PROPUESTA DE UN MODELO GEOLOGICO EN FUNCION DE REGISTROS GEOFISICOS DE POZOS

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

RESUMEN

Una investigación del subsuelo fue llevada a cabo en el campo geotérmico de Cerro Prieto para obtener información valiosa de la distribución a profundidad de las diferentes litofacies que comprenden un sistema de depositación deltáica, utilizando la interpretación cualitativa de los registros geofísicos de pozos. La interpretación sedimentológica de los registros de resistividad y potencial espontáneo se muestran en varios perfiles que cruzan el campo. Este trabajo, considerado de detalle, será de gran ayuda para el conocimiento de la localización de zonas permeables e impermeables a profundidad, así como los posibles caminos para el flujo de fluidos subterráneos. Además de la interpretación sedimentológica, se elaboró un plano de geología estructural usando los registros de pozos e información geofísica disponible del área, incluyendo los levantamientos gravimétricos y de sísmica de refracción.

Mediante la ayuda de los registros de temperatura, eléctricos y radioactivos, fue posible localizar la profundidad de la zona de alteración hidrotermal de los sedimentos descrita por Elders, 1978, y se elaboraron dos planos de configuración de la cima de esta anomalía proporcionando una clara correlación con las anomalías geofísicas de gravimetría.

Por otra parte, hay que resaltar que este trabajo es la continuación del método de estudio de Lyons y Van de Kamp, 1980, con el fín de proponer un modelo geológico final para ser utilizado dentro de los planes de expansión del campo, así como para la simulación matemática de yacimientos y proyectos de reinyección.

INTRODUCCION

La exploración y explotación del campo de Cerro Prieto han dado como resultado una vasta acumulación de datos de diversas índoles, tales como: geológicos, geofísicos, geoquímicos e informaciones sobre las propiedades físicas y químicas del yacimiento geotérmico.

De toda esta colección de datos, se utilizaron principalmente los estudios geológicos, geofísicos y registros geofísicos de pozos para plantear una propuesta de un modelo geológico del campo y comparar los resultados obtenidos en los estudios de gravimetría con la información interpretada de los registros geofísicos de los pozos.Como consecuencia de lo anterior, se logró una mejor comprensión en las relaciones existentes en la depositación deltáica, su comportamiento estructural y la distribución de zonas de alteración hidrotermal del campo.

FACIES LITOLOGICAS

El campo geotérmico de Cerro Prieto se encuentra localizado sobre el límite suroeste del Delta del Río Colorado en el Valle de Mexicali; el cual a su vez, es parte de la Cuenca del Salton (Fig. No. 1). Esta depresión estructural está caracterizada por una abundante actividad sísmica a lo largo de los sistemas de fallas Cerro Prieto y Volcano principalmente (Albores et, al, 1978) y por deformaciones verticales en la superficie terrestre (Lofgren, 1978), dando como resultado un efecto combinado de fracturamiento y desplazamiento sobre los sedimentos que rellenan la cuenca. La profundidad de la cuenca ha sido estimada por medio de estudios geofísicos regionales de sismología de refracción y gravimétricos, sugiriendo una máxima profundidad de 6.4 Km., en un punto localizado justo al sur de la Frontera Internacional (Biehler,et al., 1964). Este gran paquete sedimentario fue formado principalmente por sedimentos transportados por las corrientes divagantes del Río Colorado, el cual ha estado descargando sedimentos desde hace varios millones de años en dicha cuenca. Ademas de la depositación deltáica, esta zona ha sido afectada por constantes basculamientos de basamento, provocados por esfuerzos tectónicos dinámicos que han fracturado intensamente esta región.

Desde el punto de vista estratigráfico se conoce que cualquier río, al desembocar en un cuerpo de agua relativamente estable, forma un ambiente deposicional conocido como "Sistema Deltáico". La depositación de los sedimentos que transporta el río, está caracterizad por sedimentos con gran diversidad de tamaño de granos, en donde es posible diferenciar sub-ambientes deposicionales tales como; Planicie Deltaica (que incluye canales distributarios, pantanos, planicie de inundación, etc.); Frente Deltáico (barra de desembocadura de canal, frente distal y arenas marginales) y el Pro-Delta. De estos sub-ambientes o facies el de Frente Deltáico y Planicie Deltáica son los que contienen sedimentos relativamente gruesos. (De la Peña y Verdugo, 1979) (Fig. No. 2).

Una de las aplicaciones más importantes de la interpretación cualitativa de los registros eléctricos, radica en conocer la distribución de unidades litológicas a profundidad mediante la forma de la curva del potencial espontáneo (SP), de cada uno de estos sub-ambientes o litofacies en estudios sedimentológicos. De acuerdo con

Pirson (1970), existe una clase de delta denominado delta arqueado de energía intermedia, en el cual la carga de sedimentos es transportada por canales fluviales (A) y tienen la característica de que a medida de que el delta crece, este canal tiende a apilarse con nuevas cargas de sedimentos del río, dando como resultado, desde el punto de vista eléctrico, una ausencia o inversión en la respuesta del SP debido a la presencia de agua dulce en esta litofacie, junto con un incremento de resistividad. Las facies de Planicie Deltáica están caracterizadas por depósitos de agua salada que proporcionan buenas desviaciones en la curva del SP en los canales distributarios (B1) y en depósitos de sedimentos gruesos interdistributarios (B2), los cuales son producidos por fisuras a lo largo de los bordes de los canales. Además se presentan sedimentos finos, tales como limos y arcillas en este sub-ambiente en la planicie de inundación, pantanos, lagos y lagunas. La mayor parte de las arenas se desarrollan en la litofacie de frente de Delta entre las que se encuentran grupos de arenas distributarias de boca (C1), Frente de Delta intermedio (C2), Frente de Delta distante (C3), Márgenes Marinos de Delta (C4) y la litofacie Pro-Delta (D). En base a lo anterior, Lyons y Van de Kamp (1980), clasificaron las litofacies encontradas en los registros eléctricos de los pozos del campo de Cerro Prieto (Fig. No. 3), mediante las formas de las curvas del potencial (SP) y resistividad de la siguiente manera:

LITOFACIE I

Está caracterizada por arenas predominantemente, con unidades de arenas muy gruesas, comúnmente mayores de 46m (150 ft), separadas por capas de lutitas delgadas menores de 3m (10 ft). Esta litofacie sugiere canales apilados o posibles depósitos eólicos.

LITOFACIE II

Consiste de cuerpos de arenas principalmente con espesores de hasta 15m (50 ft) o mayores, y capas o cuerpos de lutitas de hasta 6 a 9m (20-30 ft). La forma de la curva del SP en las arenas más gruesas es comúnmente con bases agudas, lo que sugiere canales distributarios mientras que las arenas más delgadas pueden representar ya sea arenas de desborde de canal distributario en la Planicie Deltáica o arenas de Frente Deltáico.

LITOFACIE III

Está caracterizada por proporciones similares de areniscas y lutitas, aunque la arena puede ser dominante en algunos casos. Los cuerpos de arenas más gruesas son de 6 a 9m (20-30 ft) de espesor y tienen bases transicionales. Estas características y su asociación con arenas delgadas, limolítas y lutitas sugieren un medio ambiente de Frente Deltáico. Sin embargo, algunas de estas facies litológicas pueden representar depósitos de arenas de desborde de canal distributario sobre la Planicie Deltáica.

LITOFACIE IV

Consiste de porcentajes similares de areniscas y lutitas, pero las arenas son más delgadas que 3m (10ft). Esta litofacie puede representar ya sea depósitos distantes de desborde de canal distributarios sobre la Planicie Deltáica o depósitos de Frente de Delta distante de "baja energía"

LITOFACIE V

Consiste de limolítas y lutitas predominantemente y pueden representar diversos medios ambientes tales como: Planicie de Inundación Deltáica, Laguna Costera o Pro-Delta.

Con el fín de ilustrar las relaciones estratigráficas de las litofacies en los pozos, se elaboraron cuatro perfiles que cruzan el campo de Cerro Prieto, incluyendo el área vieja de producción (Cerro Prieto I), así como la región nueva que se está desarrollando actualmente (Cerro Prieto II y III).

