MODELO GEOLOGICO DEL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO

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

RESUMEN

Con base en diversos estudios recientes de geología, geofísica, geoquímica, petrografía y de la información que se obtuvo de los pozos construidos a la fecha, se realizaron modificaciones no sustanciales al modelo geológico que se presentó en el 1er. Simposio geotérmico efectuado en la ciudad de San Diego, California.

Básicamente, se trabaja aún con el mismo modelo, constituido principalmente por 3 unidades litoestratigráficas; (U-A) sedimentos no consolidados, (U-B) sedimentos consolidados y metamorfizados, y la (U-C) que representa el basamento granítico y/o metamórfico. Dos sistemas de fallas principales dislocan dichas unidades; éstos se conocen con el nombre de Cerro Prieto, de rumbo NO-SE, y Volcano de rumbo NE-SO.

Las modificaciones y adiciones que se hicieron al modelo original y que se presentan en este trabajo, se relacionan esencialmente con el comportamiento de dichas unidades, así como con su formación original, concretamente con los procesos geoquimicohidrotérmicos ocurridos en ellos. Además, se hace mención de una posible extensión de la zona al NE de la actual en explotación, lo que se fundamenta, principalmente, en el mecanismo tectónico de las fallas transformadas que afectan a esta porción de la Península de Baja California.

INTRODUCCION

LOCALIZACION

El campo geotérmico de Cerro Prieto, se localiza a 28.6 km., al SE de la ciudad de Mexicali, entre los meridianos 114°40' y 115°33' de longitud O de Greenwich y los paralelos 31°55' y 32°44' de latitud N (Fig. 1), sobre la planicie deltaica que formaron los sedimentos transportados por el Río Colorado. A 6 km, al NO del campo de explotación, se encuentra el volcán de Cerro Prieto, que tiene una altura de 225 m.s.n.m.

GEOLOGIA GENERAL SUPERFICIAL

El campo en explotación, se restringe a las áreas formadas por los rellenos del valle en las cercanías con cuerpos ígneos, tanto de origen intrusivo (Sierra de Cucapás), como extrusivo (Volcán de Cerro Prieto) (Figs. 2 y 3).

ROCAS PREBATOLITICAS

Representadas por rocas metasedimentarias: calizas, areniscas, conglomerados (Hirsch 1926, Bernard 1968; Gastil 1975) y metamórficas: mármol, gneiss, esquistos (Mc. Eldowney 1970, Gastil 1975), de edad mezosoica y en algunos casos probablemente paleozoica (Cinturón Metasedimentario). Estas rocas se presentan en las porciones O y SE de la Sierra de Cucapás.

ROCAS BATOLITICAS

Los principales ejemplos de este tipo de rocas cercanas al campo geotérmico de Cerro Prieto, forman gran parte de la Sierra de Cucapás y de la Sierra del Mayor, son de tipo granítico y tonalítico; tienen una edad aproximada de 119 a 120 millones de años (Silver y Bank 1969, Gastil 1975).

ROCAS POST-BATOLITICAS, VOLCANICAS Y SEDIMENTARIAS

Las rocas volcánicas son por lo general andesitas, riolitas y dacitas de edad mioceno-plioceno (Krummenacher *et al.*, 1969, Mc Eldowney 1970, Gastil 1975), éstas se presentan únicamente en la Sierra Pinta a 75 km al SO del campo geotérmico. Rocas riodacíticas del pleistoceno-holaceno constituyen principalmente el volcán de Cerro Prieto (Barnard 1968, Elders y Robinson 1971, Gastil 1975).

Los sedimentos deltaicos de origen continental, que conforman el Valle de Mexicali e Imperial, ocurren desde la parte E de la Sierra de Cucapás, el Mayor y del Cerro del Centinela; hacia el E se extienden hasta el Desierto de Altar. Al N y NO forman Imperial Valley y East Mesa en Estados Unidos de Norteamérica. Al S los limita el Golfo de California o Mar de Cortés. Al O de la zona geotérmica de Cerro Prieto se interdigitan con los depósitos aluviales procedentes de la Sierra de Cucapás.

TECTONICA REGIONAL

Diversas investigaciones se realizaron para conocer la de-

riva, debida a la barrera que representa la placa continental, de los diferentes bloques que integran la placa pacífica en su movimiento hacia el NO y las consecuencias que dichos desplazamientos y choques de bloques tectónicos provocan en la actualidad, como la formación de sistema de fallas transformadas de las que se originan centros de dispersión y en las que generalmente se presentan actividad volcánica, enjambres de temblores, depresiones oceánicas y actividad hidrotérmica (Figs. 4 y 5).

El campo de Cerro Prieto se localiza en uno de esos centros de dispersión (Lommitz 1970, Elders 1972), como consecuencia del movimiento lateral derecho de las fallas Imperial y Cerro Prieto (Reyes 1979). Debido a esos movimientos a rumbo, se formó un sistema de fallas secundario denominado Volcano, de rumbo general NE-SO normal a los afallamientos principales NO-SE (I. Puente, de la Peña 1979), y con echados tanto al NO como al SE.

COMPORTAMIENTO GEOESTRUCTURAL DE LAS UNIDADES LITOLOGICAS U-A, U-B y U-C

Para definir el comportamiento estructural de las unidades U-A, U-B y U-C, se analizaron los resultados obtenidos de los estudios de: reflexión, refracción, sísmica pasiva, gravimetría, magnetometría, monitoreo sísmico, registros eléctricos en pozos, análisis litológicos de muestras de roca, paleontología, petrografía y geohidrología.

Con base en esta información se obtuvo un modelo geológico preliminar integrado por tres unidades litológicas U-A, U-B y U-C (Fig. 6), al que se le hicieron modificaciones conforme se obtuvieron nuevas informaciones.

UNIDAD A

Se compone de sedimentos no consolidados, arcillas, limos, arenas y gravas, y su parte inferior, de horizontes en etapa transicional de consolidación, representados por lodolitas, lutitas y limolitas de color café. Se determinó que la depositación que dio origen tanto a esta unidad como a la U-B, ocurrió en un medio ambiente deltaico del tipo lagunar o de estuario (L. M. Thorton 1979), y permitió la depositación de horizontes arcillosos, que actualmente sirven como sello e impiden el ascenso de los fluidos geotérmicos a la superficie. Entre los horizontes arcillosos, se presentan cuerpos aislados y horizontes de arenas y gravas con capacidad para el almacenamiento del agua que se filtra tanto del Río Colorado como de las escasas precipitaciones pluviales que acontecen en la región. Dichos cuerpos permeables que son los que contienen los acuíferos más superficiales, deben funcionar como una carga hidrostática que ayuda en parte a detener el posible ascenso de los fluidos calientes a la superficie y al mismo tiempo deben recargar los acuíferos de agua caliente de la U-B. Para verificar lo anterior, y conocer el comportamiento de los acuíferos de agua fría que se alojan en la U-A, se ha programado construir durante 1980 de 2 a 3 pozos piezométricos a profundidades del orden de ± 1000 m, en el área de C. P. II.

UNIDAD B

Esta unidad de sedimentos consolidados, integrados por areniscas, limolitas, lutitas, pizarras y argilitas, deben su estado actual a factores conjuntos como: metamorfismo regional, cambios geoquimicohidrotérmicos (Elders, Hoagland, Mc Dowell 1979), y a la compactación de los mismos, cuando se depositaron sucesivamente en las cuencas que se formaron como consecuencia del tectonismo que impera en esta zona, cuencas soterradas que se estima contengan espesores de sedimentos del orden de 3500 a 5500 m.

A semejanza con la unidad A, las capas presentan una distribución sumamente errática, tanto horizontal como vertical, éstas han sido afectadas por el intenso afallamiento y fracturamiento, producto de los constantes movimientos tectónicos, así como por los procesos de metamorfismo en sus diferentes formas que han cambiado su estructura original en parte.

La única diferencia con respecto a la unidad A, es su estado actual de consolidación, ya que los análisis petrográficos (Elders 1979), petrológicos y paleontológicos hechos hasta la fecha no pueden determinar alguna otra diferencia entre ellas.

UNIDAD C

En la sección C-C' (Fig. 7) se presenta un ejemplo de correlaciones de litofacies desde el pozo M-6 al M-53, desarrollada con base en porcentajes de arena y grava (U-A) y/o areniscas (U-B) y de arcilla (U-C) y/o lutitas y argilitas (U-B), efectuadas directamente de las muestras de los recortes de roca que se obtuvieron durante la perforación. Este ejemplo, que puede considerarse "grueso" comparativamente con las hechas con base en registros eléctricos (Abril 1978, Prian 1978 y 1979, Noble 1979), proporcionan una idea general de lo difícil que resulta hacer esta clase de correlaciones, ya que no se tienen capas índices que den confiabilidad necesaria para llevarlas a cabo lo más apegadas a la realidad. Es importante hacer notar que de los análisis hechos a las muestras de roca extraídos de todos los pozos construidos a la fecha, así como de las correlaciones eléctricas (Abril 1978, 1979), y litológicas (I. Puente, de la Peña 1978), (Vonder Haar, Howard 1979), no ha podido definirse que algún gran paleocanal (Prian 1978) sea la estructura almacenante de los fluidos geotérmicos; lo que parece evidente, es que los sedimentos deltaicos son principalmente de origen lagunar y de estuario (Thorton 1979), zonas que generalmente están surcadas por sistemas de canales poco profundos que desembocan en los litorales, las evidencias más concretas son la presencia de capas de lutitas que varían desde 15 m, hasta 1 mm de espesor las capas más delgadas dan la apariencia de se-

dimentos varvados, que van de tonos gris claro a gris oscuro. Erráticamente se presentan cuerpos aislados de areniscas y de lutitas en espesores hasta de 50 m (Abril, 1978), 100% limpios y que generalmente no tienen continuidad horizontal, ya que se acuñan (Noble, 1979) en forma normal, debido a factores tales como:

a) Las constantes fluctuaciones tectónicas de la región ocasionaron el soterramiento de los sedimentos, antes de que el ambiente inmediato de depositación influyera en forma importante en la composición y en la geometría de los sedimentos ya depositados.

b) Al régimen de suministro de sedimentos, el que a su vez es un reflejo de la actividad tectónica de la zona que debió provocar que los posibles bordes lagunares, marinos y ribereños estuvieran sujetos a avances y retrocesos casi continuos, por lo que consecuentemente ocurrieron ciclos de sedimentación muy compleja y errática.

En 1979, se realizó una interpretación estructural preliminar de la U-B, (I. Puente, de la Peña 1978), con base en su posición a profundidad, ésta se basó tanto en los resultados de los estudios geofísicos que a la fecha se tenían, como en los análisis de muestras de roca extraídas de los pozos.

La diferencia con el estudio estructural anterior y el presente, consistió en no tomar en cuenta los desniveles menores de 100 m, optándose únicamente por analizar los desniveles más importantes. Se localizaron cinco secciones, la 1-1', 2-2', 3-3', 4-4' y 5-5', se trazaron a rumbo NO-SE con el fin de cortar los principales accidentes estructurales del sistema de fallas Volcano. Cinco más la B-B', C-C', D-D', E-E' y F-F', se trazaron a rumbo SO-SE para detectar las fallas del sistema Cerro Prieto (Fig. 8). Al apoyarse en las diferencias de niveles que presenta la U-B en las correlaciones hechas entre los pozos, las evidencias de relices de falla que se observaron en los recortes de perforación y de los resultados que se obtuvieron de los más recientes estudios de sísmica de reflexión (Fonseca 1979) determinaron 3 fallas principales del sistema Volcano, Delta, Pátzcuaro e Hidalgo, y se reubicó la falla Cerro Prieto (Fig. 8), que anteriormente se había ubicado cerca de la vía del ferrocarril. Otro posible elemento que confirma la existencia de esas zonas de debilidad estructural es el que expone (Bermejo 1979) con base en los análisis y correlaciones de temperaturas que hace de cada uno de los pozos, determina que la ocurrencia de las temperaturas deben presentarse principalmente en zonas donde las estructuras geológicas estén afalladas. Con base en esto, se detectaron varias fallas, algunas de las cuales son coincidentes con las detectadas por geología y geofísica.

En la figura 10 se estudian las secciones geológicas 2-2', 3-3', 4-4' y 5-5', se toma como base una línea de referencia con el fin de analizar la posición de las fallas del sistema Volcano, entre cada una de las secciones geológicas, en ella se aprecian muy claramente los desplazamientos de la U-B, que en parte llegan a ser del orden de 800 m, como en la falla Pátzcuaro; dicha falla y la de Hidalgo en sus trazas hacia el NE presentan una forma alabeada. En las demás secciones (B-B', C-C', D-D', E-E' y F-F') (Figs. 11, 12, 13, 14 y 15), normales a las anteriores, se determinaron las fallas del sistema Volcano: Pátzcuaro e Hidalgo, no pudo definirse ninguna otra falla importante.

Con base en la cima de la unidad B se realizó una configuración preliminar (Fig. 9), con el fin de conocer el comportamiento de los sedimentos consolidados y metamorfoseados, principalmente para la localización y programación constructiva de los pozos exploratorios y de producción. En dicha configuración, se aprecia que en la zona de explotación para la planta de C.P.I, la cima de U-B, está a una profundidad promedio de 700 m, mientras que en las zonas que se localizan al SSE y NNE de la planta, la cima se va profundizando hasta los 2100 m, (NL-1). Hacia el O, SO y NO de Cerro Prieto, desaparece el contacto entre U-A y U-B (pozos M-3, M-6, M-96 y S-262), donde incluso se tienen manifestaciones hidrotérmicas superficiales. En los recortes de perforación extraídos de dichos pozos, se observa la predominancia de gravas, arenas y areniscas sobre muy escasos y delgados horizontes de arcillas y lutitas. Dicha predominancia hace suponer que esta franja NO-SE corresponde a una zona de frente deltaico (Noble 1979) donde seguramente prevalecieron movimientos tectónicos diastróficos que determinaron la ocurrencia y predominancia de sedimentos gruesos sobre los finos. A una distancia aproximada de 2 km, desde el pozo O-473 y al O de la Laguna Volcano, el contacto entre U-A y U-B, aparentemente vuelve a presentar las mismas condiciones, ya que de acuerdo con la información de la sísmica de refracción (Calderón 1962), se obtuvieron velocidades para dicha cima de la U-B del orden de 3000 a 3700 m/s (líneas 2 y 3), iguales a las que se obtuvieron en la zona de C. P. II (M-53, M-93, NL-1, etc.) (I. Puente, de la Peña 1978), asimismo los resultados obtenidos en las líneas D, E y F de los Estudios de Sísmica de Reflexión (Fonseca 1979), confirman la presencia de una formación de rocas estratificadas, de las que no se conoce actualmente su composición y origen. En esta zona se programó para 1981, construir un pozo exploratorio de ± 1500 m de profundidad.

ISOTERMAS

Con objeto de conocer la relación existente entre las principales estructuras que gobiernan el campo de Cerro Prieto y las zonas de mayor temperatura se realizaron una serie de secciones de isotermas, se utilizaron para ello los registros de temperatura efectuados en los pozos (Figs. 16, 17, 18 y 19) y se compararon con las secciones geológicas. Se observó que las curvas de isotermas se comportan en forma sensiblemente paralela al comportamiento

estructural del campo, es decir, las zonas de anomalías térmicas se presentan a menor profundidad, donde las capas de la U-B, están más cercanas a la superficie y se profundizan cuando aumenta la temperatura (principalmente en las zonas cercanas a la falla Pátzcuaro), a medida que las capas de la U-B se encuentran a mayor profundidad.

Para tratar de determinar la ubicación de la fuente o fuentes caloríficas que calientan los acuíferos del campo, se llevaron a cabo planos de isotermas a 500, 1000, 2000 y 2500 m de profundidad (Figs. 20, 21, 22, 23 y 24), y asimismo una configuración de isotermas máximas con base en registros de temperatura en pozos que fluyen (Fig. 25).

