



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA

**"ESTUDIO GEOFISICO DEL PROYECTO GEOTERMICO
LOS HUMEROS - DERRUMBADAS, ESTADOS
DE PUEBLA Y VERACRUZ"**

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO GEOFISICO

P R E S E N T A N :

HERIBERTO GARCIA VELAZQUEZ

Y

LUIS HECTOR PALACIOS HARTWEG

MEXICO, D. F.

1990.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CONTENIDO

RESUMEN	1
-------------------	---

CAPITULO I. GENERALIDADES

I.1.- Introducción	3
I.2.- Objetivo	3
I.3.- Localización	4
I.4.- Vías de comunicación	6
I.5.- Bosquejo geológico	6
I.6.- Antecedentes	8
I.7.- Métodos empleados	8

CAPITULO II. ESTUDIOS GEOFISICOS REGIONALES

II.1.- Finalidad	15
II.2.- Levantamiento aeromagnético	15
II.3.- Estudio telúrico y de autopotencial	17
II.4.- Estudio geoelectrico	19
II.5.- Conclusiones	26

CAPITULO III. ESTUDIO A DETALLE EN LA CALDERA LOS HUMEROS

III.1.- Descripción del área	29
III.2.- Trabajo de campo	29
III.3.- Resultados	31
III.4.- Conclusiones	62

CAPITULO IV. ESTUDIOS A DETALLE EN LOS DOMOS LAS DERRUMBADAS

IV.1.- Descripción del área	67
IV.2.- Trabajo de campo	68
IV.3.- Resultados	68
IV.4.- Conclusiones	96

REFERENCIAS CITADAS	99
-------------------------------	----

ILUSTRACIONES

	Página
Figura 1.- Modelo geotérmico idealizado	4
2.- Localización del área estudiada	5

Figura	3.- Dispositivo tetrapolar Schlumberger	7
	4.- Mapa aeromagnético residual	12
	5.- Interpretación de anomalías magnéticas por medio de prismas	13
	6.- Sección telúrica y de autopotencial	18
	7.- Localización de líneas geoelectricas regionales	20
	8.- Línea geoelectrica regional 1	21
	9.- Línea geoelectrica regional 2	24
	10.- Línea geoelectrica regional 3	27
	11.- Mapa de localización de sondeos eléctricos de La Caldera los Humeros	30
	12.- Plano de iso-resistividad aparente con $AB/2=200$ m	32
	13.- Plano de iso-resistividad aparente con $AB/2=500$ m	33
	14.- Plano de iso-resistividad aparente con $AB/2=1\ 000$ m	34
	15.- Plano de iso-resistividad aparente con $AB/2=1\ 600$ m	36
	16.- Plano de iso-resistividad aparente con $AB/2=2\ 000$ m	37
	17.- Sección 50-50' integrada por iso-resistividad, electrostratigrafía y potencial natural de La Caldera los Humeros	38
	18.- Sección 46-46' integrada por iso-resistividad, electrostratigrafía y potencial natural de La Caldera los Humeros	40
	19.- Sección 44-44' integrada por iso-resistividad, electrostratigrafía y potencial natural de La Caldera los Humeros	41
	20.- Sección 40-40' integrada por iso-resistividad, electrostratigrafía y potencial natural de La Caldera los Humeros	43
	21.- Sección 36-36' integrada por iso-resistividad, electrostratigrafía y potencial natural de La Caldera los Humeros	45
	22.- Sección 30-30' integrada por iso-resistividad, electrostratigrafía y potencial natural de La Caldera los Humeros	46
	23.- Sección 26-26' integrada por iso-resistividad, electrostratigrafía y potencial natural de La Caldera los Humeros	48
	24.- Sección 22-22' integrada por iso-resistividad, electrostratigrafía y potencial natural de La Caldera los Humeros	49
	25.- Sección 18-18' integrada por iso-resistividad, electrostratigrafía y potencial natural de La Caldera los Humeros	51
	26.- Sección 16-16' integrada por iso-resistividad, electrostratigrafía y potencial natural de La Caldera los Humeros	52
	27.- Sección Mazatloya integrada por iso-resistividad, electrostratigrafía y potencial natural de La Caldera los Humeros	54
	28.- Sección Tenamastepec integrada por iso-resistividad, electrostratigrafía y potencial natural de La Caldera los Humeros	55
	29.- Sección Xalapazco integrada por iso-resistividad, electrostratigrafía y potencial natural de La Caldera los Humeros	57
	30.- Sección Arenas integrada por iso-resistividad, electrostratigrafía y potencial natural de La Caldera los Humeros	58
	31.- Sección Humeros integrada por iso-resistividad, electrostratigrafía y potencial natural de La Caldera los Humeros	60
	32.- Sección Madero integrada por iso-resistividad, electrostratigrafía y potencial natural de La Caldera los Humeros	61
	33.- Configuración del horizonte superior de las rocas calcáreas del Cretácico	63
	34.- Delimitación de las zonas de interés geotérmico	64
	35.- Mapa de localización de sondeos eléctricos	69
	36.- Plano de iso-resistividad aparente con $AB/2=200$ m	70
	37.- Plano de iso-resistividad aparente con $AB/2=500$ m	71
	38.- Plano de iso-resistividad aparente con $AB/2=1\ 000$ m	73
	39.- Plano de iso-resistividad aparente con $AB/2=1\ 600$ m	74

	Página
Figura 40.— Plano de iso-resistividad aparente con $AB/2=2\ 000\ m$	75
41.— Sección 5-5' integrada por iso-resistividad, electroestratigrafía y potencial natural de Los Domos las Derrumbadas	76
42.— Sección 7-7' integrada por iso-resistividad, electroestratigrafía y potencial natural de Los Domos las Derrumbadas	78
43.— Sección 9-9' integrada por iso-resistividad, electroestratigrafía y potencial natural de Los Domos las Derrumbadas	79
44.— Sección 11-11' integrada por iso-resistividad, electroestratigrafía y potencial natural de Los Domos las Derrumbadas	81
45.— Sección 13-13' integrada por iso-resistividad, electroestratigrafía y potencial natural de Los Domos las Derrumbadas	83
46.— Sección 15-15' integrada por iso-resistividad, electroestratigrafía y potencial natural de Los Domos las Derrumbadas	84
47.— Sección 14-14' integrada por iso-resistividad, electroestratigrafía y potencial natural de Los Domos las Derrumbadas	86
48.— Sección 12-12' integrada por iso-resistividad, electroestratigrafía y potencial natural de Los Domos las Derrumbadas	87
49.— Sección 10-10' integrada por iso-resistividad, electroestratigrafía y potencial natural de Los Domos las Derrumbadas	89
50.— Sección 8-8' integrada por iso-resistividad, electroestratigrafía y potencial natural de Los Domos las Derrumbadas	90
51.— Sección 6-6' integrada por iso-resistividad, electroestratigrafía y potencial natural de Los Domos las Derrumbadas	92
52.— Sección 4-4' integrada por iso-resistividad, electroestratigrafía y potencial natural de Los Domos las Derrumbadas	94
53.— Planos de iso-conductancia longitudinal (S)	95
54.— Sección geológica idealizada Z-Z' de Los Domos las Derrumbadas	97

RESUMEN

Los diversos estudios realizados a través de los últimos años en el área denominada Los Humeros--Derrumbadas han demostrado que existen características favorables para la presencia de un yacimiento geotérmico a profundidad.

En base a los resultados de los estudios geofísicos se han delimitado zonas con características apropiadas que las relacionan con un posible yacimiento geotérmico. Estas zonas han sido localizadas en La Caldera los Humeros y en Los Domos las Derrumbadas, determinando que la profundidad promedio de las rocas que se encuentran con altas temperaturas es de 1 500 m en ambos sitios.

Dichos estudios, apoyados en la información geológica superficial, permiten suponer que la capa sello se encuentra formada por materiales de relleno y rocas ígneas del Cuaternario y que el probable medio productor se encuentra en las rocas calcáreas del Cretácico.

Las probables zonas de recarga hidráulica a los yacimientos son: En La Caldera los Humeros su parte noroccidental y por el norte para Los Domos las Derrumbadas.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1. Introducción

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) a través del Departamento de Geología y Minería lleva a cabo diversos estudios con el fin de localizar sitios favorables para la construcción de plantas generadoras de energía eléctrica encaminada a satisfacer las necesidades de la Nación. Las plantas son en su mayoría termoeléctricas, hidroeléctricas y se están desarrollando las de tipo nuclear. Sin embargo, dada la actual política de diversificación de fuentes de energía y el potencial geotérmico con que parece contar el país, actualmente se realizan exploraciones en algunas áreas que muestran manifestaciones termales importantes con el propósito de evaluar la factibilidad de su aprovechamiento.

Nuestro país cuenta con características geológicas propicias para la existencia de energía geotérmica en el subsuelo. Usando este recurso natural se produce energía eléctrica en el campo geotérmico de Cerro Prieto, en Baja California Norte, con una capacidad instalada de 150 MW y la perspectiva de ampliarla a 300 MW en 1988. Se encuentran avanzados también los proyectos para la instalación de plantas geotérmicas dentro de la provincia geológica denominada Zona Neovolcánica Transmexicana en: Los Azufres, en el Estado de Michoacán, La Primavera, Estado de Jalisco, y Los Humeros—Derrumbadas en los estados de Puebla y Veracruz, del cual forma parte el presente informe.

1.2. Objetivo

El objetivo principal de las técnicas de prospección geofísica junto con la geología, geoquímica y la geohidrología, en la exploración geotérmica es la de construir el modelo geotérmico del área. Idealmente esta constituido por (Figura 1):

- a) Capa sello
- b) Yacimiento
- c) Base impermeable
- d) Fuente de calor
- e) Zona de recarga.

Los métodos geofísicos tratan de delimitar los distintos componentes del modelo en base a los contrastes que pudieran presentar algunas de las propiedades físicas de éstas, como son la resistividad eléctrica, la susceptibilidad magnética, la densidad o la conductividad térmica.

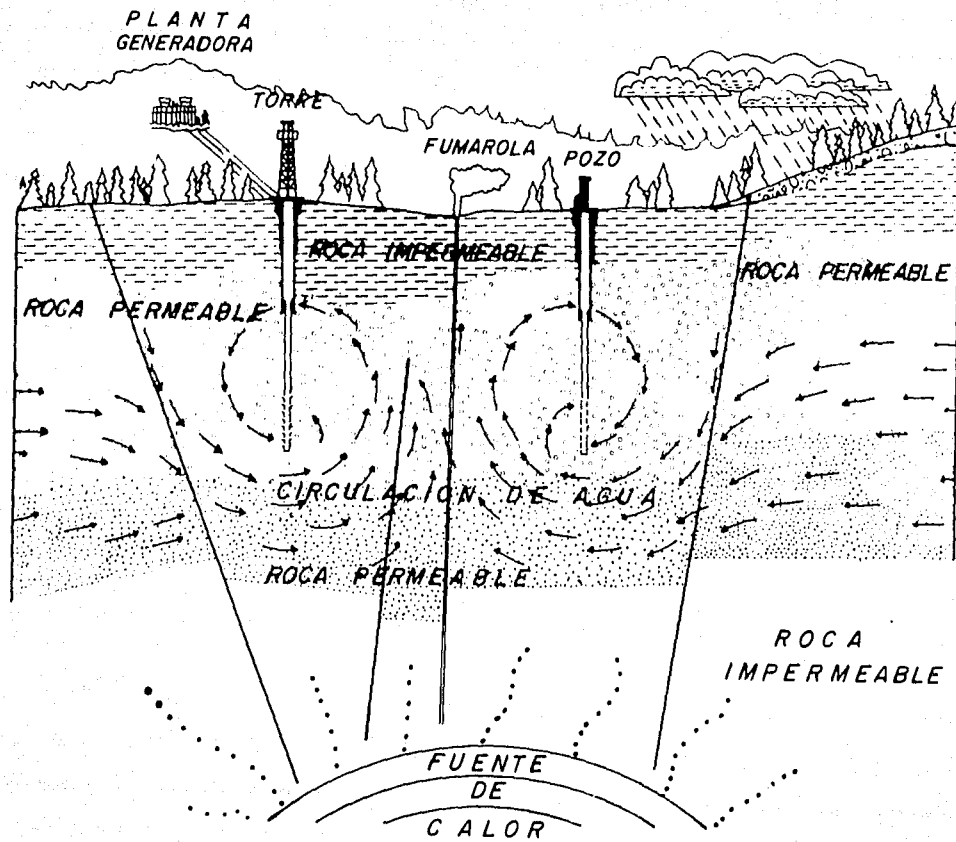


Figura 1.— Modelo geotérmico idealizado.

1.3. Localización

El Proyecto Geotérmico (PG) Los Humeros—Derrumbadas se encuentra en la Cuenca de Libres-Oriental, estados de Puebla y Veracruz (Figura 2); geológicamente se localiza en el extremo oriental de la Zona Neovolcánica Transmexicana que atraviesa a México en dirección W—E, en intersección con la Sierra Madre Oriental.

El área estudiada por geofísica comprende aproximadamente una superficie de 4 000 km² y se encuentra delimitada por las coordenadas:

19° 05' a 19° 44' de Latitud Norte

97° 20' a 97° 45' de Longitud Oeste

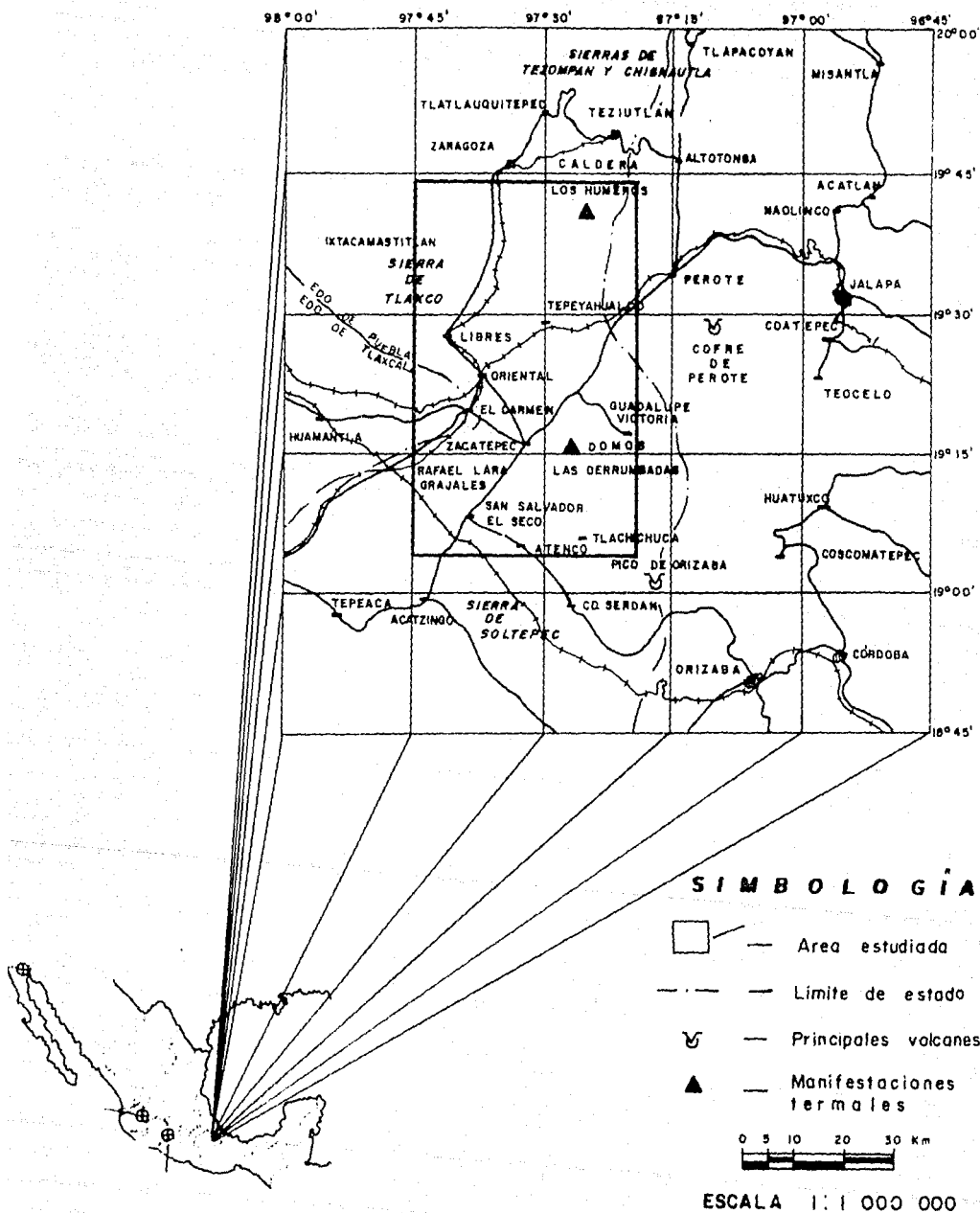


Figura 2.— Localización del área estudiada.

quedando al norte los poblados de Teziutlán, Altotonga y Zaragoza, al sur los poblados de San Salvador el Seco y Tlachichuca, al oeste por Ixtacamastitlán y Huamantla, y al este por los poblados de Perote y Guadalupe Victoria. La mayor parte del proyecto se encuentra ubicado en el Estado de Puebla.

1.4. Vías de comunicación

El área se encuentra bien comunicada por carreteras asfaltadas que forman una red entre los principales poblados de la región.

Existen dos líneas ferroviarias que cruzan la zona: la de México-Perote-Jalapa-Vera-cruz, y la de México-Apizaco-Oriental-Teziutlán.

En lo que a medios de comunicación aérea se refiere, únicamente existen campos de aterrizaje para aviones pequeños en Tehuacán y Jalapa, ambas ciudades se encuentran fuera de los límites del área comprendida en el presente estudio.

1.5. Bosquejo geológico

Geológicamente el área se encuentra limitada al norte por la estructura dómica denominada Macizo de Teziutlán, constituida por esquistos y rocas graníticas desarrolladas desde el Pérmico Tardío al Triásico Tardío-Jurásico Temprano que forman el basamento regional. Cubriendo discordantemente a éste, aparecen las rocas clásticas del Triásico-Jurásico las cuales, a su vez, están cubiertas del mismo modo por una secuencia marina que representa al Jurásico Superior-Cretácico Superior.

Las rocas mesozoicas sufrieron plegamientos a principios del Terciario y las estructuras plegadas fueron semierosionadas antes de que las rocas volcánicas posteriores las cubrieran.

La primera acumulación de rocas volcánicas se efectuó hace aproximadamente 11 millones de años y está constituida por derrames de andesita de hornblenda. Estas rocas se encuentran cubiertas parcialmente por derrames de andesita de augita procedentes de los volcanes Cofre de Perote y Pico de Orizaba, cuya edad es aproximadamente de 5 millones de años.

El siguiente evento magmático fue de tipo explosivo con producción de gran cantidad de ignimbritas que concluyó con derrames y domos asociados de composición ácida. Esta actividad vació parcialmente la cámara magmática y provocó el desplome de la estructura, originándose de esta manera la caldera por hundimiento.

Después del hundimiento se sucedieron una serie de derrames de andesita basáltica y posteriormente continuó la actividad volcánica con la erupción de grandes cantidades de pómez que cubrió en forma considerable a la región.

La fase final de la actividad volcánica del área se manifiesta con la producción de una serie de derrames de composición basáltica que muestran estrecha relación con el origen de las calderas de explosión o maars, que están distribuidas en toda la región.