Posteriormente a la clasificación de cada una de las litofacies encontradas en los pozos, se procedió con la correlación de éstas y de esta manera se hicieron evidentes varios aspectos relevantes en los perfiles (Figs. 4, 5, 6 y 7). Entre éstos cabe destacar que en la totalidad de los perfiles se presenta una depositación casi horizontal en la parte somera de las secciones indicando un período de calma en la descarga de sedimentos y así como fuertes desplazamientos entre los contactos, debido a los efectos del sistema de fallas que afectan la región. Estas características se presentan invariablemente en todos los perfiles, demostrando la complejidad existente en la interpretación de este tipo de sedimentación. Así mismo, cabe hacer resaltar la distribución tan característica que presentan las zonas que están abiertas a producción de los pozos, sugiriendo una estructura dómica a lo largo de los perfiles. Posteriormente se demostrará que esta misma estructura dómica se observa en la información proveniente de los registros geofísicos de pozos.

III.- GEOLOGIA ESTRUCTURAL

Tectónicamente, el campo se localiza en uno de los ramales del sistema sureste de fallas denominadas San Andrés, siendo las fallas principales que gobiernan en esta zona las de Cerro Prieto e Imperial, de rumbo predominante NW-SE. Estas fallas son las que forman el complejo tectónico del tipo transforme, que ha dado origen a la formación del campo geotérmico, depresiones topográficas profundas y la constante evidencia de movimientos telúricos. La consecuencia directa de la actividad de fallas transformadas, se presenta como un intenso fracturamiento entre el sistema fallas paralelo a las fallas principales de rumbo con otro sistema de fallas oblicuo de carácter normal.

Estos sistemas de fallas se han denominado sistema Cerro Prieto y Volcano y son considerados como fronteras impermeables al flujo de fluidos las fallas de rumbo (Cerro Prieto) y como fallas

conductoras de fluidos, las fallas de tipo normal que forman estructuras en echelón de horts y grabens.

En base a la correlación de registros geofísicos de pozos y al levantamiento de sismología de refracción de Calderón (1972) fue posible elaborar un plano estructural del campo (Fig. No. 8), en el cual se presentan los dos sistemas de fallas ya conocidos, así como un sistema nuevo predominantemente N-S de fallas normales.

Al analizar los perfiles, se encontraron dos tipos de fallas ya reportadas por otros autores (Lyons and Van de Kamp, 1980), que afectan la posición de los sedimentos en distinta manera que son: las fallas jóvenes que alteran la totalidad de la columna de sedimentos y las fallas viejas que solamente han afectado la parte más profunda de los pozos.

IV.- ZONA DE ALTERACION HIDROTERMAL

De acuerdo con Ershaghi, et al., (1980), el flujo de los fluidos hidrotermales en rocas sedimentarias y los efectos combinados de presión y temperatura provocan efectos de litificación y alteración en los sedimentos, y debido a que estos efectos son más probables de que ocurran en estratos porosos y permeables, la detección de zonas alteradas hidrotermalmente puede ayudar en la identificación de zonas porosas, permeables y con altas temperaturas. La alteración hidrotermal es una forma de metamorfismo hidrotermal donde la interacción entre los minerales de la roca y los componentes químicos del fluido geotérmico da como resultado un ensamblaje con nuevas características mineralógicas en las rocas.

Según Elders et al, (1978), se localizaron etapas progresivas y alteración pos-depositacional con una clara correspondencia con la distribución de la temperatura a profundidad, incluyendo minerales diagenéticos seguidos por minerales de temperatura moderada a alta.

La distribución de características mineralógicas hidrotermales está relacionado con el patrón de flujo de fluidos y transferencia de calor en un sistema geotérmico antes de que éste sea afectado por producción y reinyección.

Siguiendo el procedimiento de estudio delineado por Lyons y Van de Kamp (1980), fue posible localizar la parte superior de la zona de alteración mediante el uso de los registros de densidad y resistividad. Esto fue llevado a cabo debido a que se observó un fuerte incremento en la densidad y resistividad de las lutitas del orden de 2.4 g/cm3 y resistividad de 5 ohm-m.

Con la nueva información de los pozos más recientes, se elaboraron dos planos de configuración de las profundidades en metros de la cima de la zona de alteración hidrotermal en el campo (Figs. No. 9 y 10). Debido a que esta configuracion representa la distribución de densidades anómalas en el campo, se encontró una clara correspondencia con el plano de anomalías de Bouguer de Chase, et al (1978) (Fig. 11). Como se estableció anteriormente, en ambos planos se presenta la misma forma dómica en la configuración de la cima que se antepone al yacimiento y que lleva una estrecha relación con lo observable en las secciones geológicas. Con el fín de aclarar la ambigüedad de definir cual es el origen que provoca la distribución de densidades del plano de anomalía de Bouguer, cabe hacer la explicación que según la correlación anterior parece ser que el plano de Bouguer está más relacionado con perturbaciones someras de densidad en los sedimentos que con reflejos de basamento, al menos, en lo que respecta a la zona del campo.

CONCLUSIONES

Una de las principales conclusiones es de que, en la actualidad, ya se cuenta con las herramientas técnicas necesarias para continuar con los estudios sedimentológicos del campo y conocer la distribución de las zonas permeables e impermeables en cualquier dirección que atraviese el campo. Aunado a ésto, se cuenta con la información estructural inferida de los perfiles para entender mejor el comportamiento de las fallas en las zonas de interés. Todo este volumen generado de información puede tener aplicaciones inmediatas en los proyectos de simulación matemática de yacimientos, y en las investigaciones del comportamiento de la reinyección de fluidos geotérmicos en el campo.

REFERENCIAS

1.-Albores L., A., Reyes Z., A., Brune, J.N., González G., L., Garcilazo M., L., y Suárez V., F., 1978, Estudios de sismicidad en la región del campo geotérmico de Cerro Prieto; Proceedings, First Simposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, September 20-22, 1978, p. 227-234.

2.-Biehler, S., Kovach, R.L., and Allen, C.R., 1964. Geophysical framework of Northern end of Gulf of California structural province., in Van Andel T., and Shor, G., eds., Marine geology of Gulf of California: Am. Assoc. Petroleum Geologist Mem. 3, p. 126-143.

3.-Calderón, 1972, Levantamiento de Sismología de Refracción en el campo geotérmico de Cerro Prieto; Informe Interno de C.F.E., Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto

4.-Chase, D.S., Clover, R.C., Grannell, R.B., Leggewie, R.M., Eppnik, J., Tarman, D.W., y Goldstein, N.E., 1978, Precision gravity studies at Cerro Prieto, Proceedings, First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México, September, 20-22, 1978, p. 249-257.

5.-De la Peña L., A., y Verdugo F., J., 1979, Interpretación sedimentológica del campo geotérmico de Cerro Prieto: Informe Interno de C.F.E., Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto.

6.-Elders, W.A., Hoagland, J.R., McDowell, S.D., y Cobo, J.M., 1978, Hydrothermal mineral zones in the geothermal reservoir of Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México, September 20-22, 1978, p. 68-75.

7.-Elders, W.A., Hoagland, J.R., Vallette, N.J., Williams, A., Barker, C., and Coolier, P., 1980, A comprehensive study of samples from geothermal reservoirs: Petrology and geochemistry of subsurface and surface samples from the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, México, Riverside, University of California.

8.-Ershaghi, I., Ghaemian S., y Mathews, M., 1980, Detection of hydrothermal alteration in a sedimentary type geothermal system using well logs: Society of Petroleum Engineers of AIME, 55th Annual Fall Technical Conference and Exhibition of SPE, September 21-24, 1980, SPE-9499.

9.-Lofgren, B.E., 1978, Measured crustal deformation in the Imperial Valley California: Proceedings, First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México, September 20-22, 1978, p. 141-145.

10.-Lyons,.D.J., and Van de Kamp, P.C., 1980, Subsurface geological and geophysical study of the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México: Berkeley, Lawrence Laboratory LBL-10540.

11.-Pirson, S. J., 1970, Geological Well Log Analysis, Gulf Publishing Co. Houston.

