del área de Tulecheck.

Figure 11. Geologic map of the Tulecheck area.

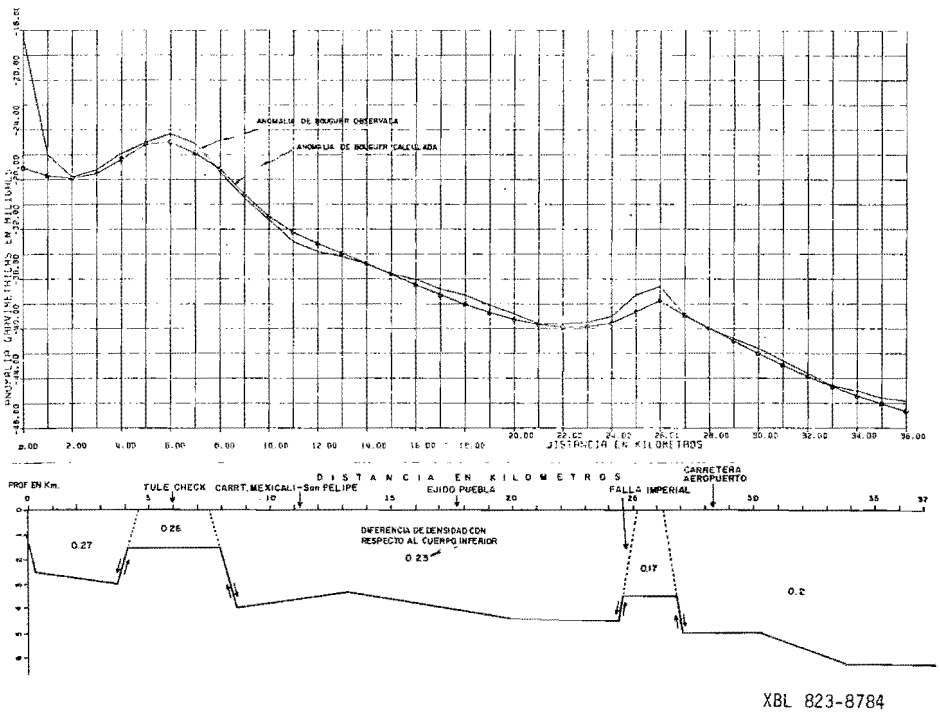
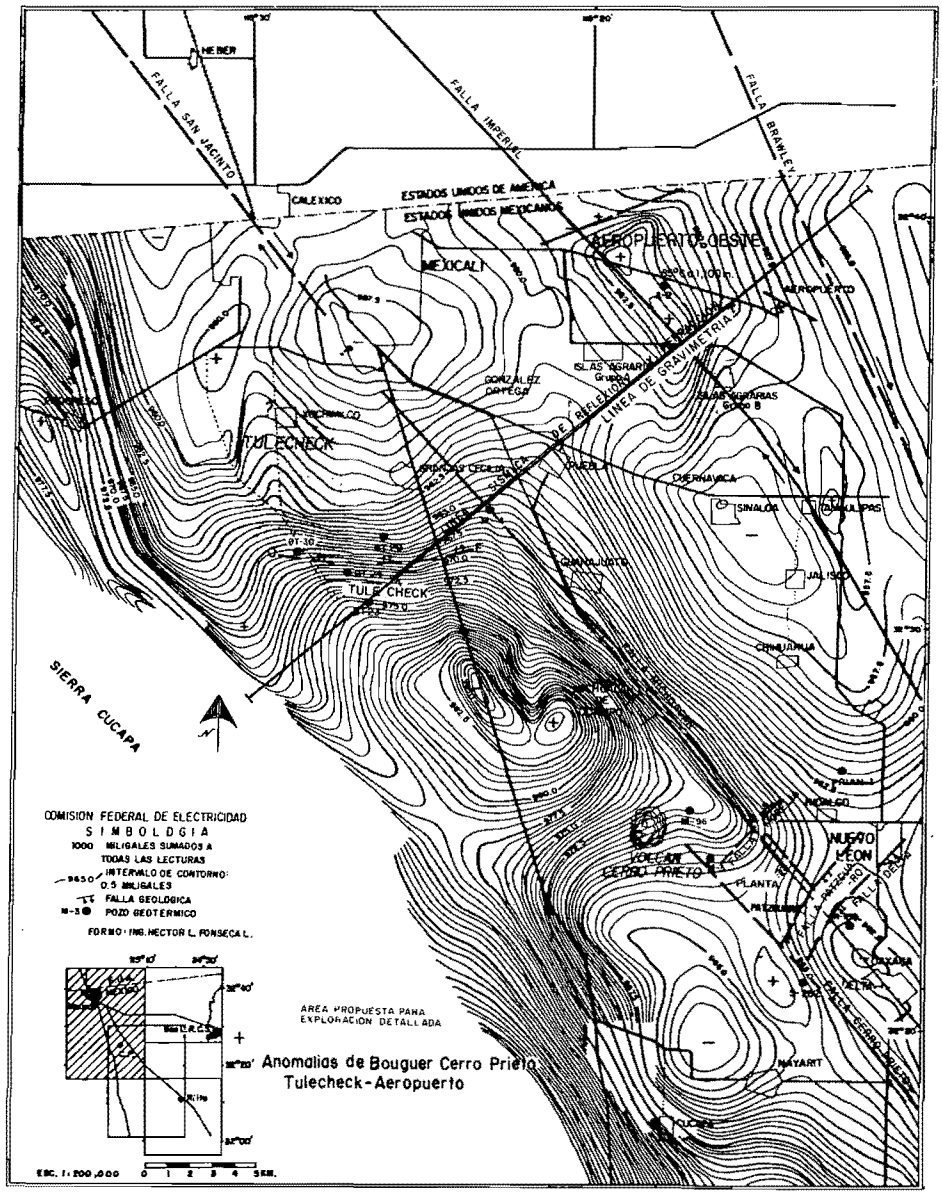


Figura 12. Sección gravimétrica de un modelo de basamento en el área de Tulecheck. La localización de esta línea se muestra en la Figura 13.

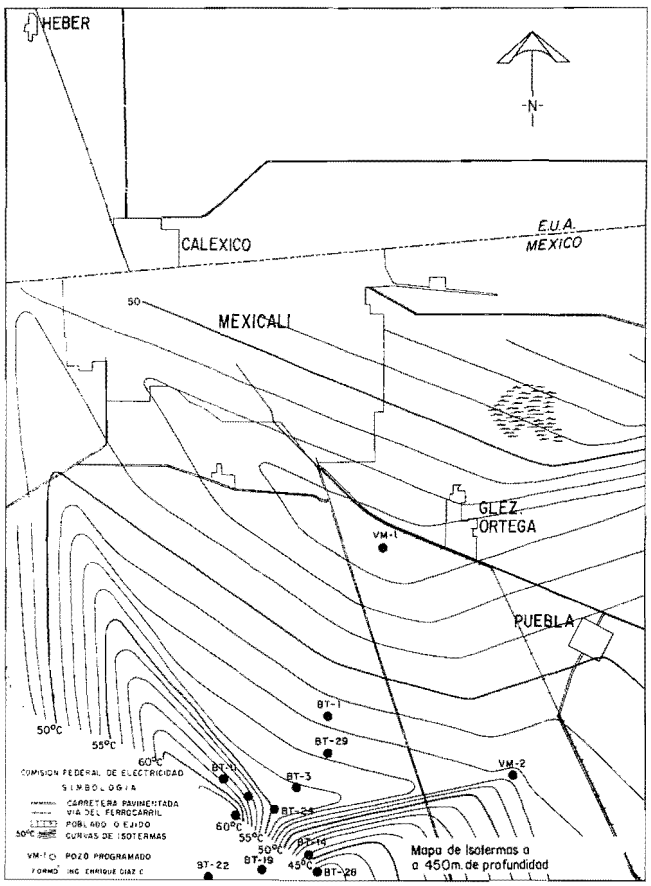
Figure 12. Gravity profile of a basement model of the Tulecheck area. See Figure 13 for the location of this profile.



XBL 823-8785

Figura 13. Mapa de las anomalías de Bouguer en la región Tulecheck-Aeropuerto.

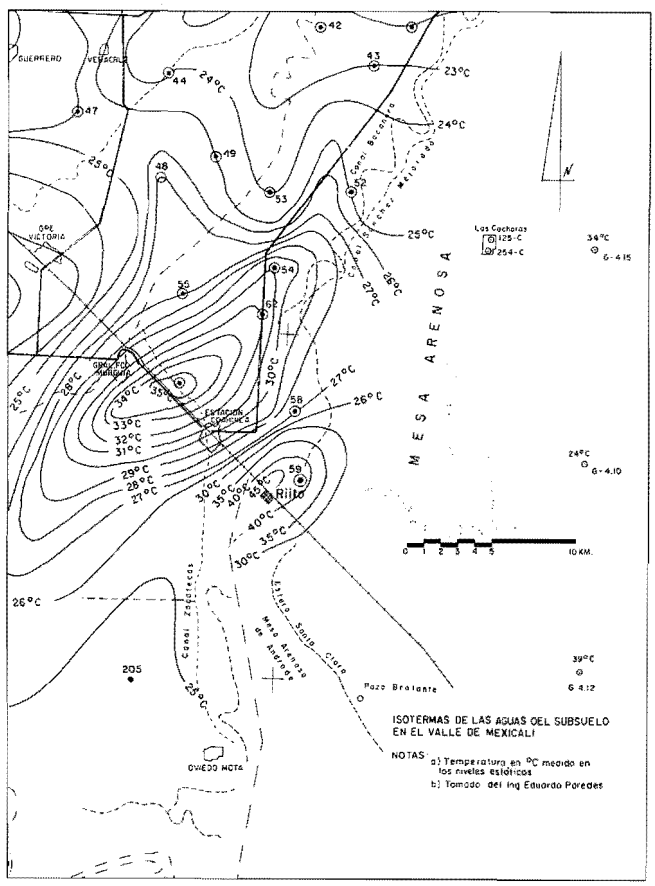
Figure 13. Bouguer anomaly map of the Cerro Prieto, Tulecheck, and Aeropuerto areas.