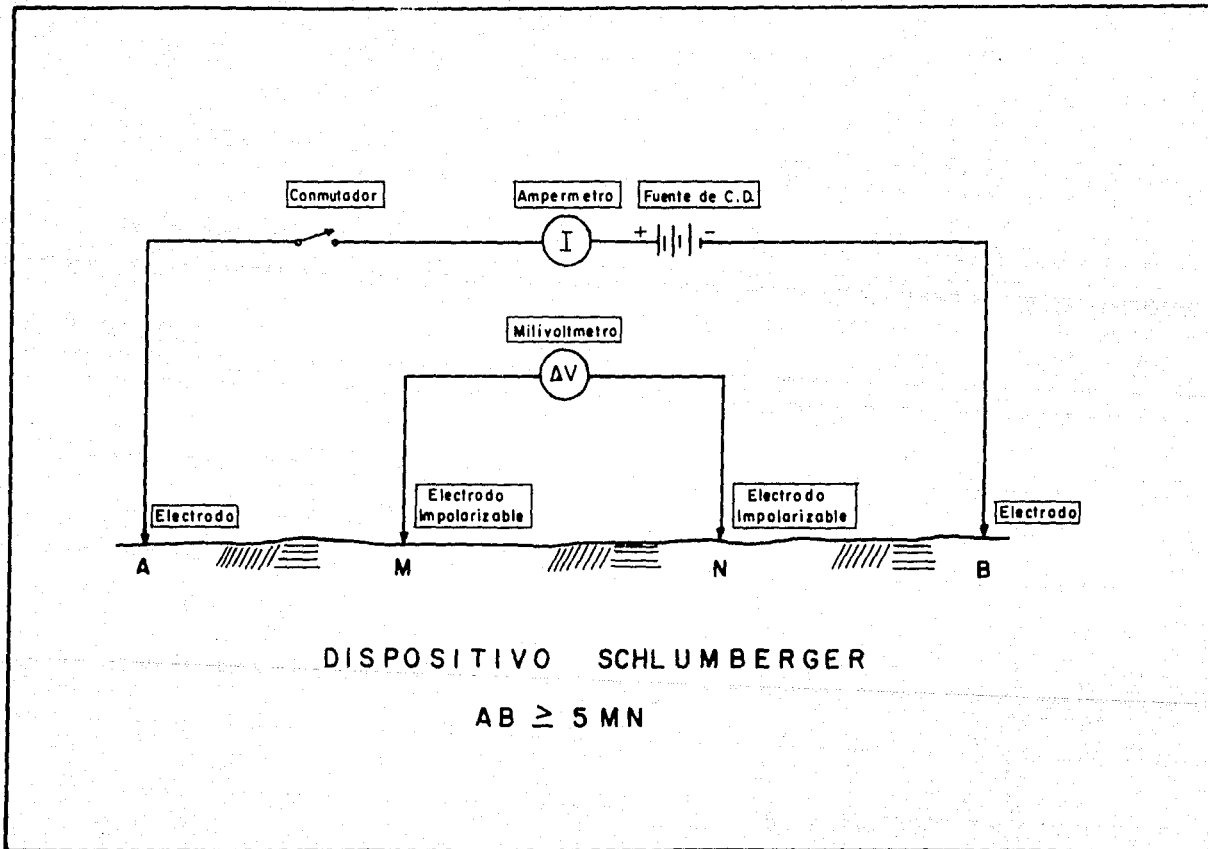


Figura 3.— Dispositivo tetrapolar Schlumberger.

Las relaciones geológicas de las diversas unidades y la secuencia magmática de La Caldera los Humeros, permiten visualizar la presencia de una cámara magmática en proceso de enfriamiento cercana a la superficie.

Se considera como posible reservorio las calizas de edad cretácica conjuntamente con los conglomerados y los materiales de relleno de la Formación Cruz Blanca, y como capa sello las rocas volcánicas y los sedimentos lacustres. (Yáñez-García *et al.*, 1980).

1.6. Antecedentes

Entre los meses de febrero y abril de 1968 la CFE, en coordinación con el Instituto de Geofísica de la U.N.A.M., realizó los primeros estudios geofísicos en La Caldera los Humeros, estando García-Durán (1968) a cargo de los mismos. En ese tiempo se hicieron mediciones de flujo térmico, magnéticas, gravimétricas, de resistividad y de ruido sísmico, cubriendo en conjunto un área de 18.43 km².

Nueve años después, en 1977, fueron realizados otros estudios geofísicos por personal del Instituto de Geofísica de la U.N.A.M., esta vez consistentes en un levantamiento aeromagnético (Flores-Luna *et al.*, 1980) y otro gravimétrico.

En los años de 1979 y 1980, el mismo Instituto, bajo contrato con la CFE, llevó a cabo también en La Caldera Los Humeros un levantamiento regional de corrientes telúricas y de autopotencial (Alvarez-Béjar, 1980 y 1981).

En ese mismo año de 1979, la CFE reanudó los trabajos geofísicos, emprendiendo las exploraciones aeromagnéticas (Palacios-Hartweg, L.H., y Vázquez, Contreras, A. 1980) y geoeléctrica a nivel regional en La Caldera Los Humeros y en Las Derrumbadas, y posteriormente los estudios a detalle geoeléctricos y autopotencial en ambas áreas, los cuales fueron continuados hasta fines de 1980.

1.7. Métodos empleados

Los métodos de exploración geofísica empleados en el presente trabajo se basan en la medida de la variación espacial de campos físicos naturales o artificiales: el campo eléctrico y el campo magnético. Los parámetros registrados determinan implícitamente importantes propiedades de las rocas.

En el análisis y cuantificación de estas propiedades se aplicaron métodos como el sondeo geoeléctrico, el autopotencial y de corrientes telúricas, para determinar la distribución de la resistividad en el medio; y levantamientos aeromagnéticos, para determinar la distribución de la susceptibilidad magnética en el subsuelo.

La discusión somera de estos métodos y su aplicación en el mapeo de rocas y estructuras geológicas relacionadas con zonas geotérmicas se describe a continuación:

METODO DE RESISTIVIDAD. --En diversas partes del mundo las experiencias obtenidas con los métodos geoeléctricos en campos geotérmicos conocidos, demuestran que un

yacimiento geotérmico con altas temperaturas ($T > 220^\circ$) se caracteriza por presentar una conductividad eléctrica del orden de magnitud mayor que la misma roca almacenadora a temperatura de 20° . El método de sondeo geoelectrico ha sido empleado con éxito en muchos lugares para obtener la distribución de resistividad; existen varios tipos de arreglos electrodicos para ejecutar un sondeo geoelectrico en el campo, pudiendo emplearse desde dos electrodos hasta cinco o más. Los arreglos de cuatro electrodos son, hasta ahora, más prácticos en la prospección.

Aquí se describe únicamente el dispositivo tetrapolar Schlumberger por ser éste el que se empleó en el presente trabajo.

En la ejecución de un sondeo eléctrico, con los electrodos M y N (Figura 3), se mapea en la superficie el gradiente de potencial (ΔV) que se produce al introducir un campo eléctrico de corriente directa por medio de los electrodos A y B que también están en contacto con la superficie. En el arreglo Schlumberger, A y B permanecen en línea con los M y N y en forma externa a ellos; durante el levantamiento de datos, A y B cambian simétricamente una secuencia logarítmica de distancias. Cuando la lectura del gradiente de potencial se vuelve muy pequeña, es necesario incrementar la separación entre M y N para aumentar la resolución de las mediciones, teniendo en cuenta la restricción $\overline{AB} \geq 5 \overline{MN}$, características del dispositivo mencionado.

Una vez que se obtiene el valor de la corriente circulante (I) y la diferencia de potencial (ΔV), se calcula la resistividad aparente de la relación:

$$\rho_a = \frac{2\pi}{K} \frac{\Delta V}{I}$$

donde

$$K = \frac{I}{AM} - \frac{I}{BN} - \frac{I}{AN} + \frac{I}{BM}$$

En cada sondeo eléctrico se grafican los valores calculados contra la distancia $\overline{AB}/2$ en papel bilogarítmico, resultando la curva de variación de la resistividad aparente con la profundidad de investigación bajo el centro del arreglo; el alcance de la investigación depende de la separación entre los electrodos de corriente y de la conductividad del subsuelo.

La resistividad del medio, por otro lado, está en función de factores como la permeabilidad y granulometría de la matriz, así como de la cantidad y la calidad del agua de formación.

Los resultados de campo se corrigen por las variaciones laterales locales y se interpretan mediante la superposición con curvas patrón y el método del Punto Auxiliar (Orellana, 1972). También son utilizados métodos automáticos de procesamiento de datos por computadora para obtener modelos geoelectricos estratificados a partir de las curvas de resistividad aparente del campo (solución al problema inverso), o para reproducir curvas de resistividad aparente teóricas a partir de modelos estratificados (solución al problema directo) obtenidos

con el procedimiento de superposición con curvas patrón a fin de probar la calidad de estos. Los parámetros que determinan un modelo geoelectrico estratificado son la resistividad real y el espesor de cada una de las capas.

El análisis profundo de la información geoelectrica recolectada requiere de los siguientes tres tipos de presentación:

a) Mapas de iso-resistividad aparente.— La finalidad de estos planos es la de mostrar en forma objetiva la distribución horizontal de la resistividad aparente para inferir cualitativamente rasgos estructurales y variaciones litológicas o de características físicas del subsuelo a una profundidad dada.

b) Secciones de iso-resistividad aparente.— Los datos cuya representación en plano se acaba de describir pueden también representarse en cortes que expresan el comportamiento vertical y la distribución horizontal de la resistividad a lo largo de la sección.

Las secciones de iso-resistividad proporcionan una visión diferente a la que se obtiene de los mapas, aunque la información es también del todo cualitativa.

c) Secciones electroestratigráficas.— Con los parámetros de los modelos geoelectricos estratificados se forman secciones geoelectricas a manera de una sección geológica elaborada con perforaciones. En tales secciones las unidades de resistividad real reproducen cercana o vagamente la posición, forma y otras características de los medios existentes, en los sitios donde aquéllas se ubican. La evaluación en este caso es cuantitativa, deduciéndose los rasgos geológicos principales con la ayuda de pozos y afloramientos de roca.

METODO MAGNETICO.— El método magnético mide parámetros del campo magnético terrestre, el cual muestra distorsiones o anomalías por la presencia de campos magnéticos inducidos o remanentes provocados por las rocas ígneas, en general, y por yacimientos de minerales magnéticos. La profundidad y estructura de la roca basal así como la localización de diques y fallas relacionadas con ellos, son los objetivos que se siguen normalmente en un estudio magnetométrico.

Las anomalías son registradas mediante instrumentos denominados magnetómetros de los cuales pueden emplearse varios tipos dependiendo del parámetro del campo que se desea medir. El tipo de magnetómetro utilizado en el presente trabajo mide y graba datos del campo total en forma analógica, para lo cual el instrumento fue instalado en un helicóptero de 5 plazas y el sensor, fuera de éste, a una distancia aproximada de 60 m. Las lecturas magnéticas son sometidas a correcciones por variación diurna y el plano resultante es procesado para eliminar el campo normal de la tierra, obteniéndose el correspondiente plano de anomalía residual. Este muestra una serie de rasgos asociados a cuerpos tanto aflorantes como del subsuelo por lo que la interpretación de anomalías debe considerar, por un lado, las particularidades geológicas del área, y, por otro, los objetivos de la exploración.

Para este método se toma en cuenta que los fluidos hidrotermales y las altas temperaturas, alteran las propiedades magnéticas de las rocas.

METODO DE AUTOPOTENCIAL (S.P.).— Esta técnica geofísica registra anomalías de gradiente de campos eléctricos naturales por medio de un par de electrodos impolarizables, conectados a un voltímetro muy preciso, cuya posición se hace variar a lo largo de las líneas de estudio.

Las fuentes de origen de las anomalías de autopotencial en un área geotérmica son:

- a) El movimiento de fluidos a través de medios porosos, dando lugar a un potencial electrocinético.
- b) Las reacciones electroquímicas que causan flujos de corriente en el subsuelo y,
- c) Los altos gradientes de temperatura (efecto termoelectrónico) que producen fuertes diferencias de potencial en el orden de 200 a 300 mv.

Se ha observado que el gradiente de potencial en estos casos experimenta fuertes variaciones a lo largo de zonas falladas y fracturadas, ya que existen movimientos ascendentes y descendentes de fluidos hidrotermales.

Este método es una herramienta auxiliar para entender el comportamiento del subsuelo mostrando gráficamente en perfiles la diferencia de potencial (ΔV), contra la posición horizontal del dispositivo electródico.

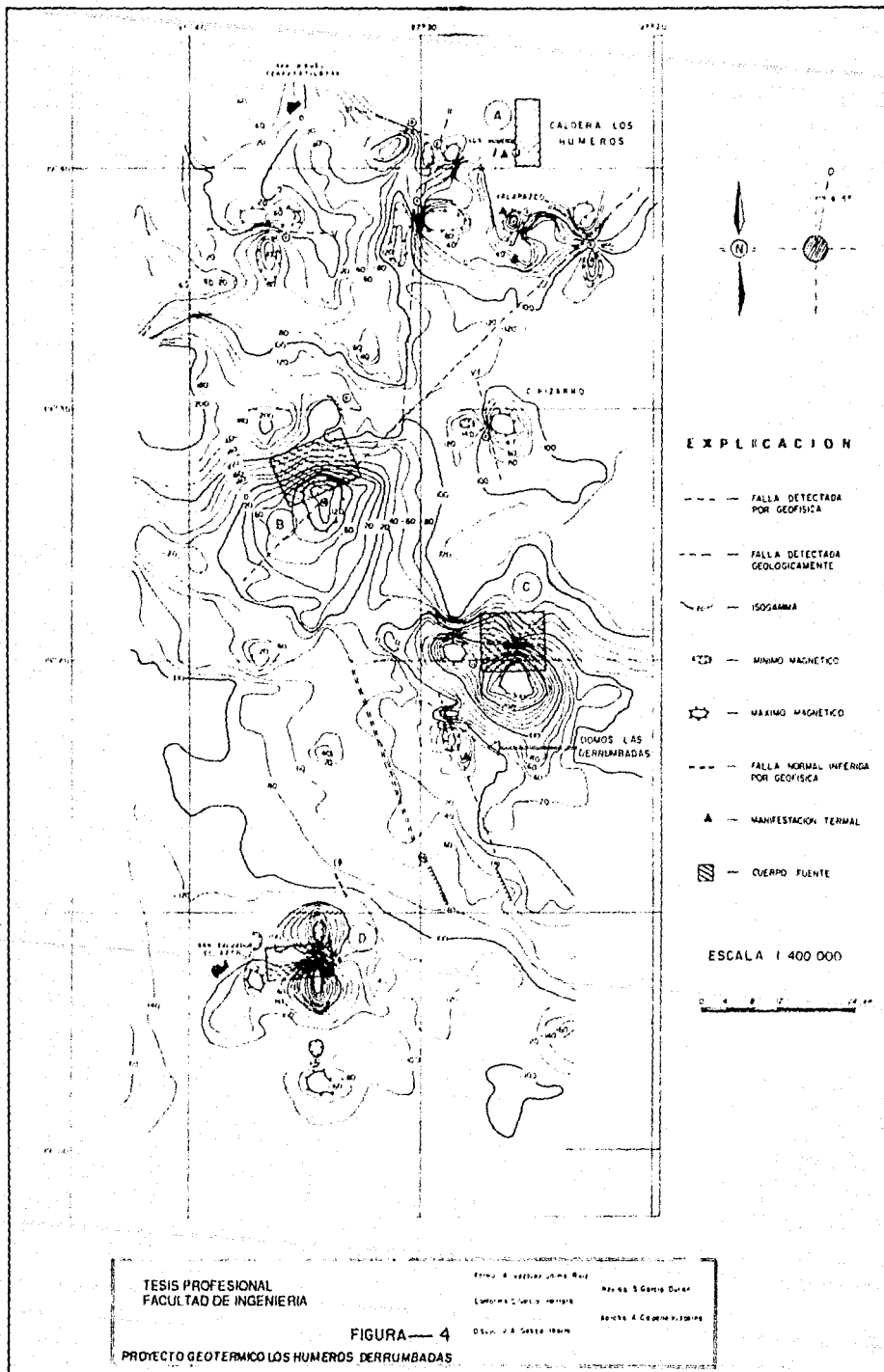
METODO DE CORRIENTES TELURICAS.— Es una técnica que aprovecha la existencia de campos electromagnéticos naturales (EM) originados por interacción del viento solar con la magnetósfera terrestre y, en menor grado, por las descargas eléctricas (relámpagos) que ocurren masivamente en el cinturón ecuatorial.

Para el método telúrico, Alvarez-Béjar (1980) ha aplicado un arreglo, propuesto por Morrison y desarrollado por Beyer, consistente en el mapeo del campo eléctrico (E) en dos intervalos contiguos de 500 m en línea, a dos frecuencias diferentes: 0.05 y 8 Hz. El intervalo en la dirección de avance denominado, corresponde a la componente E_y del campo, mientras que el intervalo opuesto a ella, denominado X, corresponde a la componente E_x del mismo.

Debido a que ambas componentes son medidas simultáneamente, las fluctuaciones en amplitud que puedan presentar las corrientes telúricas quedan anuladas al realizar el cociente E_y/E_x , de tal manera que sólo se reflejan características eléctricas bajo cada intervalo.

Las frecuencias de 0.05 Hz y 8 Hz permiten sondear a dos profundidades diferentes y las penetraciones quedan determinadas por la secuencia de resistividades y el valor absoluto de éstas. El cociente E_y/E_x es graficado para ambas frecuencias en función de la posición, resultando una curva de variación lateral cuyos quiebres o irregularidades son interpretados cualitativamente asociándolos con rasgos geológicos como zonas de fractura, fallas, contactos, diques, etc.

En caso de medios con capas conductoras y resistivas en alguna secuencia dada, se establece una equivalencia de los estratos reales con uno ficticio y homogéneo que representa el efecto conjunto de todos los estratos reales sobre la onda; la penetración en el medio queda entonces determinada por la resistividad aparente de su equivalente homogéneo.