En el plano de isotermas a 500 m de profundidad, se observa que las máximas temperaturas, de 160°C, se localizan en un área entre el pozo M-6 y el M-3, y a medida que se profundiza (isotermas a 1000, 1500, 2000 y 2500), las curvas de isotermas se desplazan hacia el NE; por otro lado la configuración de isotermas máximas, informa una temperatura de 340°C en una curva que se presenta abierta en la misma dirección. Lo anterior hace suponer que la fuente o fuentes caloríficas que alimentan el campo, podría localizarse en alguna parte entre la falla de Cerro Prieto y la Imperial al NE del campo en explotación.

CONCLUSIONES

El campo de Cerro Prieto se localiza en un centro de dispersión producto de movimiento lateral derecho de las fallas transformadas Cerro Prieto e Imperial, ambas de rumbo general NO-SE, pertenecientes al sistema de fallas de San Andrés (Fig. 26). Como consecuencia del movimiento relativo de estas fallas, se formó otro sistema sensiblemente perpendicular al anterior, al que se denominó Volcano con rumbo general NE-SO; las fallas de este sistema son de tensión y por consiguiente, abiertas; es factible (aunque no se ha comprobado) que a través de estas fallas ascienda el flujo calorífico que calienta el agua almacenada en el o los acuíferos del campo de Cerro Prieto.

Aunque los afallamientos en áreas de centros de dispersión son complejos y difíciles de determinar, hasta el momento, con apoyo en los diferentes estudios que se han realizado, tanto geológicos como geofísicos, se detectaron en el área de Cerro Prieto 3 fallas principales del sistema Volcano: falla Delta, falla Pátzcuaro y falla Hidalgo, y se dedujo que son por las que asciende la energía calorífica al campo.

Asimismo, con base en los estudios mencionados y en los resultados obtenidos de los pozos construidos, tentativamente se delimitó el campo geotérmico de Cerro Prieto de la siguiente manera: En su porción SO por la falla de Cerro Prieto; al NO por una franja que pasaría por los pozos M-3, M-94 y aproximadamente a 1 km al SE del pozo Prian; al SE por una zona que incluye los pozos S-262, M-92 y M-189, hacia la porción NO, hasta el momento no hay indicios del límite.

REFERENCIAS

Abril, A. y R. Molinar, "Desarrollo e interpretación de pruebas transitorias de presión en pozos del campo geotérmico de Cerro Prieto", *Segundo simposio sobre el campo geotérmico de Cerro Prieto,* octubre de 1979.

Bermejo, F. J., F. X. Navarro, F. Castillo, C. A. Esquer y C. Cortés, "Variación de presión en el yacimiento de Cerro Prieto durante su explotación", *Segundo simposio sobre el campo geotérmico de Cerro Prieto*, octubre de 1979.

Cobo, J. M., "Geología y mineralogía del campo geotérmico de Cerro Prieto", *Segundo simposio sobre el campo geotérmico de Cerro Prieto,* octubre de 1979.

Elders, "Crustal spreding in Southern California —the Imperial Valley and the Gulf of California formed by the rifting apart of continental plate", *Science*, vol. 178, núm. 4056, 1972, pp. 20-22.

Elders, W. E. y J. R. Hoagland, "Estudios de la interacción agua-roca en el campo geotérmico de Cerro Prieto, Baja California, México", *Segundo simposio sobre el campo geotérmico de Cerro Prieto*, octubre de 1979.

Fonseca, H. L. y A. Razo, "Estudios gravimétricos, magnetométricos y de sísmica de reflexión en el campo geotérmico de Cerro Prieto", *Segundo simposio sobre el campo geotérmico de Cerro Prieto*, octubre de 1979.

Gordon, R., G. R. P. Phillips y E. C. Allison, "Reconnaissance geology of the state of Baja California memoir 140 the Geological", *Society of America*, 1975.

Lommitz, *Revista de la Unión Geofísica Mexicana*, México, instituto de Geofísica, UNAM, pp. 42-45.

Noble, J. E., "Análisis estratigráfico y sedimentológico del campo geotérmico de Cerro Prieto, Baja California, México", *Segundo simposio sobre el campo geotérmico de Cerro Prieto*, octubre de 1979.

Prian C., R., "Posibilidades de desarrollo del área geotérmica de Cerro Prieto, B. C.", *Segundo simposio sobre el campo geotérmico de Cerro Prieto*, octubre de 1979.

Thorton, M. L., "Algunos microfósiles calcáreos del área de Cerro Prieto", *Segundo simposio sobre el campo geotérmico de Cerro Prieto,* octubre de 1979.

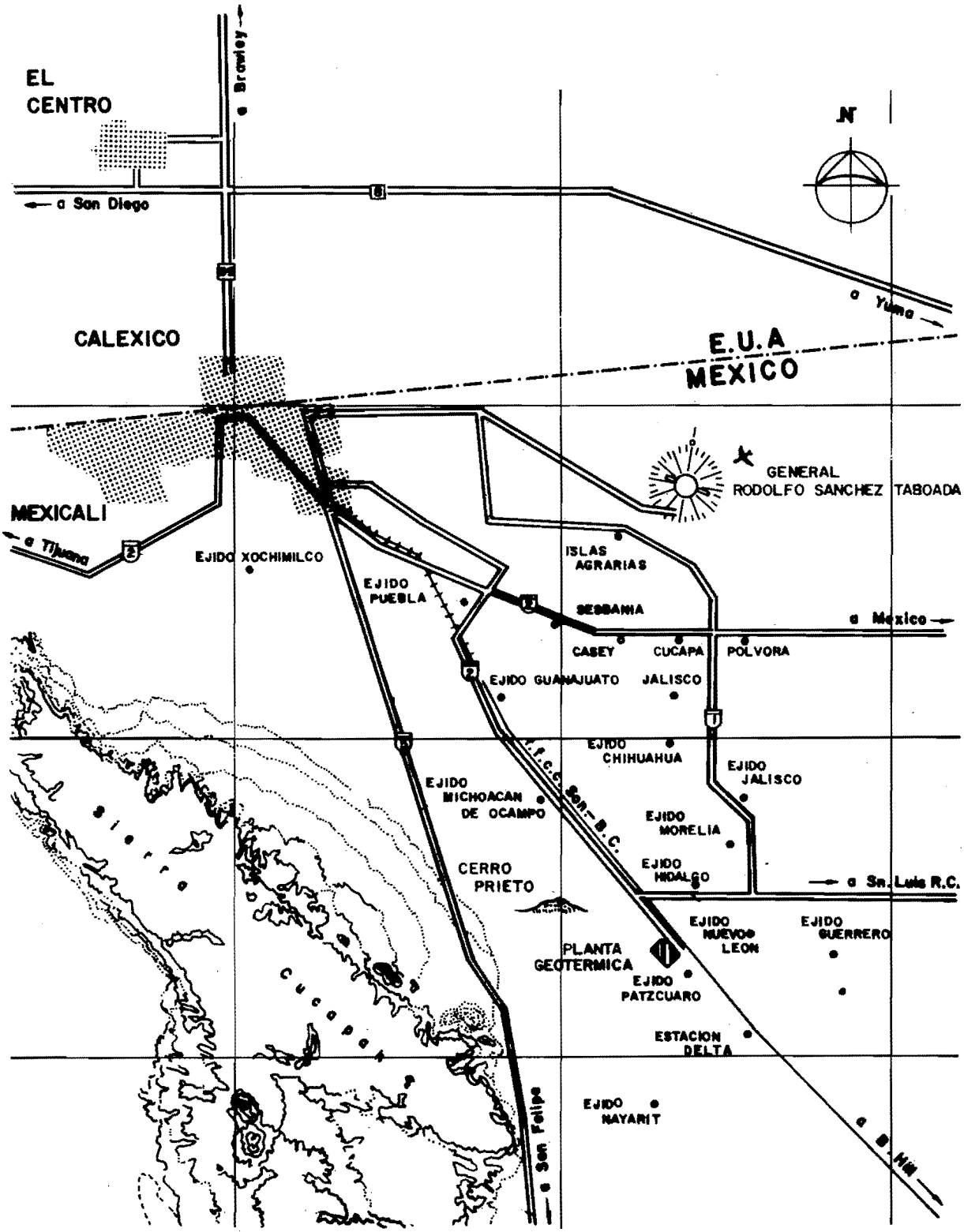


Figura 1. Principales vías de comunicación al campo geotérmico de Cerro Prieto.

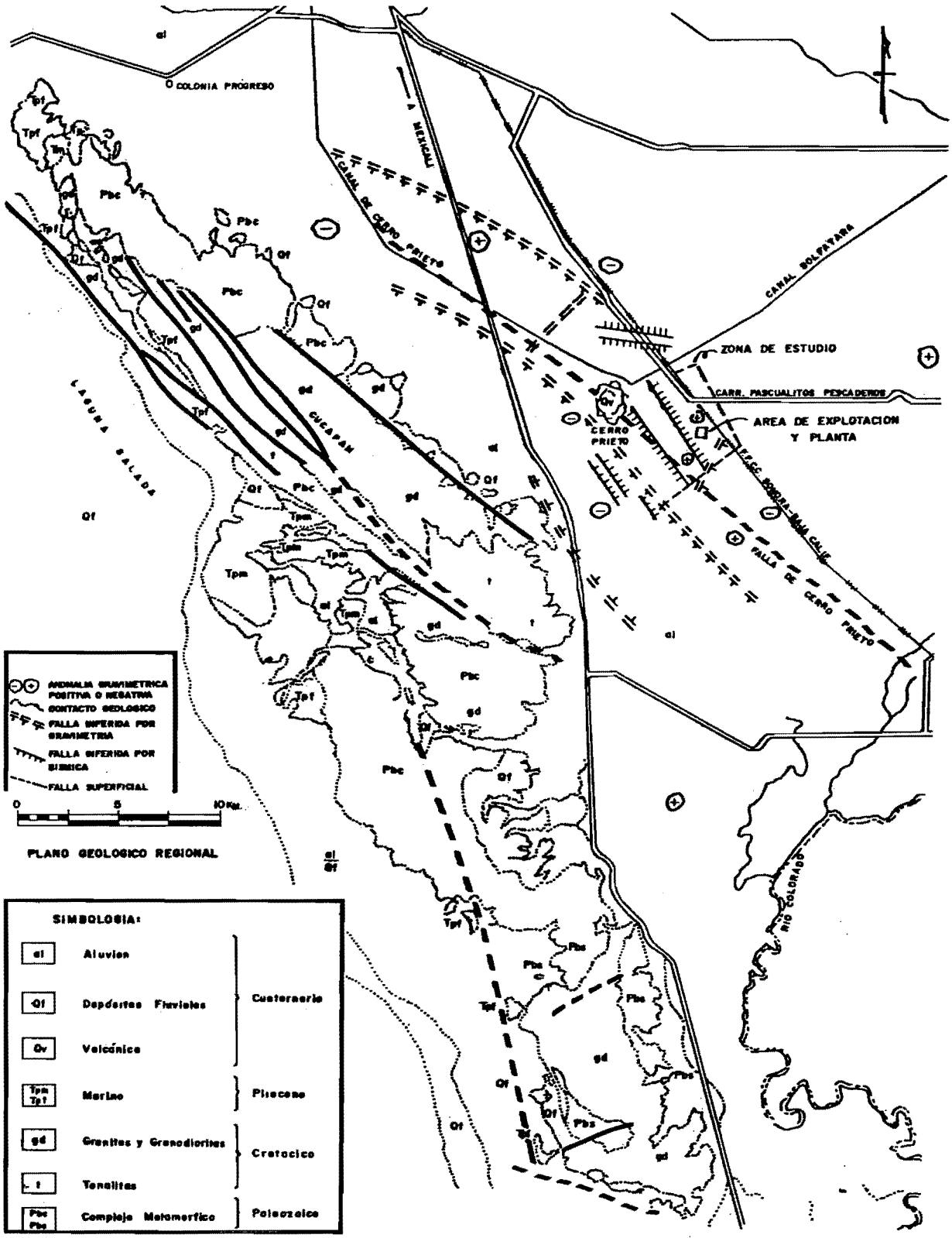

COLONIA PROGRESO
A MEXICALI
CANAL DE CERRO PRIETO
CANAL SOLFATARA
ZONA DE ESTUDIO
CARR. PASCUALITOS PESCADEROS
AREA DE EXPLOTACION Y PLANTA
CERRO PRIETO
FALLA DE CERRO PRIETO
LAGUNA SALADA
CUCAPAH
RIO COLORADO
ANOMALIA GRAVIMETRICA POSITIVA O NEGATIVA
CONTACTO GEOLOGICO
FALLA INFERIDA POR GRAVIMETRIA
FALLA INFERIDA POR SISMICA
FALLA SUPERFICIAL
0 5 10 Km.
PLANO GEOLOGICO REGIONAL
SIMBOLOGIA:
al Aluvion
Of Depositos Fluviales
Ov Volcánico
Tpm Tpf Marino
gd Granitos y Granodioritas
t Tonalitas
Pbc Pbs Complejo Metamorfico
Cuaternario
Plioceno
Cretacico
Paleozoico

Figura 2.