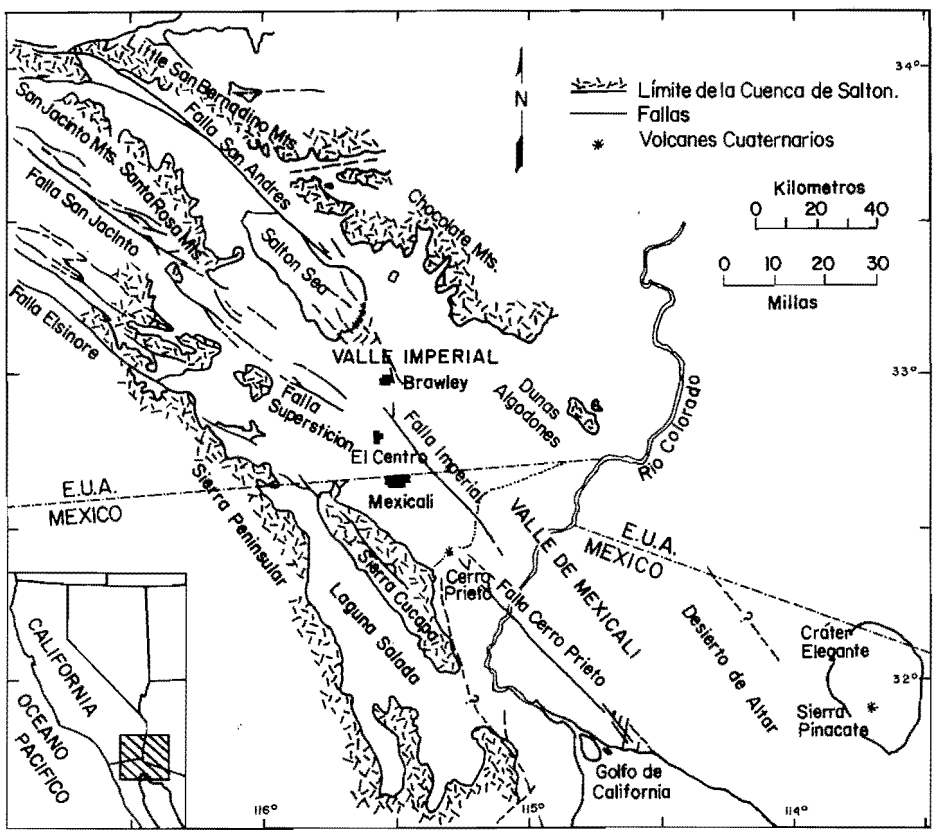


Figura 1. Localización del campo de Cerro Prieto dentro de la cuenca de Salton (Elders, 1979).

Figure 1. Location of the Cerro Prieto field within the Salton Trough (Elders, 1979).

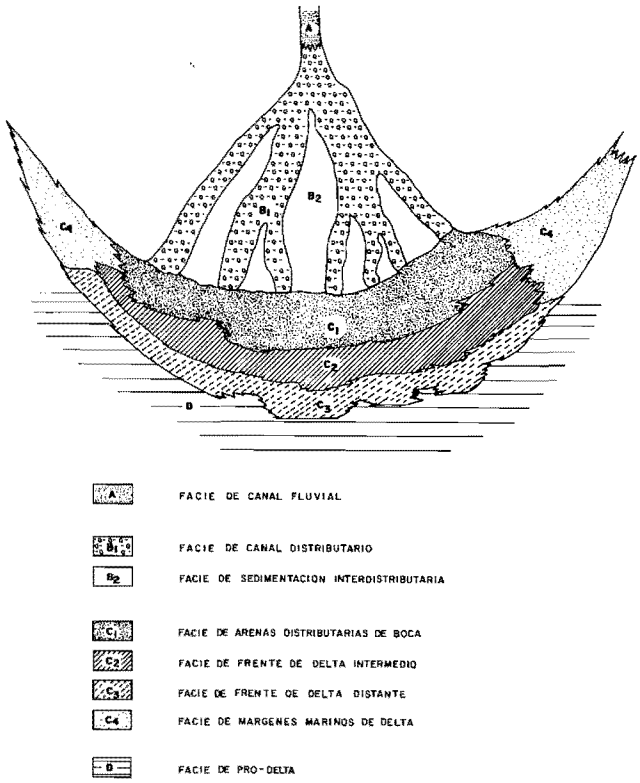


Figura 2. Delta arqueado constructivo de energía intermedia. (Tomado de Pirson, 1970.)

Figure 2. Lobate delta (taken from Pirson, 1970).

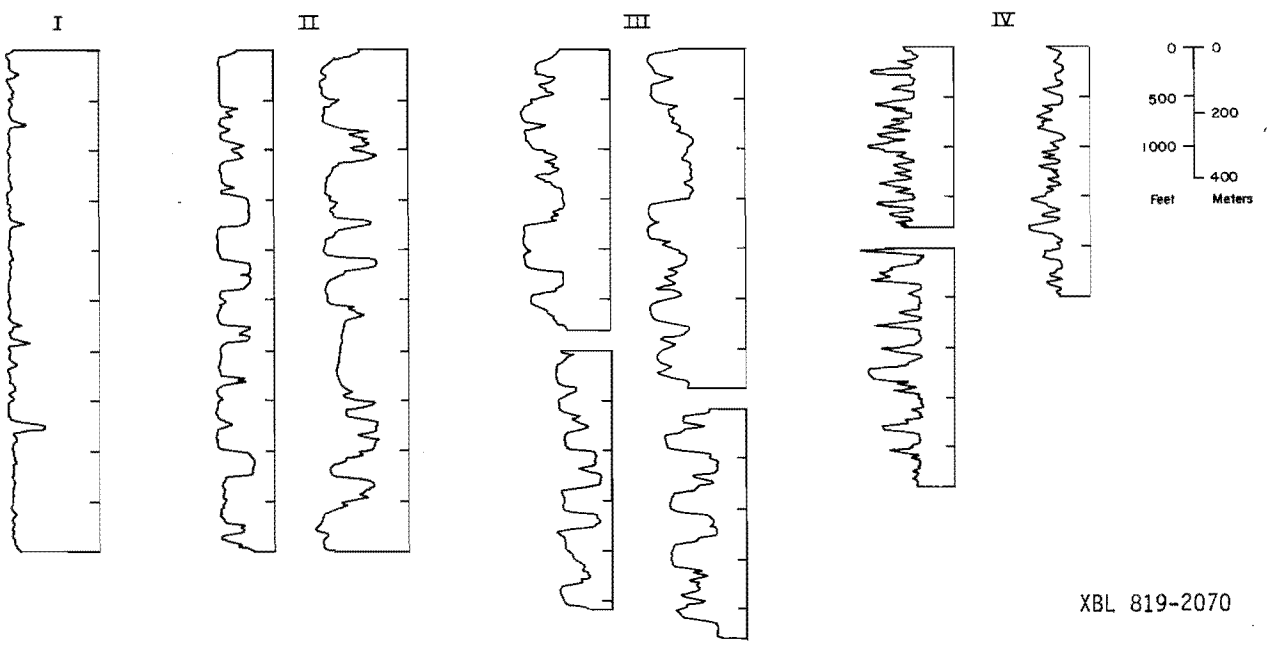


Figura 3. Ejemplos de clases de litofacies basados en la curva de potencial espontáneo (SP). (Tomado de Lyons y Van de Kamp, 1980.)

Figure 3. Examples of lithofacies classes based on the spontaneous potenial (SP) curve (taken from Lyons and Van de Kamp, 1980).