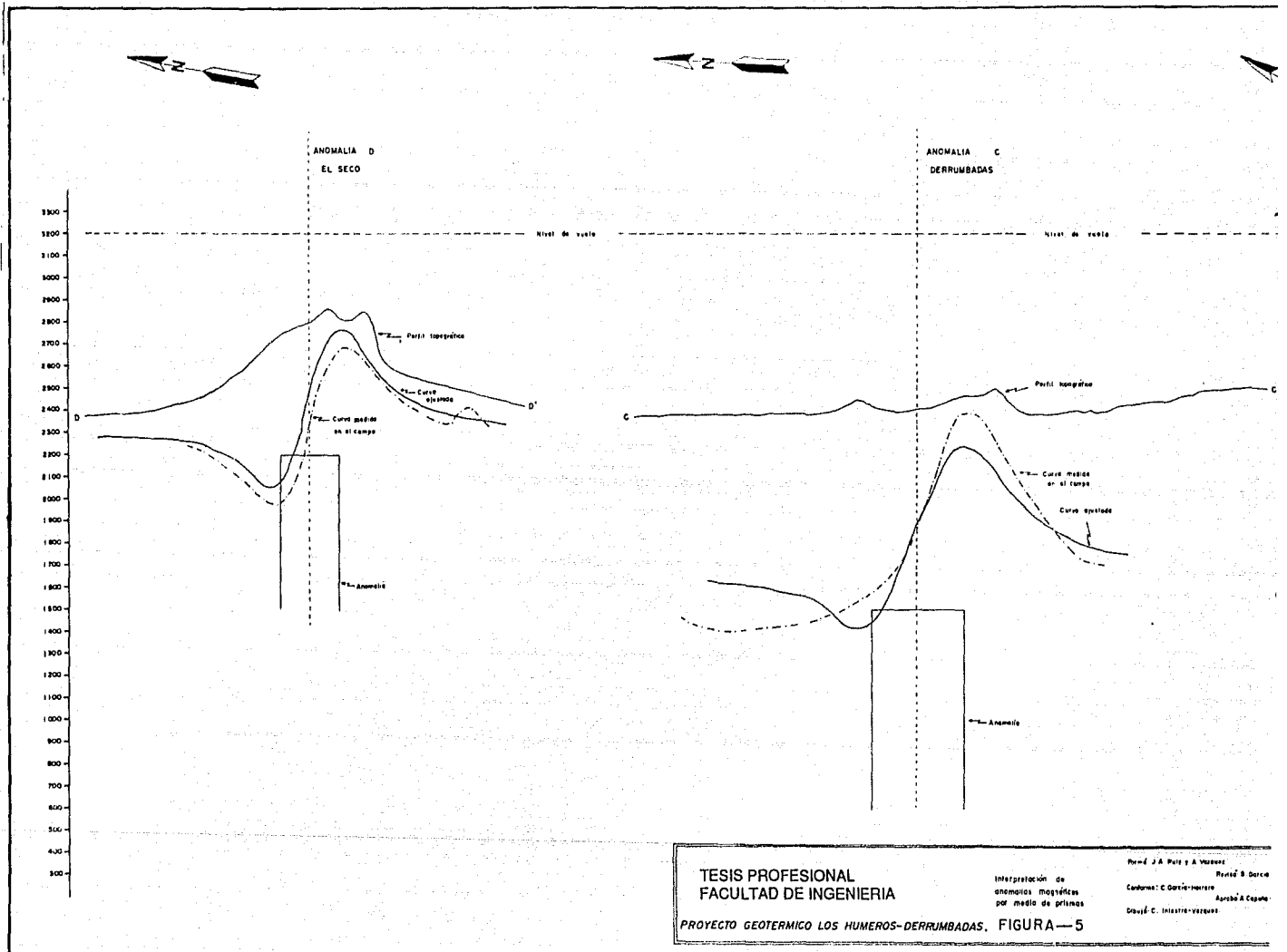


TESIS PROFESIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA

PROYECTO GEOTERMICO LOS HUMEROS DERRUMBADAS

FIGURA — 4

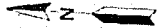
Elaborado por: J. A. Sesto 1980m
Revisado por: J. A. Sesto 1980m
Diseñado por: J. A. Sesto 1980m



TESIS PROFESIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA
PROYECTO GEOTERMICO LOS HUMEROS-DERRUMBADAS. FIGURA—5

Interpretación de
 anomalías magnéticas
 por medio de optinas

Perfil J. A. Pati y A. Vazquez
 Perfil B. Durán
 Cadena: C. García-Herrera
 Aprobó: A. Capana
 Dibujó: C. Martínez-Vázquez

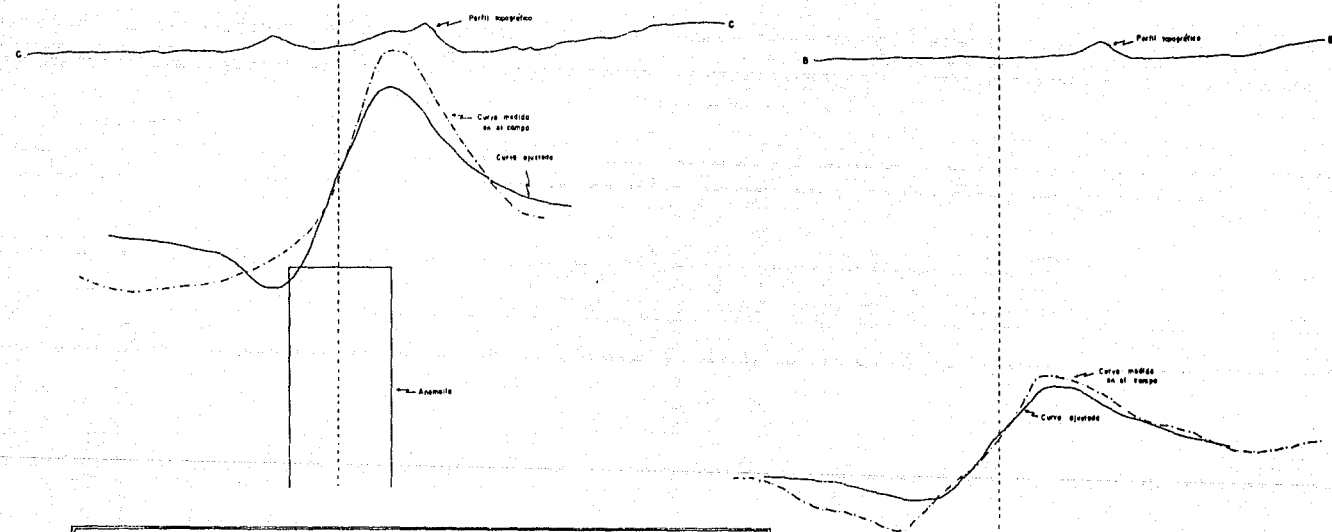


ANOMALIA C
DERRUMBADAS

ANOMALIA B
GRANITO

Nivel de corte

Nivel de corte



TESIS PROFESIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA

Interpretación de
anomalías magnéticas
por medio de prismas

Formó a A. Ruiz y A. Viquez
Revisó S. García-Durán
Colaboró: C. García-Hernández
Ayudó a Cepeda-Vázquez
Diseñó C. Inostroza-Vasquez

PROYECTO GEOTERMICO LOS HUMEROS-DERRUMBADAS. FIGURA—5

Anomalia

CAPITULO II

ESTUDIOS GEOFISICOS REGIONALES

II. 1. Finalidad.

La finalidad de los estudios geofísicos regionales fue determinar de una manera rápida y económica las características estructurales más sobresalientes del área Los Humeros las Derrumbadas. El carácter de gran visión propio de los resultados obtenidos en estos estudios permitió delimitar las zonas para la programación de los trabajos a detalle. Estos a su vez con la información geológica, geoquímica y geohidrológica, permitieron la comprensión clara del subsuelo.

En el siguiente apartado se reseñan los estudios geofísicos de esta etapa, y los resultados correspondientes, siguiendo el orden en que fueron efectuados los mismos.

II. 2. Levantamiento aeromagnético.

En el área que cubre el P.G. Los Humeros las Derrumbadas se realizó un estudio aeromagnético con el fin de detectar estructuras geológicas de interés para la factibilidad del proyecto, principalmente en lo que se refiere a la profundidad y forma del basamento ígneo-metamórfico que usualmente se ha relacionado con la fuente de calor de un yacimiento geotérmico.

La superficie incluida en el levantamiento fue aproximadamente de 4 000 km², con una retícula de 5 km por lado; se usó un helicóptero Lamma de 5 plazas, la altura de vuelo fue de 3 200 m.s.n.m., a una velocidad de 55 nudos, se tomaron lecturas del campo total con intervalos de 1 seg en forma analógica. El posicionamiento se llevó a cabo en forma visual con planos topográficos de la Dirección de Estudios del Territorio Nacional (DETE-NAL), localizando sobre el terreno puntos previamente seleccionados, el control de altura se llevó mediante un altímetro barométrico.

Para tener un registro continuo de la variación diurna, se colocó un magnetómetro base al centro del área el cual tomó datos en forma continua durante el levantamiento aéreo.

Los métodos de reducción de datos fueron los clásicos en este tipo de prospecciones, eliminando el efecto de la variación diurna y el campo natural para obtener el plano de ano-

malía residual. La interpretación de éste revela algunas características geológicas según la forma y orientación de las anomalías magnéticas. Tomando en cuenta esas características, se describen los siguientes resultados.

El plano residual se dividió en 4 zonas principales (Figura 4), relacionadas con grandes estructuras ígneas. La zona A corresponde a la estructura caldérica Los Humeros, en la cual aparecen las siguientes anomalías principales:

Al centro de la caldera se detecta la parte positiva de una anomalía bipolar (anomalía 1), la cual se origina por un intrusivo altamente magnetizado en forma de prisma que debe encontrarse a una profundidad aproximada de 2 km asociado probablemente al conducto volcánico localizado al centro de la caldera, por el cual salieron.

La anomalía 1 ya ha sido detectada (Flores-Luna, *op. cit.*) donde se ha interpretado un cuerpo que tiene las dimensiones horizontales de 5 x 2 km orientado de Norte a Sur.

En esta misma zona se detecta una serie de anomalías que se han explicado por fallas que delimitan la caldera, algunas de las cuales han sido observadas en la superficie (Yáñez-García, *op. cit.*); la falla II, asociada con los bipolos Nos. 3 y 4, limita la parte Oeste de la caldera, mientras que la falla III de orientación Noroeste-Sureste, que dio origen al Cerro Oyameles, es la causante de la anomalía bipolar No. 6. Esta falla podría prolongarse hacia el centro de la caldera pero no existen evidencias geológicas que lo permitan afirmar.

La anomalía No. 2 es importante debido a que está localizada sobre el Xalapazco o Calderita, donde existen manifestaciones termales asociadas a los fallamientos que dieron origen al hundimiento.

La falla I, inferida por el bipolo No. 5, limita la parte Sureste de la caldera, prolongándose hacia el Suroeste hasta la zona anómala B, donde ha sido cartografiada por geología.

La zona B presenta una gran anomalía con suave gradiente causada por un cuerpo de forma cómica que sigue una distribución espacial muy parecida al contorno de la anomalía, teniendo su parte más somera hacia el centro de la misma. El intrusivo forma parte del basamento granítico y ha sido interpretado por el método de prismas infinitos, asignándole una profundidad de 2 000 metros (Figuras 4 y 5B) y las dimensiones horizontales de 4 por 6 km con una orientación Noreste-Suroeste. Existen afloramientos de este cuerpo en diversas partes de la zona.

La zona C se encuentra formada por las anomalías bipolares Nos. 11 y 12. La primera se ha interpretado como un cuerpo localizado a una profundidad de 900 m a partir del nivel medio regional (2 400 m.s.n.m.), con dimensiones horizontales de 4.5 y 5 km (Figuras 4 y 5C) y una orientación aproximada Este-Oeste. Esta anomalía sigue el contorno del intrusivo sienítico de cuya existencia se tienen evidencias por la presencia de afloramientos del mismo en el área.

La anomalía del bipolo No. 12 se localiza al sur de Los Domos las Derrumbadas, donde

existe una serie de fallas por las cuales se han emplazado las riolitas (Qrio) dando origen a los domos.

Al Suroeste de Los Domos las Derrumbadas se localizan las anomalías Nos. 16, 17 y 18 que determinan la zona D. Estas son causadas por un cuerpo volcánico y los derrames asociados que pueden observarse en El Seco. La zona anómala está relacionada con una serie de fallas localizadas al norte de la misma, por donde se han emplazado materiales ígneos. La anomalía magnética No. 16 se ha interpretado con un cuerpo prismático emplazado a 200 m bajo el nivel medio topográfico (2 400 m.s.n.m.) cuyas dimensiones horizontales son de 2.7 por 5.2 km (Figuras 4 y 5D) y tiene una orientación aproximada Este-Oeste.

Relacionadas con las 4 zonas anteriormente mencionadas se han detectado otra serie de pequeñas anomalías aisladas que fueron interpretadas como zonas de falla. La anomalía bipolar No. 7 ha sido asociada a la serie de fallas V que dio origen a los derrames volcánicos en la zona; la anomalía bipolar No. 9 debe originarse por la falla VI a la cual se le atribuyen las dos etapas de vulcanismo que caracterizan al Cerro Pizarro, es decir, la formación del volcán preexistente y el emplazamiento del domo riolítico; asimismo, de la magnetometría se ha interpretado la existencia de un sistema de fallas escalonadas que se profundizan hacia el Oeste: fallas 13, 14 y 15 (Figura 4), aproximadamente con una orientación Noreste-Suroeste, formando un graben en esa zona.

II. 3. Estudio Telúrico y de Autopotencial

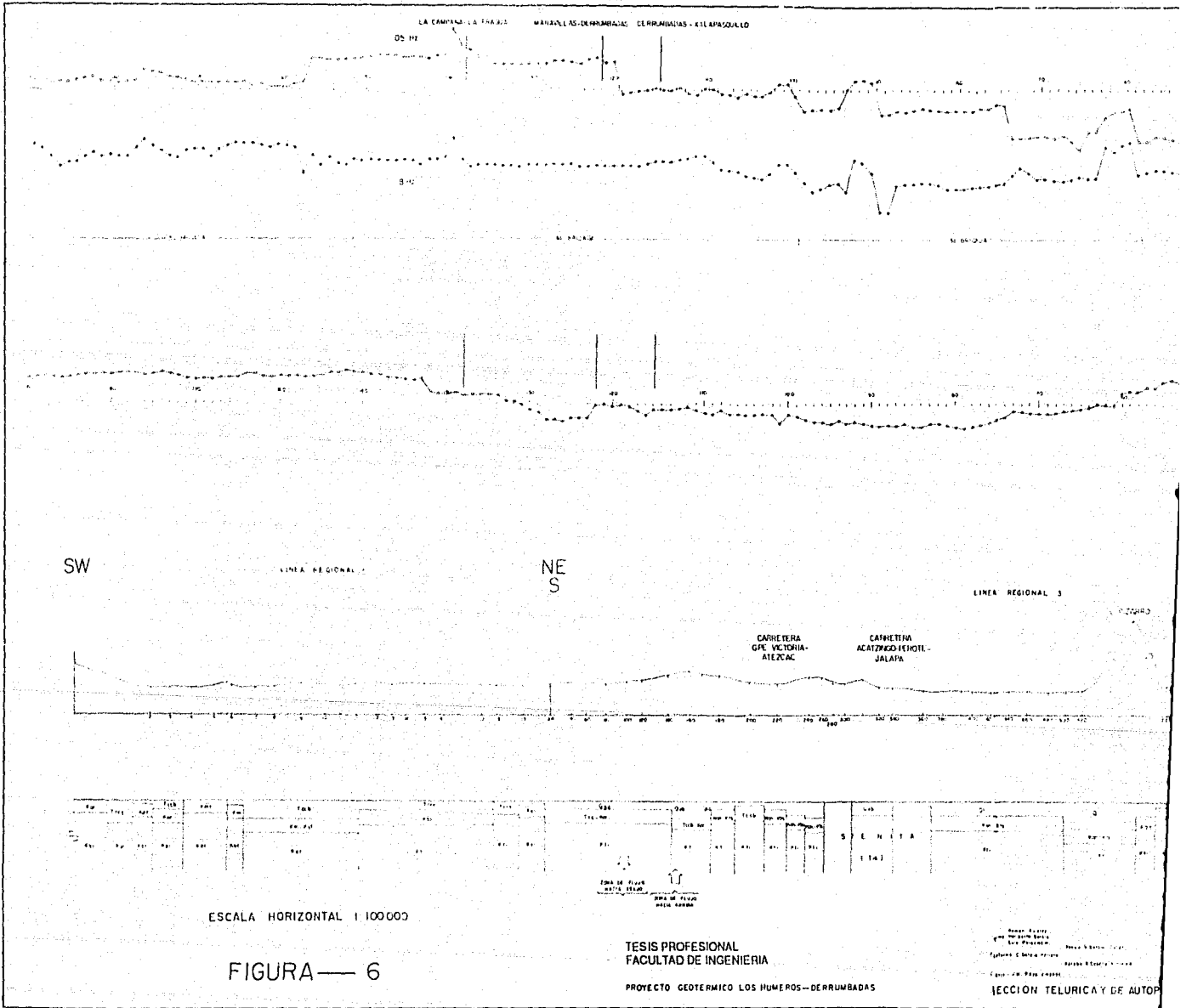
El Instituto de Geofísica por contrato con C.F.E. realizó un levantamiento regional de corrientes telúricas y de potencial natural (Alvarez-Béjar, *op. cit.*) que cubrió una longitud total de 140 km con 4 líneas. De éstas, en el presente informe sólo se describe la línea regional denominada Aljibes-Derrumbadas-Humeros (Figura 6), que corresponde a las líneas geoelectricas regionales 1 y 2.

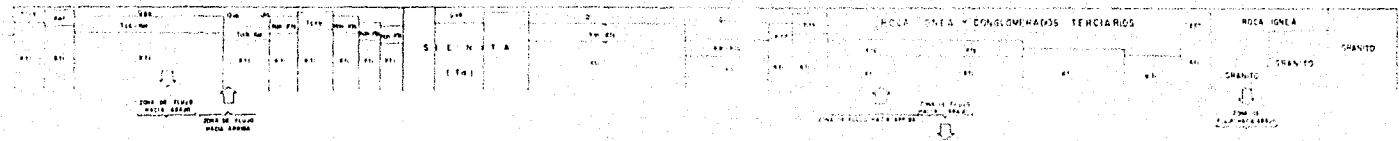
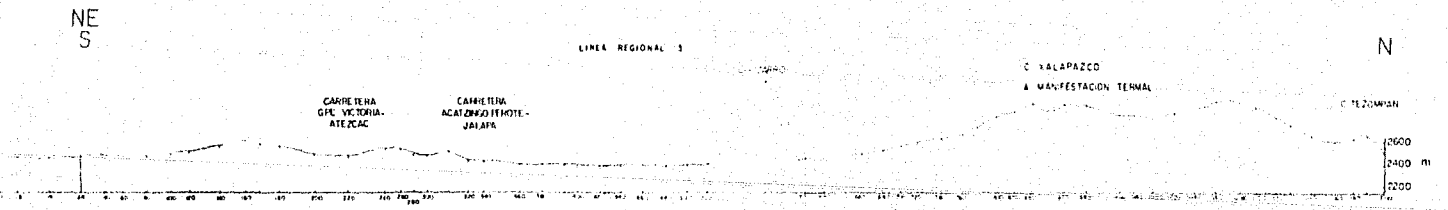
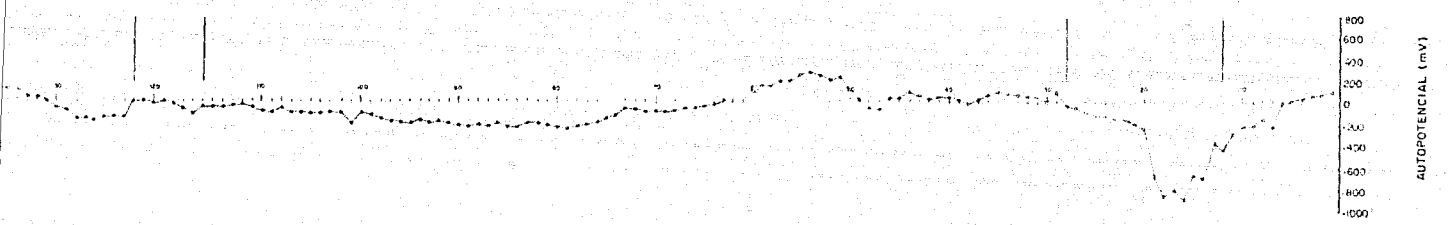
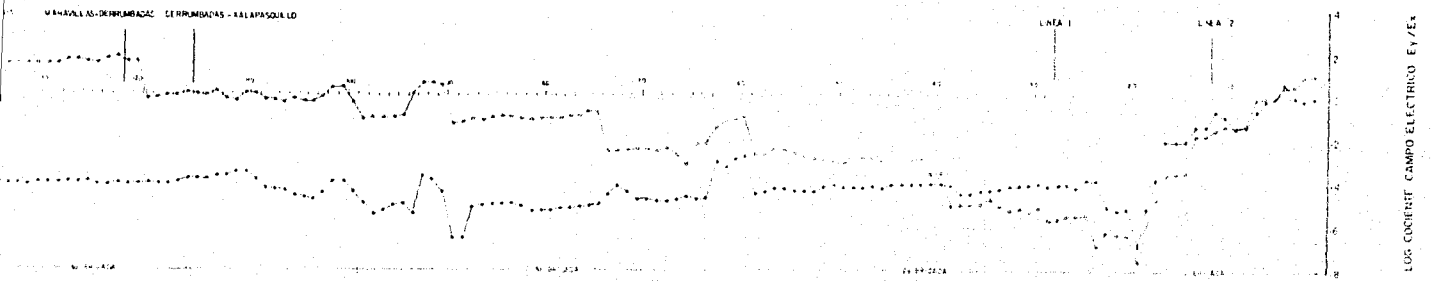
Los resultados originales han sido modificados, en base a los conocimientos geológicos y geofísicos actuales, sobre un modelo de bloques separados por fallas verticales de diverso desplazamiento relativo. Las características más sobresalientes de dicha interpretación son las siguientes:

De los puntos 1 a 19 (No. de sondeo geoelectrico) se interpretó en general un primer paquete de conglomerados del Terciario (Tceb) que cubre a rocas calcáreas del Cretácico, las cuales afloran entre los puntos 5 a 6 con el nombre de Formación Maltrata; en esa zona el basamento está constituido por la Formación Orizaba (Kor), que se detecta entre los puntos 1 y 12, y por las calizas de la Formación Tamaulipas Inferior (Kti), detectada entre los puntos 12 y 19 (Línea 2).