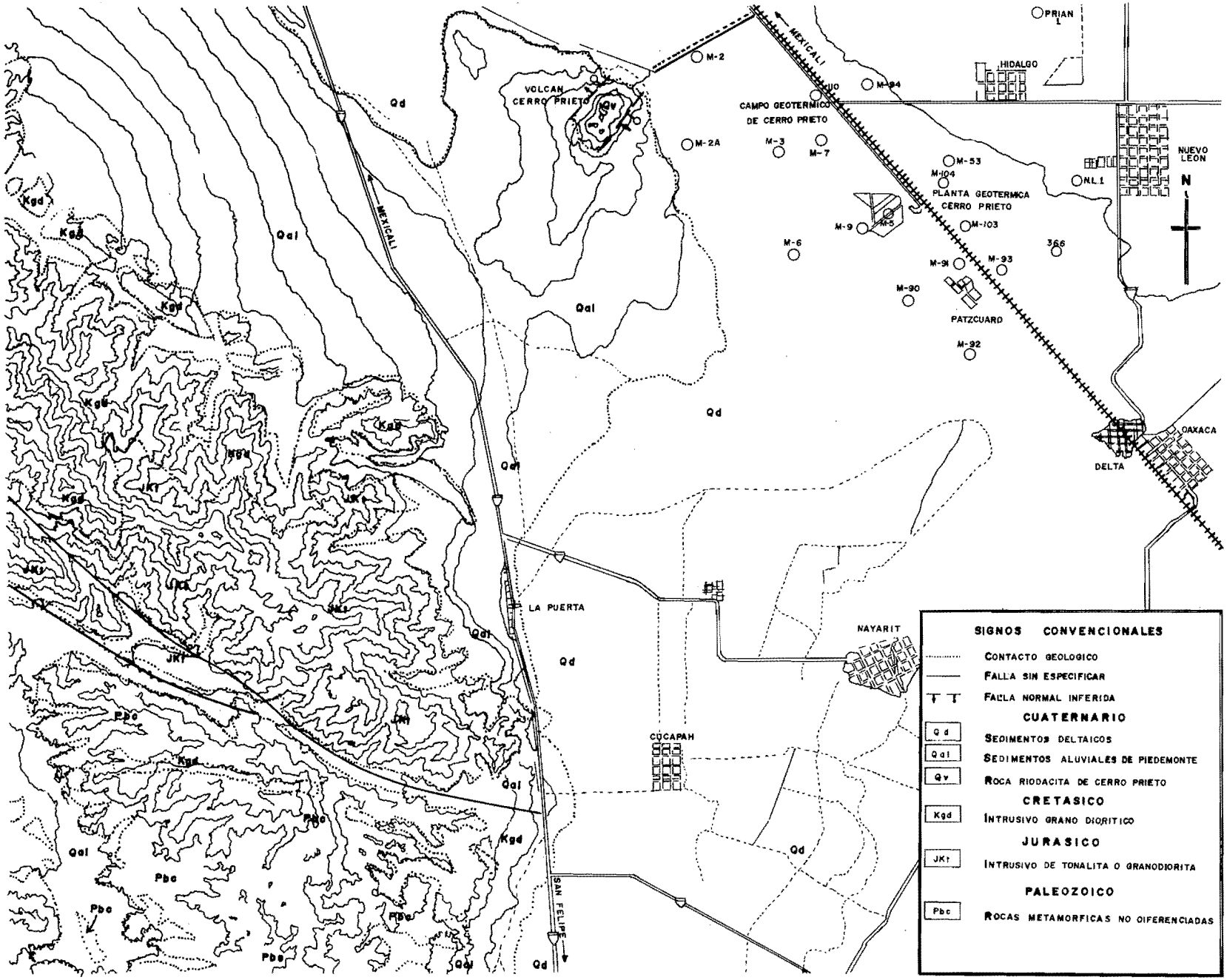
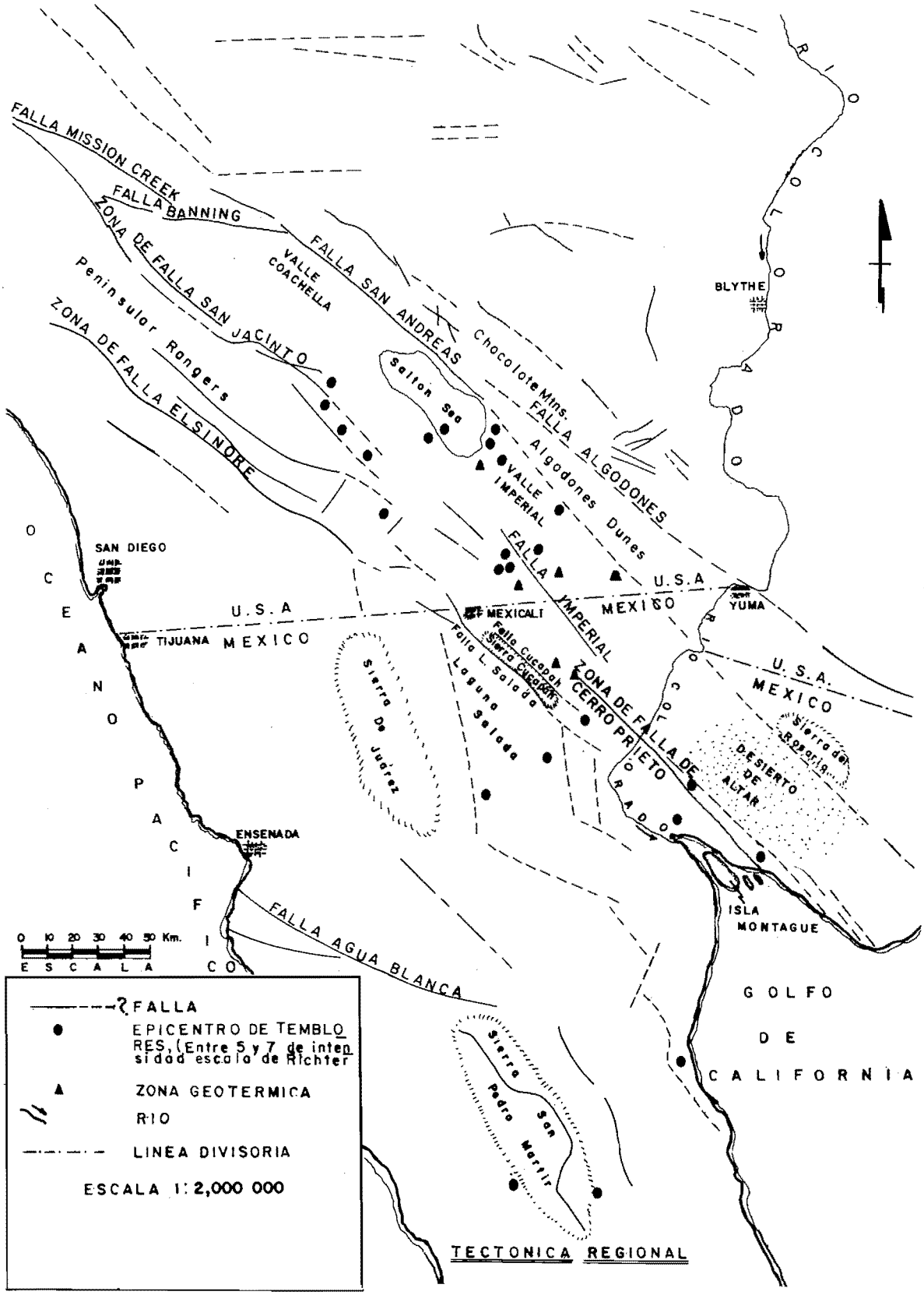
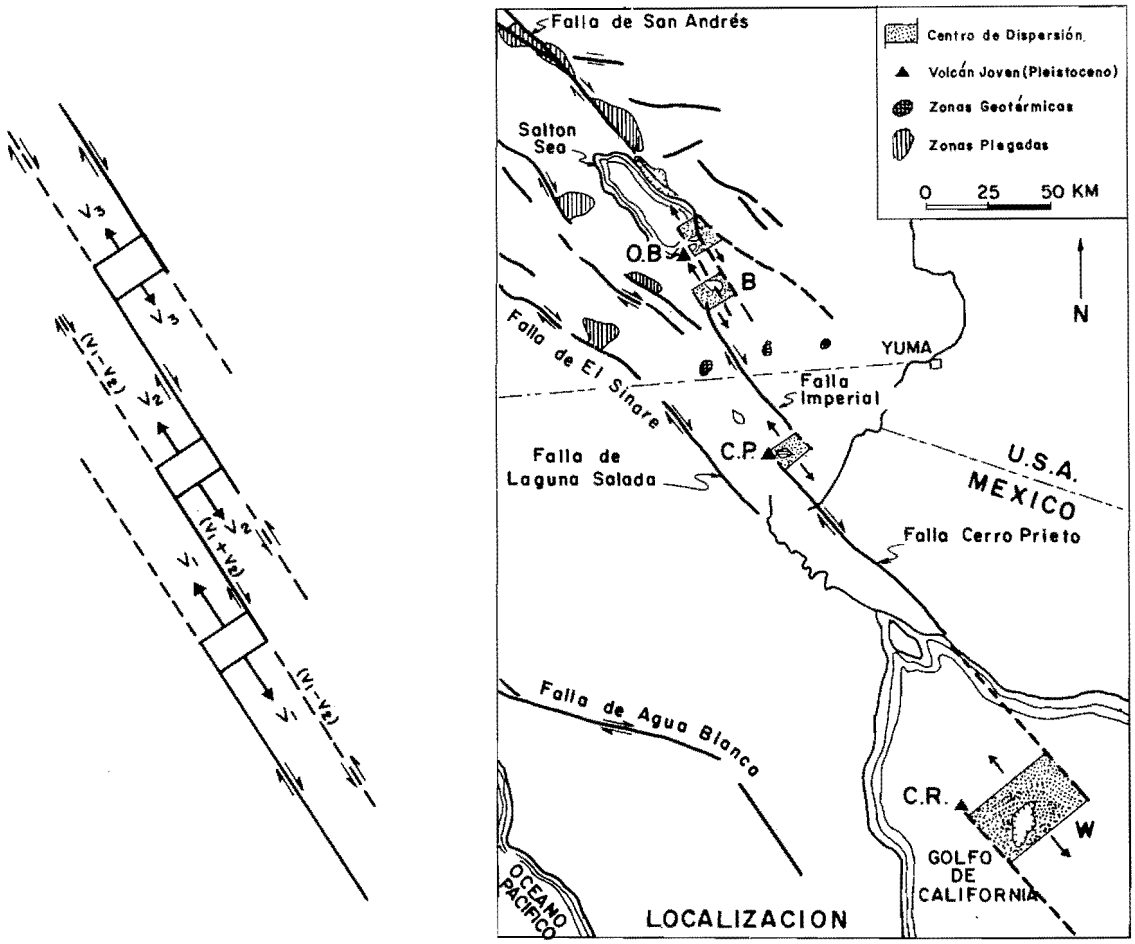

PRIAN 1
HIDALGO
M-2
M-94
VOLCAN CERRO PRIETO
Qv
CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO
M-2A
M-3
M-7
M-53
M-104
NL 1
NUEVO LEON
N
PLANTA GEOTERMICA CERRO PRIETO
M-9
M-5
M-103
M-6
366
M-91
M-93
M-90
PATZCUARO
M-92
OAXACA
DELTA
MEXICALI
Qd
Qal
Kgd
JKt
Pbc
LA PUERTA
NAYARIT
CUCAPAH
SAN FELIPE
SIGNOS CONVENCIONALES
CONTACTO GEOLOGICO
FALLA SIN ESPECIFICAR
FALLA NORMAL INFERIDA
CUATERNARIO
Qd SEDIMENTOS DELTAICOS
Qal SEDIMENTOS ALUVIALES DE PIEDEMONTE
Qv ROCA RIODACITA DE CERRO PRIETO
CRETASICO
Kgd INTRUSIVO GRANO DIORITICO
JURASICO
JKt INTRUSIVO DE TONALITA O GRANODIORITA
PALEOZOICO
Pbc ROCAS METAMORFICAS NO DIFERENCIADAS

Figura 3.



TECTONICA REGIONAL

Figura 4.



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

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

Figura 5.

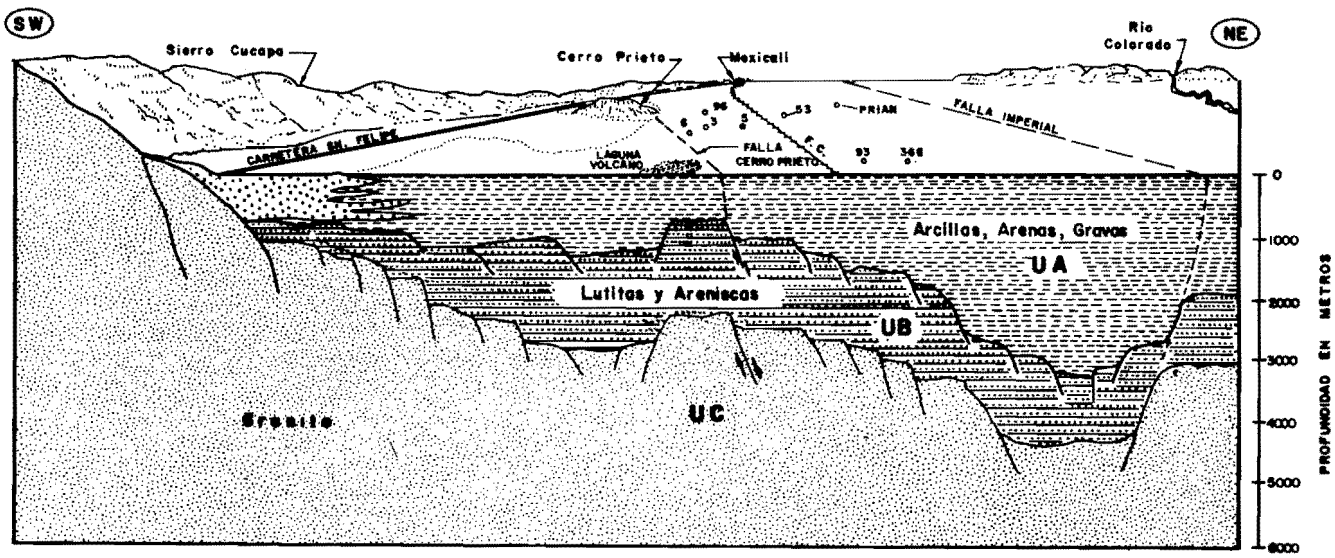


Figura 6.

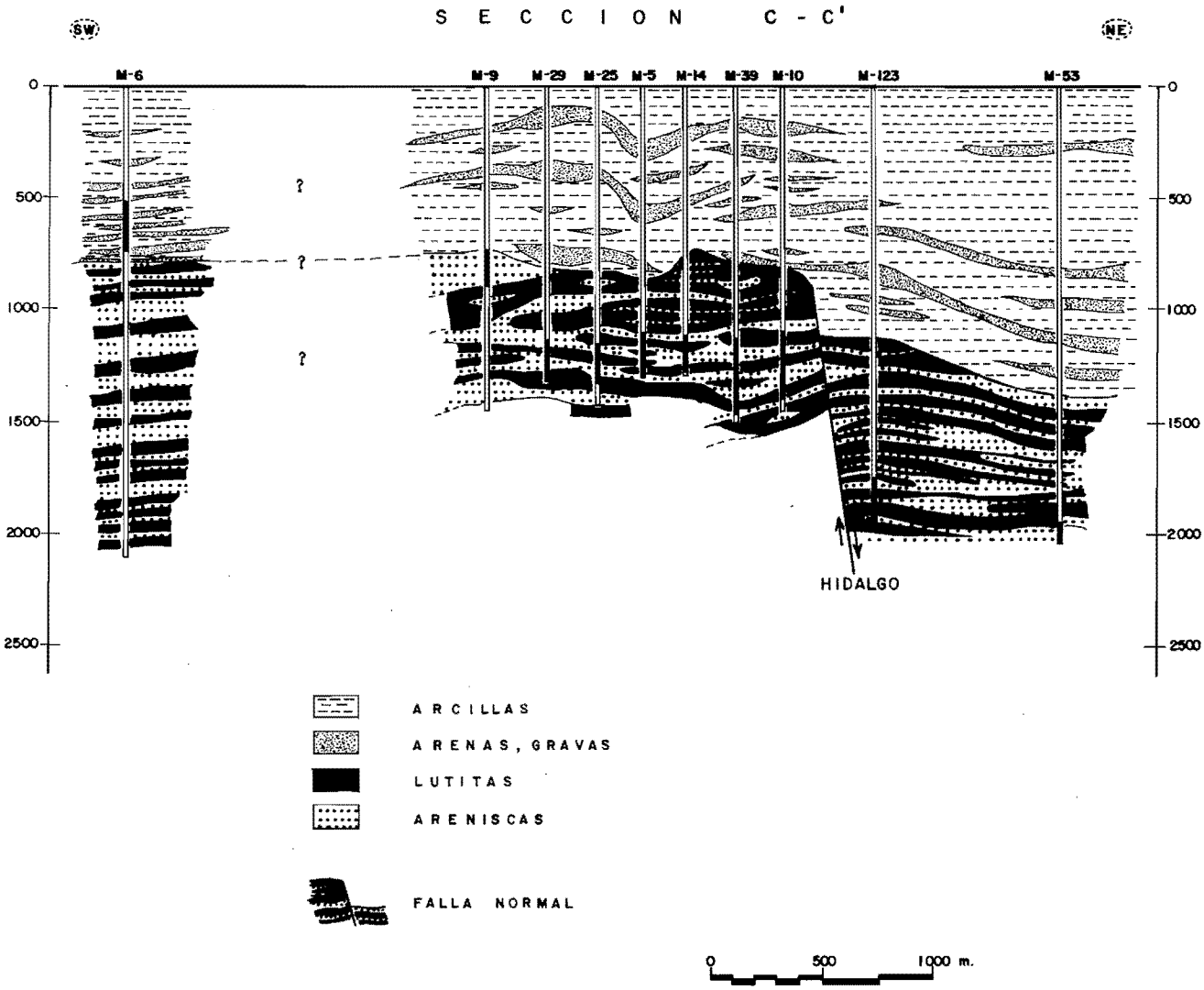

S E C C I O N C - C'
SW
NE
M-6
M-9
M-29
M-25
M-5
M-14
M-39
M-10
M-123
M-53
0
500
1000
1500
2000
2500
?
?
?
HIDALGO
ARCILLAS
ARENAS, GRAVAS
LUTITAS
ARENISCAS
FALLA NORMAL
0
500
1000 m.

Figura 7.