XBL 824-8786

Figura 14. Mapa de isotermas a 450 m de profundidad en la región de Tulecheck.

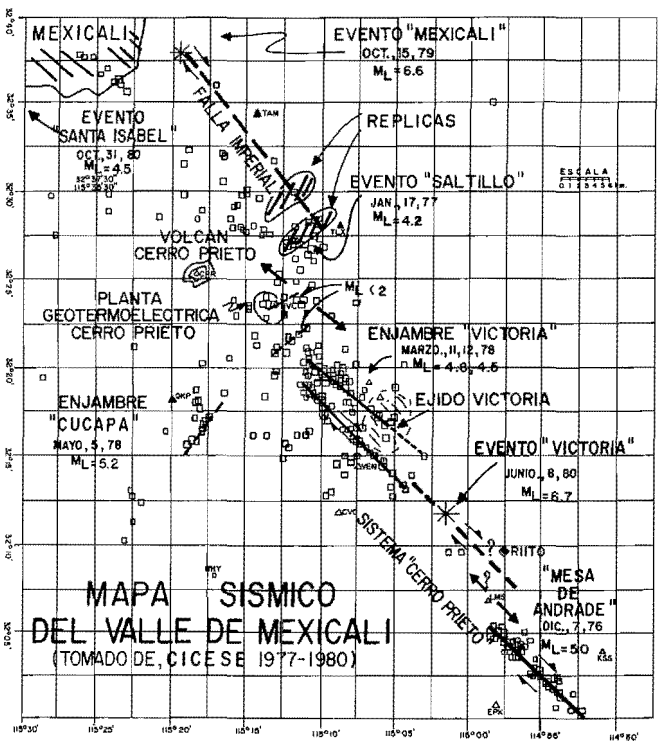
Figure 14. Isotherm at 450-m depth.



XBL 824-8787

Figura 15. Mapa de las isotermas de las aguas del subsuelo en la región de Riíto.

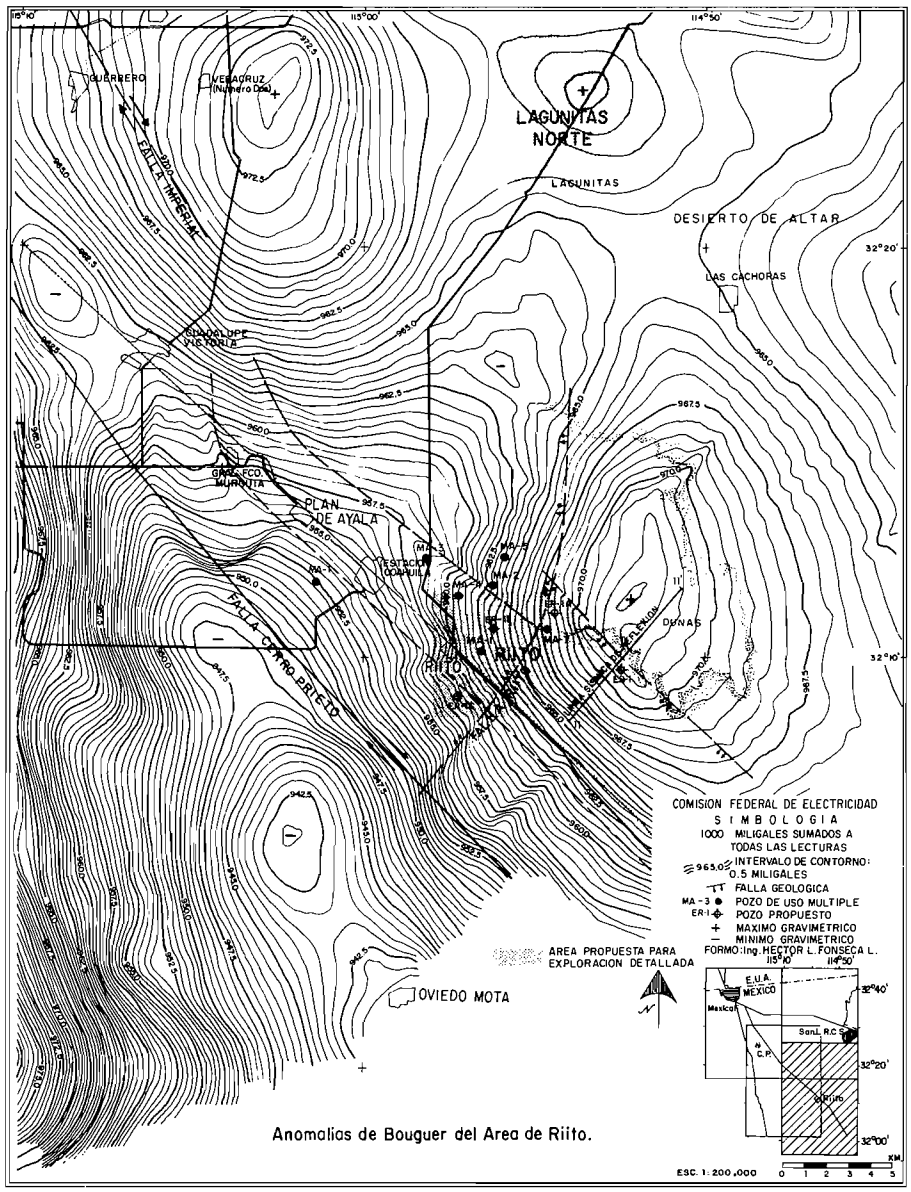
Figure 15. Groundwater isotherm map in the Riíto area, in °C.



XBL 824-8788

Figura 16. Mapa sísmico del Valle de Mexicali (tomado de CICESE, 1977-1980).

Figure 16. Seismic map of the Mexicali Valley (taken from CICESE 1977-1980).



Anomalías de Bouguer del Area de Riito.

XBL 824-8789

Figura 17. Mapa de las anomalías de Bouguer en el área de Ríito.

Figure 17. Bouguer anomaly map of the Riíto area.

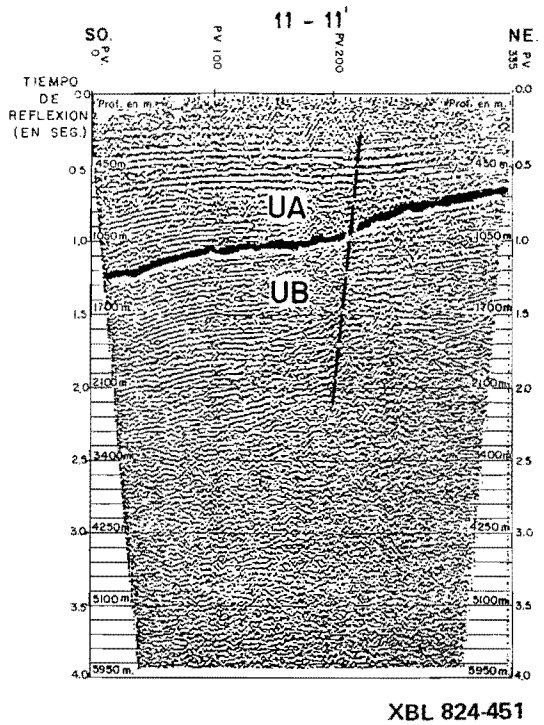


Figura 18. Sección sísmica de reflexión mostrando el buzamiento de las capas hacia el sudeste en el área de Riíto. Ver la Figura 17 para localización.

Figure 18. Seismic reflection section of the Riíto area showing strata dipping towards the southwest. See Figure 17 for the location of this profile.