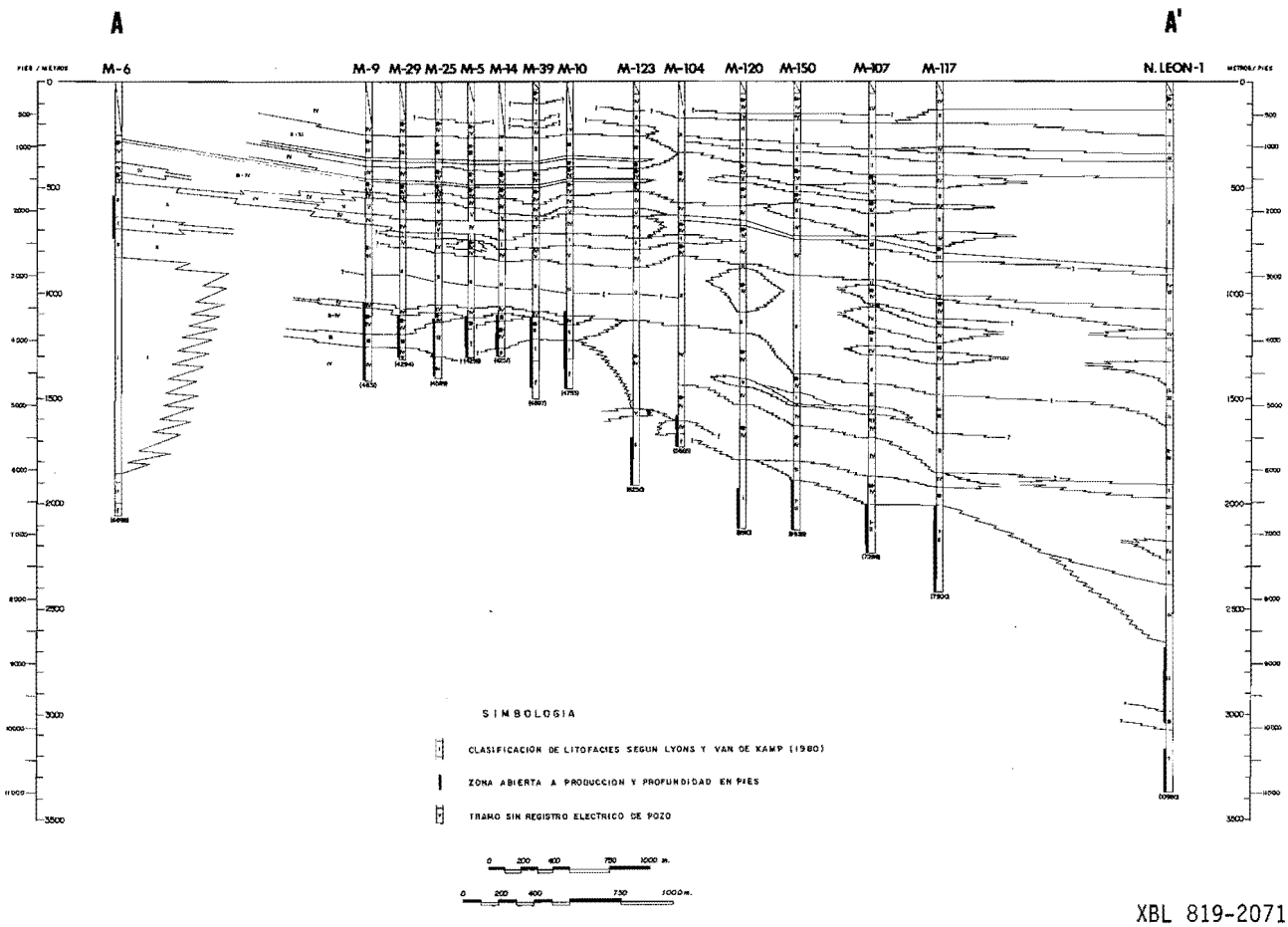
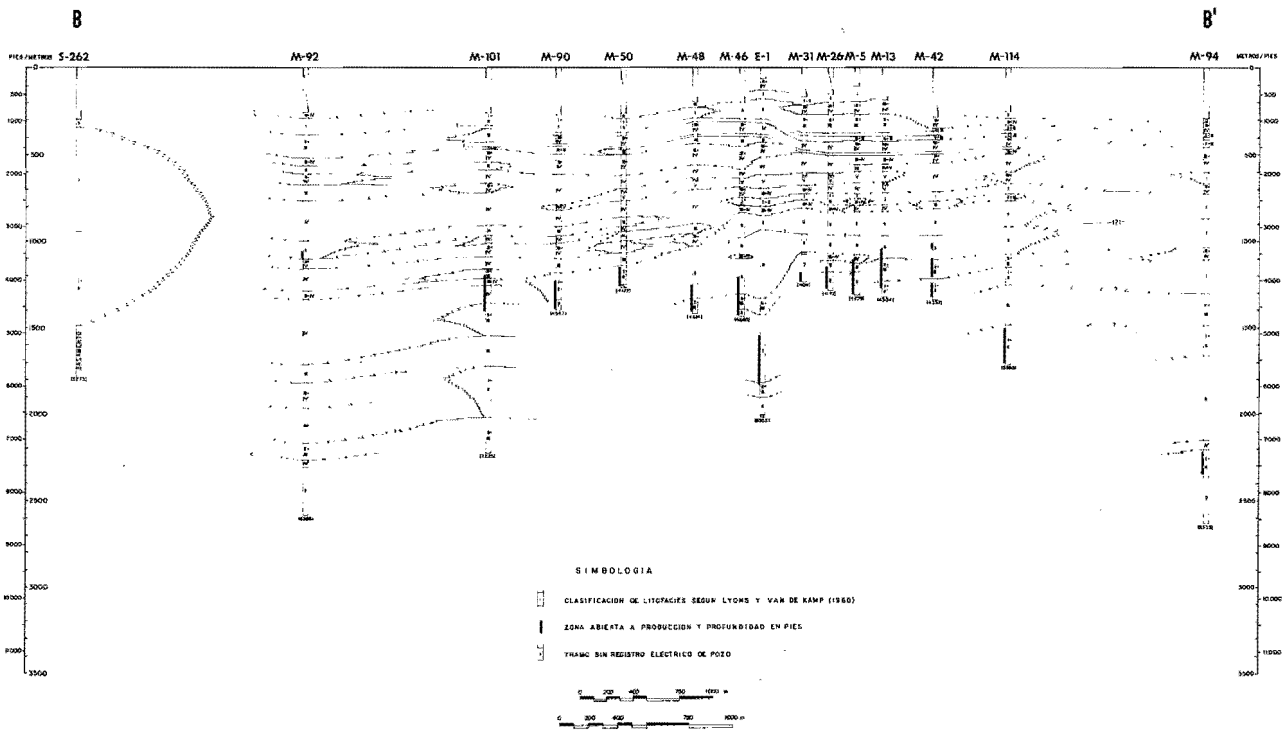


Figura 4. Perfil del campo de Cerro Prieto a lo largo de la línea A-A' (ver Figura 8).

Figure 4. Cross-section A-A' of the Cerro Prieto field (see Figure 8).



XBL 819-2072

Figura 5. Perfil del campo de Cerro Prieto a lo largo de la línea B-B' (ver Figura 8).

Figure 5. Cross-section B-B' of the Cerro Prieto field (see Figure 8).