Entre los puntos 20 y 280 (Línea 1) probablemente corresponda con rocas y materiales de relleno del Cuaternario sobre un paquete de conglomerados y rocas calcáreas del Cretácico. El basamento resistivo en este intervalo se encuentra formado por las calizas de la Formación Tamaulipas Inferior.

Entre los puntos de referencia 300 y 380 se detectó un intrusivo sienítico Terciario (Tis) cubierto por rocas volcánicas del Cuaternario.





TESIS PROFESIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA

PROYECTO GEOTERMICO LOS HUMEROS-DERRUMBAS

RECCION TELURICA Y DE AUTOPOTENCIAL

Del punto 380 hasta el 640 se interpretó como un primer paquete formado por sedimentos lacustres de la Laguna de Tepeyahualco, que cubre a otro paquete que incluye las Formaciones Tamaulipas Superior (Kts) y Agua Nueva (Kan), el cual a su vez descansa sobre la roca basal de la Formación Tamaulipas Inferior.

Del punto 660 hasta el extremo norte de la línea se detectan en primer lugar varios tipos de rocas ígneas y conglomerados del Terciario, los cuales sobreyacen, del punto 660 hasta el 1 060, a un paquete de rocas calcáreas del Cretácico y, del punto 1 060 hasta el extremo de la línea, al basamento regional constituido por rocas ígneas y metamórficas.

Por su parte, con el método de autopotencial se localizaron y delimitaron dos zonas principales de flujos (Figura 6) ascendentes y descendentes, en los intervalos 60-160 y 660-760, así como una zona de flujos descendentes en el intervalo 960-1 100, los cuales pudieran relacionarse con la circulación de fluidos hidrotermales en el subsuelo (Alvarez-Béjar, *op. cit.*).

II. 4. Estudio geoelectrico

El estudio geoelectrico se realizó a través de cuatro líneas regionales (Figura 7) mediante el método de sondeos eléctricos verticales (S.E.V.) con espaciamiento electródico máximo de $AB = 4\ 000\ m$ en un dispositivo Schlumberger.

En el presente sólo se hace referencia a los resultados de 3 líneas, ya que la cuarta se describe más adelante, en los estudios de detalle de La Caldera los Humeros (Línea 36); las tres primeras se presentan según su orden de importancia.

Línea 1.— Esta línea tiene una longitud de 90 km y une a Los Domos las Derrumbadas con La Caldera los Humeros en dirección Sur a Norte y consta de 58 sondeos eléctricos (Figura 8).

Del perfil de iso-resistividad aparente se desprenden las siguientes características: en la totalidad de su extensión los valores superiores a los $700\ \Omega\text{-m}$ se identifican en general con materiales volcánicos de varios tipos: basaltos, riolitas, tobas, estando la mayor concentración de aquellos al norte del Cerro Pizarro y al final de la sección (sondeos 620 a 1 200). Los altos resistivos localizados al sur del perfil, entre los sondeos 100 y 200, se deben a los materiales ígneos eyectados por el volcán Cerro Alto, localizado al este de los Domos las Derrumbadas, mientras que los valores altos de los sondeos 240 a 300 corresponden a los derrames del Volcán La Chancla. Los valores de resistividad aparente restantes, oscilan entre 100 y $500\ \Omega\text{-m}$, se deben a la existencia de rocas calcáreas a profundidad. En algunos casos la resistividad propia de estas formaciones no es clara debido al efecto de los materiales superficiales altamente conductores, como el caso de la Laguna de Tepeyahualco localizada entre los sondeos 360 y 500, donde la resistividad aparente es menor a $30\ \Omega\text{-m}$ debido a que el suelo está saturado de aguas salobres.

Esta sección muestra también una serie de bajos de resistividad aparente ($\rho_a < 50\ \Omega\text{-m}$) a profundidades que sugieren una posible relación con zonas de alta temperatura, lo cual representa un factor muy importante para la localización de yacimientos geotérmicos de interés comercial.

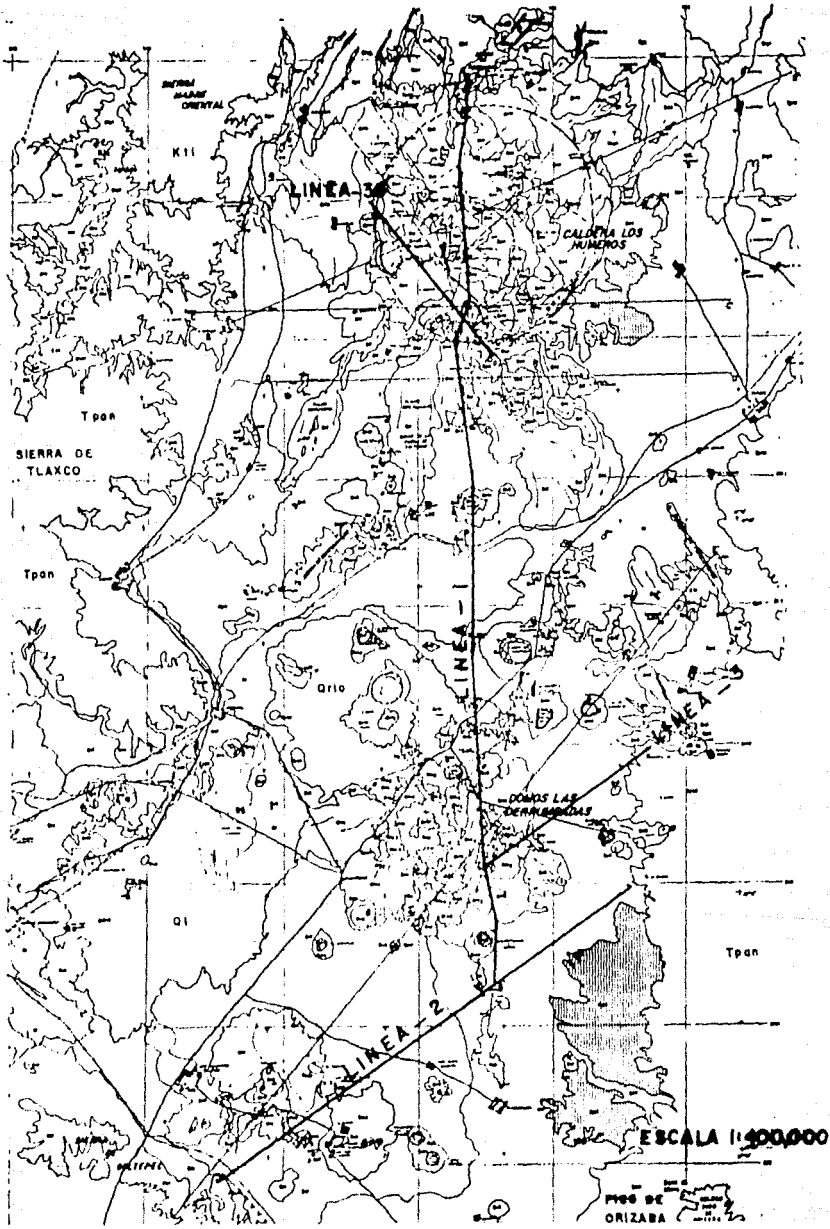


Figura 7. — Localización de líneas geoelectricas regionales.

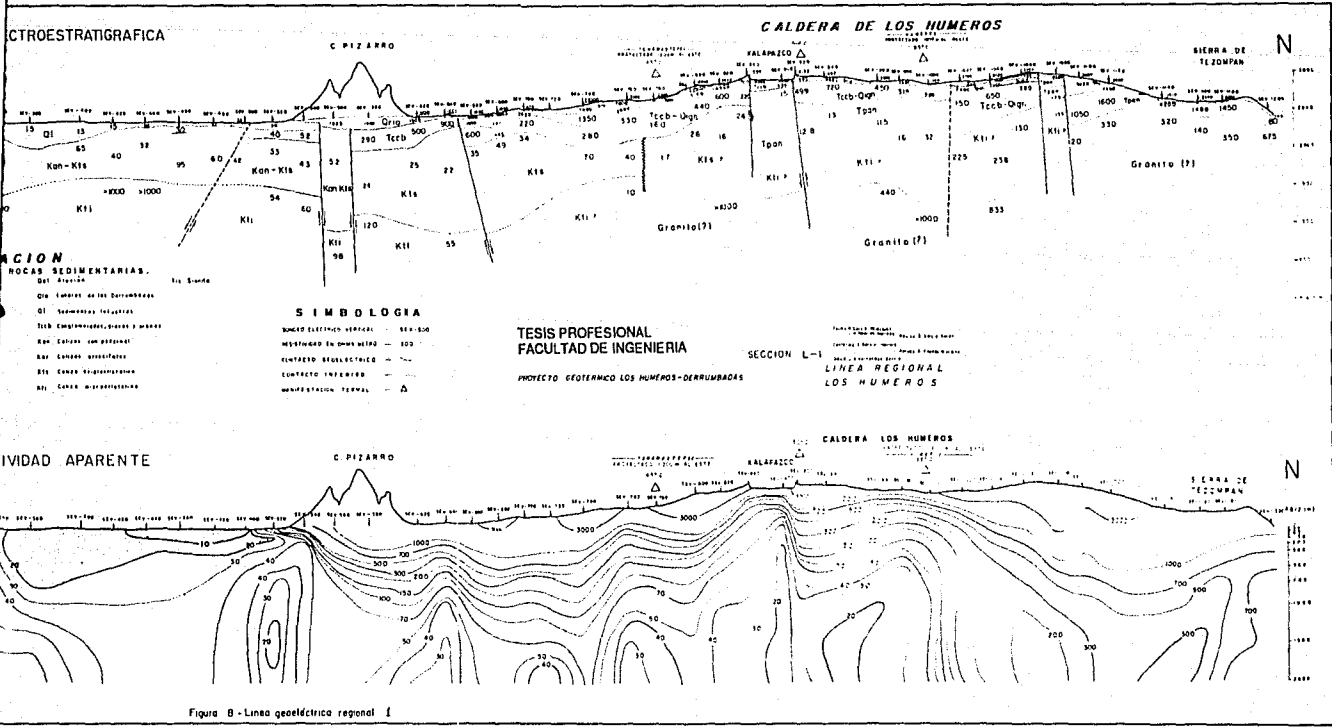
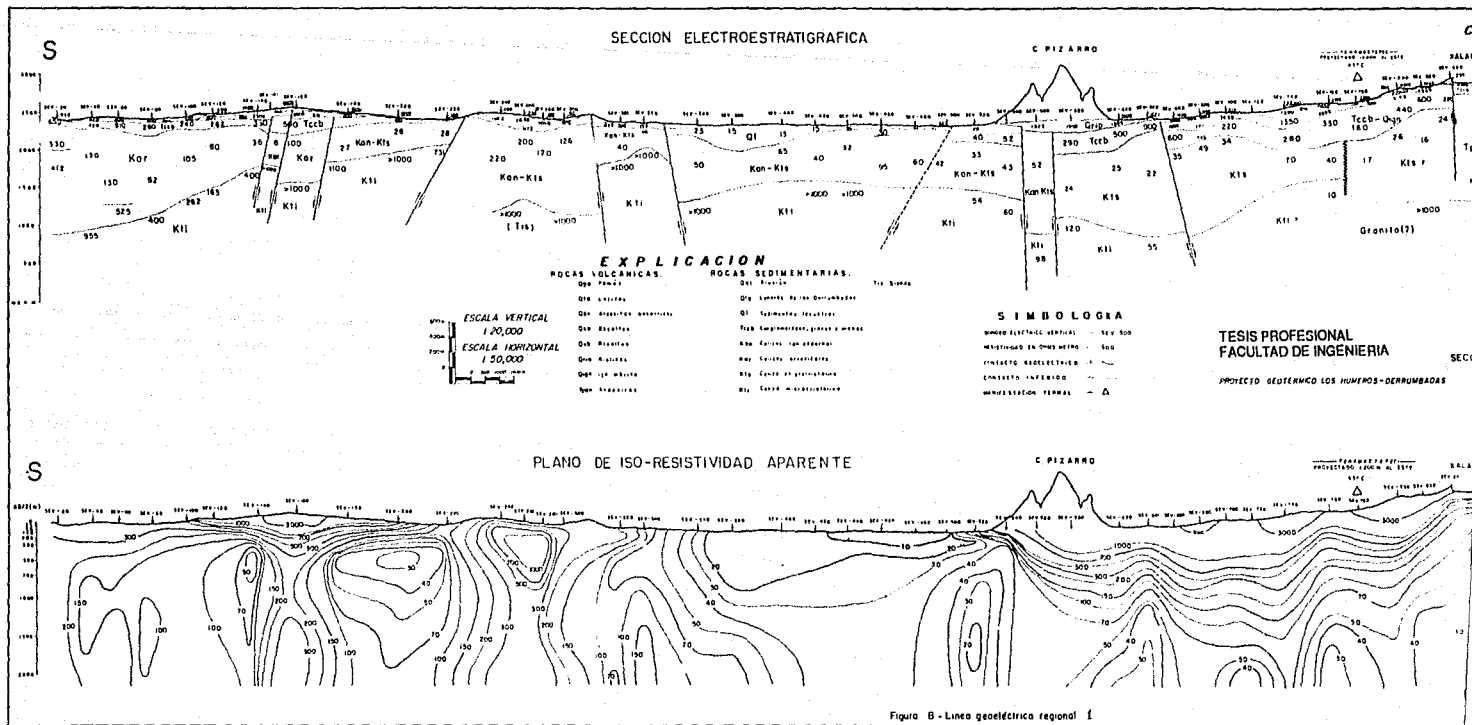


Figura B - Línea geoelectrónica regional I



Uno de estos mínimos se encuentra situado bajo el sondeo 140, y tiene cercana relación con las manifestaciones termales de la Sierra La Ventana. Otra anomalía de interés se ha detectado con las manifestaciones termales observadas en el domo sur de Las Derrumbadas.

En los flancos Sur y Norte del Cerro Pizarro (sondeos 520 y 620), se detectaron anomalías de resistividad que, en cambio, no presentan manifestación hidrotermal alguna en superficie.

La anomalía ubicada bajo el sondeo 760 puede asociarse a las manifestaciones termales del sitio denominado Tenamustepec. Las anomalías localizadas entre los sondeos 900 y 1 000 muestran relación con una serie de manifestaciones termales que se observan en el Xalapazco y en el poblado Los Humeros, indicando la presencia de un posible yacimiento a profundidad de grandes dimensiones.

La interpretación electrostratigráfica de esta sección revela importante información: entre el sondeo 20 y el sondeo 220 se detecta una cubierta o capa superficial constituida por un grueso paquete de horizontes geológicos con espesor promedio de 200 m; dicho paquete está formado por materiales tales como pómez (Qpo), conglomerados del Terciario y depósitos volcánicos estos últimos probablemente (Qvb) fueron eyectados por el Volcán Cerro Alto, localizado entre los sondeos 120 y 180, en una época relativamente reciente.

Bajo esta misma cubierta se detecta una segunda unidad compuesta por rocas calcáreas del Cretácico que corresponden a las formaciones geológicas, Orizaba y Agua Nueva, con valores de resistividad desde 6 Ω -m hasta 412 Ω -m y con espesores que se adelgazan de 1 350 a 300 m de Sur a Norte; las bajas resistividades deben tener su origen en los fluidos hidrotermales, que se manifiestan al pie de Los Domos las Derrumbadas. En esta misma zona se ha interpretado una serie de fallamientos, tal vez relacionados con la aparición del Volcán Cerro Alto. El basamento resistivo, en esa parte de la línea, se encuentra compuesto por rocas calcáreas de las formaciones Tamaulipas Inferior y Tamaulipas Superior.

Entre los sondeos 220 y 240 se ha inferido una falla que representa el límite septentrional de la zona descrita, entre los sondeos 240 y 300 se halla una cubierta formada por rocas volcánicas con resistividades que van desde 500 hasta 2 000 Ω -m y espesor máximo de 150 m, producto del Volcán La Chancal. Subyaciendo a estos materiales ígneos se han detectado rocas calcáreas de la Formación Tamaulipas Superior cuya resistividad oscila entre 120 y 220 Ω -m. Aquí se ha supuesto un basamento resistivo ($\rho < 1\ 000\ \Omega$ -m) formado por el intrusivo ígneo terciario de composición sienítica.

En el intervalo comprendido por los sondeos 300 y 360 se ha sugerido la existencia de dos fallas que limitan una secuencia con 3 medios bien diferenciados: una cubierta de 100 m de espesor compuesta por materiales volcánicos, una capa de 420 m de espesor con calizas de la Formación Agua Nueva, y el basamento resistivo por la Formación Tamaulipas Inferior.

Entre los sondeos 360 y 500 la influencia del acuífero Tepeyahualco produce baja resistividad hasta una profundidad estimada entre 750 y 1 000 m, afectando a la cubierta de 50 a 300 m compuesta por sedimentos lacustres (Q1) con un espesor de 50 a 300 m, y a la

Formación Agua Nueva, que tiene allí un espesor promedio de 700 m. En esta zona el basamento resistivo debe estar formado por rocas calcáreas del Cretácico Inferior.

En el sector ubicado entre los sondeos 500 y 660 es posible inferir la existencia de un sistema de fallas que produce un desplazamiento hacia arriba *horst* de las rocas Cretácicas en las formaciones Agua Nueva y Tamaulipas Superior. Es notable la baja resistividad en el basamento calcáreo compuesto por la Formación Tamaulipas Inferior, donde los valores oscilan entre 55 y 120 Ω -m. Este comportamiento pudiera estar relacionado con la existencia de un yacimiento geotérmico de interés. Al centro del *horst* se ha inferido el fallamiento que dio origen al Cerro Pizarro.

Entre los sondeos 660 y 860 se detecta una cubierta de materiales ígneos de 300 a 600 m de espesor con valores de resistividad hasta de 22 000 Ω -m. Bajo esta capa de materiales ígneos se detecta un medio, cuyo espesor oscila entre 100 y 350 m compuesto por conglomerados del terciario cuya resistividad cae dentro del rango 160-600 Ω -m. Las calizas se manifiestan geoelectricamente a partir de los 390 m bajo el sondeo 660 y a los 550 m bajo el sondeo 740. El sondeo 760 es de particular interés, porque a los 1 010 m de profundidad se detectan bajas resistividades que tal vez obedezcan a la circulación de fluidos termales.

El sondeo 860, por otra parte, detecta un horizonte resistivo a una profundidad de 1 600 m el cual, se ha supuesto, corresponde al basamento granítico. Entre los sondeos 860 y 920, que constituyen los límites Sur y Norte del Jalapazco respectivamente, se detectan dos fallas, una de las cuales, la ubicada al Norte, da origen a manifestaciones termales en superficie. En esta zona también se detectan bajas resistividades para las calizas de la Formación Tamaulipas Superior a una profundidad de 1 300 m, dando a este lugar un gran interés para fines geotérmicos. Sobre estas rocas calcáreas se encuentra un horizonte con espesor de 80 m de conglomerados terciarios con resistividades del orden de 530 Ω -m., sobre los cuales, a su vez, existe un paquete de 35 m de espesor compuesto en su mayor parte por rocas volcánicas.