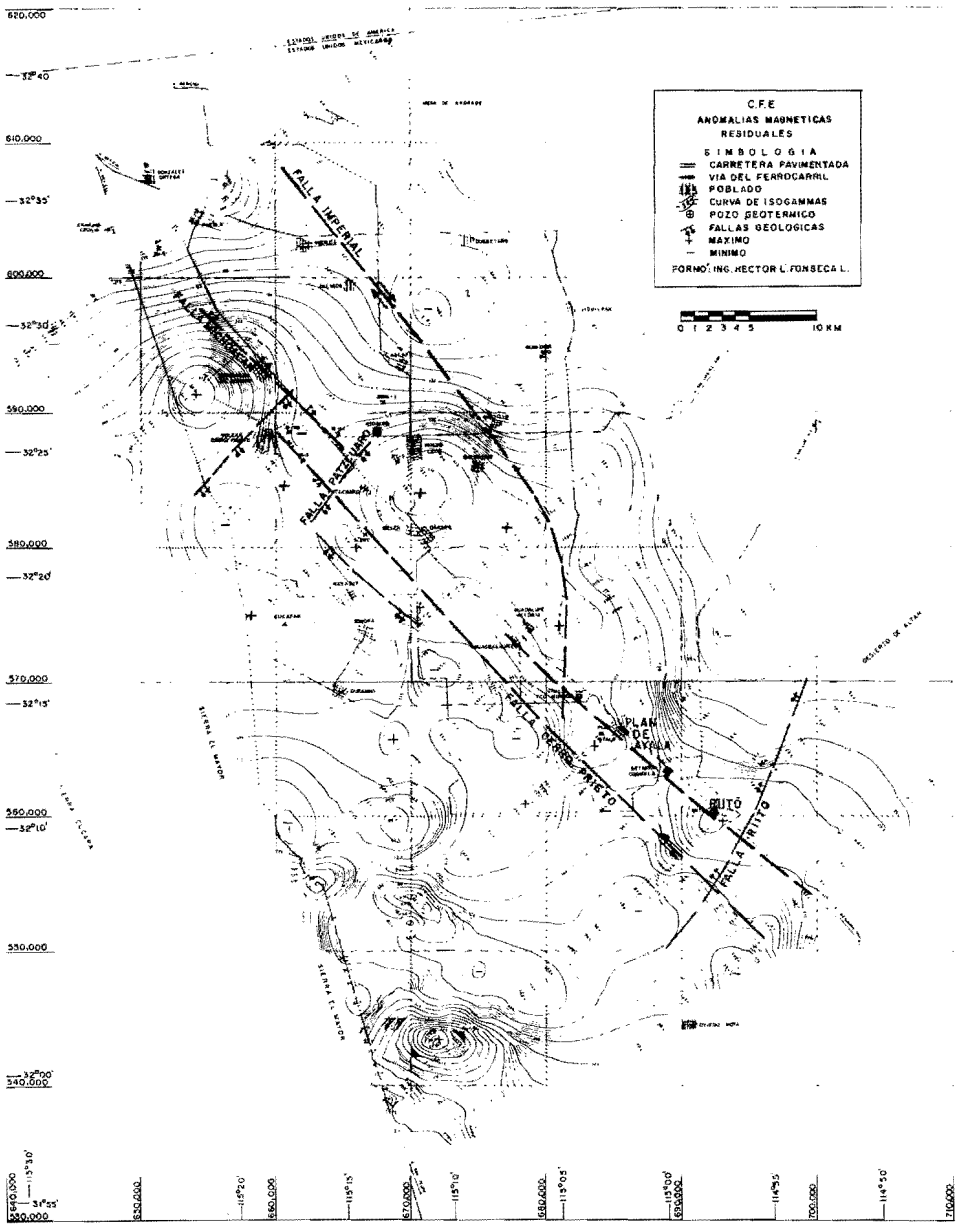
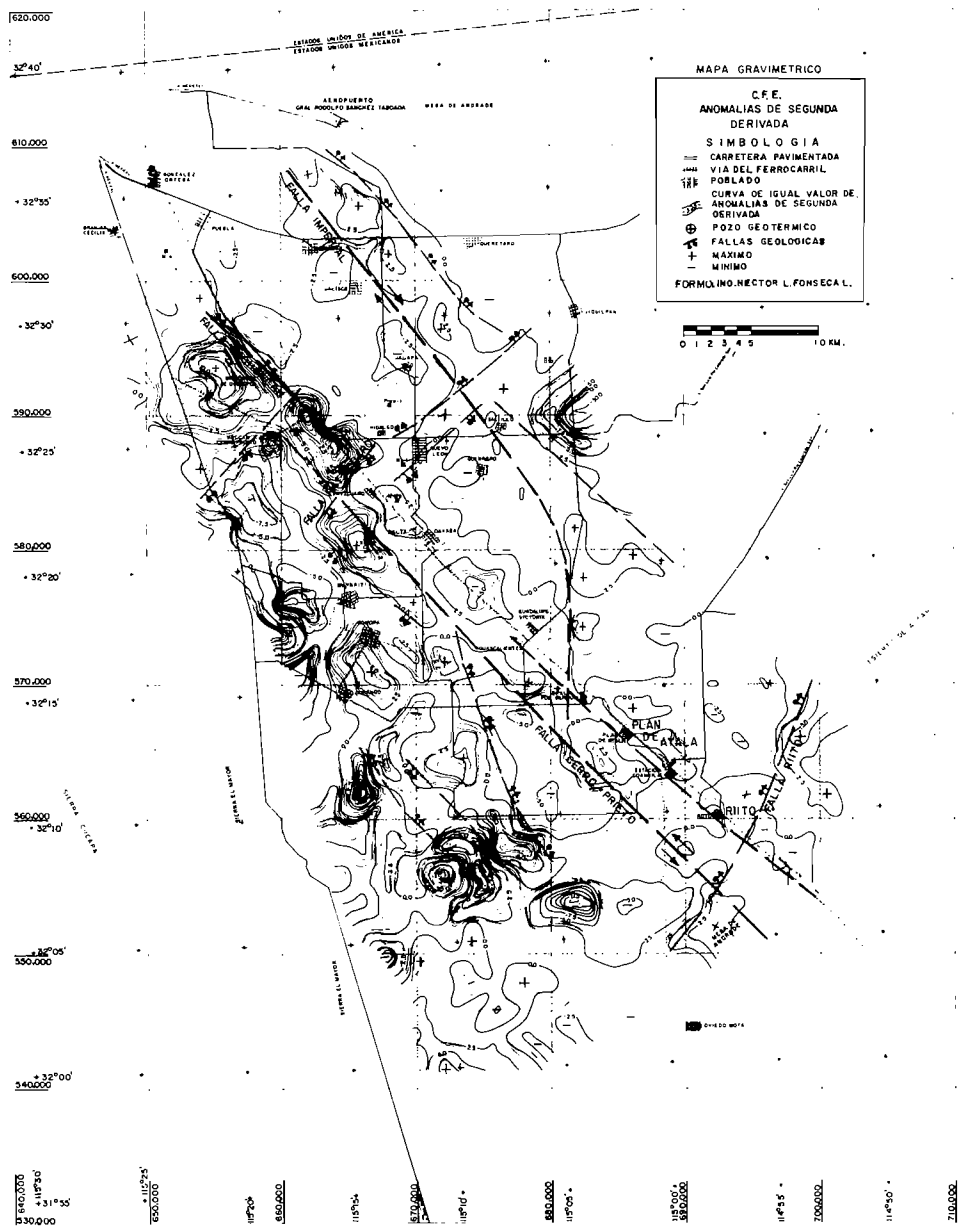


Figura 19. Mapa de las anomalías magnéticas residuales del Valle de Mexicali.

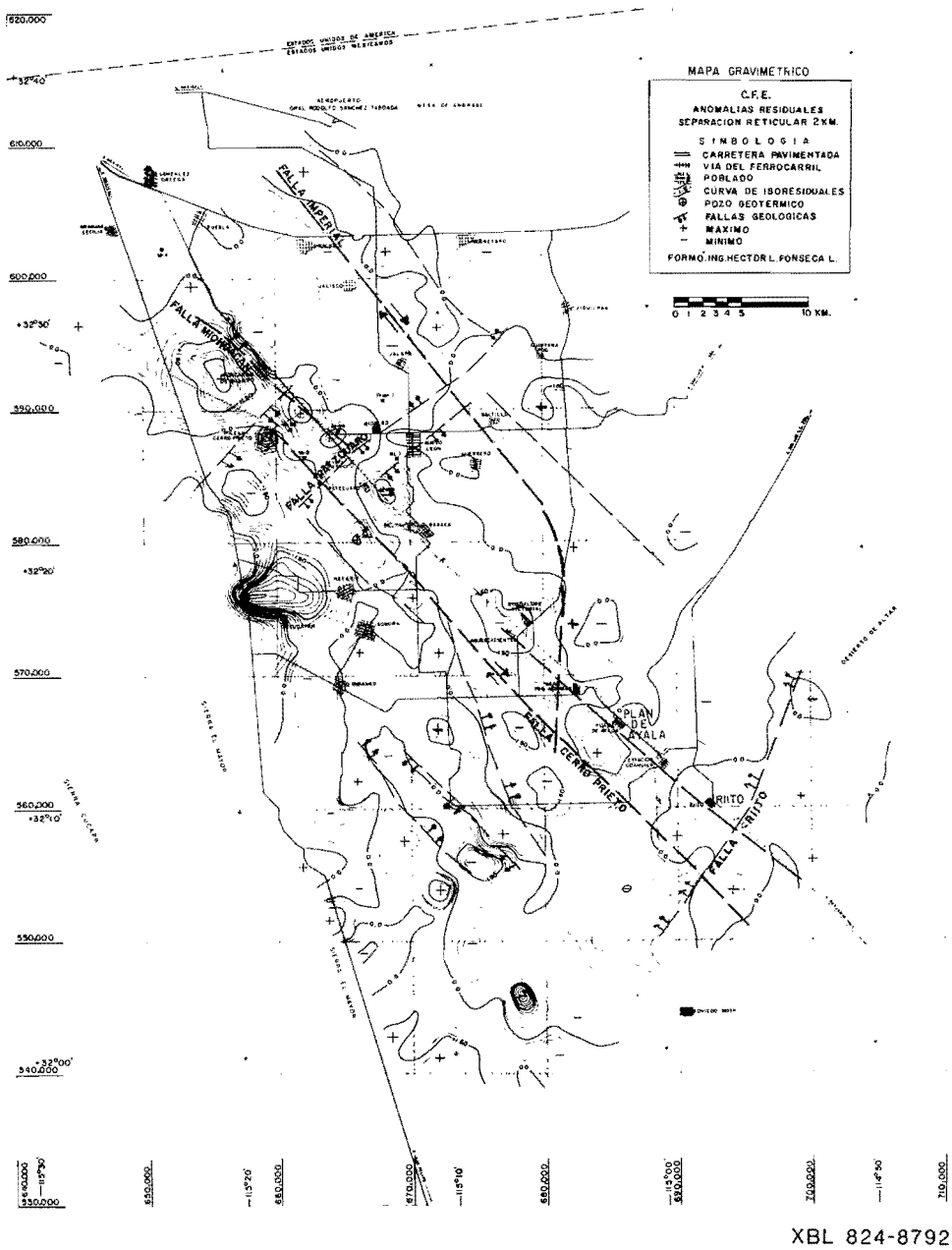
Figure 19. Magnetic residual map of the Mexicali Valley.