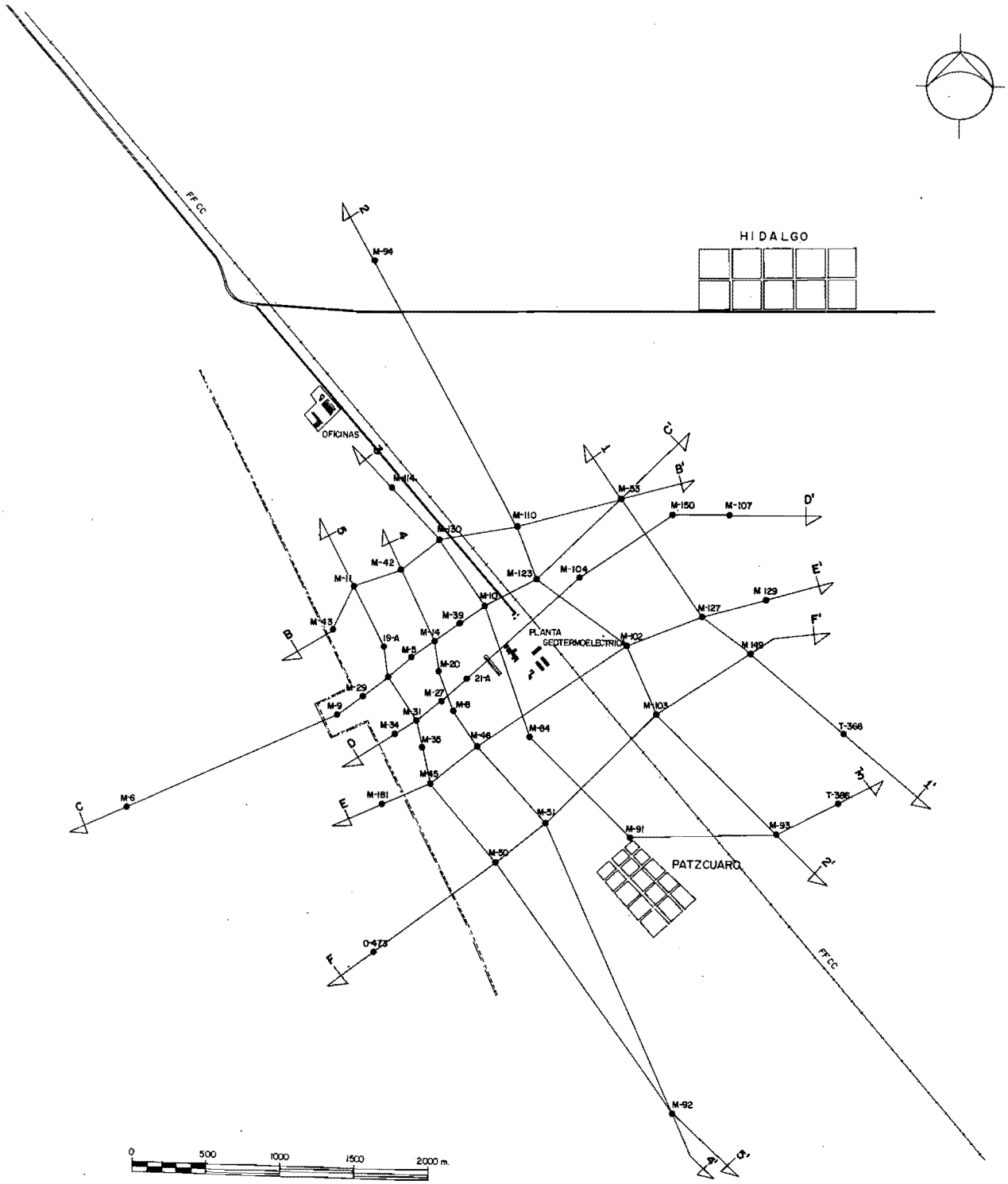

HIDALGO
PATZCUARO
OFICINAS
PLANTA GEOTERMOELECTRICA
FF CC
M-94
M-114
M-130
M-110
M-53
M-150
M-107
M-42
M-11
M-123
M-104
M-10
M-39
M-127
M 129
M-43
19-A
M-14
M-5
M-102
M 149
M-20
21-A
M-29
M-27
M-9
M-8
M-31
M-103
M-34
M-35
M-46
M-64
T-368
M-45
M-6
M-181
M-51
M-91
M-93
T-386
M-50
O-473
M-92
0
500
1000
1500
2000 m.

Figura 8.

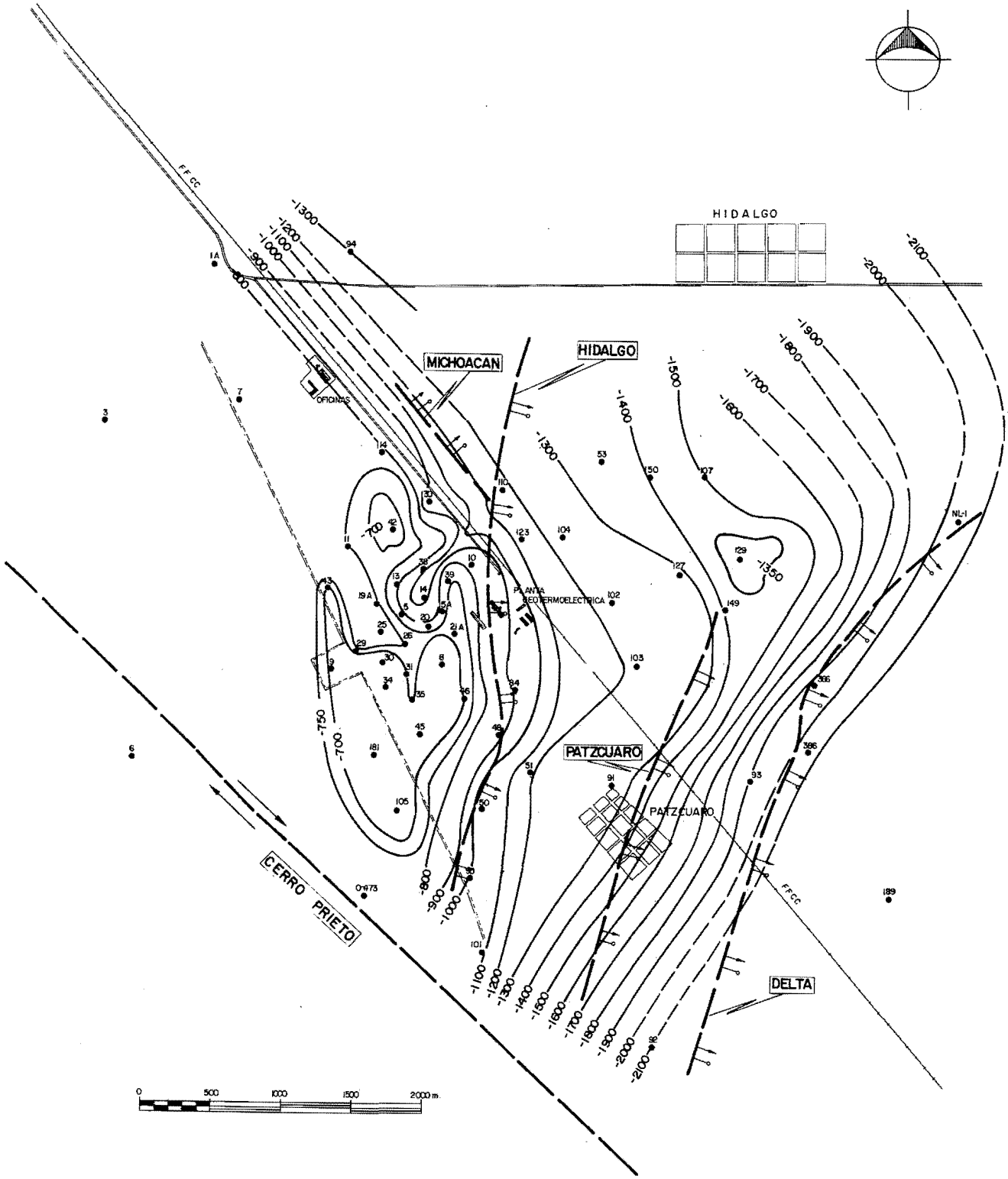


Figura 9. Configuración Cima *B*.

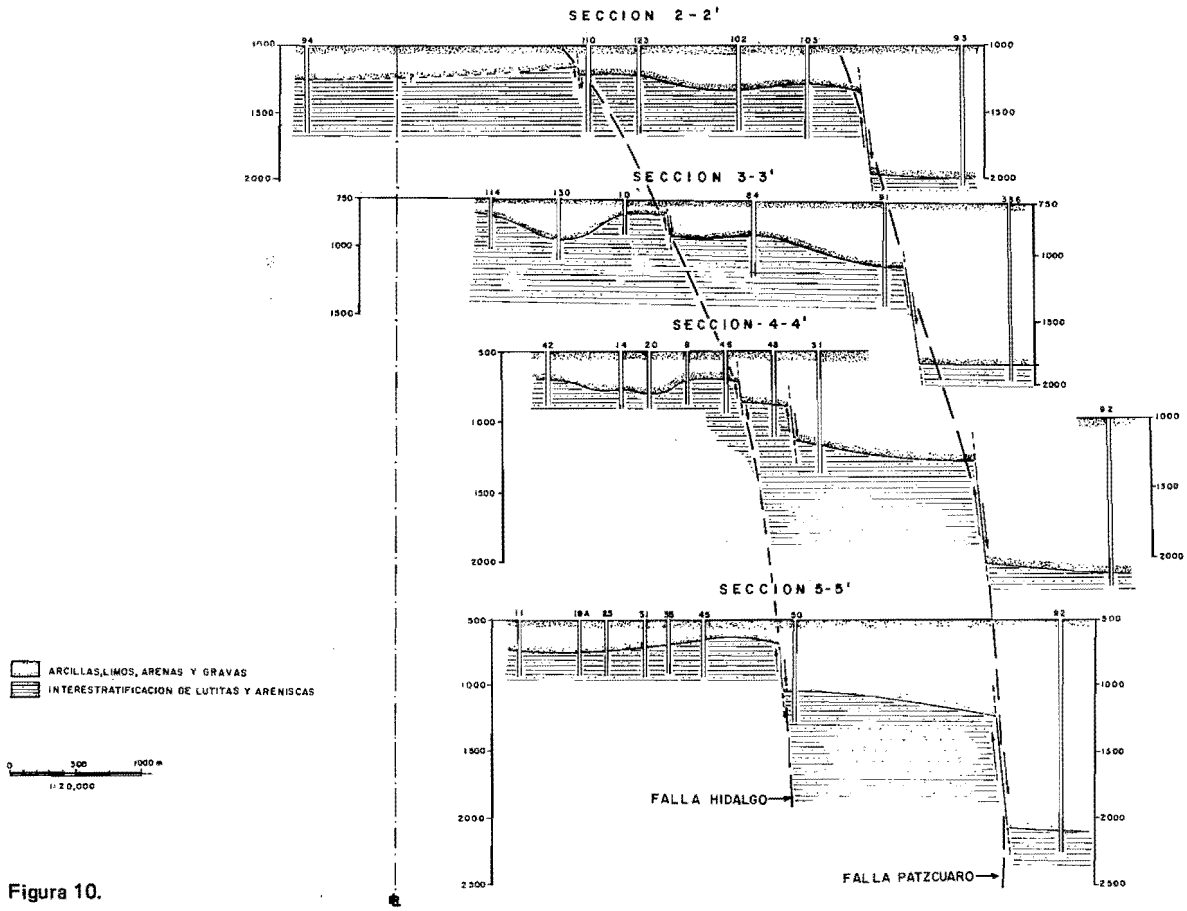


Figura 10.

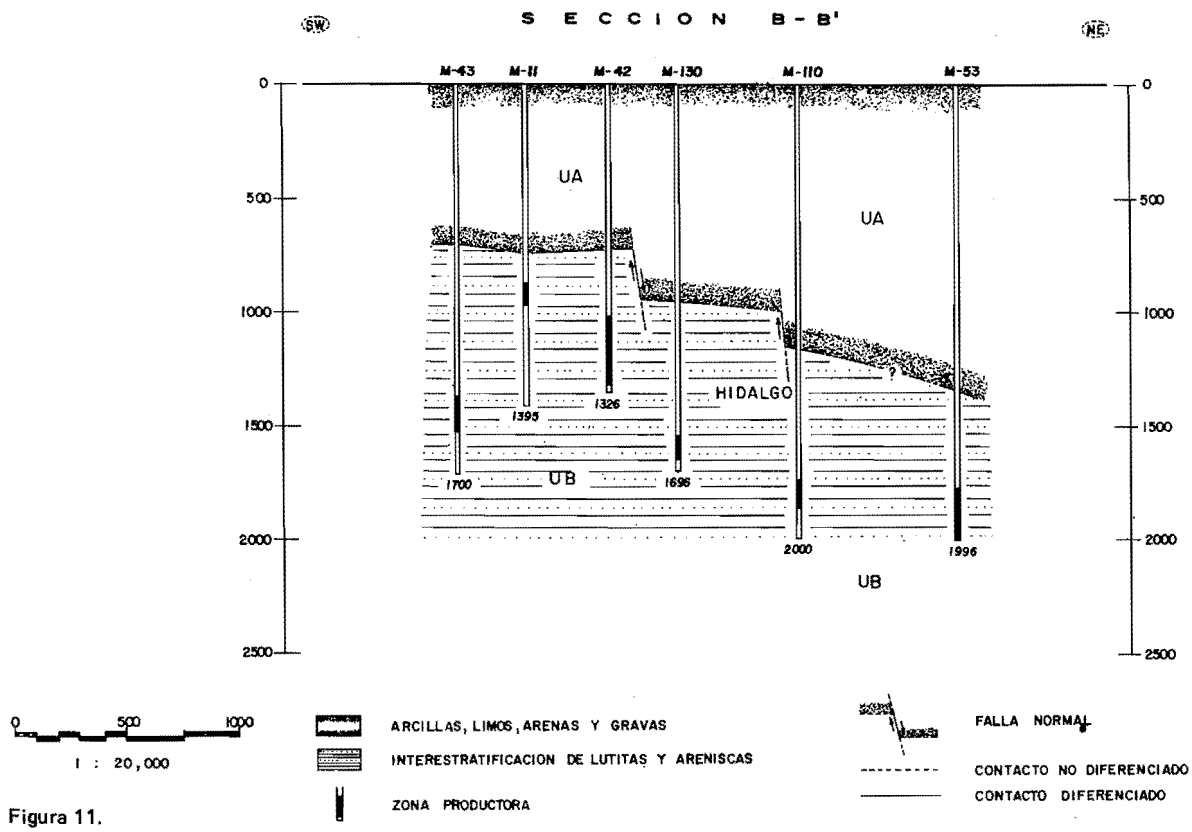


Figura 11.