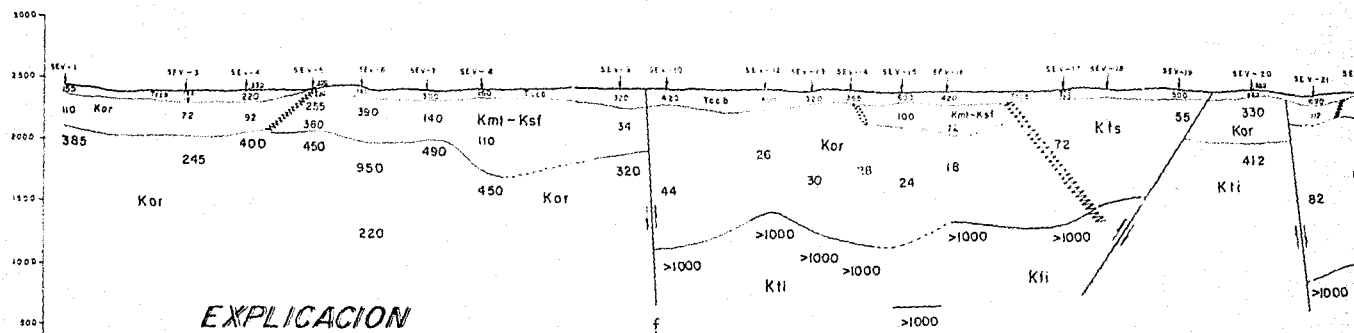
Del sondeo 920 al sondeo 1 000, a una profundidad promedio de 350 m, se detectan bajos resistivos ($\rho < 32 \Omega$ -m) en rocas calcáreas del Cretácico; esta zona conductora es también de enorme interés, ya que ocupa una gran extensión. Las calizas están cubiertas por 350 m de materiales ígneos y conglomerados resistividad variable desde 315 hasta 4 680 Ω -m. hasta 4 680 Ω -m.

Entre los sondeos 960 y 1 040, a una profundidad de 1 200 m aproximadamente, se registró un medio altamente resistivo relacionado con el basamento granítico mientras que, por otro lado, en la zona comprendida por los sondeos 1 020 y 1 200, se detectó una gruesa cubierta de materiales volcánicos con espesor hasta de 600 m (sondeo 1 100) y resistividad que oscila entre 740 y 13 000 Ω -m, correspondiendo los valores más altos a la andesita.

Finalmente, en el intervalo delimitado por los sondeos 1 120 y 1 200 se encontró un sustrato con resistividad del orden de magnitud menor que la cubierta andesítica, a una profundidad relativamente somera (200 m en promedio), el cual se ha interpretado como un granito alterado.

SW

SECCION ELECTROESTRATIGRAFICA

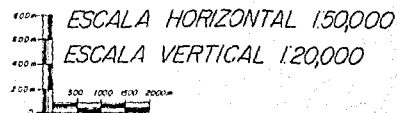


EXPLICACION

- Tpau Anisotropia
- Tccb Conductividad, pozos y drenes
- Kan Caliza con pedernal
- Kor Caliza arenolimitada
- Kts Caliza cristalina
- Kti Caliza microcristalina

SIMBOLOGIA

- Señal electrostratigrafica SEV - 20
- Resistividad en ohm-metro 10
- Contacto geoelectrico
- Contacto inferido



PERFIL DE ISO-RESISTIVIDAD APARENTE

SW

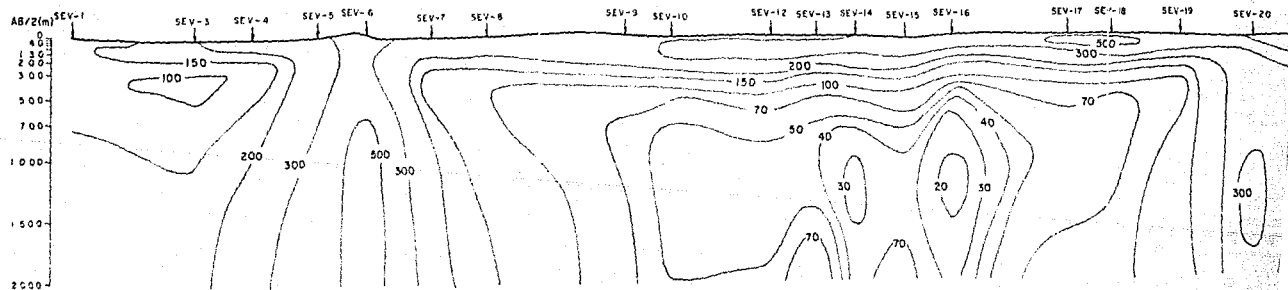
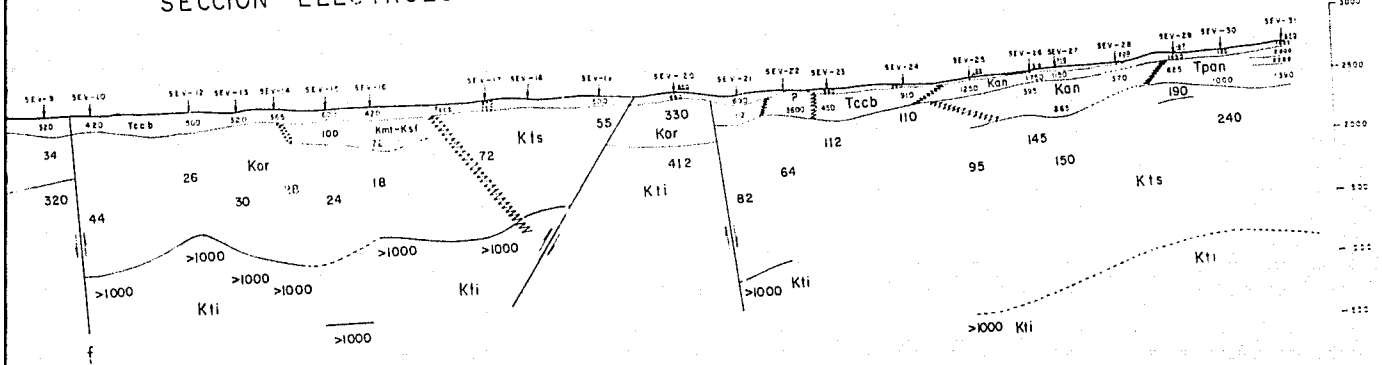


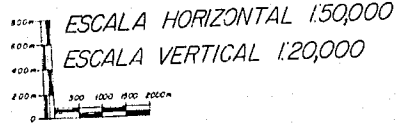
Figura 9.- Linea geoelectrica regional 2

SECCION ELECTROESTRATIGRAFICA



SIMBOLOGIA

- Contorno eléctrico vertical SEV - 20
- Resistividad en ohm-metro 30
- Contacto geoelectrico ~~~~~
- Contacto inferido - - - - -



TESIS PROFESIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA

PROYECTO GEOTERMICO HUMEROS-DERRUMBADAS.
 LINEA RESISTIVIDAD 12

HUMEROS-DERRUMBADAS
 Formas L.H.P. de C. HUMEROS
 Contorno C. Derrumbadas - Surcos de C. de C. de C.
 Datos J.A. MARRERO-SOLÍS
FIGURA — 9

PERFIL DE ISO-RESISTIVIDAD APARENTE

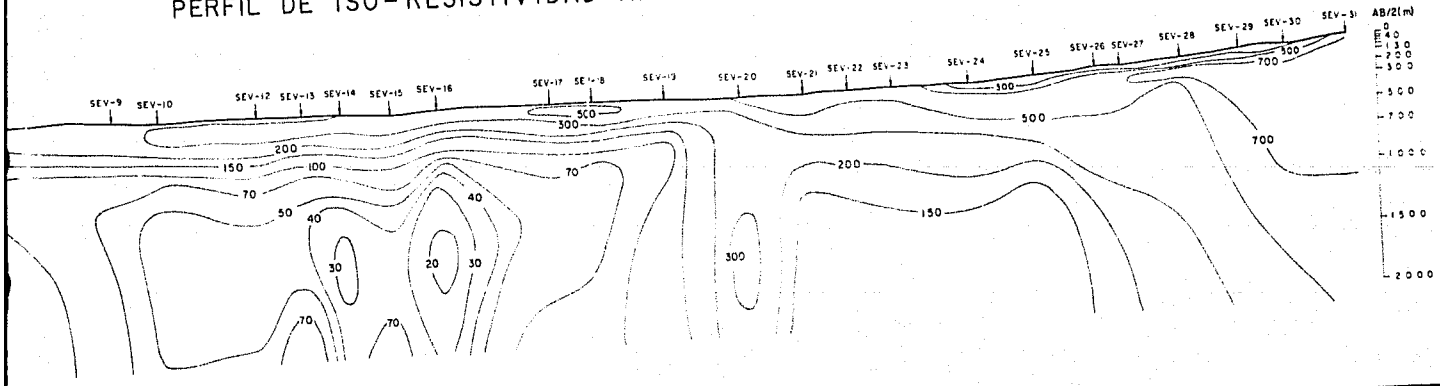


Figura 9.- Línea geoelectrica regional 2

Línea 2.— Esta línea corresponde a la segunda sección del estudio regional denominada La Fragua-Aljibes (Figura 9). La sección tiene una longitud de 38 km, una orientación Noreste Suroeste y está formada con 29 sondeos eléctricos. El perfil de iso-resistividad aparente muestra, en primer lugar, una zona de resistividad aparente de 100 a 500 Ω -m en su extremo meridional, entre los sondeos 1 y 8, la cual es causada por una distribución más o menos homogénea de rocas calcáreas, notándose claramente un máximo entre los sondeos 5 y 7. En cuanto al intervalo del sondeo 7 al 19, la resistividad aparente adquiere valores entre 100 y 500 Ω -m en forma superficial, pero existe un predominio de valores más bajos a mayor profundidad, con mínimos resistivos entre los sondeos 13 y 16, haciendo de este lugar la zona más interesante de esta línea.

Entre los sondeos 19 y 21 se detectó una anomalía resistiva donde se ha inferido la presencia de fallas geológicas importantes por el fuerte gradiente de las curvas.

Del sondeo 21 al 31 las resistividades aparentes mayores a 500 Ω -m se deben a la influencia de derrames andesíticos localizados al pie del volcán Pico de Orizaba. Bajo estas rocas las resistividades aparentes cambian de 150 Ω -m a 500 Ω -m con un comportamiento muy homogéneo relacionado con calizas de la Formación Tamaulipas Superior.

La interpretación electrostratigráfica marca igualmente tres zonas distintas. La primera, entre los sondeos 1 y 9, muestra en general un comportamiento de 3 horizontes geoelectrónicos, el más somero de los cuales, con un espesor promedio de 100 m y resistividad entre 122 y 320 Ω -m, correspondiente a los conglomerados del Terciario. El segundo horizonte, de unos 300 m de espesor corresponde a la Formación Orizaba alterada en la porción meridional del tramo que se analiza y a las formaciones Maltrata (Kmt) o San Felipe (Ksf) en la porción restante. El horizonte más profundo muestra resistividad mayor, causada por la presencia de la Formación Orizaba, sin alteración con buena permeabilidad cuya profundidad oscila entre 360 y 700 m.

Una falla inferida entre los sondeos 9 y 10 sirve de límite meridional para la segunda zona de la sección, la cual incluye del sondeo 10 al 19. La cubierta en esta parte la constituyen los conglomerados terciarios con resistividad de 320 a 950 Ω -m y un espesor promedio de 140 m. El segundo paquete geoelectrónico se encuentra compuesto por rocas calcáreas de la Formación Orizaba, con alrededor de 1 000 m de espesor y resistividad que varía entre 72 y 18 Ω -m; los valores más bajos pueden ser causados por flujos hidrotermales dentro de un medio permeable. El basamento resistivo está formado por rocas calcáreas de la Formación Tamaulipas Inferior localizadas a una profundidad máxima de 1 200 m.

Entre los sondeos 19 y 21 se está detectando un *horst* cuya existencia está avalada por los afloramientos de la Formación Orizaba que constituye al Cerro Tepetitlán.

La tercera zona de esta sección comprende los sondeos 21 a 31 y se encuentra formada en general por dos paquetes geoelectrónicos; el más superficial está formado en conjunto por conglomerados terciarios, rocas calcáreas de la Formación Agua Nueva y andesitas con un espesor promedio global de 300 m aproximadamente; bajo aquél se encuentra el segundo paquete geoelectrónico constituido por rocas calcáreas de la Formación Tamaulipas Superior, con resistividad que oscilan entre 64 y 240 Ω -m y un espesor máximo de 1 600 m.

El basamento resistivo ($\rho > 1\ 000\ \Omega\text{-m}$, aún cuando sólo se detecta en el sondeo 21, probablemente se encuentre a una profundidad del orden de los 1 500 m y está formado por calizas de la Formación Tamaulipas Inferior.

Línea 3.- La línea regional 3 se estudió en una longitud aproximada de 16 km mediante 13 sondeos eléctricos en una trayectoria Noreste-Suroeste que une al poblado Maravillas con Los Domos las Derrumbadas.

La sección de iso-resistividades aparentes (Figura 10), muestra las siguientes características:

La alta resistividad aparente, que va de 500 a 3 000 $\Omega\text{-m}$, se concentra cerca de la superficie en los sondeos 160 y 161 debido a la influencia de rocas ígneas eyectadas por el volcán Cerro Alto, localizado en el flanco Este de Los Domos las Derrumbadas. En el resto de la línea los valores de resistividad aparente de 100 a 500 $\Omega\text{-m}$ son reflejo del predominio de rocas calcáreas del Cretácico, mientras que los de 500 a 1 000 $\Omega\text{-m}$, fueron detectados por los sondeos 168 a 172, son debidos a otros materiales ígneos del terciario del mismo origen que los localizados al pie del Volcán Pico de Orizaba.

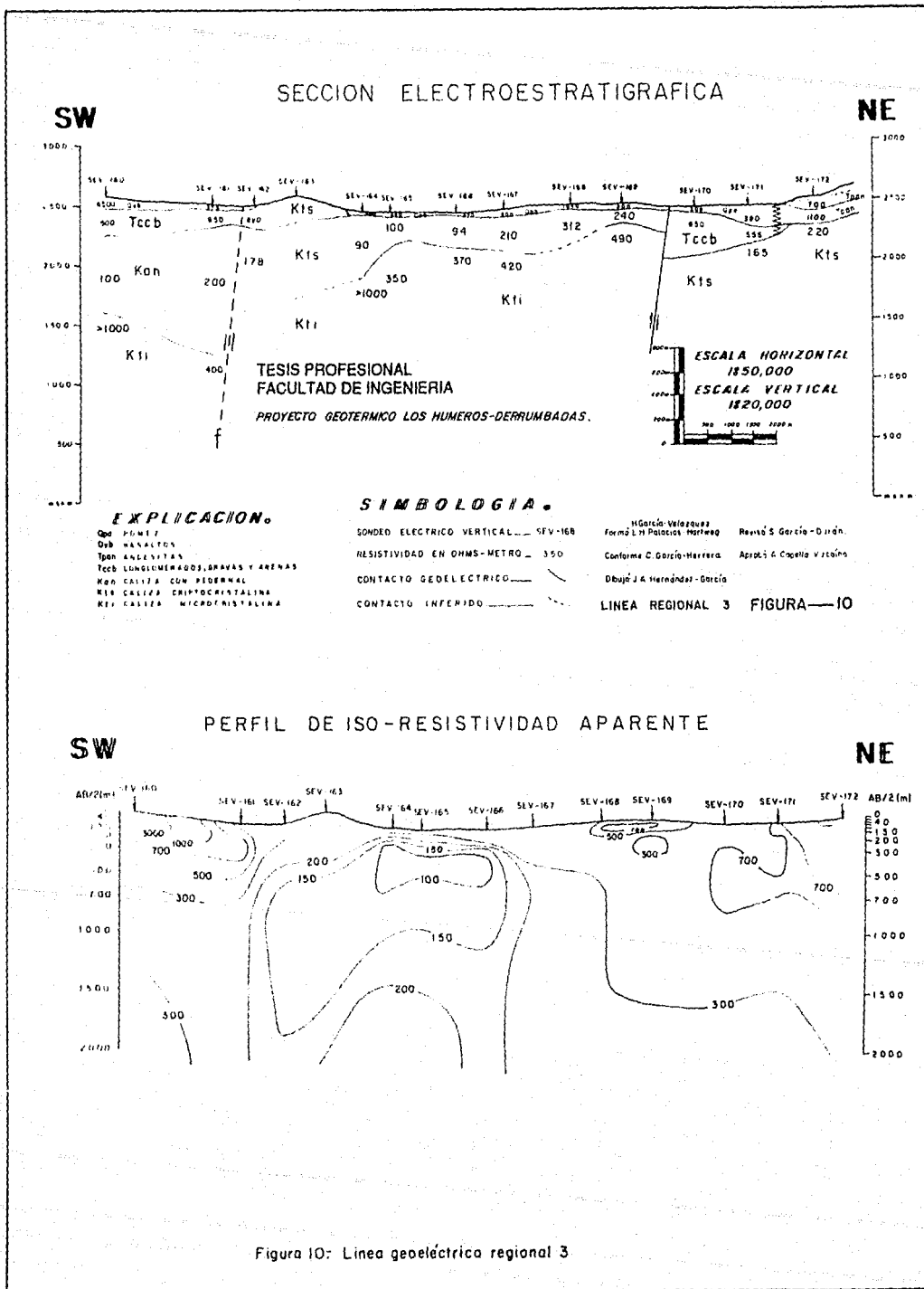
La interpretación electrostratigráfica de la línea 3 estima que entre los sondeos 160 y 162, existe una cubierta de roca ígnea con un espesor promedio de 60 m; bajo esta capa existe un medio con resistividad entre 950 $\Omega\text{-m}$ y 500 $\Omega\text{-m}$ y espesor promedio de 200 m, compuesta por conglomerados de edad terciaria y cubren a un grueso horizonte de rocas calcáreas de la Formación Agua Nueva, cuya resistividad está entre 100 y 200 $\Omega\text{-m}$ y su espesor promedio es de 850 m. El basamento resistivo en esta zona lo constituyen rocas calcáreas (Kti) a una profundidad máxima de 1 260 m.

Entre los sondeos 161 y 162 se detecta una falla que produjo un levantamiento de la Formación Tamaulipas Superior, de la cual existe un afloramiento cerca del sondeo 163. Dicha falla limita por el sur a la zona comprendida entre los sondeos 164 y 169, donde la cubierta está constituida por depósitos de pómez con resistividad de 360 a 1 040 $\Omega\text{-m}$ y espesor promedio de 60 m. La segunda capa la forman rocas calcáreas de la Formación Tamaulipas Superior, con resistividades que oscilan entre 90 y 321 $\Omega\text{-m}$ y espesor promedio de 260 m. El sustrato resistivo en este caso se encuentra constituido por calizas densas de la Formación Tamaulipas Inferior.

Entre los sondeos 169 y 170 se infiere otra zona de falla, a partir de la cual, hacia el extremo noreste de la línea, se registra un primer paquete geoelectrico con un espesor promedio de 340 m, formado por una combinación de conglomerados terciario y rocas ígneas. El basamento resistivo se encuentra formado aquí por calizas de la Formación Tamaulipas Superior.

11.5. Conclusiones

De los resultados de los estudios geológicos y geoquímicos regionales, aunados con los estudios geofísicos, ha sido posible inferir zonas con características favorables para la existencia de un yacimiento geotérmico.



El estudio aeromagnético muestra cuatro zonas anómalas principales, dos de las cuales, las anomalías A y C, están relacionadas a estructuras geológicas que presentan manifestaciones termales, ya sea en sus inmediaciones o a través de ellas mismas.

Las líneas telúricas, de autopotencial y geoelectrica coinciden en situar dos zonas de gran interés. La principal se localiza en La Caldera los Humeros entre los sondeos 760 a 1 000 de la línea regional tres, donde se puede observar la capa altamente resistiva ($\rho > 500 \Omega\text{-m}$), tal vez relacionada con una capa sello, y la zona de baja resistividad ($\rho < 40 \Omega\text{-m}$) relacionada con un posible reservorio geotérmico.