XBL 824-8791

Figura 20. Mapa de las anomalías gravimétricas de segunda derivada del Valle de Mexicali.

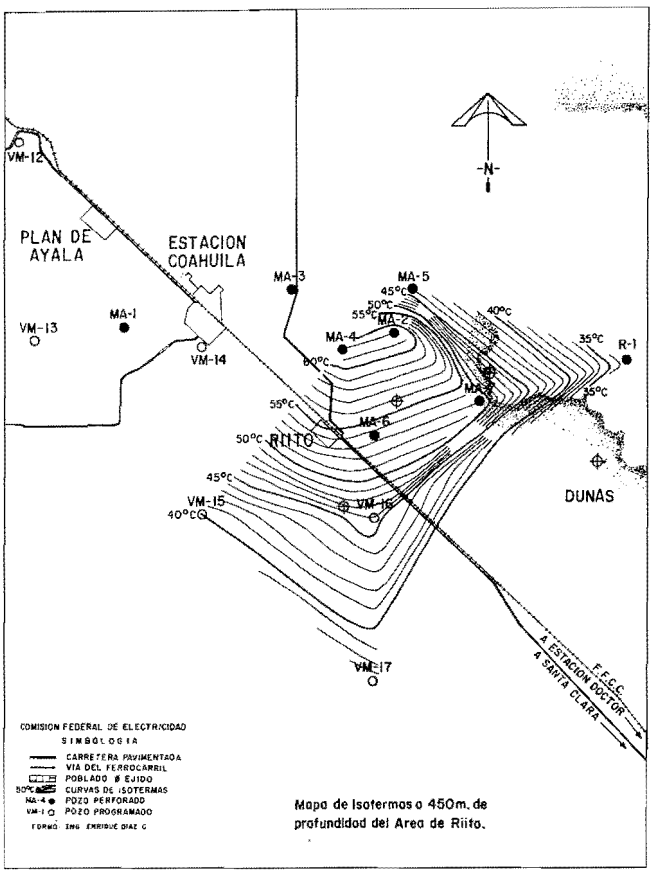
Figure 20. Second derivative gravity map of the Mexicali Valley.



XBL 824-8792

Figura 21. Mapa de las anomalías gravimétricas residuales.

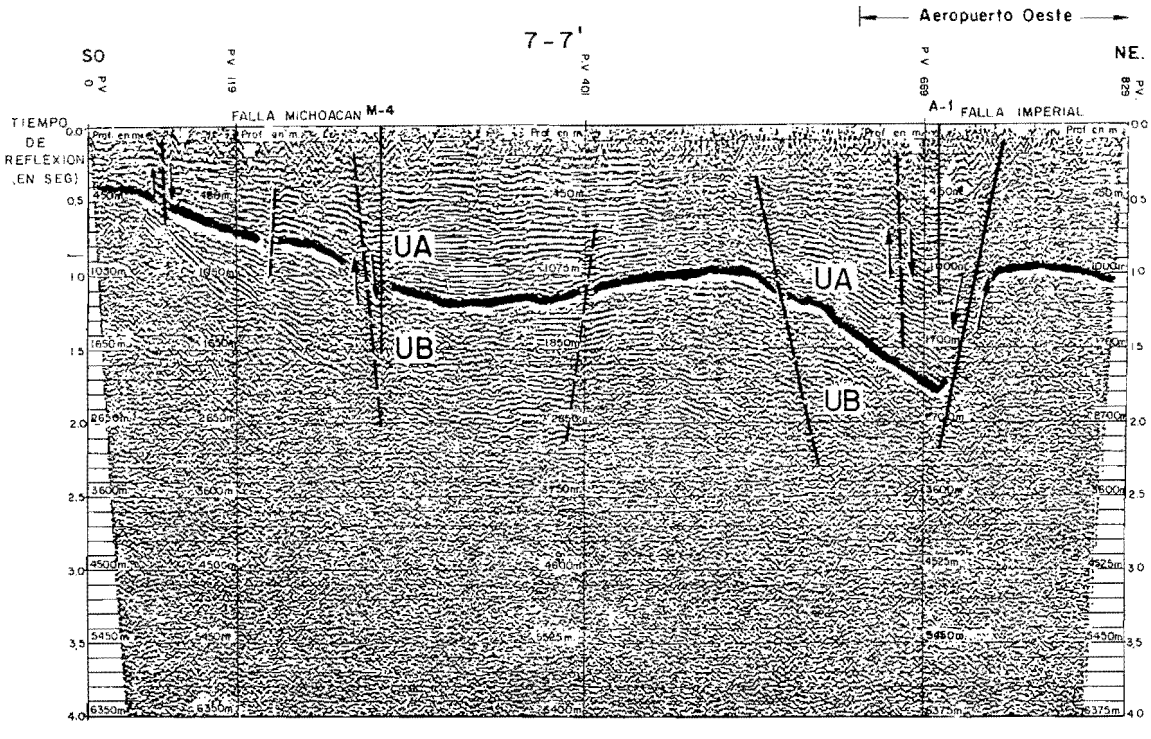
Figure 21. Residual gravity map of the Mexicali Valley.



XBL 824-8793

Figura 22. Mapa de las isotermas a 450 m de profundidad del área de Riíto.

Figure 22. Isotherm map of the Riíto area at 450 m depth.



XBL 824-455

Figura 23. Línea sísmica de reflexión mostrando el ambiente estratigráfico del área de Aeropuerto Oeste. Ver la Figura 13 para localización.

Figure 23. Seismic reflection profile showing the stratigraphy in the Aeropuerto West area. See Figure 13 for the location of this profile.

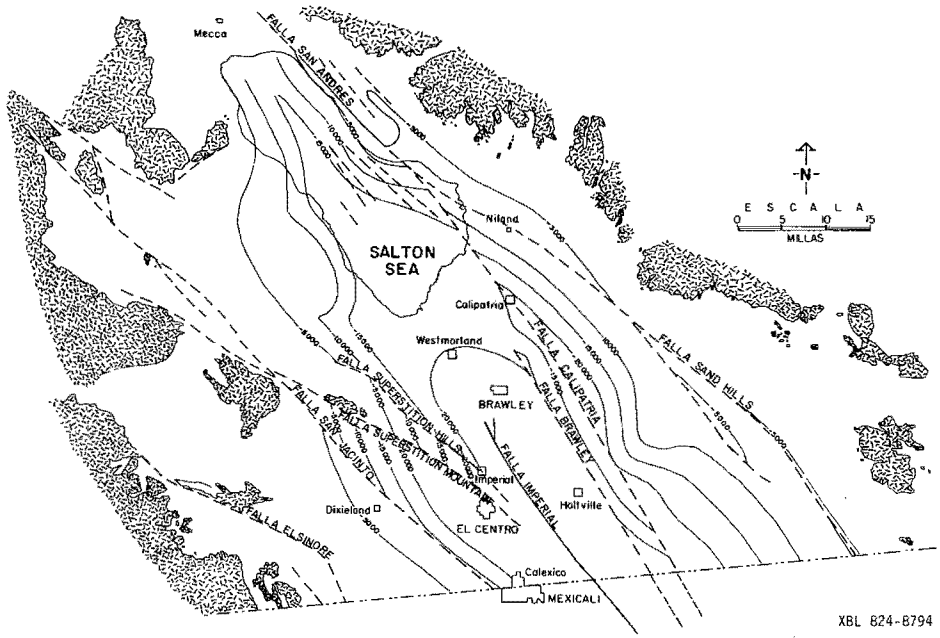
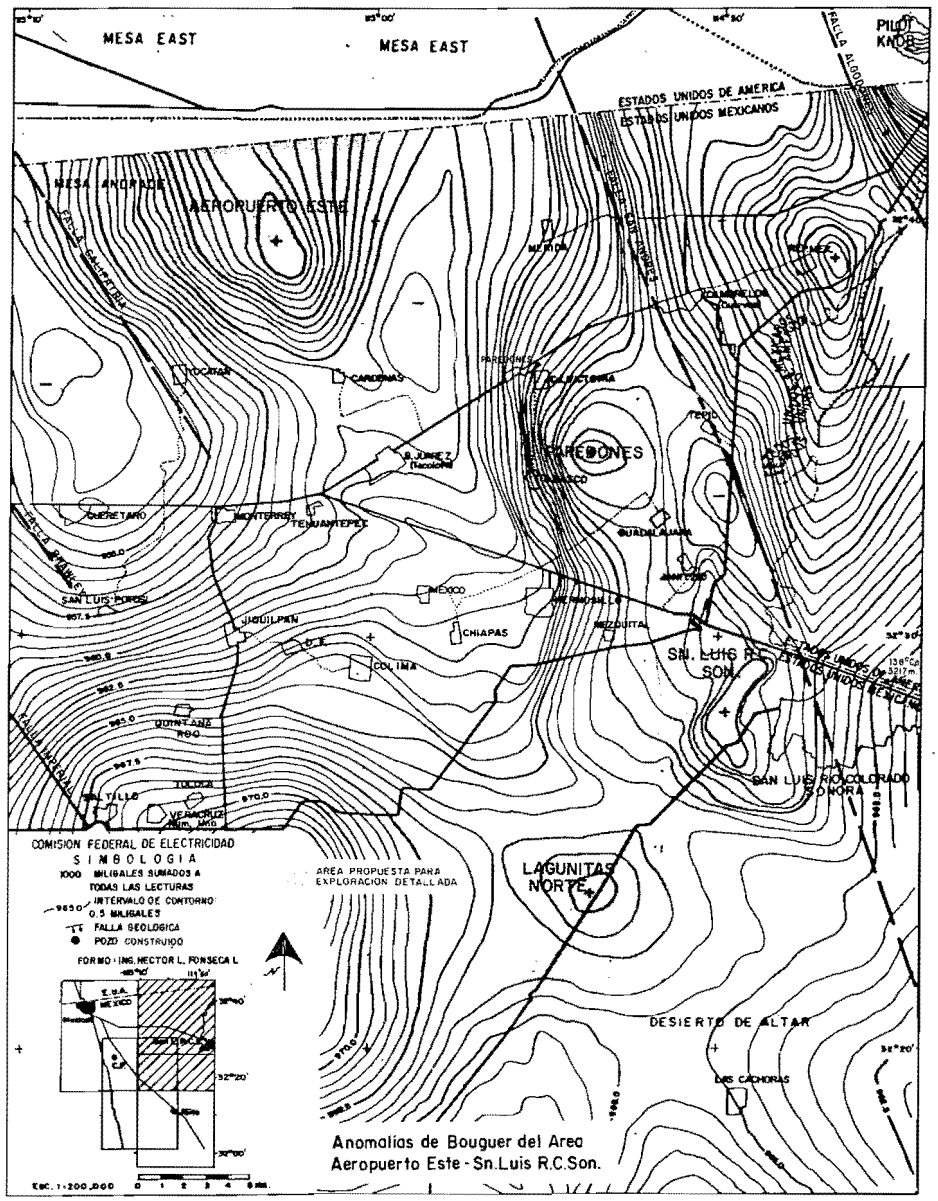