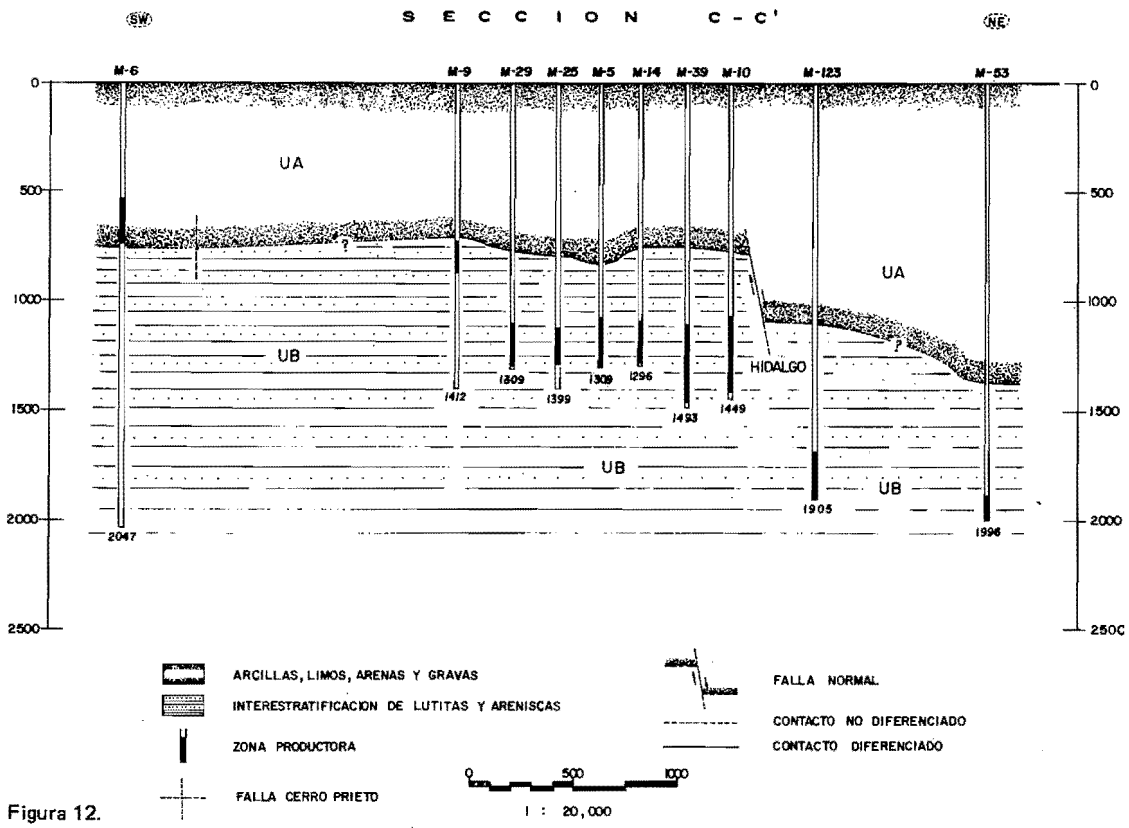


Figura 12.

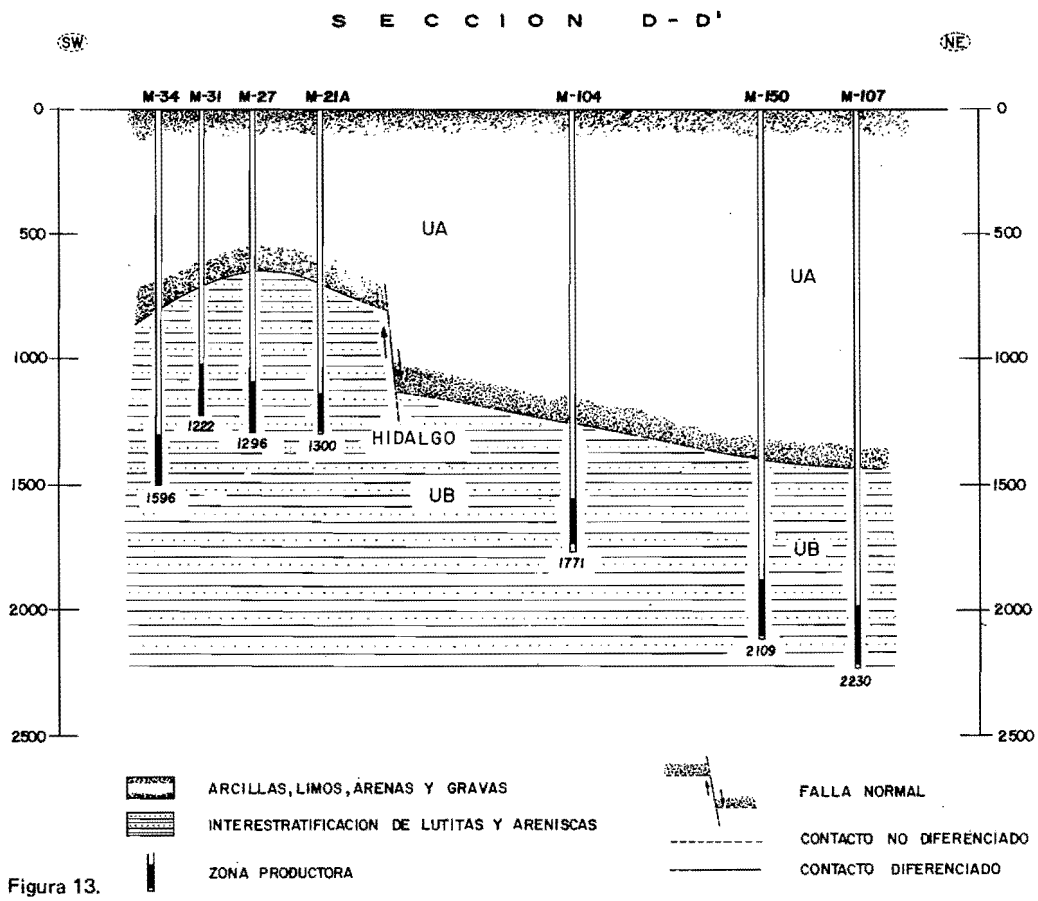


Figura 13.

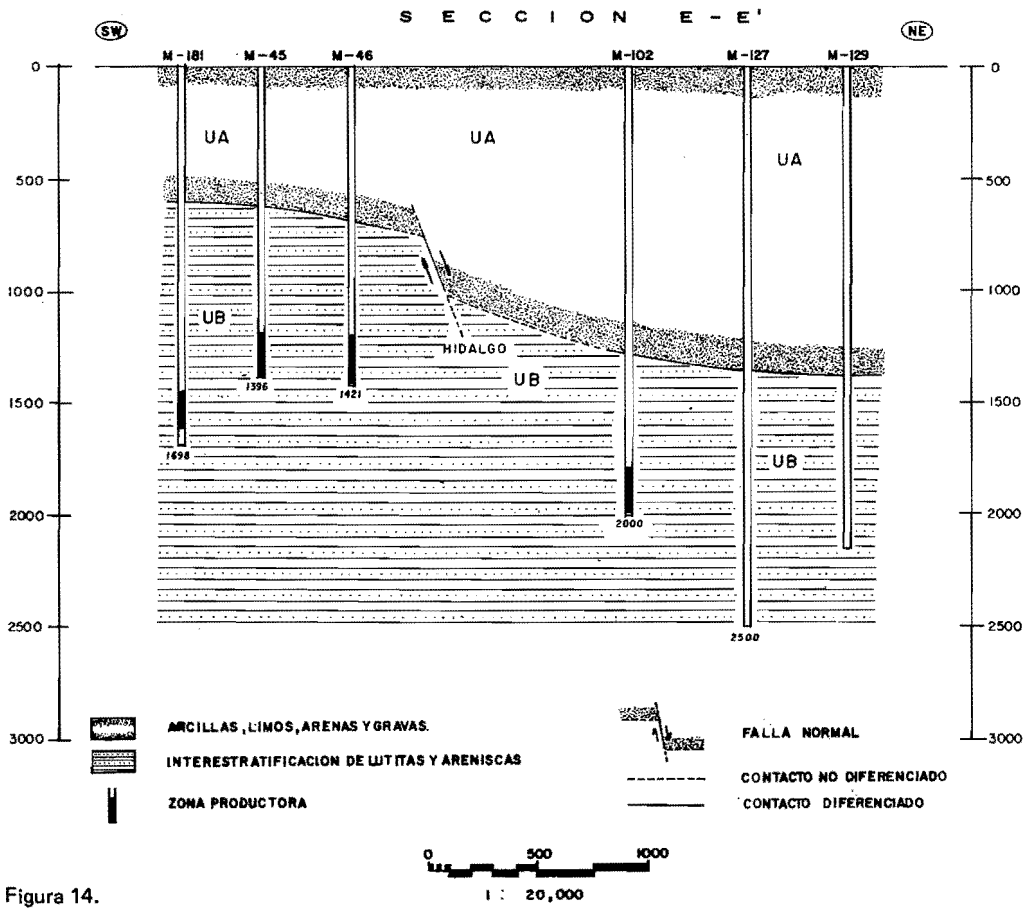


Figura 14.

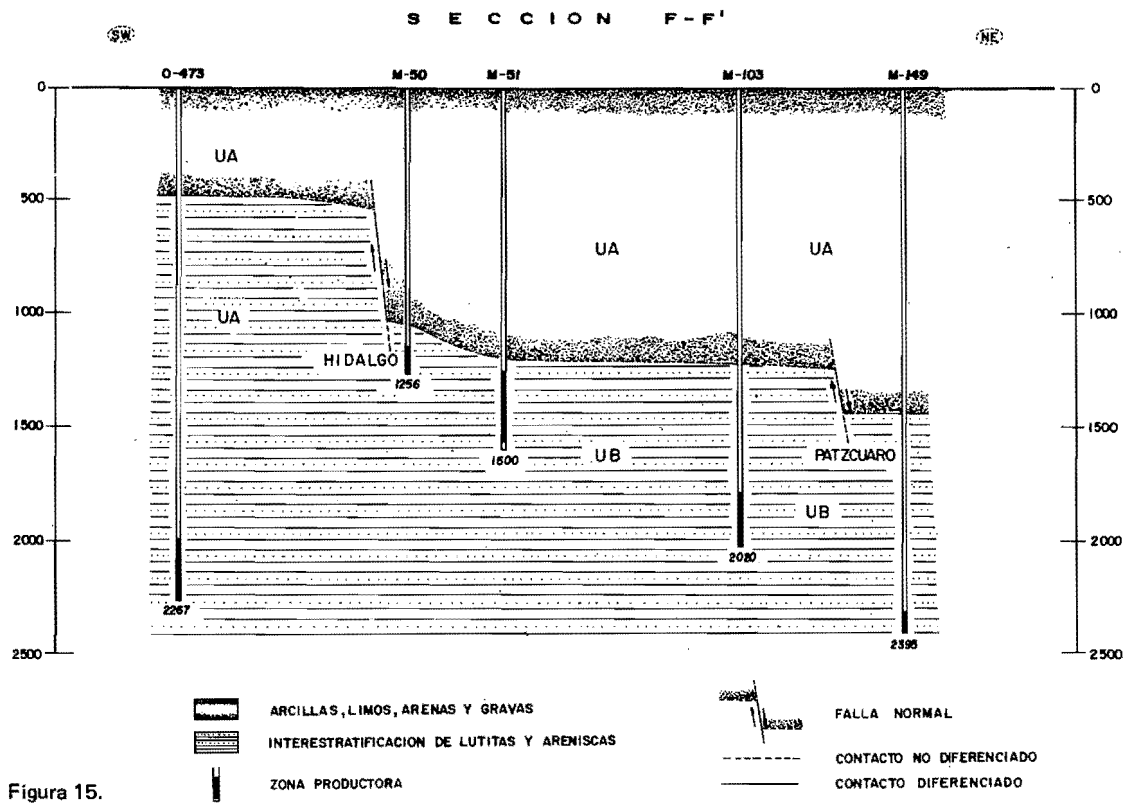


Figura 15.

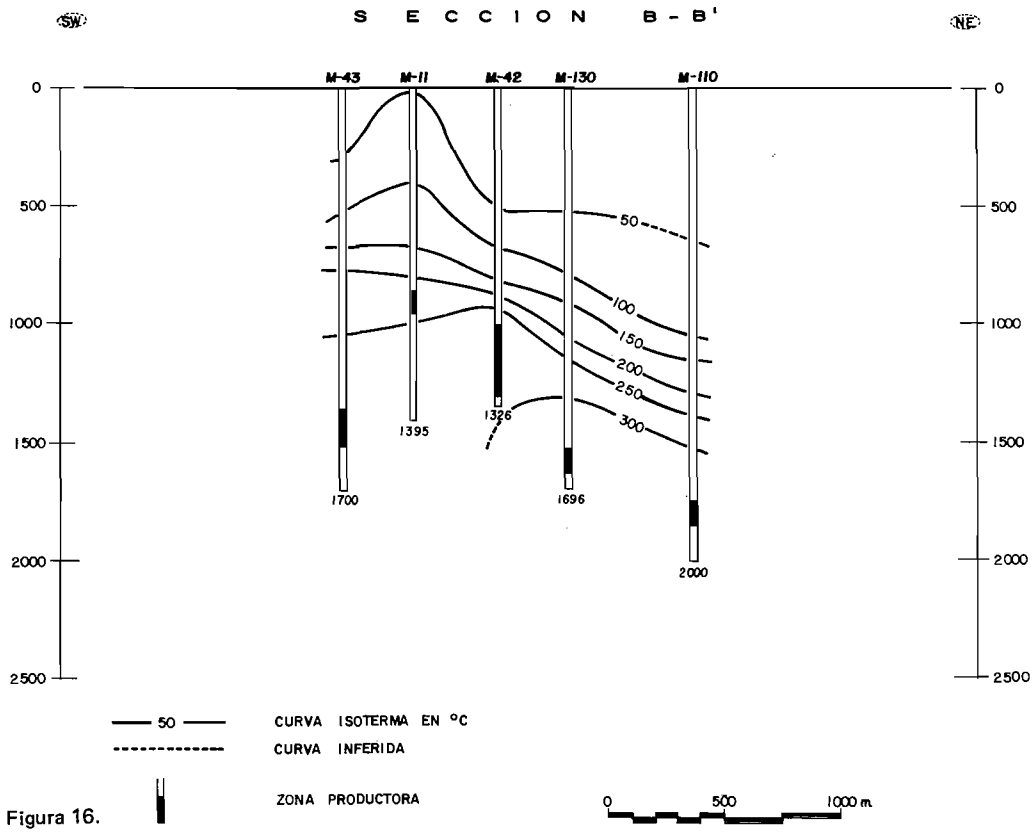


Figura 16.

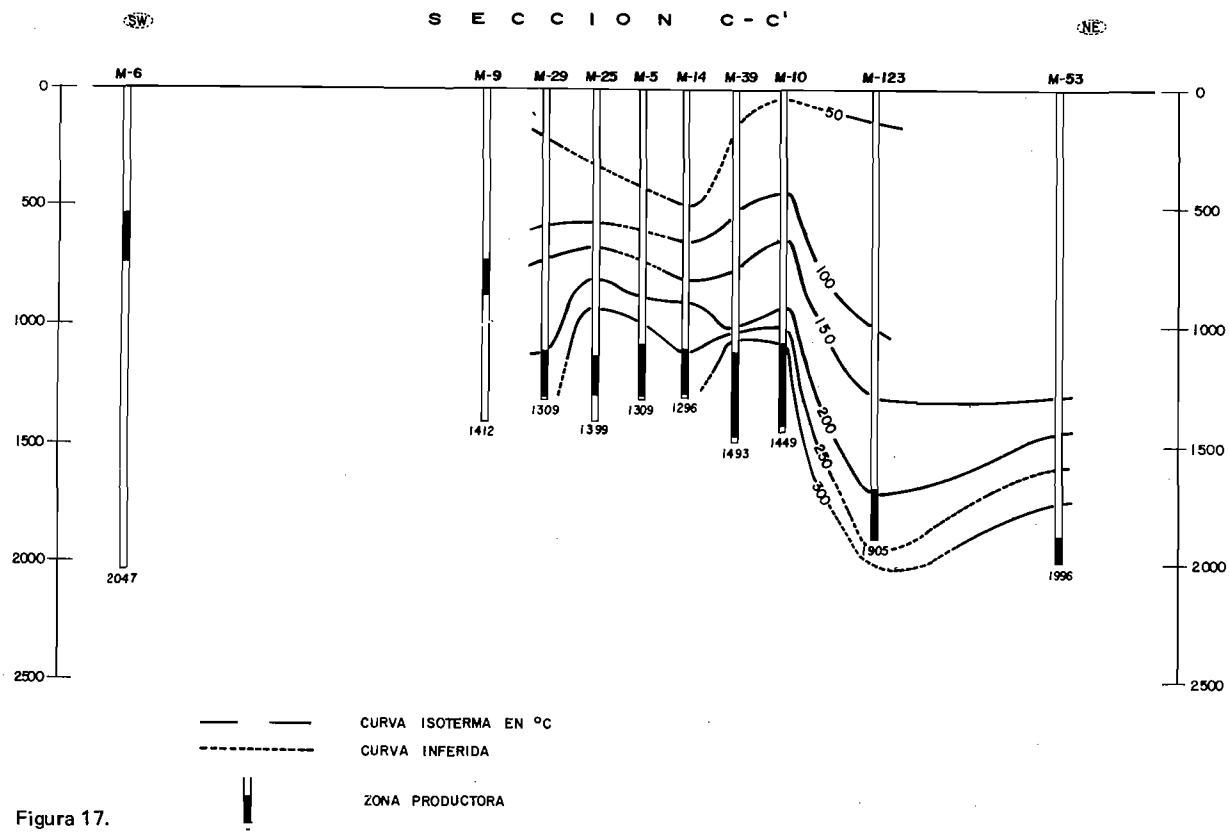


Figura 17.