La otra zona de interés se localiza en las inmediaciones de Los Domos las Derrumbadas, en donde se ha detectado una anomalía entre los sondeos 180 y 220 de la línea 1.

Los resultados que se desprenden de los estudios geofísicos regionales concuerdan en gran medida con los estudios geológicos y geoquímicos al proponer a estas dos zonas como las más importantes para fines geotérmicos. Las características favorables de éstas son principalmente la serie de fallamientos, relacionados a su vez con bajos resistivos, causados por la circulación de fluidos hidrotermales en estas zonas. En dichos sitios parece probable la existencia de permeabilidad secundaria debida al fracturamiento de las rocas calcáreas, cuyo origen se atribuye a los diferentes movimientos tectónicos ocurridos en el área.

CAPITULO III

ESTUDIO A DETALLE DE LA CALDERA LOS HUMEROS

III. 1 Descripción del área

La Caldera los Humeros se encuentra limitada por las siguientes estructuras geológicas: al Norte, por el basamento granítico; al Sur, una serie de derrames ígneos cuaternarios de la Formación Tenamastepec; al Oeste, el Cerro Oyameles constituido por riolitas; y al Este, por los derrames basálticos de la Formación San Antonio.

La caldera está formada por rocas que corresponden a diversas etapas de vulcanismo reciente, así mismo se encuentran en superficie manifestaciones termales (fumarolas) en Tenamastepec, El Xalapazco y el poblado Los Humeros (Loma Blanca, Humeros y Cueva Ahumada), remanentes de esa actividad, lo que permite suponer la existencia de un yacimiento geotérmico a profundidad.

El área cuenta con un camino de terracería, construido por C.F.E., que comunica los poblados de Perote y Los Humeros (Figura 11). Además existen abundantes brechas y caminos vecinales entre las rancherías.

III. 2 Trabajo de Campo

A fin de cubrir más detalladamente el área de la caldera, se realizaron 20 líneas de sondeos eléctricos Schlumberger que comprenden 184 puntos de observación con distancia eléctrica (AB/2) máxima de 2 000 m y 32 puntos de observación con AB/2 máxima de 4 000 m (216 SEV en total). Las líneas siguen una orientación noroeste-suroeste, paralela al rumbo general de las estructuras mayores. Asimismo, se levantaron 24 líneas de autopotencial 18 de las cuales se hicieron sobre líneas de sondeos eléctricos y las otras 6 en forma transversal en una dirección aproximada sur-norte; para estas observaciones se empleó la técnica de *salto de rana* con estaciones a intervalos de 200 m, quedando cubierta en esa forma una longitud global de 202 km de líneas, aproximadamente.

La superficie estudiada a detalle fue de 230 km² aproximadamente, estando limitada al Norte por los cerros Oyameles y San Antonio, al Sur por los cerros Pizarro y Las Águilas, al

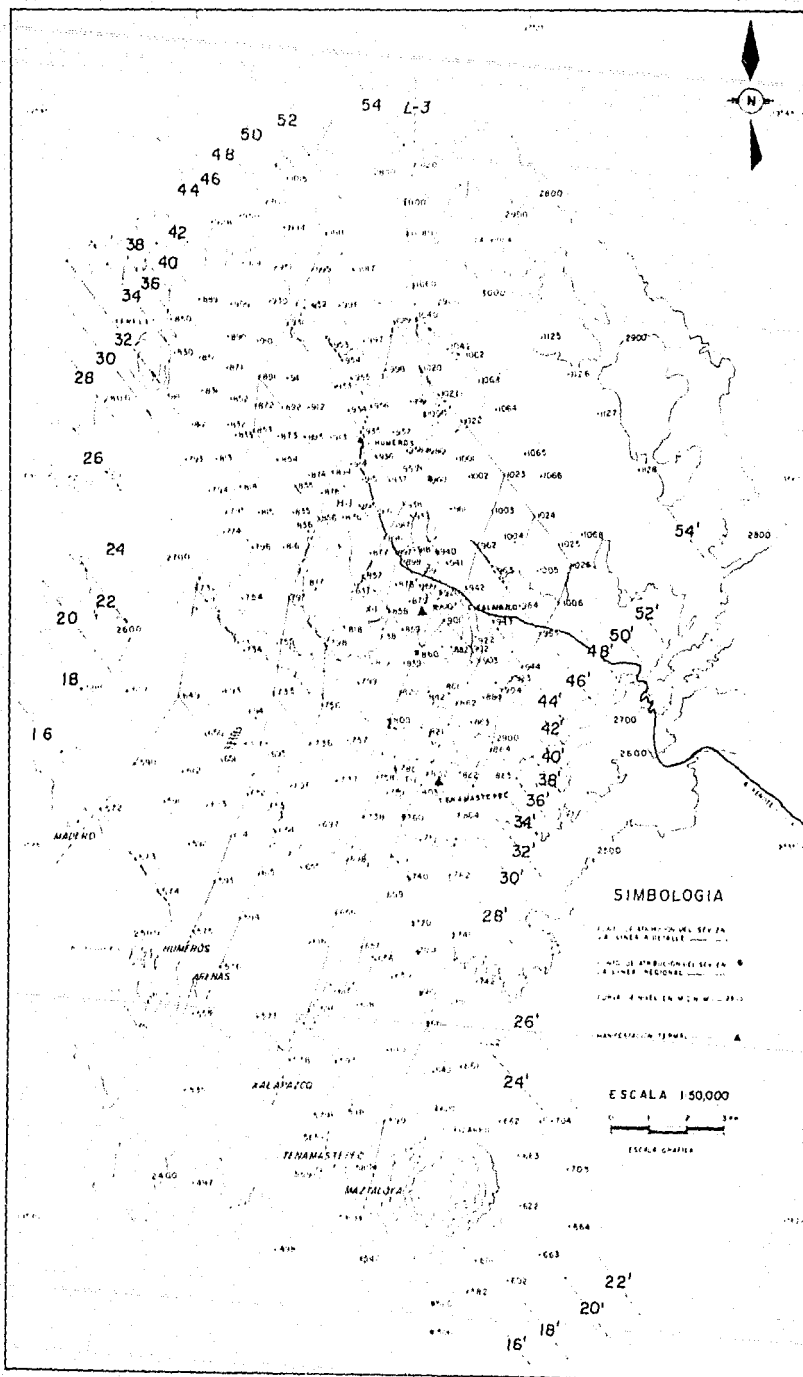


Figura II.- Mapa de localización de sondas eléctricas en la Caldera los Humeros

Oeste por la Sierra de Tlaxco y, al Este por el poblado de Maztaloya. Dichos límites, expresados en coordenadas, son los siguientes:

19° 30' a 19° 44' de Latitud Norte y
97° 31' a 97° 23' de Longitud Oeste.

III. 3 Resultados

Los resultados geoelectrónicos, en esta etapa, se muestran en dos diferentes tipos de presentación: A) planos de iso-resistividad aparente en cinco de las distancias electrónicas empleadas (AB/2=200, 500, 1 000, 1 500 y 2 000 metros), cada uno de los cuales revela la variación horizontal de la resistividad aparente en toda el área a una misma profundidad de investigación; B) perfiles de autopotencial o potencial natural de 10 líneas principales y 6 transversales; secciones de interpretación electroestratigráfica e iso-resistividad aparente de 10 de las líneas geoelectrónicas levantadas y 6 líneas formadas transversalmente a las primeras, sobre las mismas líneas de autopotencial.

A) Planos de iso-resistividad aparente.

En el plano AB/2 = 200 m (Figura 12) destacan principalmente altos resistivos con $\rho_a > 1\,000\ \Omega\cdot m$, causados por la gran cantidad de rocas volcánicas que constituyen la cubierta en toda esta zona. Sobresalen también tres anomalías con resistividad aparente menor a $500\ \Omega\cdot m$ que se encuentran alineadas en dirección NW-SE, revelando la presencia de una falla; esta permite la salida de fluidos hidrotermales causando una disminución en la resistividad cerca de la superficie. El fenómeno es notable en las cercanías Tenamastepec, en El Xalapazco y al Este del poblado de Los Humeros. Por otro lado la gradual disminución de la resistividad aparente al sur del Cerro Pizarro, es provocada por la serie de acuíferos superficiales que forman la Laguna de Tepeyahualco.

A la profundidad AB/2=500 m (Figura 13), se amplían las anomalías de baja resistividad aparente localizados en la caldera, principalmente en el poblado de Los Humeros, El Xalapazco y Tenamastepec, donde se detectan valores de resistividad menores a $30\ \Omega\cdot m$. Al sur del Cerro Pizarro sigue manifiesta la influencia de la Laguna de Tepeyahualco.

En el plano AB/2= 1 000 m (Figura 14) es clara la disminución general de la resistividad aparente. En la zona ocupada por la caldera el bajo resistivo menor a $40\ \Omega\cdot m$ se amplía considerablemente, extendiéndose al Oeste del poblado Los Humeros con una tendencia Norte-Sur. La anomalía Xalapazco ocupa totalmente la extensión de esta estructura, mostrando en su parte central un mínimo de resistividad aparente inferior a los $20\ \Omega\cdot m$. Al sur sigue aumentando la influencia de la anomalía Tenamastepec.

Al Noreste del Cerro Las Aguilas, en el mismo plano de resistividad aparente, aparece una serie de anomalías menores a los $70\ \Omega\cdot m$ cuya existencia puede estar relacionada con fluidos hidrotermales a esa profundidad. Al Norte del Cerro Pizarro, se detectan resistividades aparentes menores a $50\ \Omega\cdot m$ y son debidas probablemente, a una combinación de efectos de fluidos hidrotermales y del acuífero de Tepeyahualco. Fuera de las zonas anómalas la resistividad aparente, que oscila entre 100 y $300\ \Omega\cdot m$, es debida a las rocas calcáreas existentes en toda el área.

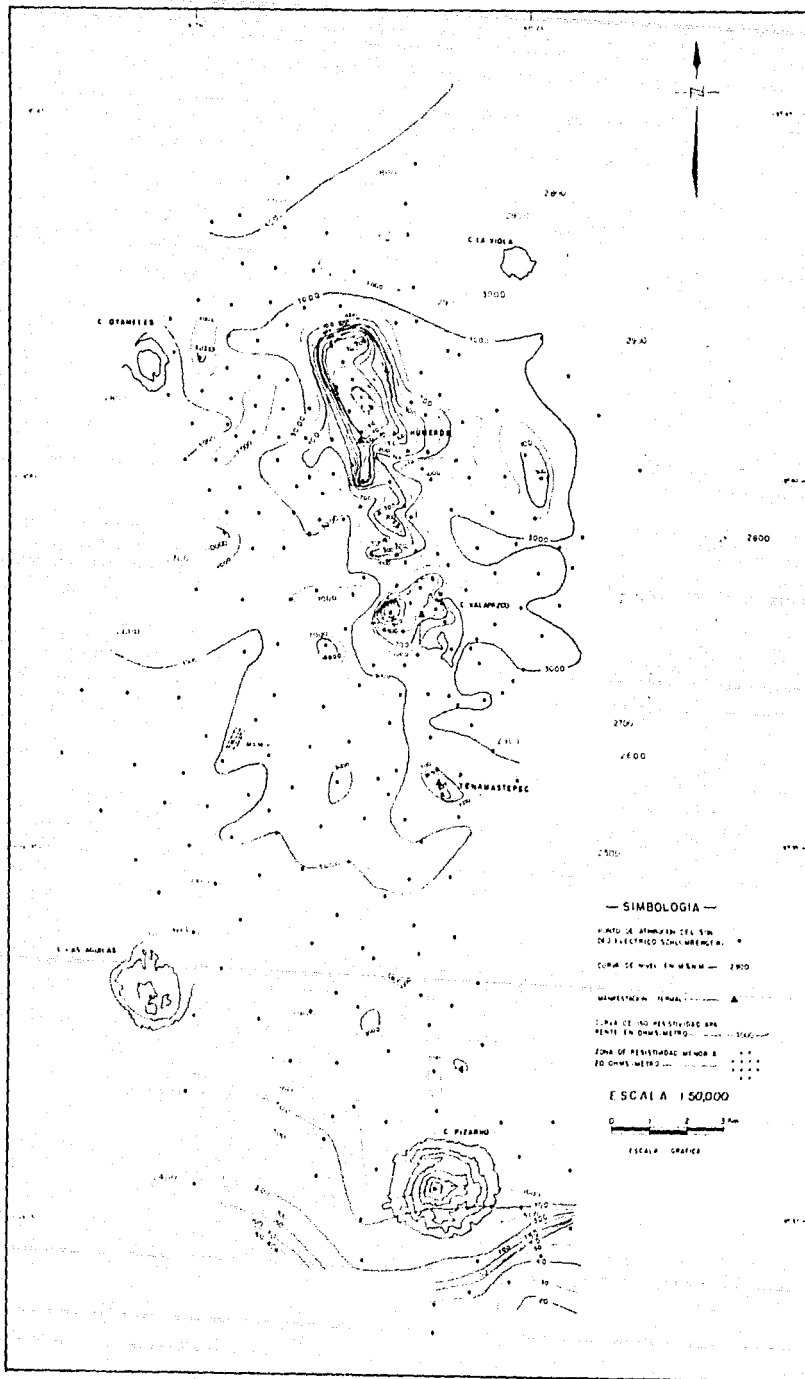


Figura 12- Plano de iso-resistividad aparente de AB/2 = 200 m.

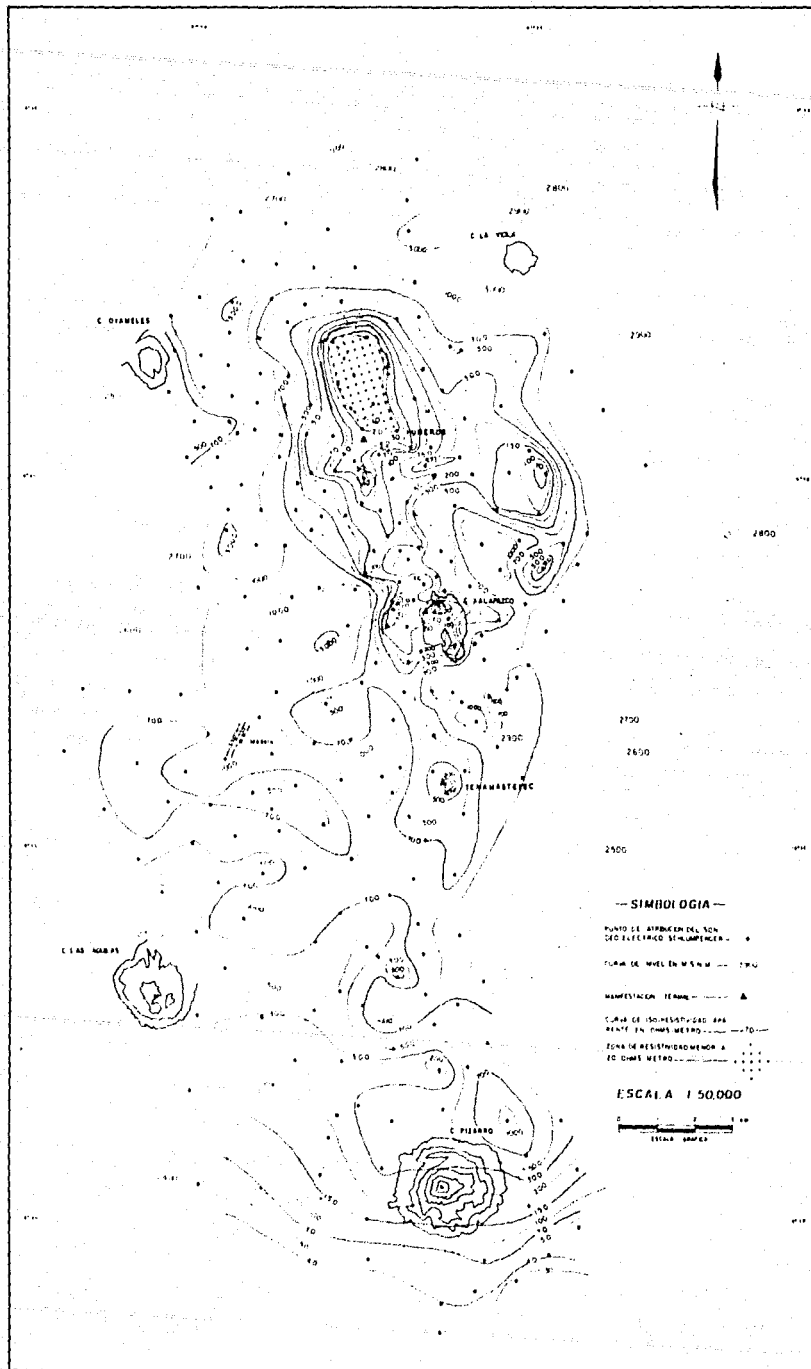


Figura 13 - Plano de iso-resistividad aparente de $AB/2 = 500m$.

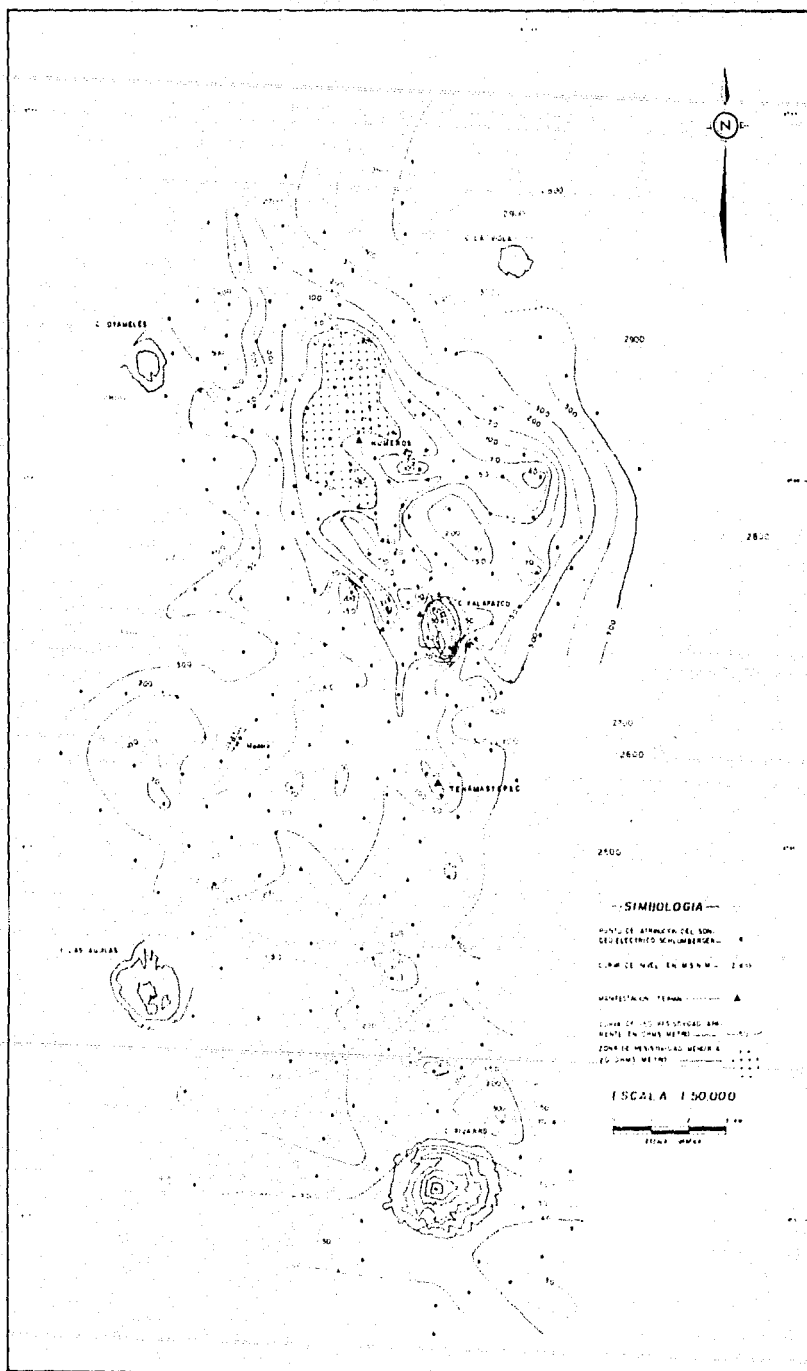


Figura 14: Plano de iso-resistividad aparente de $AB/2 = 1000$ m

A la profundidad $AB/2 = 1\ 500$ m (Figura 15), el plano en general presenta resistividad aparente inferior a los $70\ \Omega\text{-m}$, a excepción de los flancos Oeste y Este del mismo, que limitan la zona estudiada en La Caldera los Humeros. El mínimo más importante se localiza en el poblado de Los Humeros, ya que ocupa una mayor área. Otra anomalía interesante se localiza al Norte del Cerro Las Aguilas y se continúa hasta Tenamastepec, con una orientación aproximada Este-Oeste.