Figura 24. Profundidad de basamento del Valle Imperial, California (tomado de Hail et al., 1961).

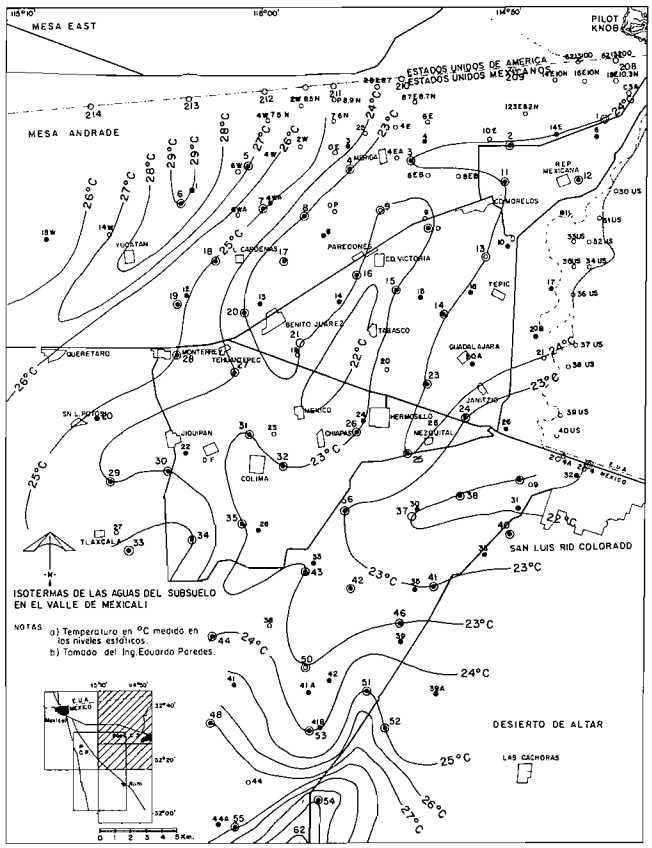
Figure 24. Basement depth in the Imperial Valley, California (taken from Hail et al., 1961).



XBL 824-8795

Figura 25. Mapa de las anomalías de Bouguer del área Aeropuerto-Este - San Luís Río Colorado, Sonora.

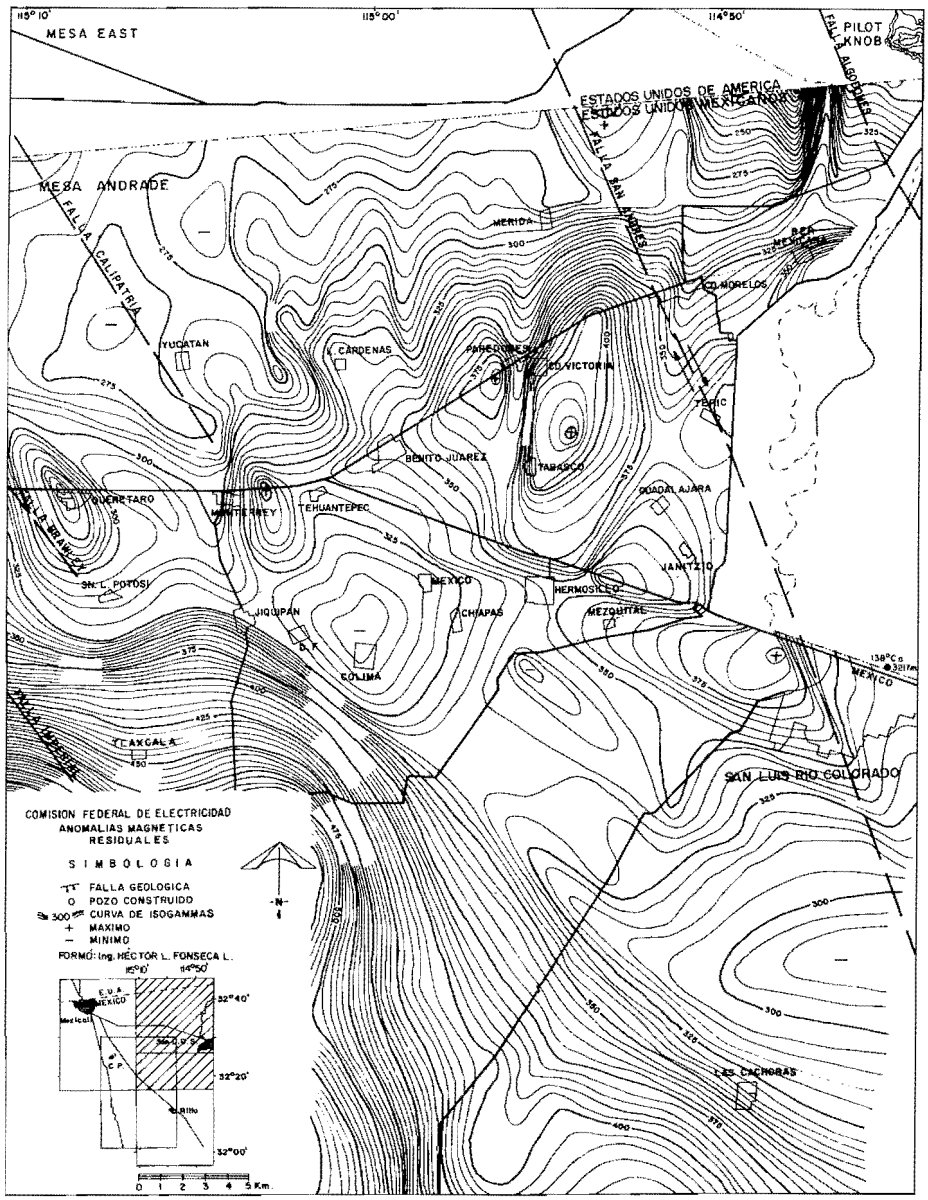
Figure 25. Bouguer anomaly map of the Aeropuerto East area--San Luís Río Colorado, Sonora.



XBL 824-8796

Figura 26. Mapa de las isotermas de las aguas del subsuelo en el Valle de Mexicali cerca de San Luís Río Colorado.

Figure 26. Groundwater isotherm map of the Mexicali Valley, in ^{o}C.



XBL 824-8797

Figura 27. Mapa de las anomalías magnéticas residuales cerca de San Luís Río Colorado.

Figure 27. Residual magnetic anomalies near San Luís Río Colorado.

EXTENSION OF THE CERRO PRIETO FIELD AND ZONES IN THE MEXICALI VALLEY WITH GEOTHERMAL POSSIBILITIES IN THE FUTURE

ABSTRACT

This study concerns the possible extension of the Cerro Prieto field and identification of other zones in the Mexicali Valley with geothermal development potential by assessing the structural geologic conditions in relation to the regional tectonic framework and the integration of geologic and geophysical surveys carried out at Cerro Prieto. This study is based on data obtained from the wells drilled to date and the available geological and geophysical information. With this information, a geologic model of the field is developed as a general description of the geometry of what might be the geothermal reservoir of the Cerro Prieto field.

In areas with geothermal potential within the Mexicali Valley, the location of irrigation wells with anomalous temperatures was taken as a point of departure for subsequent studies. Based on this initial information, gravity and magnetic surveys were made, followed by seismic reflection and refraction surveys and the drilling of 1200-m-deep multiple-use wells.

Based on the results of the final integration of these studies with the geology of the region, it is suggested that the following areas should be explored further: east of Cerro Prieto, Tulecheck, Riíto, Aeropuerto-Algodones, and San Luís Río Colorado, Sonora.