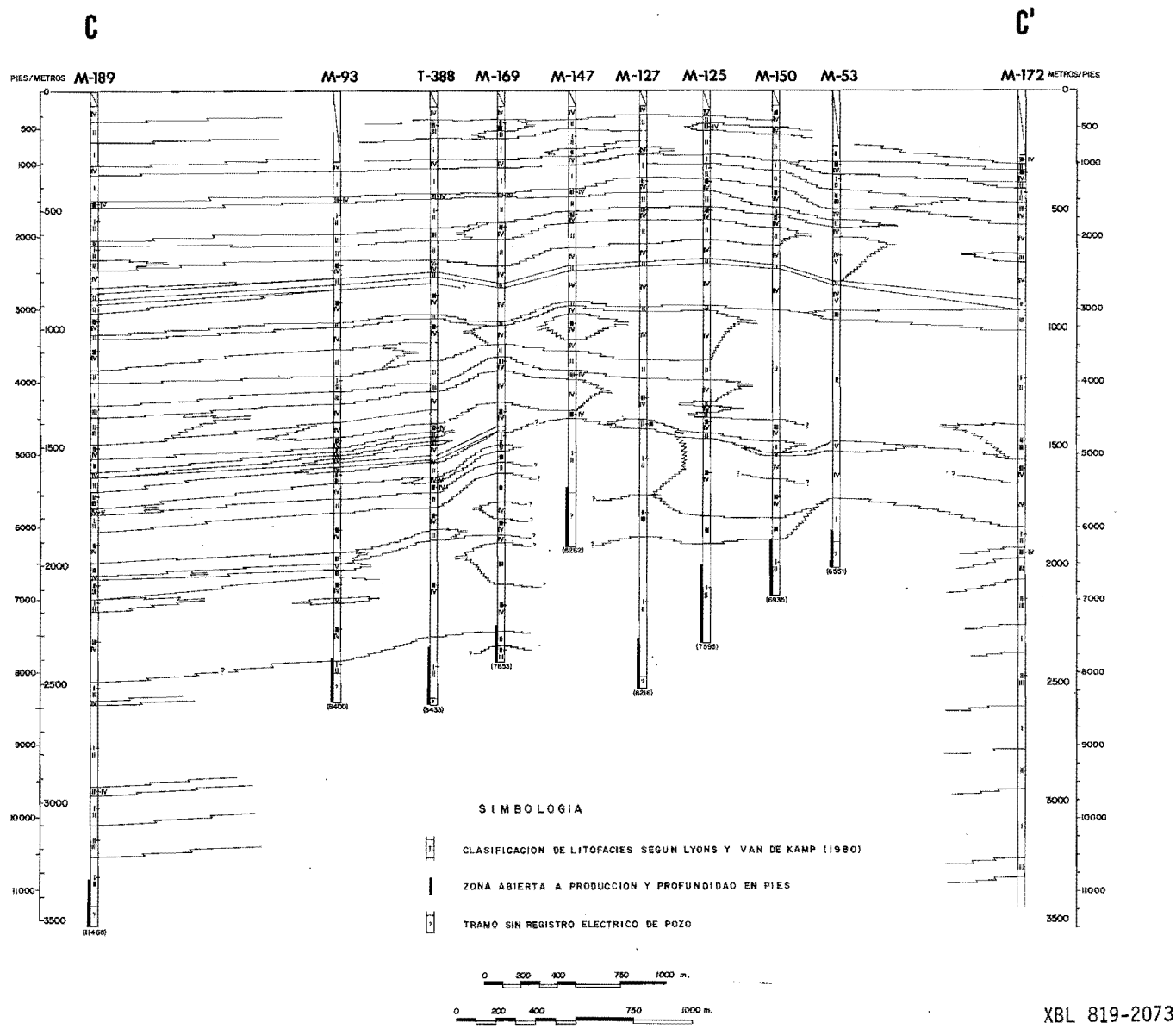


Figura 6. Perfil del campo de Cerro Prieto a lo largo de la línea C-C' (ver Figura 8).

Figure 6. Cross-section C-C' of the Cerro Prieto field (see Figure 8).

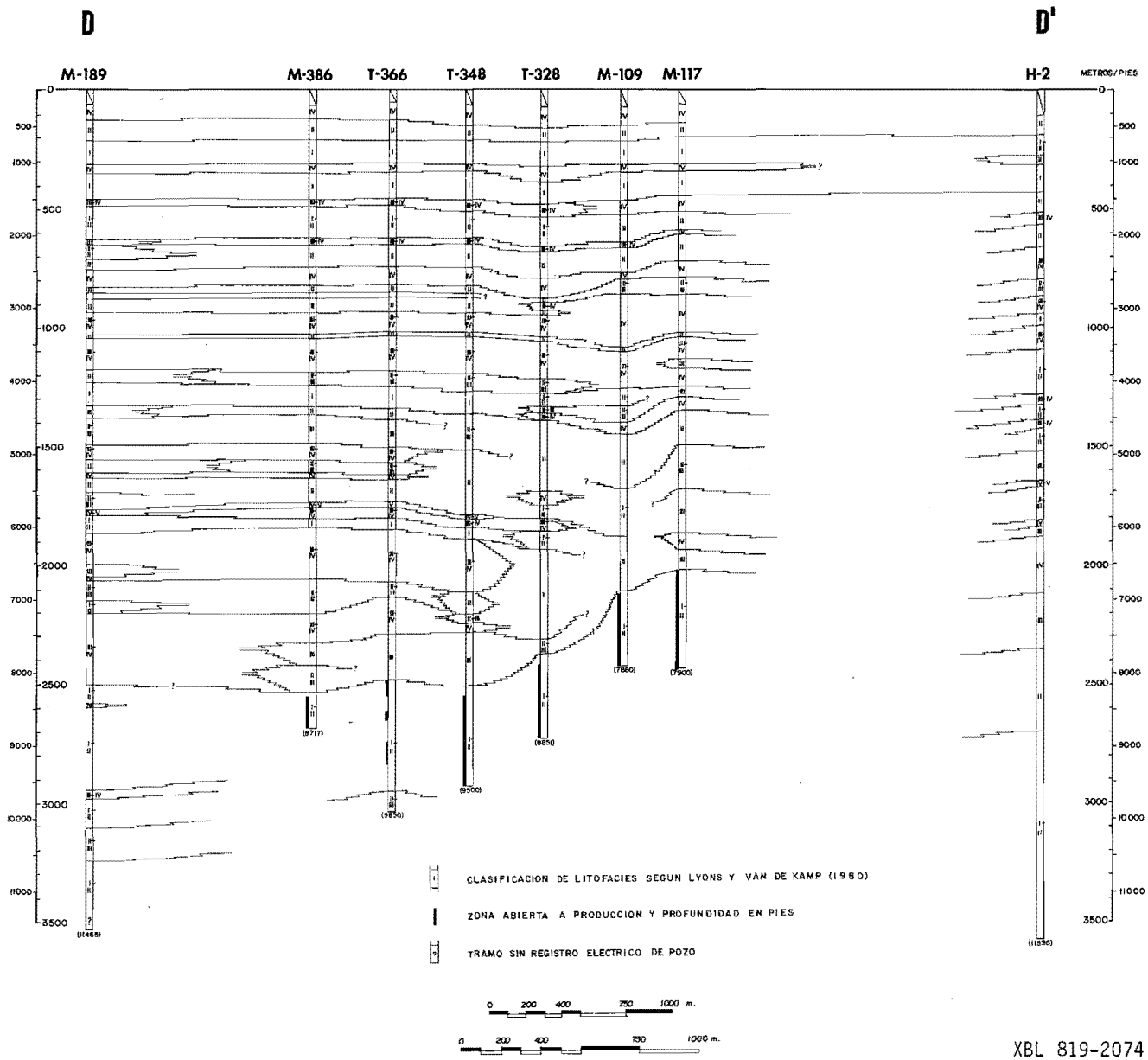
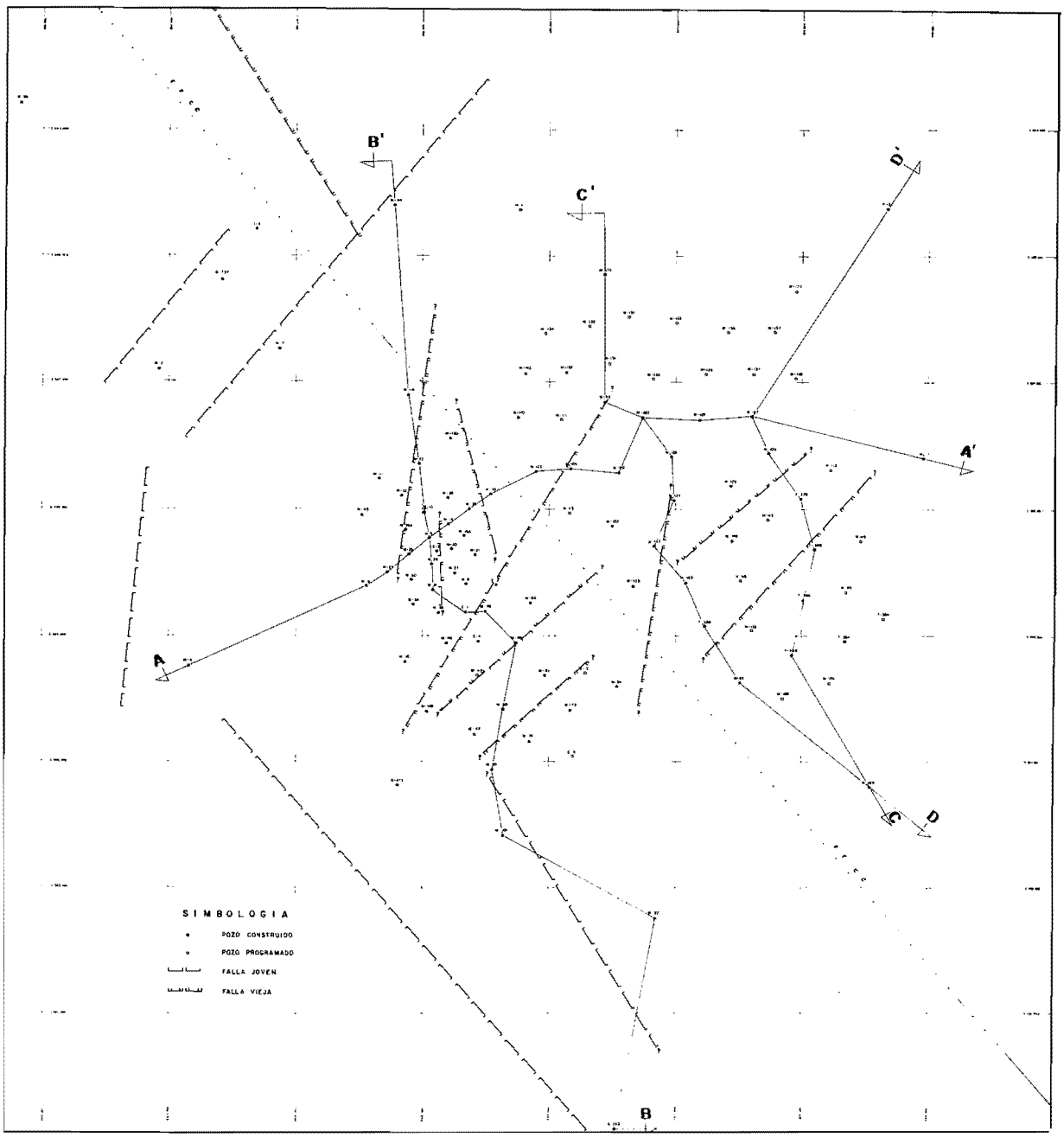


Figura 7. Perfil del campo de Cerro Prieto a lo largo de la línea D-D' (ver Figura 8).