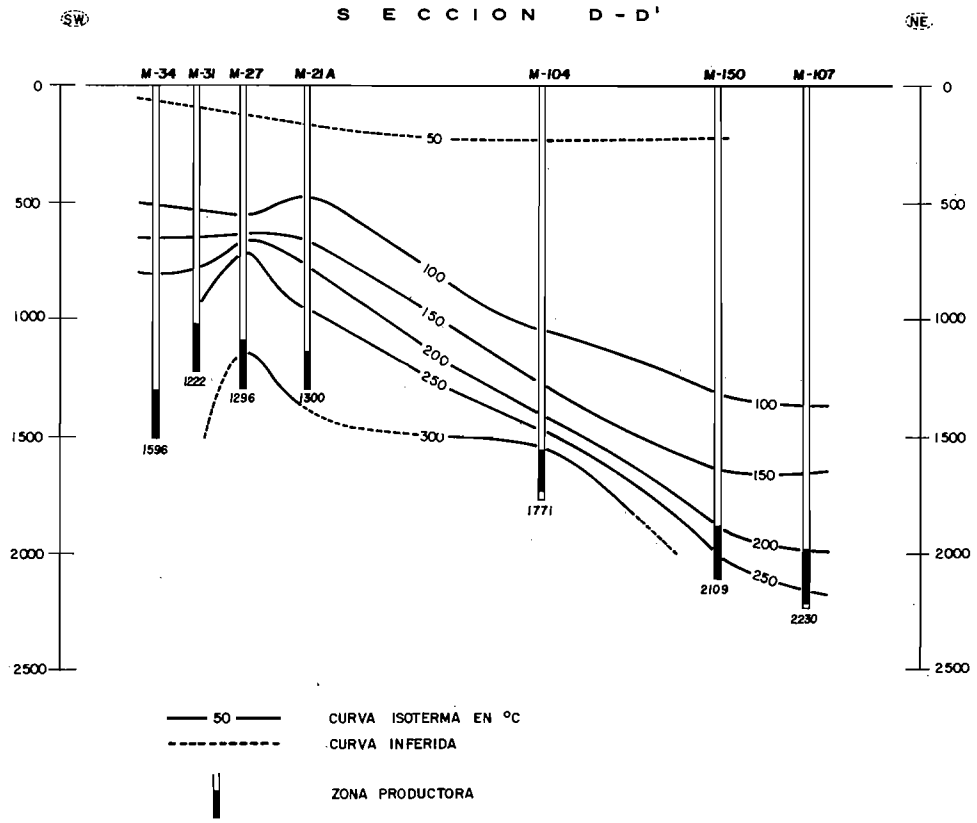


Figura 18.

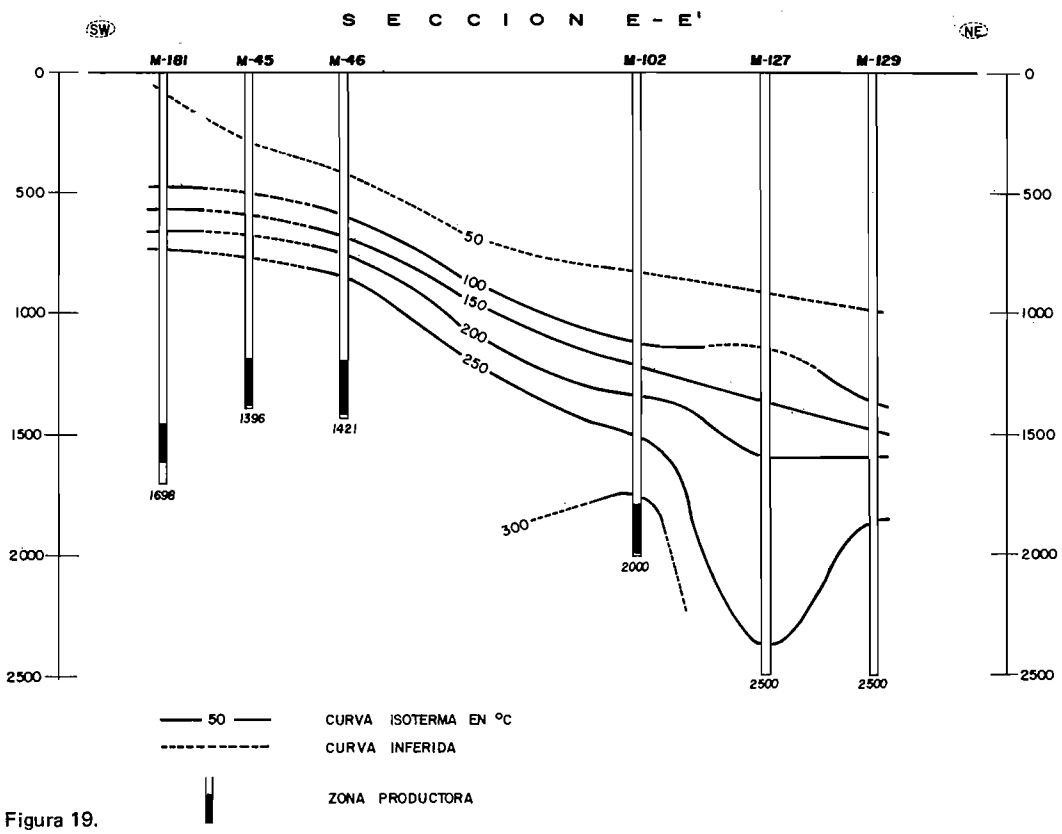


Figura 19.

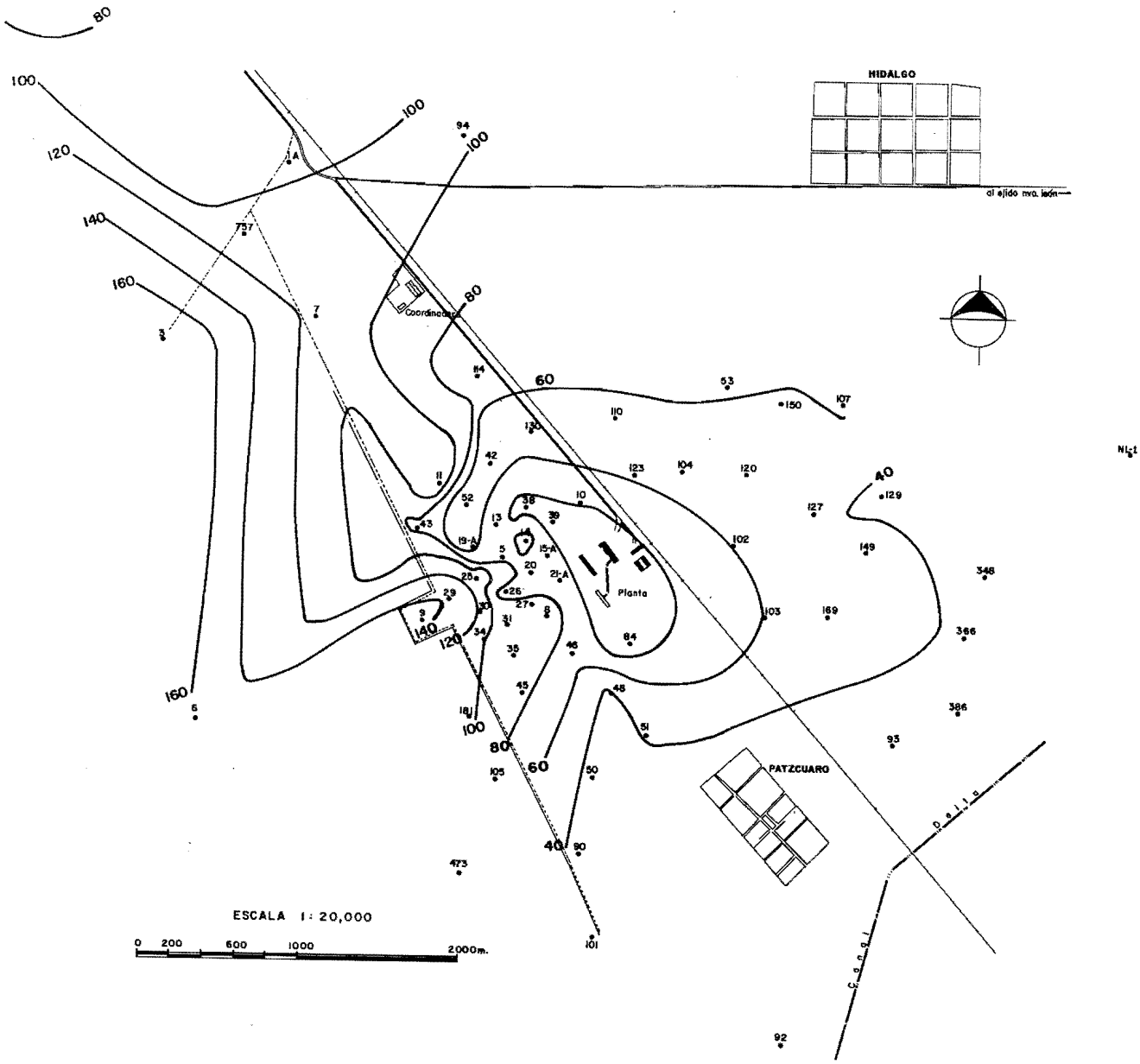


Figura 20. Isotermas a 500 m de profundidad (°C).

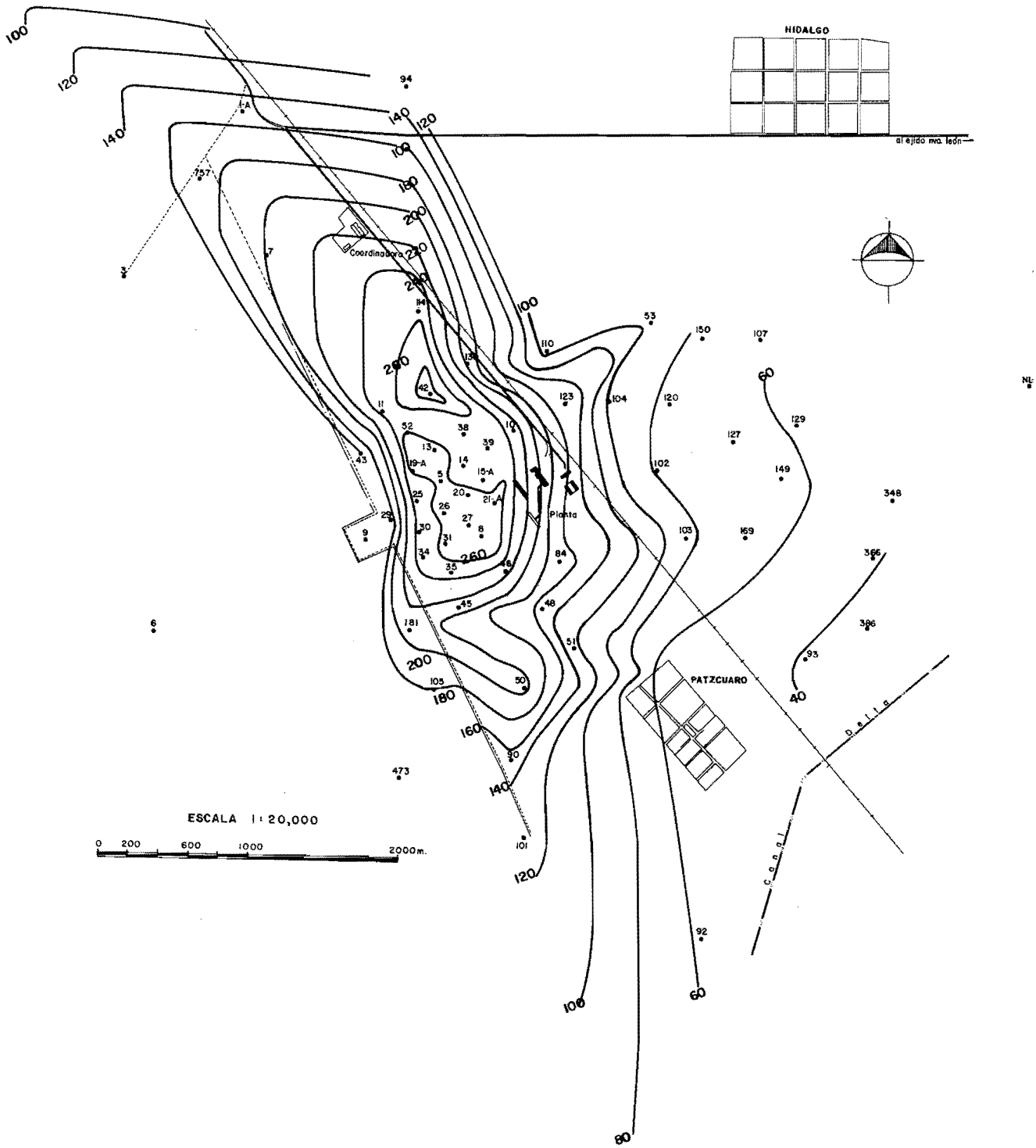


Figura 21. Isotermas a 1000 m de profundidad (°C).

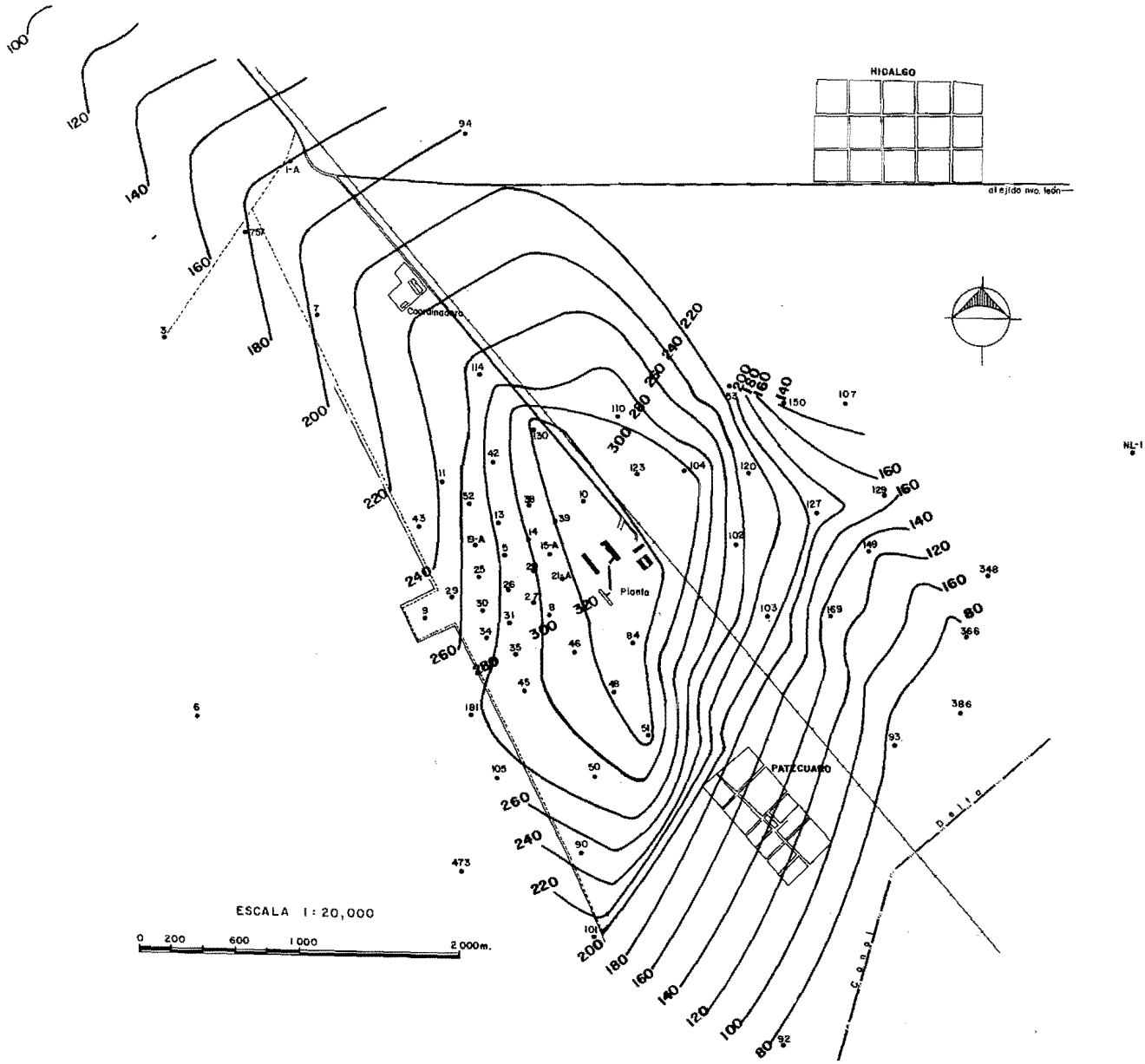


Figura 22. Isotermas a 1500 m de profundidad (°C).