INTRODUCTION

After 15 years of detailed investigations, technical studies, uninterrupted effort, and the experience obtained from operating the 180,000 kW Cerro Prieto geothermal power plant, we have been able to demonstrate the benefits of using geothermal energy for generating electricity. An examination of these results has motivated the Comisión Federal de Electricidad to begin a power plant construction program at Cerro Prieto which, by 1984, will have an installed capacity of 620,000 kW.

At the same time, diverse exploration activities have been taking place in the Mexicali Valley to evaluate the potential of some areas with thermal anomalies. If these prove to be commercially exploitable and their output added to the already proven reserves, the estimated generating capacity for the Mexicali Valley will be on the order of 1000 MW.

With the desire to contribute to the geothermal development of the region, the present study describes some of the structural and geologic conditions favoring the existence of geothermal areas and the relation of certain geophysical anomalies with zones that could have geothermal development possibilities, including the possible extension of the Cerro Prieto field.

Some of the areas considered to be geothermal prospects have been identified on the basis of their geographic location and from information derived from Imperial Valley geothermal fields, with which they share the common characteristic of being located on gravity highs, even though only the Salton Sea field displayed surface thermal anomalies (Figure 1). Also, a rigorous study of the maxima observed in the Mexicali Valley resulted in the conclusion that only some of the anomalies should be explored further because others merely reflect the basement structure.

GENERAL GEOLOGIC BACKGROUND

The Mexicali Valley, site of the Cerro Prieto field, is located in the Gulf of California physiographic province. Topographically, it is a flat region in which the only rise is the Cerro Prieto volcano with an elevation of 225 m above sea level.

The valley is part of the Colorado River delta, whose Tertiary and Quaternary sediments are composed primarily of clastic rocks of deltaic or piedmont origin. The deltaic sediments can be subdivided into two lithologic units: unconsolidated and consolidated sediments. The geothermal aquifers are located in the latter. These consolidated rocks (shales and sandstones) lie unconformably over an Upper Cretaceous granitic and metasedimentary basement (Figure 2).

Structurally, the valley is characterized by a series of grabens and horsts resulting from crustal spreading and associated with the movement of the NW-SE trending strike-slip Cerro Prieto, Imperial, and San Andreas faults (Figure 3).

These faults, and generally all the faults of the region, are part of the San Andreas system, which penetrates the Gulf as a group of en-echelon faults (Figure 4). This system is in turn part of a global network of volcanic chains, submarine rifts, and deep ocean trenches found at the boundary between the large drifting Pacific and American Plates (Figure 5).

This is a zone that is characterized tectonically by basins associated with transform faults. It is seismically very active with shallow focus earthquakes. Here, the Earth's crust has undergone thinning, and as a consequence, the igneous mantle material is closer to the surface, giving rise to some areas with high heat flow.

Because the Gulf of California is located within a plate dispersion zone, the movement of these plates has created stresses in the crust and mantle that have caused the displacement of large blocks (Figure 6). This has caused the formation of troughs, such as the Wagner trough, which is connected to the Mexicali Valley through the Cerro Prieto fault.

In relation to this study, it is important to note that the most important geologic feature of the region is the opening of the crust and continental drift which resulted in the formation of the Gulf of California. Starting with the regional picture and integrating several theories and data, we have developed a geologic history whose main features are briefly described as follows. Originally, in the Pliocene epoch, the Baja California peninsula was part of a granitic continental mass. However, due to complex crustal and mantle stresses and to the movement of the American and Pacific plates, it started to separate (Anderson, 1971). As a consequence, the spreading process caused fracturing, displacement of large blocks, sea floor spreading, and magma penetration that are still taking place today. Much has been written about these processes.

Locally, in the Mexicali and Imperial Valleys and the northwestern part of the Gulf of California near the San Andreas fault system, a series of tectonic phenomena has taken place, including high seismicity, basement displacements in the northeastern and southwestern sides of the valleys, transform faults with vertical and horizontal displacements, magmatic intrusions, volcanoes, and a variety of high-heat flow zones which favor geothermal environments. The high-heat flow zones motivated the exploration in the Imperial and Mexicali valleys. This led to the discovery of eight geothermal areas in the Imperial Valley: Salton Sea, Heber, East Mesa, North Brawley, Glamis, Dunes, and Border, some of which are just coming into production (Figure 7).

Even though geothermal exploitation of the Mexicali Valley started in 1973 with the Cerro Prieto field, the latest exploration indicates that the field may extend to the east of its present location. In addition, four areas with geothermal possibilities were found: Tulecheck, Riíto, Aeropuerto-Algodones, and San Luís Río Colorado.

An analysis of the local geology of the field showed evidence that the NW-SE trending Cerro Prieto (or San Jacinto) fault extends from the Gulf of California to the Cerro Prieto volcano. Contrary to what had been thought before, this fault does not act as a conduit for fluids but, rather, is a boundary for the geothermal field.

To the north of the main production zone, another fault named Morelia, striking NE-SW (Figure 8), was found on the basis of geophysics and well-log correlations. This fault is also thought to act as a boundary for the field. It is part of a fault system named Volcano, generally striking NE-SW, which has another three fault zones named Delta, Pátzcuaro, and Hidalgo. This fault system, oblique to the regional NW-SE tectonic pattern, is clear evidence of the en-echelon displacement characteristic of the transform faults of the Mexicali Valley. This has led to the belief that the faults of the Volcano system, located on what has been suggested to be a spreading center, can be considered to be the main paths for heat and geothermal fluid transport.

POSSIBLE EXTENSION OF THE CERRO PRIETO FIELD

There are many different studies about the nature of the Cerro Prieto geothermal field. Many notable contributions have been made and much discussion generated about the boundaries of the field. The southwestern boundary of the field is made up of the Cerro Prieto fault; the northwestern boundary by a band passing trough wells M-3, M-172, and H-2; the southeastern boundary by a zone passing through wells S-262, M-92 and M-189; the eastern boundary of the field has not yet been determined (Figure 8). Based on the above and because there are high temperatures to the east, we believe that exploratory drilling should focus on this region. The high temperatures are one of the main features making the zone east of Cerro Prieto and east of Ejido Nuevo León attractive.

In this section, we will summarize the results of an analysis of a number of geological and geophysical studies made by CFE at the Cerro Prieto geothermal field and neighboring areas to provide technical justification for exploring to the east of the present field. Some of the geologic features we expect to find during drilling are summarized as follows:

1. It has been proposed that the Cerro Prieto field is located in an active spreading center created by the right lateral movement of the Cerro Prieto and Imperial transform faults (Elders, 1972). As result of the relative motion of these faults, another system of faults, apparently perpendicular to the first, was formed. This is the Volcano system, with faults generally trending NE-SW (Calderón, 1962; Puente, 1978). These are tension, and therefore open faults, making feasible the ascent of the hot material which heats the water stored in the permeable sediments. This theory has not been verified. However, the zone of wells classified as good producers is located in this area. Exploration is pending in a band E-NE, E, and E-SE of this region.

   Although faulting in the vicinity of spreading centers is complex and difficult to determine, based on the results of different geologic and geophysical studies, four faults of the Volcano system have been inferred in the Cerro Prieto area: Morelia, Hidalgo, Pátzcuaro, and Delta. It has been suggested that they are related to the origin of the field. The orientation of the highest temperature isotherms

shows some correlation with the ENE orientation pattern of these faults (Figure 8).

2. A possible argument against the existence of the Volcano system is that these faults were not clearly detected by recent seismic reflection and refraction surveys (GYMSA, 1980). However, these faults could have only a slight effect on the reflection patterns (Figure 9), or change strike towards the east, as in the case of the Delta fault in the vicinity of well NL-1 (to the south). The isotherms could also change their orientation in the same direction. Nonetheless, if we accept the existence of a spreading center, the correlation between gravity and seismic surveys and data from deep wells enables us to assume that, if we are located within such a spreading center, a local effect of hydrothermal metamorphism could be an increase in the density of the sediments. This increase would be due to the presence of silica and carbonates which are deposited in the intergranular spaces by circulating geothermal brines. The density increase causes the dome-shaped gravity high that can be observed between the Cerro Prieto field and the Ejido Nuevo León. This high extends to the east (Figure 10) and could be related to a possible extension of the field.

3. The information gathered by the recent refraction and reflection seismic surveys to the east of the Cerro Prieto field (GYMSA, 1980) shows that the top of the consolidated sediments can be expected to be at ±2500 m depth in the area proposed as a possible extension of the field. In the structural environment towards the south of this region, faulting appears to be more intense. The contact between the consolidated and unconsolidated sediments can also be expected to be deeper in that direction.

The desirability of further exploratory work in this eastern sector of the field is evident. The technical arguments supporting such a proposal have been put forward to permit a decision to be made regarding future well drilling in light of some of the problems with the local ejidos or towns. It is important to note, however, that if the extension of the field toward the east cannot be proven, the new exploration wells to be drilled should be placed near well NL-1 (to the east) because that would increase the probability of success of any wells drilled near the Imperial fault. Towards this sector, there is no evidence of anomalous temperatures. This might imply that this zone is hydrothermally inactive or that the unconsolidated shallow layers are so permeable that either infiltration or groundwater flow from the Colorado River do not permit a thermal anomaly to be observed near the surface.

TULECHECK AREA

Geothermal interest in the Tulecheck area, approximately 17 km NW of the Cerro Prieto volcano (Figure 11), arose from the presence of hydrothermal manifestations such as hot springs, fumaroles, and boiling mudpots.

This geothermal anomaly was given the name "Tulecheck" because it includes the hydrothermal manifestations in the irrigation canals of Huisteria and Tulecheck. High temperatures, 165°C, have been found in the 1200-m-deep multiple-use wells drilled in the area.