Al Norte del Cerro Pizarro, en este mismo plano se manifiesta claramente una anomalía con resistividad aparente menor a $40\ \Omega\text{-m}$, tal vez causada por flujos hidrotermales a esa profundidad de investigación. Las anomalías localizadas al Sur del Cerro Pizarro tienen su origen, posiblemente, en el efecto combinado de flujos hidrotermales con el acuífero somero de Tepeyahualco, el cual enmascara la información geoelectrica característica de una mayor profundidad.

Finalmente, a una profundidad $AB/2 = 2\ 000$ m (Figura 16) se extiende en general la anomalía del poblado de Los Humeros llegando a ocupar casi totalmente el interior de la caldera. La zona de bajos resistivos se encuentra limitada por la curva de $30\ \Omega\text{-m}$, que también enmarca los mínimos localizados al Norte del Cerro Las Aguilas.

En esa misma área se siguen detectando pequeñas anomalías causadas seguramente por fluidos hidrotermales en la zona. Los bajos de resistividad que se registran al sur del Cerro Pizarro deben explicarse en forma similar.

B) Perfiles de Autopotencial y Secciones electrostratigráficas y de iso-resistividad aparente

Sección 50-50.— Esta sección tiene una longitud de 10.6 km aproximadamente (Figura 17), y está construida con 10 sondeos. La Línea 50-50' (Figura 11) representa el límite, NE del área estudiada a detalle, siguiendo una orientación NW-SE.

La sección electrostratigráfica revela 4 diferentes medios. Las capas más superficiales están constituidas por rocas volcánicas con espesores que van desde 70 m, en el sondeo 1 023, hasta un máximo de 280 m, bajo el sondeo 1 016. La resistividad de estas rocas varía entre $1\ 200$ y $13\ 500\ \Omega\text{-m}$.

El medio subyacente muestra un rango de resistividad que va desde 150 hasta $570\ \Omega\text{-m}$ y espesores que varían entre 110 m, bajo el sondeo 1 023, hasta 480 m, bajo el sondeo 1 020. Se encuentra constituido por rocas ígneas y por los conglomerados de la Formación Cruz Blanca (Tccb).

La capa más profunda detectada en esta sección está formada por rocas calcáreas de la Formación Tamaulipas Superior, con resistividad de 22 a $94\ \Omega\text{-m}$. Estos bajos valores probablemente se deban a la presencia de fluidos hidrotermales.

La sección de iso-resistividad aparente indica un comportamiento homogéneo general del subsuelo, aunque se aprecia la existencia de una falla entre los sondeos 1 025 y 1 026 la cual produce también un cambio brusco en la respuesta del potencial natural (S.P.) en esa zona.

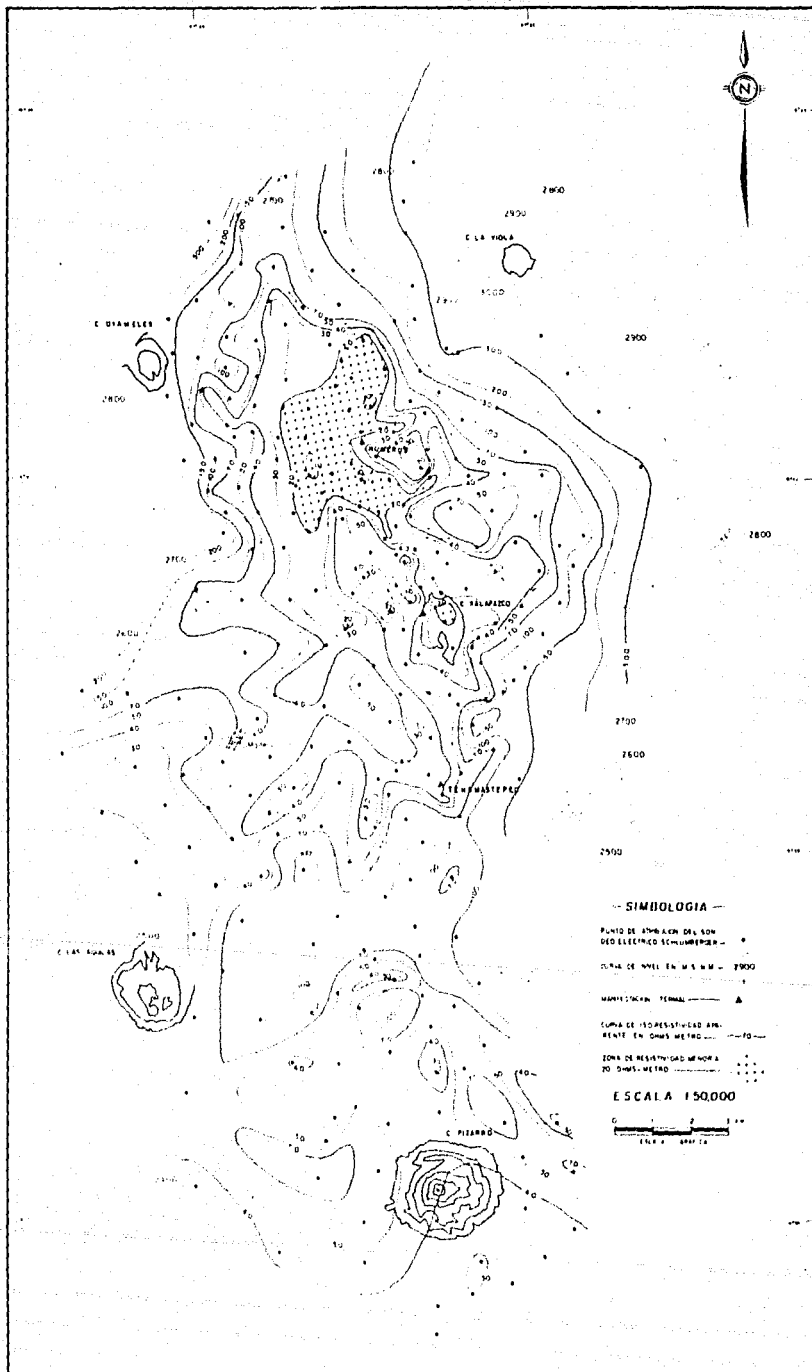


Figura 15 - Plano de iso-resistividad aparente de $AB/2 = 1500$

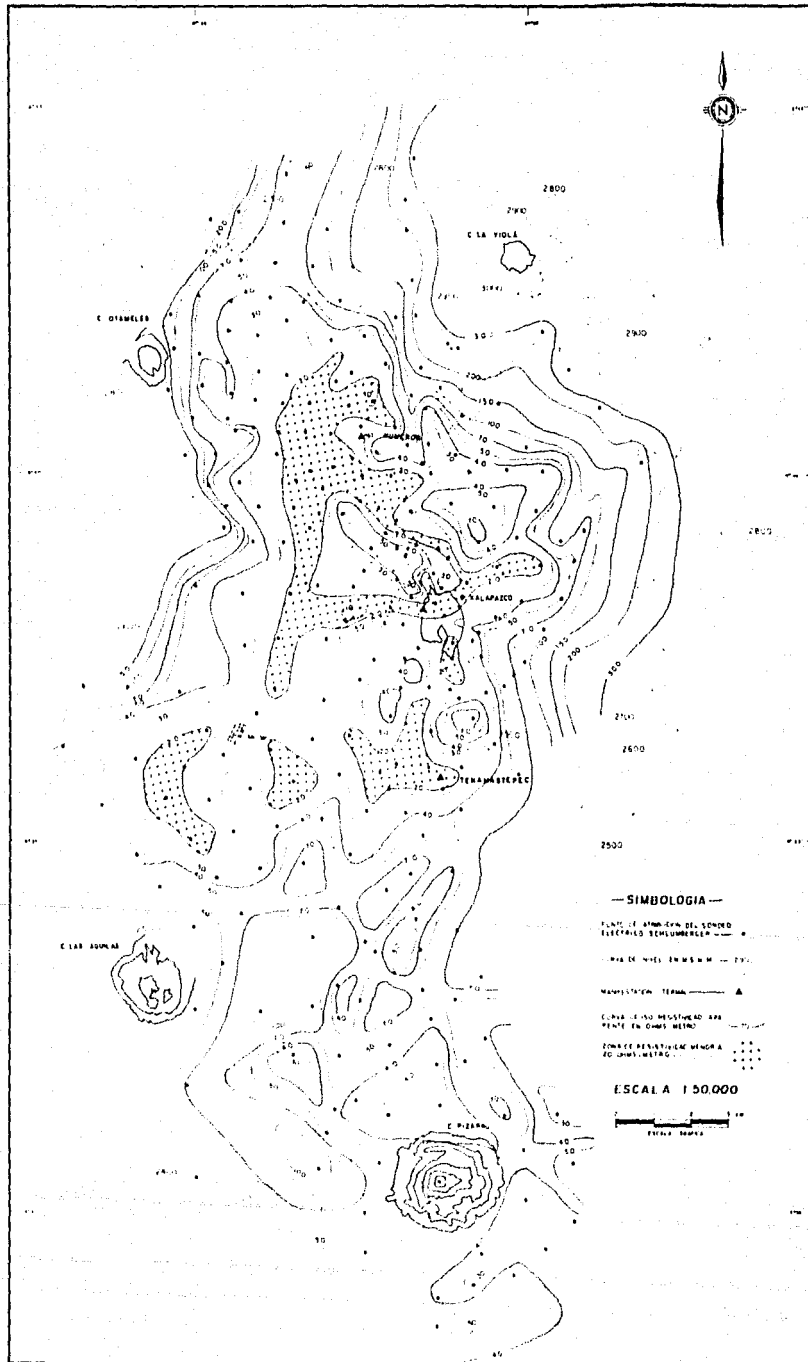
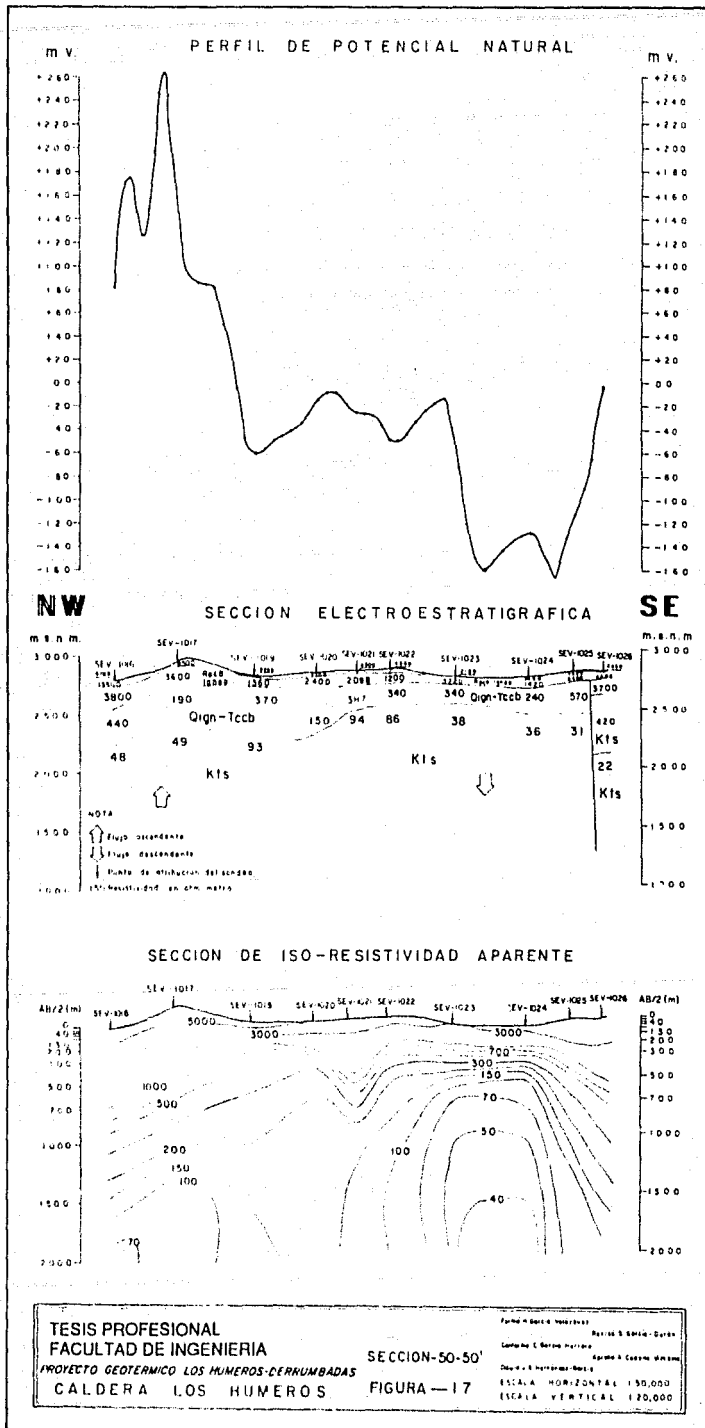


Figura 16.- Plano de iso-resistividad aparente de $AB/2 = 2000$ m.



El comportamiento de la curva de potencial natural permite interpretar movimientos de fluidos hidrotermales, con una tendencia regional de flujo ascendente entre los sondeos 1 016 y 1 019, y con flujo descendente entre los sondeos 1 019 a 1 026.

Sección 46-46'.— La línea 46-46' formada por 15 sondeos, tiene una longitud de 11.6 km y una orientación NW-SE.

De la sección electrostratigráfica respectiva se determina una cubierta compuesta por rocas ígneas (Qrio, Tpan, Qsv), con resistividad que va desde 1 200 hasta 20 450 Ω -m y espesores que oscilan entre 70 m, entre los sondeos 955 y 954, y 270 m bajo, el sondeo 962 (Figura 18).

El segundo paquete nuevamente lo integran rocas ígneas y los conglomerados del Terciario; presenta resistividad desde 63 hasta 330 Ω -m con un espesor promedio de 250 m. Este paquete geoelectrónico muestra un notable estrechamiento entre los sondeos 954 hasta 957 y un aumento de espesor hasta de 500 m bajo el sondeo 961.

Entre los sondeos 957 y 961 se interpreta una serie de fallamientos que deben tener relación con las emanaciones termales entre los sondeos 953 y 956.

El tercer paquete geoelectrónico, formado por rocas calcáreas del Cretácico de la Formación Tamaulipas Superior, presenta resistividad que va de 2 a 48 Ω -m. Los bajos resistivos más importantes se encuentran limitados por las fallas detectadas entre los sondeos 953 y 954, y los sondeos 958 y 959. Esta zona de alta conductividad está relacionada con las manifestaciones termales ya mencionadas.

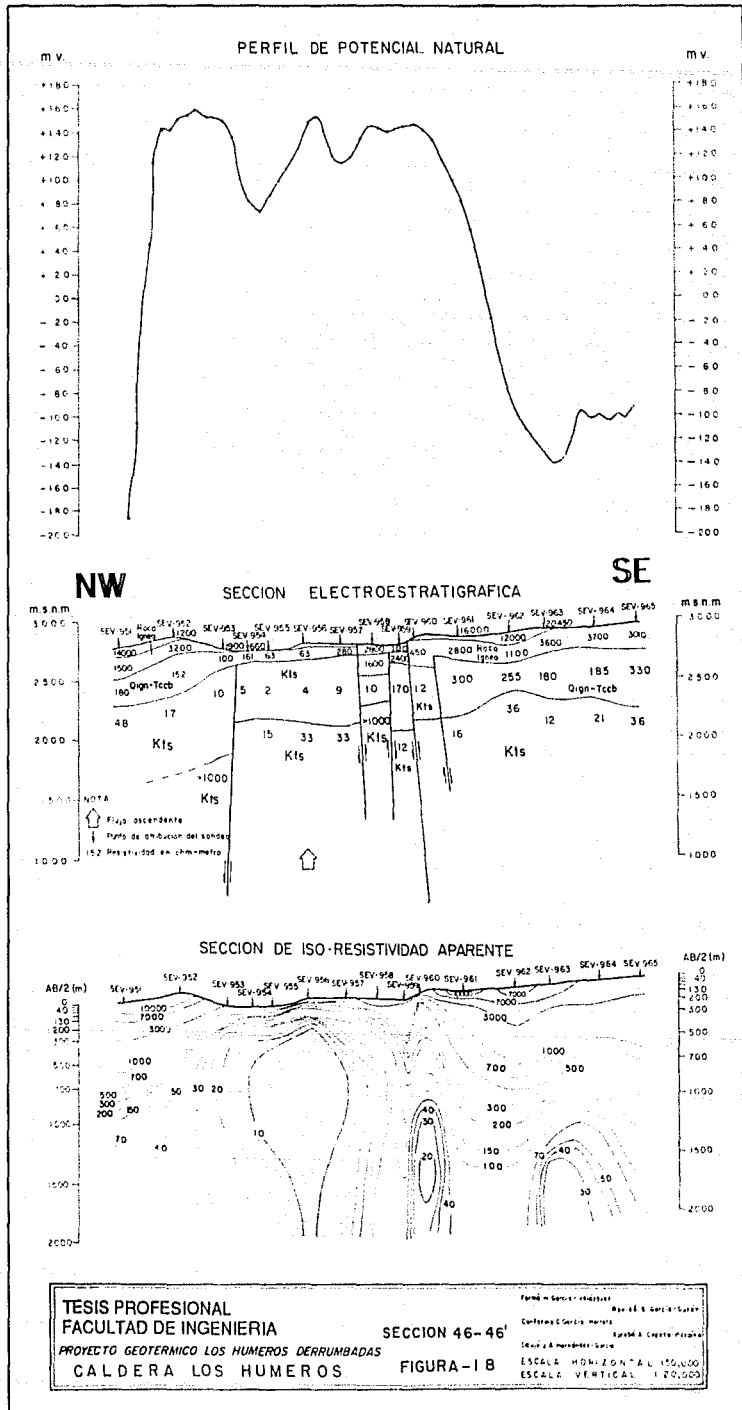
Entre los sondeos 953 y 958 es posible deducir un comportamiento estructural de *horst*, cuyas correspondientes zonas de falla son la vía de fluidos ascendentes, según se observa en el perfil de potencial natural, donde se tienen anomalías positivas hasta de 350 mV. La dirección que muestran estos flujos y las manifestaciones hidrotermales observadas en la superficie parecen indicar la presencia de un yacimiento geotérmico a profundidad.