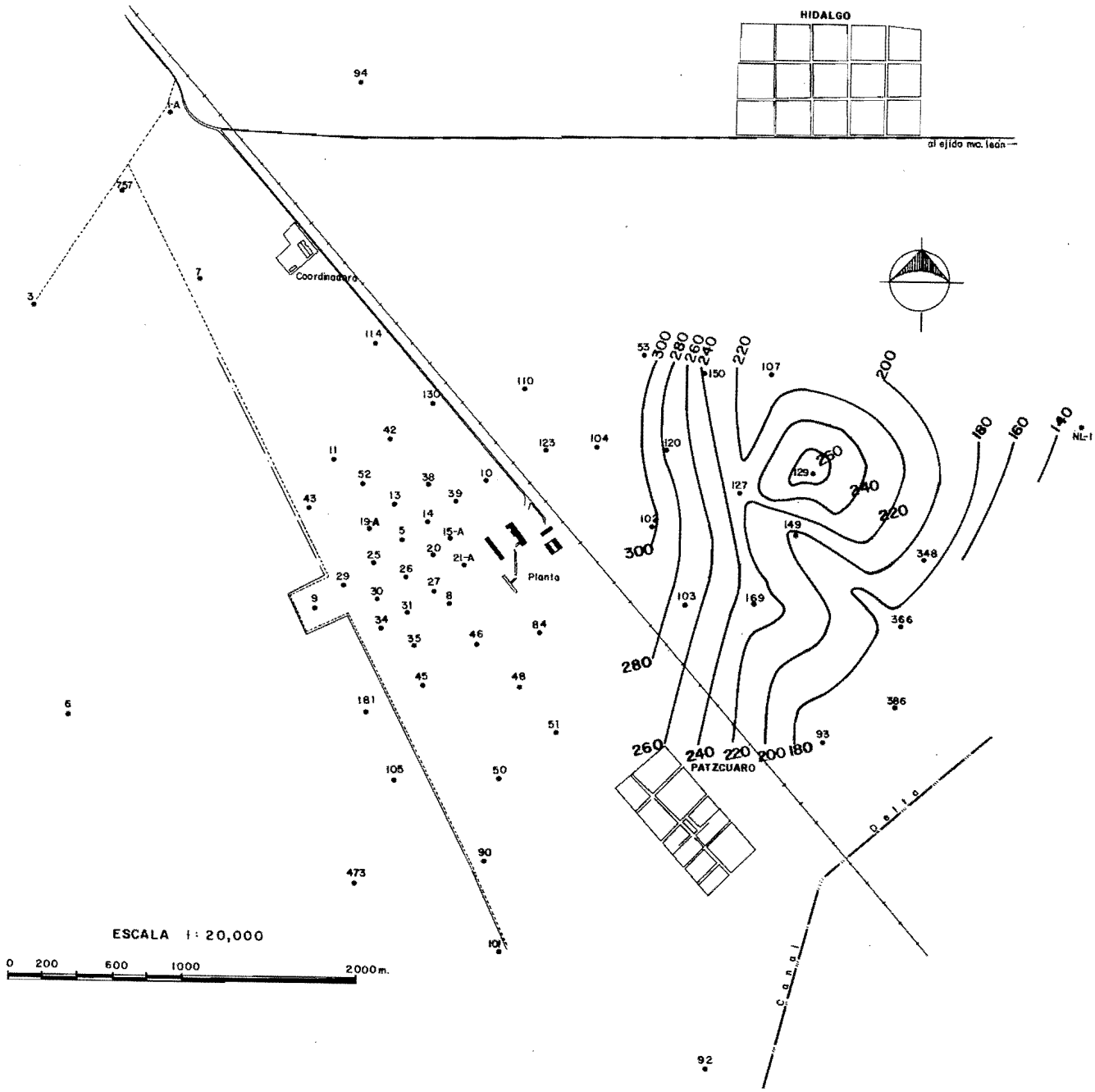


Figura 23. Isotermas a 2000 m de profundidad (°C).

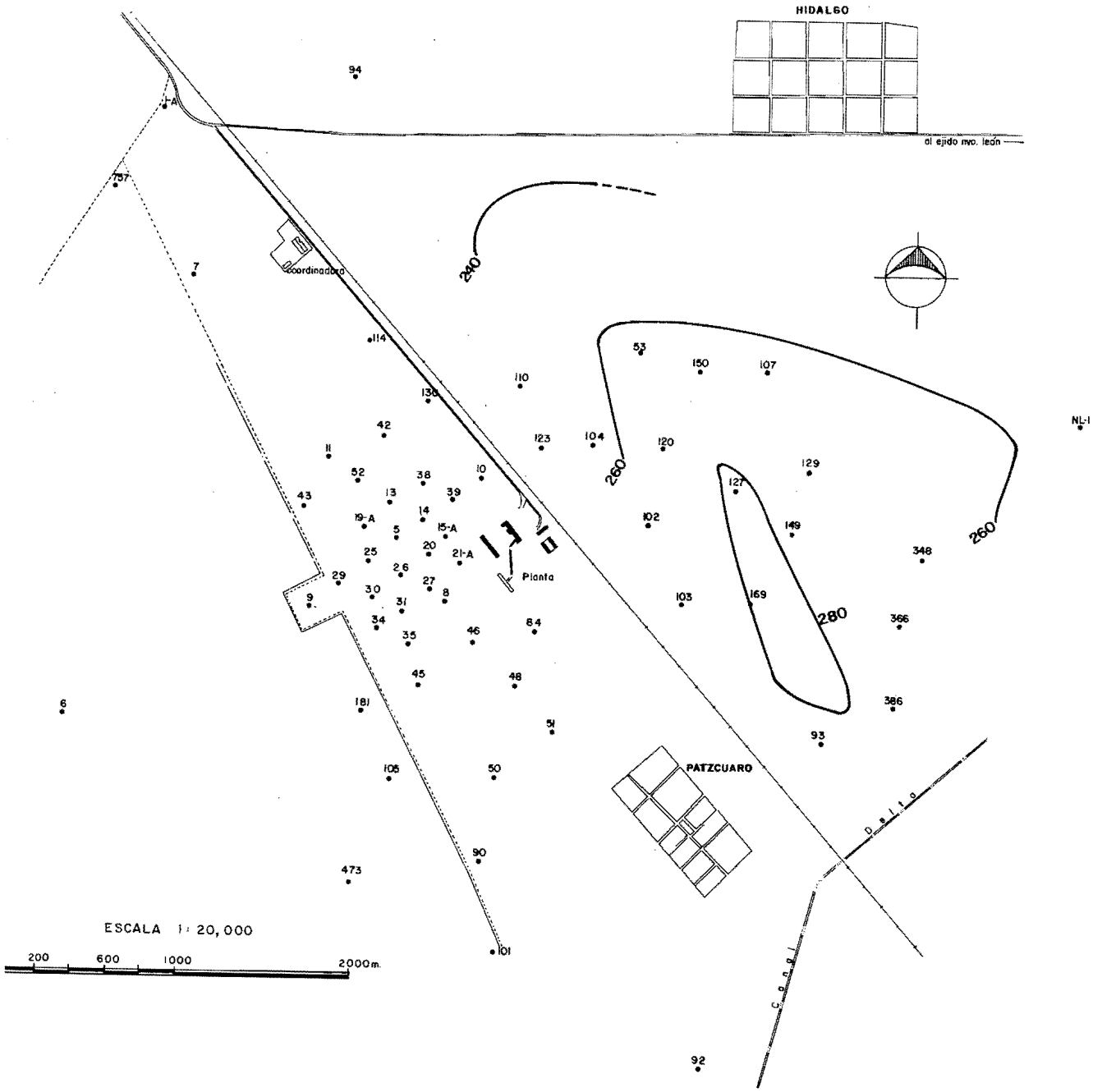


Figura 24. Isotermas a 2500 m de profundidad (°C).

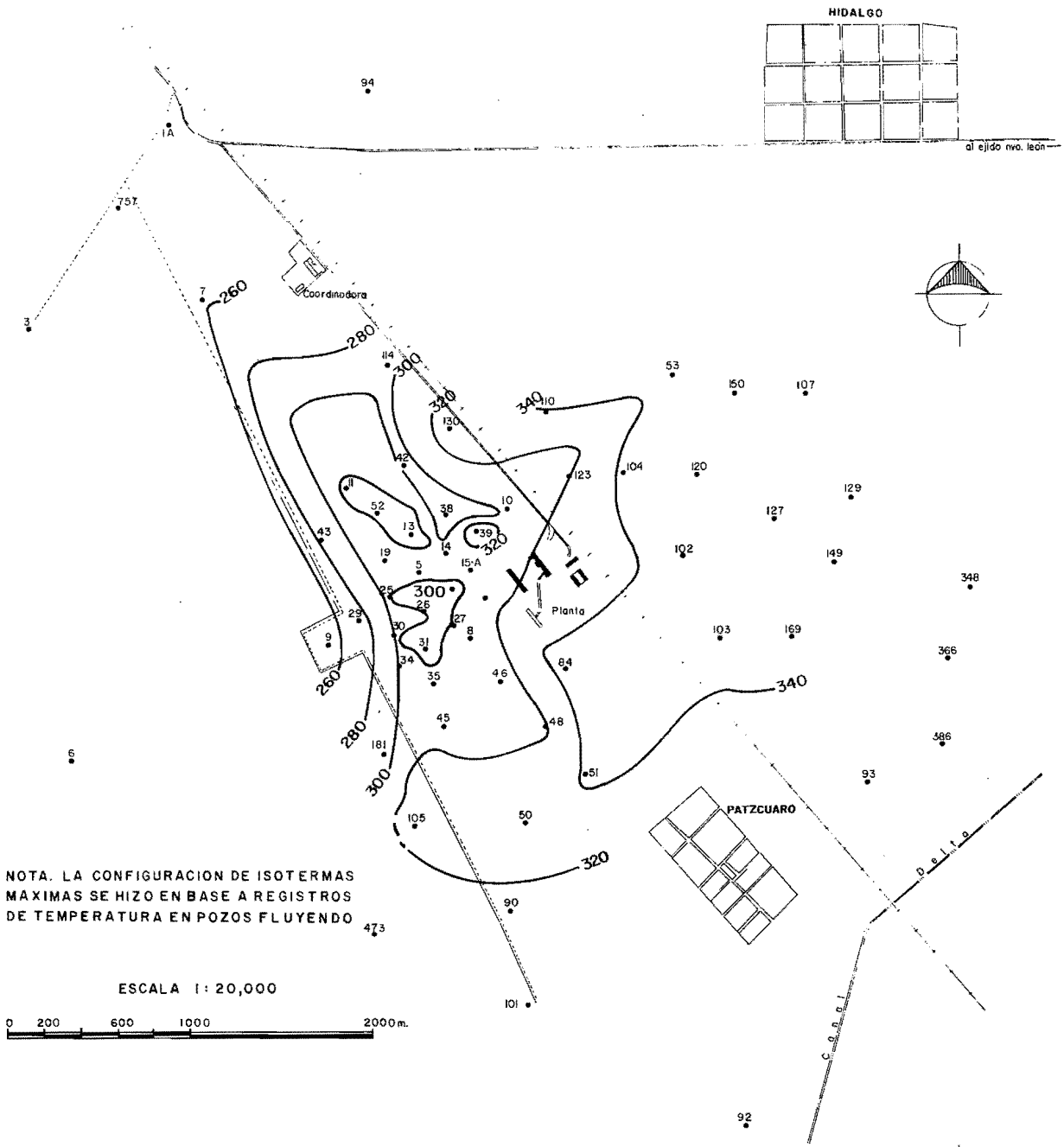


Figura 25. Isotermas máximas (°C).

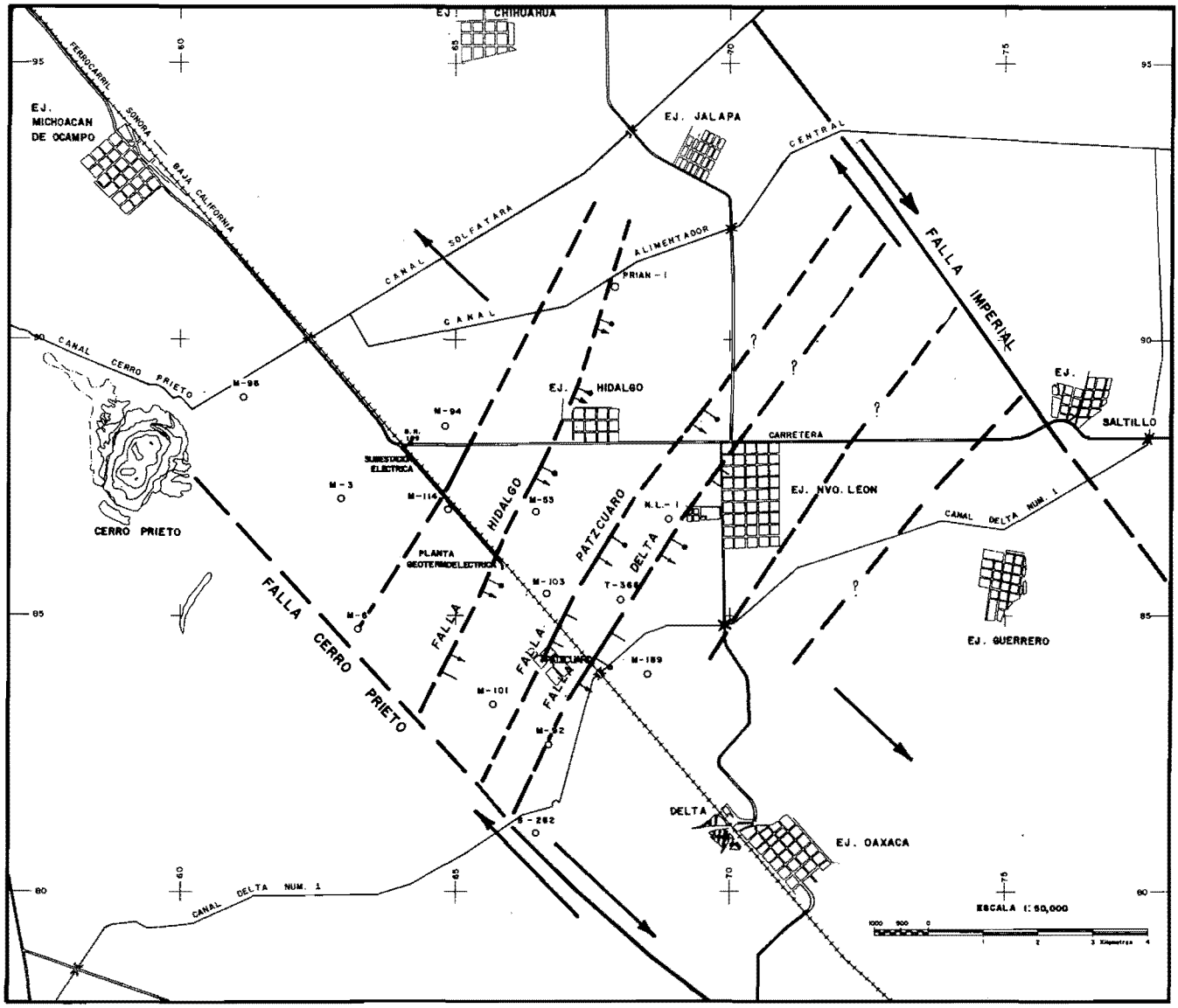

EJ. CHIHUAHUA
EJ. MICHOACAN DE OCAMPO
FERROCARRIL SONORA BAJA CALIFORNIA
EJ. JALAPA
CENTRAL
CANAL SOLFATARA
ALIMENTADOR
PRIAN - I
CANAL
FALLA IMPERIAL
CANAL CERRO PRIETO
M-96
M-94
EJ. HIDALGO
EJ.
SALTILLO
CARRETERA
SUBESTACION ELECTRICA
M-3
M-114
M-53
N.L.-1
EJ. NVO. LEON
CANAL DELTA NUM. 1
CERRO PRIETO
PLANTA GEOTERMOELECTRICA
M-103
T-366
FALLA HIDALGO
FALLA PATZCUARO
DELTA
FALLA CERRO PRIETO
M-6
M-189
EJ. GUERRERO
M-101
M-52
DELTA
S-262
EJ. OAXACA
CANAL DELTA NUM. 1
ESCALA 1:50,000

Figura 26.