Within the regional geologic framework, this geothermal zone is located 6 km NE of the Cucapa Range granitic complex. This is only 150 m from the contact between the more recent clayey-sandy sediments of the Mexicali Valley and the piedmont sediments which underlie them and which outcrop along a broad belt parallel to the foothills of the Cucapa Range. The piedmont sediments, which have a predomiance of angular clastic material and fragments of micaceous granite, present cross-bedded layers which generally dip between 0° and 12° to the northeast (Razo, 1967). The first wells drilled in the area indicate that the contact between the piedmont sediments and the overlying alluvial deposits has approximately the same dip as the piedmont sediments.

Tectonically, the area is located in the zone of influence of the San Jacinto fault. Although the principal trace of this fault is located approximately 6 km to the northeast, its constant activity must have contributed to the fracturing of the granitic basement, resulting in the formation of a horst located at a depth of about 1500 m (Figure 12).

From a commercial development standpoint, the zone of geothermal interest does not coincide with the area of the thermal manifestations because it is only a zone of surface thermal leakage. Geologic studies of the area indicate that thermal leakage occurs along an inclined region through the piedmont deposits. The greater permeability of these deposits suggests that the clayey-sandy sediments that make up the alluvial sediments act as a caprock to these leakages. The main problem is the nature of the heat source. Theoretically, the heat flow should be coming from a source near the Cerro Prieto (San Jacinto) fault. However, results from well M-4, drilled to 2004 m depth, do not show evidence for this (60°C at 2000 m).

Continuing with the structural analysis, gravity studies indicate that the basement in this area is an extension at depth of the predominantly granitic rocks which outcrop at the Cucapa and Mayor Ranges (Figure 13). This has been deduced from the alignment of the Bouguer anomaly contours. These contours suggest the presence of a buried mountain range whose morphology has its largest expression 9 km northwest of the Cerro Prieto volcano, in the neighborhood of the Cerro Prieto field and the Tulecheck area. As an argument to support this contention, we found that wells S-262, M-3, and M-96 reached basement at depths varying from 1470 to 2730 m.

The surface manifestations at Tulecheck are reminiscent of a similar situation found at Laguna Volcano in the Cerro Prieto area. The Laguna Volcano area is a zone of surface thermal leakage traversed by the Cerro Prieto fault, which bounds the eastern granite block at depth, and the geothermal reservoir zone located over the downthrown basement block, to the east of the fault. At Tulecheck, the leakage zone is smaller. Even though there the Cerro Prieto Fault does not bound

the basement, this could well be done by another fault which, according to the gravity contours, strikes east-west. Feasibility studies to date in the zone that has been suggested as having geothermal development potential indicate that it may not be a good field. This could be due to the fact that exploration has centered on the intersection of the east-west fault with the contact between the permeable and impermeable sediments, where the energy has been leaking to the surface. As a source of steam, we propose that the basement faults, which may affect the overlying stratigraphy, make it possible for fluids of magmatic origin to ascend. When these mix with fluids of shallower aquifers, steam is generated. Therefore, we suggest that north of Tulecheck, the heat source is located in the periphery of the basement structure, in the downthrown block of the east-west striking fault.

To date, it has not been possible to decide which zone in the Tulecheck area has the greatest potential. One drawback is that no layer capable of acting as a caprock has been discovered in this area. On the other hand, the proximity to the Cucapa Range leads us to think that the thickness of piedmont sediments may be considerable. Nonetheless, it is hydrothermally possible that this caprock may exist at depth.

The gravity highs located at Ejido Xochimilco and at Virreyes, north of Tulecheck, could be due to the same type of source as at the Heber geothermal field: folded, densified, and hydrothermally altered sediments. One of these highs, located 8 km south of Heber, continues from the north and corresponds to a temperature maximum observed in the 450 m depth isotherm map (Figure 14). This could imply that there may be an interconnection between the Heber field and Tulecheck. This can be deduced because the area has a sediment thickness of about 4500 m, and, considering the shape of the gravity anomalies, it is unlikely that they reflect basement morphology.

For these reasons, it is proposed that detailed exploration be made in the area north of Tulecheck (Figure 13). These activities should include seismic reflection and refraction surveys and drilling of more ±1200 m-deep multiple-use wells. This will enable formulation of better teria for proposing the location of deep exploratory wells in this sector.

RIÍTO AREA

Exploration interest in the Riíto area stemmed from the presence of higher than normal temperatures in irrigation wells (Figure 15). Based on this initial information, various geological, geophysical, and geochemical studies were made. These ranged from surface geology studies, spontaneous potential surveys, and geochemical sampling to the drilling of shallow (±600 m) multiple-use wells and seismic reflection and refraction surveys.

With regard to surface geology, the Riíto region is part of the Colorado River delta, whose sediments consist predominantly of clastic rocks of deltaic origin. Tectonically, this region is also in the zone of influence of the San Andreas fault system. Consequently this is a zone of intense seismic activity (Figure 16).

One of the features of greatest interest in this area is the surface expression of the Cerro Prieto fault at Mesa de Andrade. From this, it can be deduced that the constant activity along this fault and the system of which it is part has contributed to the development of structures parallel to the fault's orientation (SE-NW), and to the orientation of other faults, such as the Riíto fault, striking SW-NE and also visible on the surface at Mesa de Andrade. This might imply that the necessary structural conditions for the formation of a geothermal area exist and that the movement of geothermal fluids is possible. The gravity studies made over this area indicate that there is a large gravity high east of Riíto (Figure 17). This could be interpreted as an indication of a densified zone.

Ten kilometers southwest of Riíto, a gravity low at the Ejido Oviedo Mota reflects the extension to the northwest of a large structural depression originating in the Gulf of California. This low seems to point to an area with a very thick sedimentary column (greater than 7000 m). From its location, it has been interpreted to be a large trough, perhaps the extension of the Wagner trough, where the sediments have been only slightly hydrothermally densified, with little effect on the gravity.

Based on the above, it would be of greater interest to explore the region of Riíto towards the gravity high rather than toward the depression. However, it should be pointed out that this high, because of its dimensions, could be of isostatic origin rather than reflecting coherently a densification of sediments. Consequently, the next step was to define the place with the most favorable structural conditions, at either the peaks or the flanks of this high. This has been inferred in part from the gravity and seismic reflection and from refraction studies which detected a fault with downthrow to the southwest, 10 km to the east of Riíto (Figure 17). This fault is parallel to the Cerro Prieto fault and could favor some hydrothermal activity. We suggest drilling one or more exploratory wells to the SW of the seismic location of this fault.

The seismic reflection sections indicate stratification dipping generally to the southwest (Figure 18). In the proposed exploration area southwest of the fault, the reflecting horizons appear to be uniform and homogeneous to a depth of 900 m. Below them is a zone of poor reflectors. This is interpreted to mean that, at about 900 m, there is a change in the degree of consolidation of the sediments that could indicate the top of a unit of consolidated sediments up to 1500 m thick. Below that depth (±2400 m), the lowest reflecting horizon is observed, possibly representing contact with a denser body. Because it is difficult to detect the basement in this area at a depth of about 2400 m, we propose that wells be drilled to a depth of 3500 m to learn more about the nature of the stratigraphy and thermal characteristics of the region.

Study of magnetic surveys in this area indicate that there is no correspondence between the magnetic and Bouguer anomalies (Figure 19). This means that they are not produced by the same source. However, there are two small magnetic highs, one at the Ejido Plan de Ayala and another at the town of Riíto, which correlate well with second derivative and residual gravity contours (Figure 20 and 21). In this instance, because of their location next to the Cerro Prieto fault, these features have been interpreted as possibly due to igneous bodies with a high content of ferromagnetic minerals, high density, and high magnetic susceptibility.

It is worth mentioning that, although it is difficult to determine the depths of the bodies causing these magnetic anomalies because of the thermal nature of the area, these could be the source of heat. Therefore, wherever these types of anomalies occur, they should be explored. In support of the above, well Elmore No. 1 at the Salton Sea geothermal field (350°C) penetrated an igneous body of intermediate composition and high magnetite content at 2123 m (Griscom and Muffler, 1971), and well Holtz No. 1 at the Heber field (215°C) found diabase at 1366 m depth (Browne, 1977). Both fields are located over magnetic highs. The source of those anomalies has been attributed to relatively young and presently cooling igneous bodies (Randall, 1968).

It is evident that the above information will have to be complemented with more detailed studies in order to reduce the uncertainty about the location of deep wells in these areas. The shallow (+600 m) multiple-use wells drilled by CFE indicated temperatures of up to 64°C at 450 m, with temperature gradients varying from 1.59°C/30 m to 3.49°C/30 m (Figure 22).

The information above supports our recommendations for drilling deep exploratory wells in the Riíto area. These should be located on the southwestern flank of the gravity high, on the peak of magnetic high, and near the trace of the Cerro Prieto fault. We do not recommend drilling over the magnetic high near Ejido Plan de Ayala because there is insufficient information about this area. However, we think the area should be explored further since there is evidence of thermal activity.

AEROPUERTO-ALGODONES AREA

This area includes two zones with geothermal potential, one west of the Taboada International Airport and the other between the airport and the town of Algodones.

Exploration interest in the area west of the airport started when higher than normal temperatures were found in irrigation wells, and because of the area's location next to the Imperial fault. This fulfills the structural requirements favoring the occurrence of some geothermal activity. On the other hand, the proximity of the Heber geothermal field in the Imperial Valley and the possible extension of the Heber thermal anomaly towards the Mexicali Valley seem to indicate that there could be some relation with the gravity high that looks like a structural rise west of the Imperial fault near the airport.