Figure 7. Cross-section D-D' of the Cerro Prieto field (see Figure 8).



XBL 8110-12259

Figura 8. Plano estructural inferido de la correlación de registros eléctricos de pozos.

Figure 8. Structural map inferred from geophysical well log correlations.

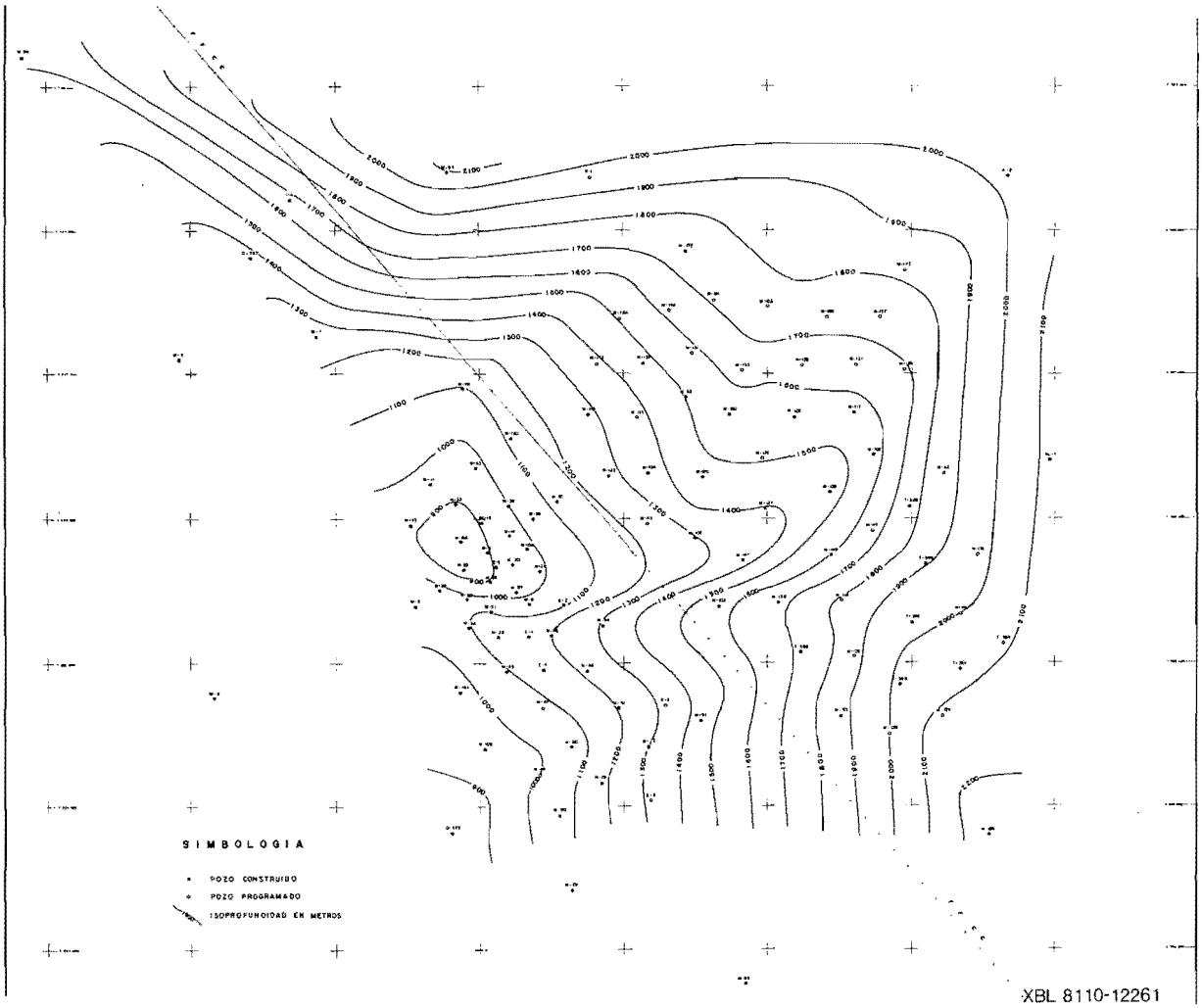


Figura 9. Cima de yacimiento localizada con el incremento de densidad en las lutitas (en metros).

Figure 9. Top of the reservoir based on the increase in shale density (depth in meters).