GEOLOGIC MODEL OF THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD

ABSTRACT

Based on several recent geological, geophysical, geochemical and petrographical studies, and information obtained from the wells completed to date, slight modifications were made to the geologic model presented during the First Symposium held in San Diego, California.

Basically, we have used the same model showing three lithostratigraphic units: Unit A, formed by unconsolidated sediments; Unit B, consisting of consolidated and metamorphosed sediments; and Unit C which corresponds to the granitic and/or metamorphic basement. These units are broken up by two main fault systems: the Cerro Prieto system striking northwest-southeast, and the Volcano system trending northeast-southwest.

Discussed here are the changes and additions made to the original model. These essentially focus on the origin of the different lithostratigraphic units, as well as their alteration due to geochemical (hydrothermal) processes.

Also, based on the tectonic mechanism of the transform faults of this part of the Baja California Peninsula, a possible extension of the present zone of production towards the northeast is discussed.

INTRODUCTION

LOCATION

The Cerro Prieto geothermal field is located 28.6 km southeast of the city of Mexicali, between the meridians of 114°40′ and 115°33′ longitude west of Greenwich and between the parallels 31°55′ and 32°44′ north latitude, on the deltaic plain of the Colorado River (Fig. 1). The Cerro Prieto volcano, reaching 225 m a.s.l., is located 6 km northwest of the production field.

GENERAL SURFACE GEOLOGY

The production field is restricted to those areas formed by the valley fill in the vicinity of igneous bodies, both of intrusive (Sierra de los Cucapá) and extrusive (Cerro Prieto volcano) origin (Figs. 2 and 3).

PREBATHOLITIC ROCKS

These are represented by metasedimentary rocks: limestones, sandstones and conglomerates (Hirsch 1926, Bernard 1968; Gastil 1975) and metamorphics: marble, gneiss and schists (McEldowney 1970; Gastil 1975), of Mesozoic age and in some cases probably Paleozoic (Metasedimentary Belt). These rocks occur in the western and southeastern parts of the Sierra de los Cucapá.

BATHOLITIC ROCKS

Near the Cerro Prieto geothermal field these rocks form the greater part of the Sierra de los Cucapá and Sierra del Mayor. They are of granitic and tonalitic type: their measured age varies between 119 and 120 m.y. (Silver and Bank 1969, Gastil 1975).

POST - BATHOLITIC VOLCANIC AND SEDIMENTARY ROCKS

The volcanic rocks are mainly Miocene-Pliocene andesites, rhyolites and dacites (Krummenacher *et al.* 1969, Mc Eldowney 1970, Gastil 1975). They occur only in the Sierra Pinta, 75 km southwest of the geothermal field. The Cerro Prieto volcano is formed mainly by Pleistocene-Holocene rhyodacitic rocks (Barnard 1968, Elders and Robinson 1971, Gastil 1975).

The deltaic sediments of continental origin of the Mexicali and Imperial Valleys appear east of the Sierra de los Cucapá, Sierra del Mayor and Cerro del Centinela. To the east they extend as far as the Desierto de Altar. Towards the north and northeast they form the Imperial Valley and East Mesa, in the United States of America. To the south they are bound by the Gulf of California, or Sea of Cortéz. West of the Cerro Prieto geothermal field these sediments are interlayered with the alluvial deposits from the Sierra de los Cucapá.

REGIONAL TECTONICS

A number of studies have been made to determine the drift of the various blocks which form the Pacific Plate as they move towards the northwest because of the barrier represented by the Continental Plate. These displacements and collisions between tectonic blocks generate transform fault systems, creating spreading centers which generally show volcanic activity, earthquake swarms, oceanic depressions and hydrothermal activity (Figs. 4 and 5). The Cerro Prieto field is located in one of these spreading centers (Lommitz 1970, Elders 1972) produced by the right-lateral movement of the Imperial

and Cerro Prieto faults (Reyes 1979). These strike-slip movements have created the secondary Volcano fault system which in general strikes northeast-southwest, perpendicular to the main northwest-southeast fault systems, with down-throws to the northwest as well as to the southeast (I. Puente and de la Peña 1979).

GEOSTRUCTURAL BEHAVIOR OF LITHOLOGIC UNITS A, B AND C.

In order to define the structural behavior of Units A, B and C (U-A, U-B and U-C), we analyzed the results of the following studies and surveys: reflection, refraction, passive seismic, gravimetry, magnetics, seismic monitoring, geophysical well logs, lithologic analysis of rock samples, paleontology, petrography and geohydrology.

Based on this data a preliminary geologic model of the field was developed which presents three lithologic units: U-A, U-B and U-C (Fig. 6). This model has been modified as new information became available.

UNIT A

This unit is composed of unconsolidated sediments: clays, silts, sands and gravels. Its lower horizons are partially consolidated and consist of coffee-colored mudstones, shales and siltstones. It was established (L. M. Thorton 1979) that this unit as well as Unit B were deposited in a deltaic environment of lagoonal or estuarine type. This resulted in the deposition of clay layers which at the present time act as caprock preventing the geothermal fluids to flow to the surface. Among the clay layers there are isolated bodies and horizons of sand and gravel which can store the waters which infiltrate from the Colorado River and from the scarce rains occurring in the region. These permeable bodies present the shallow aquifers which acting as a hydrostatic load, stop, to some extent, the upward flow of hot fluids to the surface. At the same time they recharge the hot water aquifers of Unit B. To verify this and to determine the behavior of the cold water aquifers of Unit A, two or three piezometric wells, about 1000 m deep, are planned for 1980 in the Cerro Prieto II area.

UNIT B

This unit consists of consolidated sediments (i.e. sandstones, siltstones, shales, slates and claystones) which have been modified by such factors as regional metamorphic geochemical (hydrothermal) alteration (Elders, Hoaglands and McDowell 1979), and compaction as they were deposited in the basins formed by the tectonism of the area. The estimated thickness of sediments in these basins is of the order of 3500 to 5500 m.

As in Unit A, the horizontal and vertical distribution of the layers is highly erratic because of their intense faulting and fracturing resulting from constant tectonic movements, and different metamorphic processes which have changed, to a certain extent, their original structure.

The only difference between Units A and B is their present state of consolidation. Petrographical (Elders 1979), petrological and paleontological studies made to date established no other difference between these units.

UNIT C

Section C-C' (Fig. 7) shows an example of lithofacies correlation between wells M-6 and M-53. It was prepared based on percentages of sand and gravel (U-A) and/or sandstone (U-B), and of clay (U-C) and/or shales and claystones (U-B) in the drill cuttings. This example could be considered as a "coarse" one when compared with the correlations made using geophysical well logs (Abril 1978, Prian 1978 and 1979, Noble 1979). However it gives us a general idea of how difficult it is to make this type of correlations since there are no marker layers which could indicate how close they are to reality, in order to improve them. It is important to note that the analyses made of the rock samples obtained from all the wells, as well as the correlations made using wireline logs (Abril 1978 and 1979) and lithology (I. Puente and de la Peña 1978, Vonder Haar and Howard 1979) have not been able to establish that a large paleochannel (Prian 1978) is the structure storing the geothermal fluids. It is evident that the deltaic sediments are mainly of lagoonal and estuarine origin (Thorton 1979); generally these zones are crossed by a system of shallow channels flowing towards the coast. The most concrete evidence is the presence of shale layers whose thicknesses vary between 1 mm to 15 m; the thinnest beds look like varved sediments. The color of these sediments varies between light and dark grey. Isolated bodies of sandstones and shales, up to 50 m thick, are distributed erratically (Abril 1978). They are 100% clean, and generally have no horizontal continuity since they tend to wedge out because of:

a) the constant tectonic fluctuations in the region, which resulted in the burial of the sediments before the depositional environment could strongly influence the composition and geometry of the sediments already deposited.

b) the régime of sediment supply which by itself reflects the tectonic activity in the region. This activity caused an almost continuous advance or retreat of the lagoons marine and fluvial boundaries, resulting in very complex and erratic sedimentation cycles.

Based on its position at depth a preliminary structural interpretation of Unit B was made in 1979 (I. Puente and de la Peña 1978). This was achieved using the

results available at the time of geophysical surveys and of analysis of rock samples gathered from the wells.

The difference between this and the previous structural study is that in this case only the large differences in level (depth) were considered; the differences smaller than 100 m were ignored. Five northwest-southeast sections (1-1', 2-2', 3-3', 4-4', and 5-5') were prepared across the main structures of the Volcano fault system. Also, five southwest-northeast cross sections (B-B', C-C', D-D', E-E', and F-F') were developed to defect the faults of the Cerro Prieto system (Fig. 8). Three main faults of the Volcano system (Delta, Pátzcuaro and Hidalgo) were determined and the location, previously believed to be near the railroad tracks, of the Cerro Prieto fault (Fig. 8) was changed based on: 1) the depth differences of Unit B shown in the correlations between wells, 2) the evidences of fault planes in the well cuttings, and 3) the results of recent seismic reflection studies (Fonseca 1979).

The analysis and correlation of temperature well logs, as discussed by Bermejo (1979) is another possible way to find areas of structural weakness. The zones of high temperature should appear in areas where the geologic structures are faulted. Based on this, a number of faults were determined; some agreed with those established by other geological and geophysical methods.

In Figure 10 the geologic sections 2-2, 3-3, 4-4, and 5-5, are analyzed using a reference line to determine the position of the faults of the Volcano system. This figure clearly shows the displacements of Unit B, reaching up to 800 m at the Pátzcuaro fault. The traces of the Pátzcuaro and Hidalgo faults are warped towards the northeast. In sections B-B', C-C', D-D', E-E', and F-F' (Figs. 11, 12, 13, 14, and 15), perpendicular to the ones discussed above, the Pátzcuaro and Hidalgo faults of the Volcano system were observed, no other important faults were detected.

A preliminary configuration map of the top of Unit B (Fig. 9) was prepared, especially for locating and designing the completion of exploration and production wells, and to determine the behavior of the consolidated and metamorphosed sediments. This map shows that in the production area for power plant Cerro Prieto I the top of Unit B is at an average depth of 700 m; towards the south-southeast and north-northeast of the plant the top is at greater depths, reaching about 2100 m at well NL-1. West, southwest and northwest of Cerro Prieto, where there are surface hydrothermal manifestations, the contact between Units A and B disappears (wells M-3, M-6, M-96, and S-262). The cutting samples obtained from these wells show an abundance of gravels, sands and sandstones, and very few thin layers of clays and shales. This characteristic seems to indicate that this northwest-southeast trending zone corresponds to a delta front zone (Noble 1979) where probably diastrophic tectonic movements were dominant, resulting in the deposition of large percentages of coarse sediments.

About 2 km away from well 0-473 and west of the Laguna Volcano the contact between Units A and B again seems to show the same conditions. The seismic refraction data (Calderón 1962) indicate for the top of Unit B velocities between 3000 and 3700 m/sec (Lines 2 and 3). These are equal to those obtained for the Cerro Prieto II area (wells M-53, M-93, NL-1, etc.) (I. Puente and de la Peña 1978). Also, the seismic reflection surveys along lines D, E and F (Fonseca 1979) confirm the presence of a formation of stratified rocks; however their composition and origin are yet unknown. In this area an exploration well about 1500 m deep is planned for 1981.

ISOTHERMS

To determine in the Cerro Prieto field the relation between the main geologic structures and the high temperature zones, a number of cross sections indicating temperature contours were developed based on temperature well log data. A comparison with geologic cross sections show that the shape of the isotherms correspond rather well with that of the structures in the field. The high temperature zones are found at shallow depths in areas where the layers of Unit B are near to the surface. These zones become deeper and hotter (especially near the Pátzcuaro fault) as the layers of Unit B are found at increasing depths.

To determine the location of the thermal source or sources heating the aquifers of the field, isotherms maps at 500, 1000, 1500, 2000 and 2500 m depths (Figs. 20, 21, 22, 23 and 24), and a configuration map of the maximum isotherms (Fig. 25) were developed, based on temperature logs obtained in flowing wells.

In the 500 m depth-isotherms map the maximum temperature of 160°C is located in the area between wells M-6 and M-3. At deeper levels (isotherms maps at 1000, 1500, 2000 and 2500 m depth) the temperature contours shift towards the northeast. On the other hand, the configuration of the maximum temperature map shows the 340°C isotherm open towards the same direction. This seems to indicate that the thermal source or sources recharging the field could be located somewhere between the Cerro Prieto and the Imperial faults, northeast of the production field.

CONCLUSIONS

The Cerro Prieto field is located in a spreading center created by the right-lateral movement of the northwest-

southeast striking Cerro Prieto and Imperial transform faults, belonging to the San Andreas system (Fig. 26). The relative movements of these faults produced a northeast-southwest system, essentially perpendicular to the first one, which we called the Volcano fault system. The faults of this system are tension faults, therefore open. Thus it is possible —it has not been proven yet— that heat rises through these faults, heating the water stored in the aquifer(s) of the Cerro Prieto field.

Even though the faulting in spreading center areas is complex and difficult to determine, using data from various geological and geophysical studies we have detected three main faults of the Volcano system (Delta, Pátzcuaro and Hidalgo faults) along which we infer that thermal energy is rising into the field.

Based on the results of studies mentioned above and data from completed wells, tentatively we have established the following boundaries of the Cerro Prieto geothermal field: 1) to the southwest, the Cerro Prieto fault; 2) to the northwest, the area passing through wells M-3, M-94 and about 1 km southeast of well Prian; 3) to the southeast, the zone which includes wells S-262, M-92 and M-189; and 4) to the northeast presently there are no evidences where the boundary is located.

FIGURE CAPTIONS

Figure 1. Principal routes leading to the Cerro Prieto geothermal field.
Figure 9. Configuration map of the top of Unit B.
Figure 20. Isotherms at 500 m depth.
Figure 21. Isotherms at 1000 m depth.
Figure 22. Isotherms at 1500 m depth.
Figure 23. Isotherms at 2000 m depth.
Figure 24. Isotherms at 2500 m depth.
Figure 25. Maximum isotherms.