Existing geologic and geophysical information supports our recommendation for drilling exploratory wells in the area. Previous gravimetry studies have been interpreted as indicating the presence of a horst (Fonseca and Razo, 1978; Reyes Z., 1979). On the other hand, higher than normal temperatures recorded in the region suggest that this gravity high, oriented NW-SE and bounded to the southwest by the Imperial fault, could be caused by densification of the sediments rather than by a rise in the basement. This could mean that the high was produced by hot formation waters that, as part of a convective process, deposited silica and carbonates in the pores of the sediments as the fluids migrated and cooled, thus increasing the density of the sediments and, consequently, the gravitational field.

Although not having the same structural conditions, the gravity highs at the geothermal fields of Heber, East Mesa, Brawley, Salton Sea and Dunes, etc. have been interpreted in similar fashion. On this basis, the gravity high should be explored further.

Preliminary information furnished by the recent seismic reflection and refraction studies (GYMSA, 1980) indicate that the structure is quite irregular, probably due to the constant activity of the Imperial fault (Figure 23). However, using gravimetry, we have been able to define a NE-SW alignment of the Bouguer anomalies which might imply the presence of another fault. An interesting detail about this fault is that the epicenter of the October 1979, magnitude 6.6 earthquake was located on the intersection of this fault and the Imperial fault (CICESE, 1979) (Figure 16).

One apparent drawback in locating a well in this area is that, according to available Imperial Valley information, this maximum continues into the U. S. side of the border; and, although there is evidence of abnormal temperature gradients, no evidence of commercially exploitable temperatures has been found. This zone could be considered to be an ancient site of intense hydrothermal metamorphism, presently less active. The magnetic data does not disclose the presence of any strong anomaly which could be interpreted as a basement or an igneous instrusion. This argues favorably for the presence of a metamorphic body as the source of the gravity anomaly. According to other geophysical studies made previously in the Imperial Valley, the sedimentary column shows thicknesses of up to 6000 m (Figure 24).

For these reasons, even though there is no thermal anomaly of commercial interest on the U. S. side, the structural conditions of the area seem to warrant drilling exploration wells. This recommendation is based on the following features: the increase in temperature gradients towards the southeast on the Mexican side of the border; the presence of a possible metamorphic body; temperatures measured in wells A-1 (80°C) and A-2 (85°C) drilled to a depth of 1100 m (Figure 13); the stratigraphy penetrated by these wells, which indicates

the beginning of a transition zone from unconsolidated to consolidated sediments; and the structural characteristics of the area.

Within the same Aeropuerto-Algodones area, a recent tectonic analysis of the gravity and magnetic data from the eastern portion of the airport revealed the presence of four faults. These are well correlated with faults detected on the U. S. side of the border, namely, the Algodones, San Andreas, Calipatria, and Brawley faults.

The Algodones fault, whose surface expression is found west of Pilot Knob in the town of Algodones, appears in the Bouguer anomaly map as a fault plane with downthrown steps toward the center of the depression west of the predominantly granitic block which outcrops at Pilot Knob (Figure 25). This basement surface has a downthrow of about 800 m to the southwest. Although this fault has been related to the Glamis geothermal field in the Imperial Valley, there is no interest in further exploring this part of the fault because of short extent in the Mexican portion near the town of Algodones and the lack of thermal activity in the area.

The San Andreas fault, whose surface expression appears 17 km west of Pilot Knob, is well defined by the gravity data. Data also indicate a greater than 2000 m downthrow of the basement towards the southwest. The depth to basement is estimated to be more than 6000 m; its composition is unknown.

The Calipatria fault has a noticeable correspondence with the alignment of the Bouguer anomaly contours and forms part of an apparent structural high in the western flank of a gravity high. This high is the southeastern extension of the high observed at the Border geothermal area in the Imperial Valley, which is an extension of the East Mesa thermal anomaly.

Based on these reasons and because of the existence of thermal activity in this zone (Figure 26), this gravity anomaly, which has been named Aeropuerto East, should be explored. It has been assumed to have the same origin as the gravity highs observed in the above-mentioned fields. That is, the hydrothermal activity has increased the density of the sediments, thereby altering the gravitational field. The Calipatria fault could be the conduit which facilitated this process.

SAN LUIS RIO COLORADO AREA

The area of San Luís Río Colorado has been considered as a geothermal prospect due to the high temperatures observed in a number of irrigation wells. Based on this information, geochemical sampling was made. The NaK and Na-K-Ca geothermometers indicated temperatures of 130°C. However, a 3227-m-deep oil well drilled to the northeast, just on the international border (Figure 25), showed a temperature of only 138°C.

This temperature could be considered to reflect a normal gradient, but a series of circumstances led us to think that this well is an important indicator of geothermal activity. Its proximity to the Colorado River and the aquifers related to its underflow could have influenced the temperature measurements so that no higher values were found. It is also worth noting that this well is located on the western edge of a depression whose highest elevation is found west of San Luís Río Colorado.

In summary, from a tectonic point of view, although the zone of influence of the crustal spreading and the separation of the Baja California peninsula is very broad, the zone of the Mexicali Valley northeast of the Cerro Prieto field contains the greatest thickness of sedimentary fill between the Cerro Prieto and San Andreas faults into the area studied. Because of tensional stresses and the effect of gravity, the basement displays a step-like structure extending from its outcrops at the Cucapa and Mayor Ranges and Pilot Knob to the indicated faults.

This indicates that, in the central portion of the Mexicali Valley, both southwest of the Cerro Prieto fault and northeast of the San Andreas fault, the gravity and magnetic anomalies of this region are closely related. Their origin has been attributed to the block-relief and concentration of magnetic minerals in the above-mentioned basement. Structurally speaking, these are the first available data on the area of San Luis Río Colorado and its environs.

The zones classified here as being of interest for further exploration are related to the gravity highs detected between the San Andreas and Cerro Prieto faults, where the sedimentary column is the thickest. Considering the similar correspondence to magnetic highs (Figure 27) and their position with regard to the San Andreas fault, the observed gravity highs, one west of San Luís Río Colorado and the other in the village of Paredones, have been attributed to intrasedimentary igneous intrusives with possible metamorphism, as manifested by the temperatures in the area determined by geochemistry and in the well drilled to 3127 m depth.

There is no correspondence between the gravity high located southwest of San Luís Río Colorado in Lagunitas Norte and any magnetic high. This may indicate that the gravity high was caused by hydrothermal densification of the sediments, which may indicate the presence of a weakly magnetized metamorphic body. It is not known if there is any thermal activity.

It is important to mention that, in all of the San Luís Río Colorado region, the sandy-clayey surface layer and the groundwater flow of the Colorado River can mask the thermal activities at the surface. It is also possible that they may not even exist. For this reason, we suggest that seismic exploration be carried out and that ±1200 m deep multiple-use wells be drilled on the gravity highs to provide better criteria for the future location of deep wells in this zone.

CONCLUSIONS

In this study, the geologic basis for selecting sites with geothermal development possibilities

has been the regional analysis of structural and geological data from the Mexicali Valley, which is a zone of crustal spreading due to large stresses brought about by the separation of the Baja California peninsula from the continental plate. Thus, in drawing the geomorphological analysis and associated geologic features of the mountain ranges near the Mexicali Valley, this report has formulated a hypothesis on the origin of Laguna Volcano with the aim of providing a better understanding of the regional tectonics which support the interpretations we have made here. Based on the information gathered it was concluded that:

The Cucapa and El Mayor Ranges derive isostatically from the Juarez Range with a poorly defined orientation change over a sima cover. This caused the formation of new crustal spreading centers, such as Laguna Salada. Along the margins of these ranges, some blocks with roots that were less resistant to the tensional stresses have sheared off and dropped, under the influence of gravity, toward the spreading centers, whose axes are the present fracture traces observed by different studies.

Within the tectonic framework of the Mexicali Valley, the drop of these blocks takes the form of steps that descend towards the center of the depression. This situation is illustrated by the Bouguer anomaly and magnetic maps which faithfully represent the basement relief. The basement outcrops at the Cucapa and El Major Ranges. A series of gravity minima which surround the basement are clear evidence of a mass deficit caused by the strong lateral density contrast resulting from the abrupt basement drop and marking the area of thickest sedimentary deposition. An example of this is the eastern portion of the Cerro Prieto field.

Toward the other side of the depression, in the area southwest of the village of Algodones, another similar block displacement occurs, starting apparently from the Cargo Muchacho Mountains and Pilot Knob and extending toward the depression. Another series of steps begins at the Algodones fault and continues up to the San Andreas fault. The gravity and magnetic anomalies reflect the morphology of the basement in this area.

The sites selected in this report as being geothermally attractive are related to gravity highs which do not reflect the basement and are located in the areas of thickest sedimentary fill. Some of these highs may be due to densification of the sediments by hydrothermal activity generated by a convective process in geothermal aquifers, as indicated by temperatures that have been detected at some of these sites. Other highs have been related to intrasedimentary igneous intrusions near the main faults and have been identified by their particular correspondence with magnetic highs.

Finally, based on these interpretations, we concluded that the Cerro Prieto field extends to the east of its present location by an unknown amount. We conclude this on the basis of a dome-shaped gravity high. We also indicated the desirability of establishing a program of geothermal exploration in the areas of Tulecheck, Riíto, Aeropuerto-Algodones, and San Luís Río Colorado, to include drilling of ±1200 m-deep multiple-use wells, reflection seismics, and deep exploration wells.