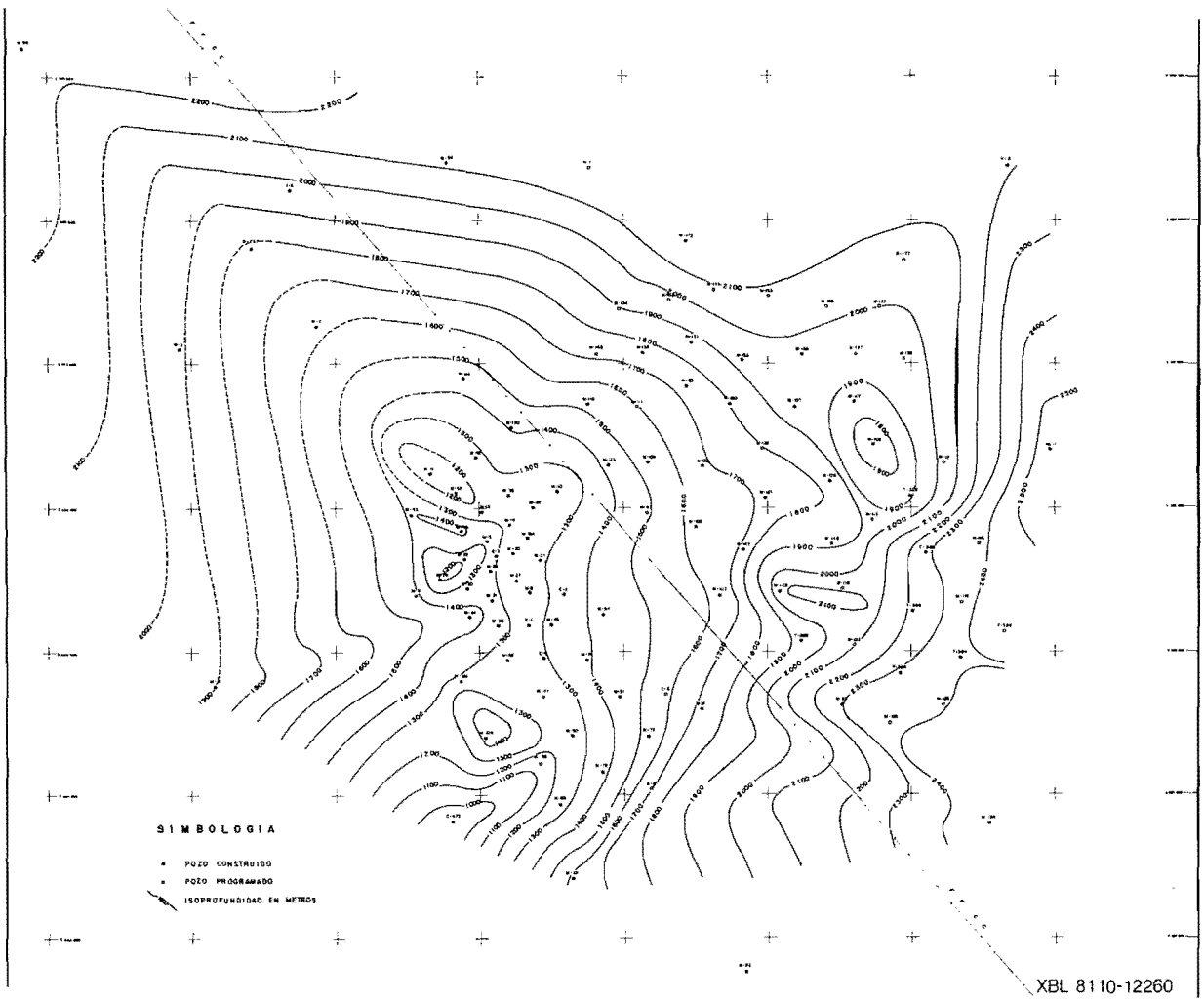
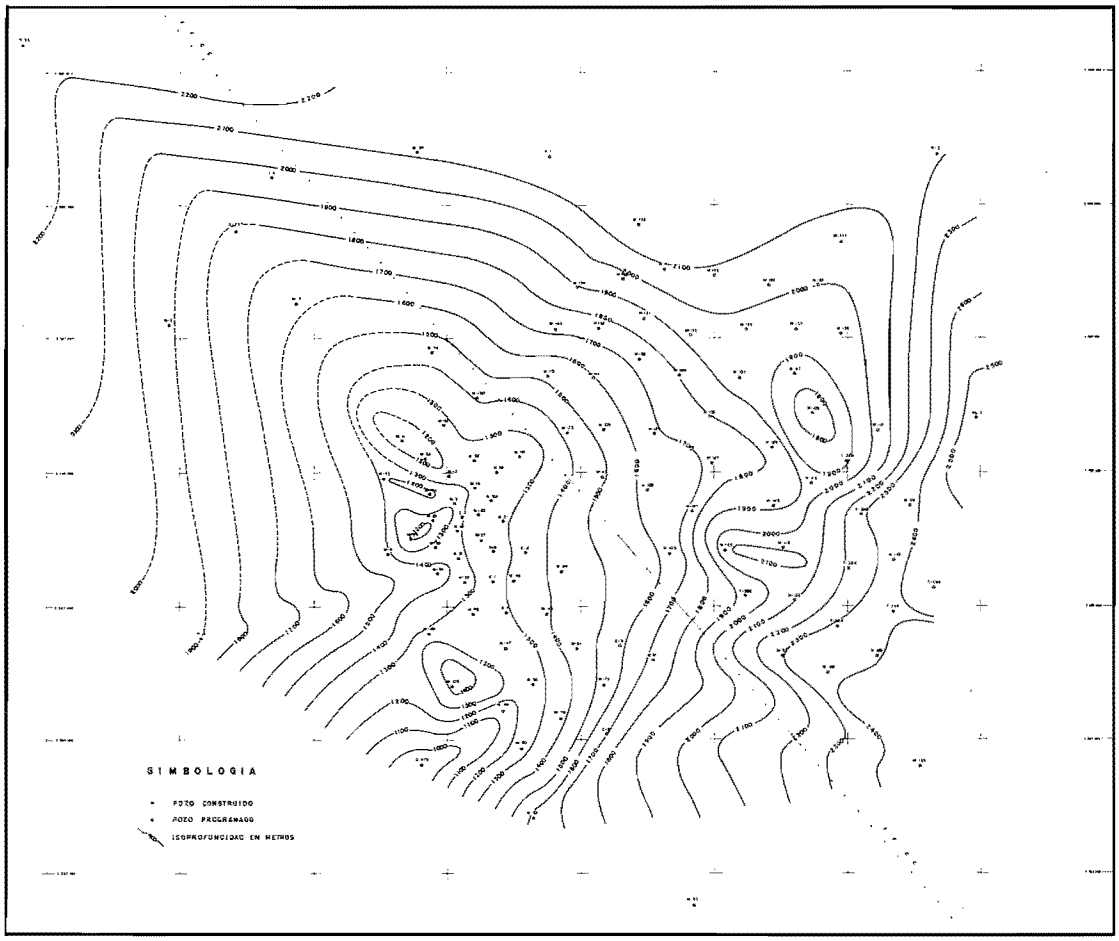


Figura 10. Cima del yacimiento localizada con el incremento de restistividad en las lutitas (en metros).

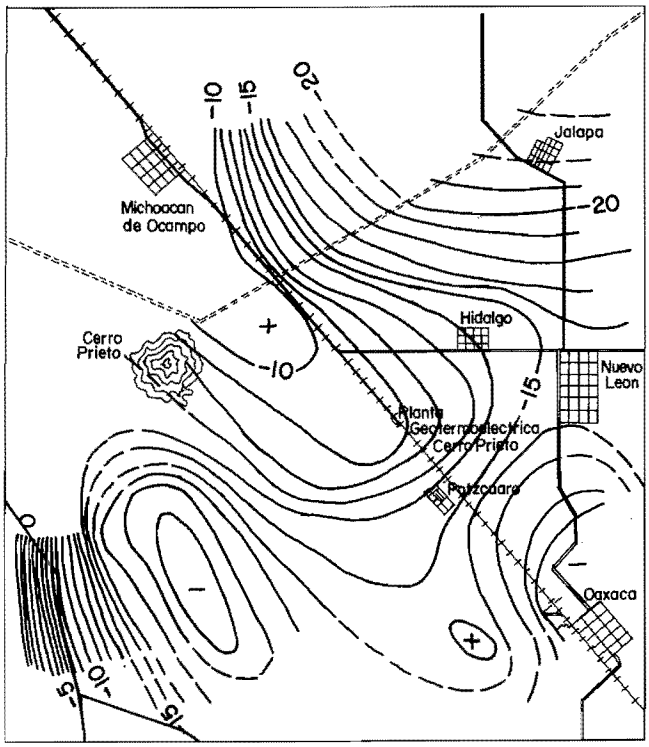
Figure 10. Top of the reservoir based on the increase in shale resistivity (depth in meters).



XBL 8110-12260

Figura 10. Cima del yacimiento localizada con el incremento de resistividad en las lutitas (en metros).

Figure 10. Top of the reservoir based on the increase in shale resistivity (depth in meters).



XBL 819-2075

Figura 11. Plano de la anomalía de Bouguer del campo de Cerro Prieto. Intervalo de configuración = 1 mgal. (Tomado de Chase et al., 1978).

Figure 11. Bouguer gravity anomaly map of the Cerro Prieto field. Contour interval = 1 mgal (taken from Chase et al., 1978).

PROPOSED GEOLOGIC MODEL BASED ON GEOPHYSICAL WELL LOGS

ABSTRACT

An investigation of the subsurface based on a qualitative interpretation of well logs was carried out at Cerro Prieto to obtain information on the distribution of the different lithofacies that make up a deltaic depositional system. The sedimentological interpretation derived from the resistivity and spontaneous potential are shown in several cross-sections of the field. A close examination of this paper will be very useful in locating permeable or impermeable zones at depth, as well as possible paths for the flow of subsurface fluids. In addition to the sedimentological interpretation, a map of the structural geology of the region based on well logs and available geophysical information was prepared, including the results of gravity and seismic refraction surveys.

The depth to the zone of hydrothermal alteration described by Elders (1980) was found by means of temperature, electrical, and radioactive logs. Two maps showing the configuration of the top of this anomaly show a clear correlation with the gravity anomalies found in the area.

This study is a continuation of the work of Lyons and Van de Kamp (1980) and has as its objective the development of a final geologic model to be used in the planning of the expansion of the field, as well as in mathematical reservoir simulation and in reinjection studies.

INTRODUCTION

The exploration and exploitation of the Cerro Prieto field has produced a vast amount of geological, geophysical, and geochemical data, as well as information about the physical and chemical properties of the geotheral reservoir.

From these data, we used mainly the geological, geophysical, and well log information. Our objective was to propose a geologic model of the field, and to compare the results of the gravity surveys with the information obtained from the analysis of well logs. As a result of this work, we have achieved a better understanding of the relations that exist in deltaic depositional systems, their structural behavior, and the distribution of hydrothermal alteration zones in the field.

LITHOLOGICAL FACIES

The Cerro Prieto geothermal field is located in the Mexicali Valley, on the southwestern

boundary of the Colorado River Delta. This valley in turn is part of the Salton Trough (Figure 1). This structural depression is characterized by profuse seismic activity, mainly along the Cerro Prieto and Volcano fault systems (Albores et al., 1978), and by vertical deformations of the ground surface (Lofgren, 1978), the combined result of which is the fracturing and displacement of the basin sedimentary fill. The depth of the basin has been estimated by means of regional geophysical studies using seismic refraction and gravity (Biehler et al., 1964). The maximum depth encountered was 6.4 km, just south of the border. This thick sedimentary sequence has been formed mainly by the changing course of the Colorado River, which has been discharging sediments into the basin for several million years. In addition to the deltaic deposition, this zone has been affected by constant oscillations of the basement, produced by dynamic tectonic stresses which have intensely fractured this region.

From a stratigraphic point of view, it is known that as a river flows into a relatively stable body of water, it forms a depositional environment known as a Deltaic System. The deposition of the materials carried by the river results in sediments which are characterized by a diversity of grain sizes, from which it is possible to differentiate depositional sub-environments, such as Delta Plain (including distributary channels, swamps, flood plains, etc.), Delta Front (including channel bars, distal front, and beach sands), and the Prodelta. Among these sub-environments or facies, the Delta Front and Delta Plain are the ones containing relatively thick sediments (de la Peña and Verdugo, 1978) (Figure 2).

One of the most important applications of the qualitative interpretation of geophysical well logs in sedimentological studies is the determination of the distribution of lithologic units at depth by means of the spontaneous potential (SP) signature of each of these sub-environments or lithofacies. According to Pirson (1970), there is a class of delta, called lobate delta, in which the sediment load is carried through fluvial channels (A) (see Figure 2). As the delta builds up, these channels have a tendency to become superimposed on each other resulting, from an electric point of view, in an absence or inversion in the SP response, and an increase in the resistivity due to the presence of fresh water in this lithofacie. The Delta Plain facies are characterized by saline water deposits that give a good response on the SP curve for distributary channels (B1), and for thick interdistributary sediments (B2) which are produced by crevasses along the channel levees. In this sub-environment one can also find fine sediments, such as silts and clays, in the flood plain, swamps, lakes and ponds. Most of the sands appear in the Delta Front lithofacie, among which one can find distributary mouth bars (C1), intermediate Delta Front (C2), Distal Delta Front (C3), Delta Marine Fringe (C4), and the Prodelta (D) lithofacie. Based on the above, Lyons and Van de Kamp (1980) classified the lithofacies found in the Cerro Prieto electrical well logs on the basis of the shape of the SP and resistivity curves (Figrue 3) as follows:

LITHOFACIES I

This lithofacies is characterized by a predominance of sands, with very thick sand units, frequently thicker than 46 m (150 ft), separated by thin layers of shales 3 m (10 ft) thick. This lithofacies suggests piled-up channels or possible eolian deposits.

LITHOFACIES II

This lithofacies consists mostly of sand bodies 15 or more meters thick (>50 ft) and shale beds or bodies 6 to 9 m (20-30 ft) thick. The SP curve in the thicker sands commonly has sharp bottoms, which suggests distributary channels, whereas the thinner sands may represent either channel overflow sands of the tributary channel in the Delta Plain, or sands from the Delta Front.

LITHOFACIES III

This lithofacies is characterized by approximately equal proportions of sandstones and shales, although sand may dominate in some cases. The thickest sand bodies are 6 to 9 m (20-30 ft) thick and the SP curve shows transitional bottoms. This characteristic and their association with thin sands, siltstones, and shales suggest a Delta Front environment. However, some of these lithofacies may represent channel overflow sand deposits of the Delta Plain.

LITHOFACIES IV

Consists of approximately equal percentages of sandstones and shales, but the sands are thinner than 3 m (10 ft). This lithofacies could represent either distal deposits of distributary channel overflow in a Delta Plain or "low energy" deposits of a distal Delta Front.

LITHOFACIES V

Consists mainly of siltstones and shales and can represent different environments, such as Delta Flood Plain, Coastal Lagoon, or Prodelta.

For the purpose of illustrating the stratigraphic relations of the lithofacies in the wells, four sections across the Cerro Prieto field were prepared, including the old production area (Cerro Prieto I) as well as the new region which is currently being developed (Cerro Prieto II and III).

After classifying each of the lithofacies found in the wells, we proceeded to correlate them between the various wells. In this manner, several relevant features of the cross-sections

became apparent (Figures 4, 5, 6, and 7). It is worth noting that all the sections showed almost horizontal layering for the shallow beds, indicating a period of calm during the deposition of these sediments. Large displacements between contacts due to the faults crossing the region were also found. These characteristics were invariably present in all the cross-sections, demonstrating the complexity of the interpretation in this type of sedimentation. The characteristic shape of the zone where the wells are open to production, which suggests a dome-like structure along the sections, is also worth noting. It will be shown later that this dome structure can also be observed in the data obtained from the geophysical well logs.

STRUCTURAL GEOLOGY

Tectonically, the field is located on one of the branches of the southeast-trending San Andreas fault system. In this area, the most important faults are the Cerro Prieto and Imperial faults, having a predominantly NW-SE strike. These faults form the transform-type tectonic complex that has given rise to the geothermal field, deep topographic depressions, and constant seismic activity. As a direct consequence of the transform faults' activity, there is a region of intense fracturing between the fault system parallel to the principal strike-slip faults, and another system of normal faults, oblique to the first one.

These systems have been called the Cerro Prieto and Volcano fault systems. The strike-slip faults (Cerro Prieto) are considered to be impermeable barriers to fluid flow. The normal faults are considered to be good fluid conductors. Both sets of faults form en-echelon horst and graben structures.

Based on the correlation between the geophysical well logs and the seismic refraction survey of Calderón (1972), it was possible to prepare a structural map of the field (Figure 8). Both of the already known fault systems are shown, as well as a new, predominantely N-S system of normal faults.

In analizing the cross-sections, we determined two types of faults (young and old) already reported by other authors (Lyons and Van de Kamp, 1980), and which affect the sediments differently. The young faults are found to affect the entire sedimentary column, whereas the older faults only affect the deeper portions of the sediments penetrated by the wells.

ZONE OF HYDROTHERMAL ALTERATION

According to Ershaghi et al. (1980), the flow of hydrothermal fluids through sedimentary rocks and the combined effects of pressure and temperature produce lithification and alteration of the sediments. Since these effects are more likely to occur in porous and permeable strata, the identification of hydrothermally altered zones may help in the identification of porous, permeable, and high-temperature zones. Hydrothermal alteration is a form of hydrothermal metamorphism where the interaction between the minerals of the rock and the chemical components of the goethermal fluid results in rocks with new mineral assemblages.

According to Elders et al. (1978), progressive stages of post-depositional alteration have been found, clearly corresponding to the distribution of temperature with depth, from diagenetic minerals to minerals formed at moderate to high temperatures.

The distribution of hydrothermal minerals is related to the fluid flow and heat transfer pattern in the geothermal system before it is affected by production and reinjection.

Following the approach of Lyons and Van de Kamp (1980), it was possible to locate the upper part of the alteration zone based on density and resistivity logs. This was done after finding a large increase in the density and resistivity of the shales, up to values on the order of 2.4 g/cm^3 for the density and 5 ohm-m for the resistivity.

With new information from the more recent wells, two maps of the top of the hydrothermal alteration zone under the field were prepared (Figures 9 and 10). Since this configuration represents the distribution of anomalous densities in the field, a clear correspondence with Chase et al.'s (1978) Bouguer gravity anomaly map of the field (Figure 11) was found. As already mentioned, both maps show the same dome-like shape over the reservoir, which is closely correlated with what can be observed in the geologic cross-sections. As for clarifying the ambiguity in explaining the Bouguer gravity anomaly map, we would suggest that, based on the above correlation, and at least in the area of the field, the Bouguer map appears to be more closely related to shallow density perturbations, rather than being a reflection of the basement.

CONCLUSION

One of the main conclusions of this study is that at present we have available the technical tools necessary to continue with the sedimentological studies of the field, and to determine the distribution of permeable and impermeable zones along any direction across the field. Also available is the structural information inferred from the cross sections to better understand the behavior of the faults in the zones of interest. This amount of data can have immediate application in mathematical reservoir simulation studies, and in the investigations of the behavior of the field during reinjection of geothermal fluids.