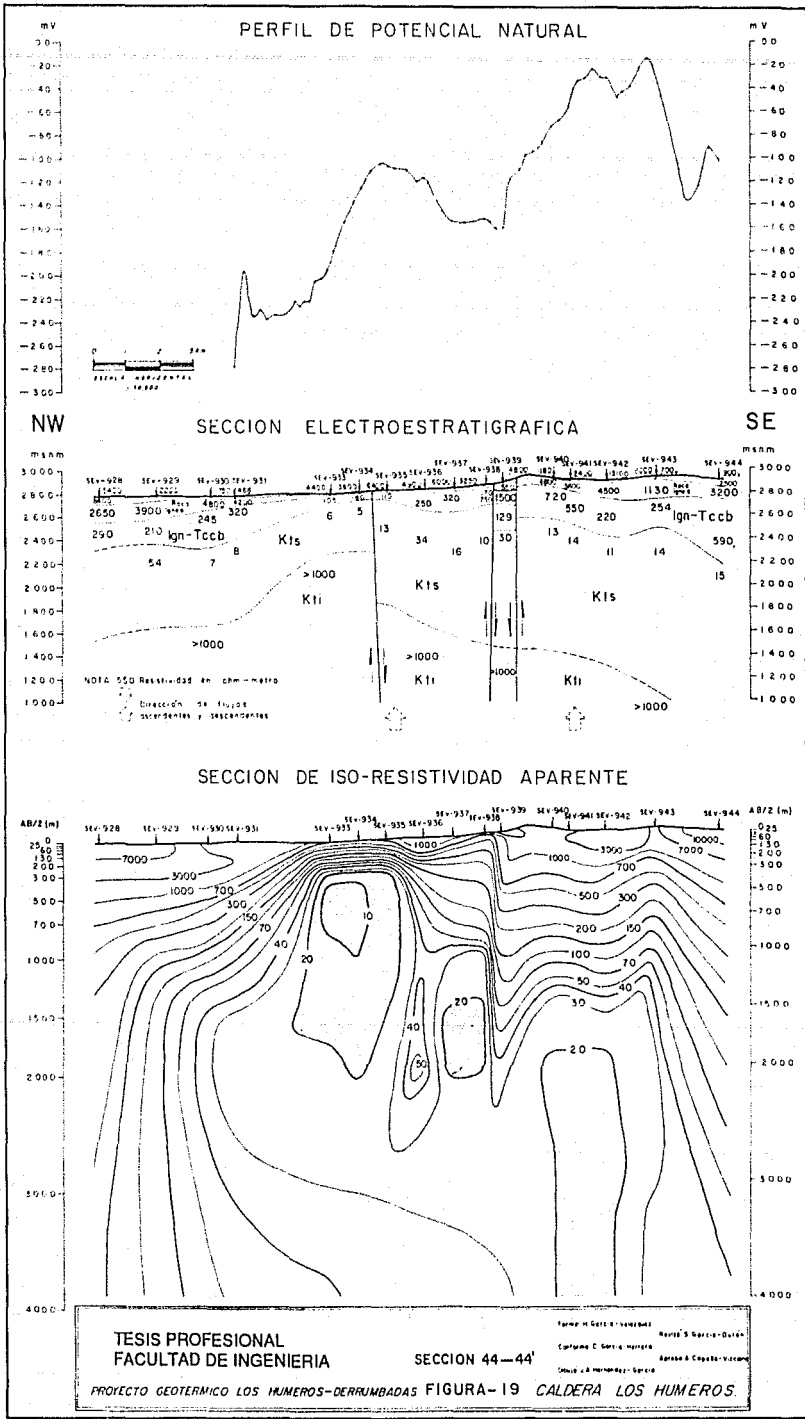
Sección 44-44'.— Esta sección, tiene una longitud aproximada de 10.7 km, está constituida con 13 sondeos y presenta una orientación NW-SE; Se inicia en la parte SE del poblado de Muztaloya y toca la porción NE del Xalapasco, cruzando las manifestaciones termales de Los Humeros hasta llegar, como límite, a los llanos de Atoluca (Figura 19).

En general, la cubierta rocosa de esta sección está constituida por rocas ígneas cuaternarias de varios tipos, aunque entre los sondeos 933 y 938 también existen rocas caolinizadas. El espesor de esta capa oscila entre 20 m, bajo el sondeo 938, hasta 200 m, detectados bajo el sondeo 928. La resistividad del primer paquete va de 1 130 a 13 100 Ω -m.

En toda la sección aparece un segundo paquete de rocas compuesto por materiales ígneos y los conglomerados del Terciario. La resistividad de este medio varía entre 105 y 750 Ω -m y su espesor oscila entre 60 y 350 m.

El tercer paquete lo componen rocas calcáreas de edad cretácica cuya resistividad toma valores desde 5 hasta 54 Ω -m. Entre los sondeos 934 y 935 se detecta una falla por la cual





existe un flujo ascendente de fluidos que da lugar a las manifestaciones termales de Los Humeros. El efecto de estos fluidos termales da origen a la baja resistividad que aparece a lo largo de la falla en el segundo y tercer paquete. Dicha falla es también notable en la respuesta del potencial natural, en donde se detecta una anomalía de aproximadamente 100 mV. de amplitud. El mismo efecto se observa en los mínimos de la sección de iso-resistividad aparente entre los sondeos 933 y 934.

En esta misma sección el efecto migratorio de la baja resistividad, provocado por el flujo del calor, parece seguir una dirección SE-NW, según puede deducirse de las manifestaciones termales en Los Humeros y Loma Blanca.

Los sondeos 938 y 939 detectan una serie de fallamientos importantes, lo cual también puede observarse en la respuesta de iso-resistividad aparente de esta zona.

Entre los sondeos 940 y 944 se detecta una anomalía en el potencial natural, debido a un flujo ascendente, de 140 mV. Al mismo tiempo se registra baja resistividad en esta zona a profundidades de hasta $AB/2=4\ 000$ m. en la sección de iso-resistividad aparente.

A lo largo de la sección se detecta un basamento resistivo ($\rho > 1\ 000\ \Omega\text{-m}$) a profundidades que varían entre 500 m y 2 500 m, tendiendo a profundizarse hacia el SE.

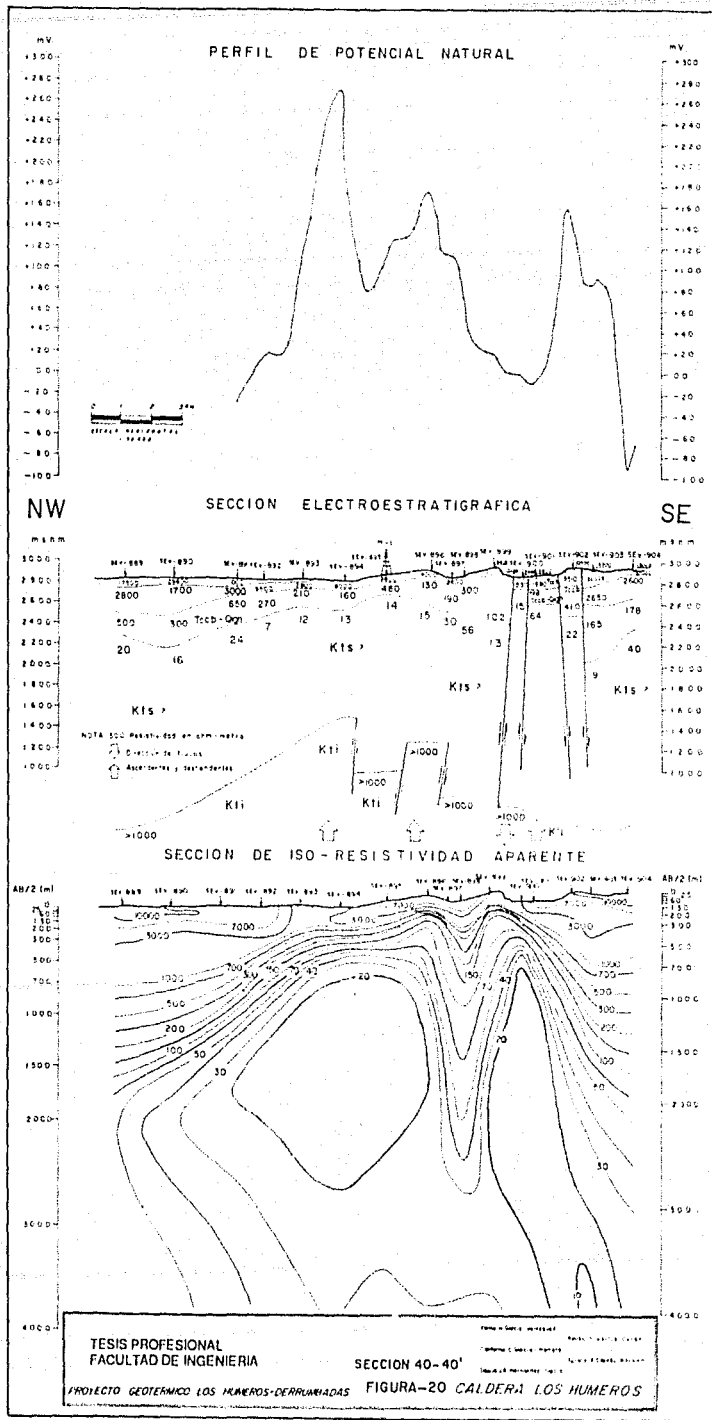
Sección 40-40'.— Esta línea tiene una longitud aproximada de 10.2 km, está construida con 16 sondeos y tiene orientación NW-SE. La sección tiene su inicio en el flujo lávico de Los Humeros, atraviesa el Cerro Xalapazco y termina al SE del mismo. El primer paquete detectado a lo largo de toda la sección está formado por rocas ígneas con resistividad que va desde 1 700 hasta 30 000 $\Omega\text{-m}$; los espesores de este paquete oscilan de 60 m detectados, en el sondeo 904, a 200 m, en el sondeo 891. El espesor de esta cubierta ígnea tiende a incrementarse hacia el noroeste de la sección (Figura 20).

El segundo paquete se encuentra formado por rocas ígneas y por conglomerados terciarios, con resistividad que va desde 102 hasta 650 $\Omega\text{-m}$ y espesores que oscilan entre 110 m, bajo el sondeo 896, y 500 m, bajo el sondeo 899.

El tercer paquete se encuentra formado por rocas calcáreas con resistividad de 7 a 64 $\Omega\text{-m}$. Este medio tiene espesores que oscilan entre 1 020 y 1 705 m, calculados bajo los sondeos 894 y 898 respectivamente.

Al hacer un análisis conjunto de las secciones de potencial natural y de iso-resistividad aparente se notan las siguientes características:

Entre los sondeos 892 y 896 se detecta un bajo de resistividad aparente que se indica a profundidad y produce un efecto de flujo ascendente sobre la respuesta del potencial natural (SP); ésta se traduce en una anomalía con amplitud de 250 mV. En esta zona se propone una zona de fallas en el basamento resistivo que se ha interpretado como un desplazamiento de bloques.



Entre los sondeos 896 y 899 se registra un comportamiento muy heterogéneo de las resistividades aparentes, lo que indica una posible zona de debilidad en la zona.

Entre los sondeos 899 y 901 se detectaron varias fallas asociadas con el colapso del Xalapazco, por donde probablemente se moviliza una serie de flujos ascendentes, los cuales dan origen a manifestaciones termales en la parte norte del mismo. En esta zona se detecta también una tendencia ascensional de los bajos de resistividad aparente, así como flujos ascendentes y descendentes en la respuesta del potencial natural. Esta se puede asociar con la existencia de una celda convectiva en la zona. Por otra parte, dentro de la sección 40-40', se detecta un basamento resistivo ($\rho > 1\ 000\ \Omega\text{-m}$) a una profundidad promedio de 1 900 m.

Sección 36-36'.— Esta línea tiene una longitud aproximada de 10.2 km, está formada por 16 sondeos y tiene una orientación NW-SE. A lo largo de la sección aparece un total de 4 paquetes geoelectricos con contrastes bien marcados de resistividad (Figura 21).

El primer paquete se encuentra constituido por rocas ígneas del Cuaternario, con valores de resistividad que van de 1 100 a 26 000 $\Omega\text{-m}$. Este paquete tiene espesores que oscilan entre 20 y 360 m, tendiendo a adelgazarse hacia el centro de la línea.

La segunda capa se encuentra formada por rocas ígneas y conglomerados cuya resistividad cae dentro del rango de 134 a 960 $\Omega\text{-m}$ y un espesor de 190 a 600 m.

Como tercer paquete se detectan rocas calcáreas del Cretácico con resistividad entre 9 y 46 $\Omega\text{-m}$. Los sondeos 858 a 860 muestran una serie de fallamientos, que se ven confirmados por un mínimo muy somero en la resistividad aparente y por un máximo en el potencial natural, con una amplitud aproximada de 550 mV. Es a través de estos fallamientos por donde se lleva a cabo el flujo ascendente de fluidos termales, manifiestos en el Cerro Xalapazco.

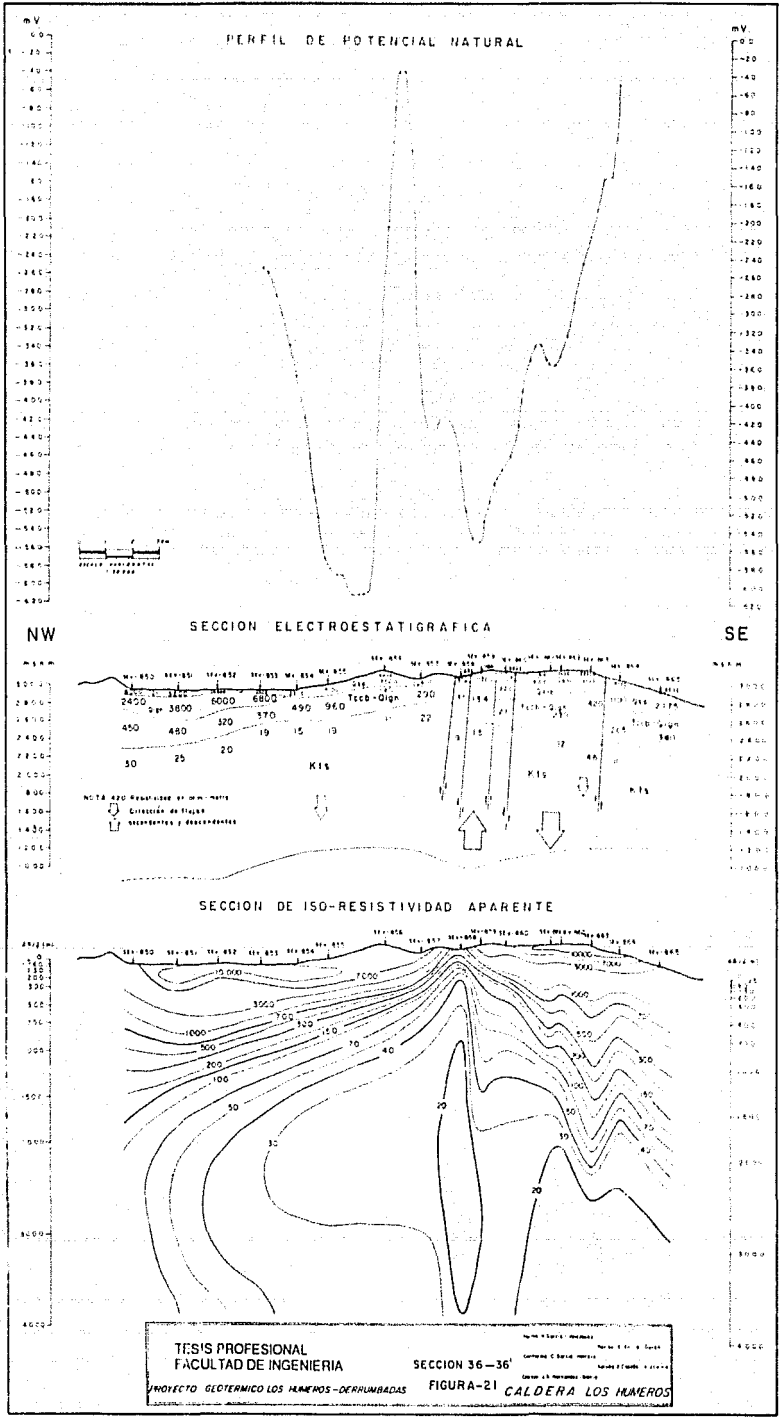
En la sección de iso-resistividad aparente los mínimos se orientan aproximadamente de SE a NW, como se puede observar en los sondeos 864 al 861 en donde se detectan valores de 12 a 20 $\Omega\text{-m}$. Entre los sondeos 863 y 864 se detecta otra falla que no afecta significativamente a las rocas calcáreas del Cretácico. El basamento resistivo se localiza a una profundidad de 2 060 m, entre los sondeos 858 y 860.

La sección 36-36' es una de las más importantes, ya que las manifestaciones termales en superficie y las resistividades de la roca permiten inferir la existencia de un yacimiento geotérmico en esta zona.

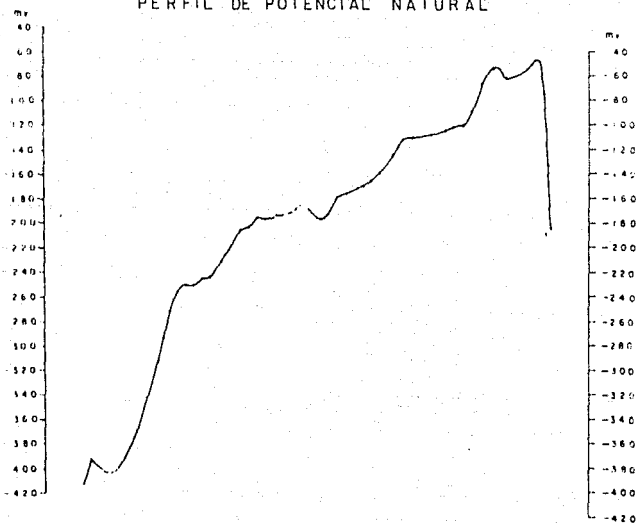
Sección 30-30'.— Esta sección se localiza en la parte central de La Caldera los Humeros, tiene una longitud de 9.8 km, se encuentra constituida por 9 sondeos y tiene una orientación también NW-SE (Figura 22).

El potencial natural refleja una tendencia de flujo hacia arriba manifestándose un máximo entre los sondeos 800 y 804. El comportamiento de la iso-resistividad aparente es homogéneo en general, es decir, muestra poca variación lateral en las rocas.

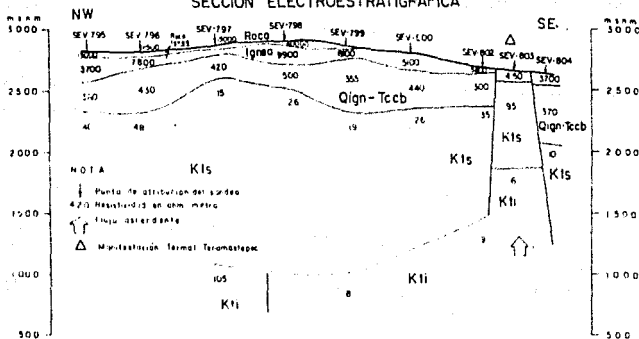
La sección electrostratigráfica presenta un primer paquete compuesto por rocas ígneas con espesores que oscilan entre 70 m, bajo el sondeo 797, y 240 m, bajo el sondeo 795. La



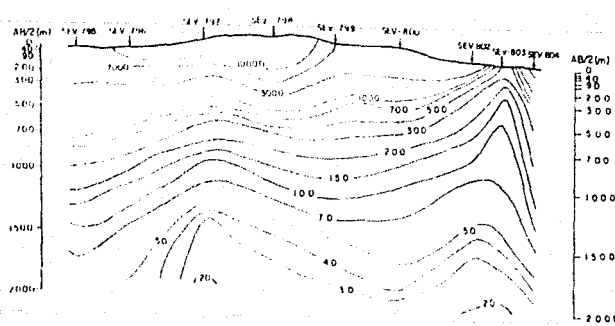
PERFIL DE POTENCIAL NATURAL



SECCION ELECTROESTRATIGRAFICA



SECCION DE ISO-RESISTIVIDAD APARENTE



TESIS PROFESIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA

PROYECTO GEOTERMICO LOS HUMEROS-DERRUMBADAS
CALDERA LOS HUMEROS

SECCION 30-30'

FIGURA-22

Forma M. Emilio Villaverde
Revisó B. Bertha Duran
Caracterizó B. Bertha Duran
Dibujó A. Marcelino Guevara
ESCALA VERTICAL 1:20,000
ESCALA HORIZONTAL 1:50,000

resistividad de este paquete adquiere valores que van desde 3 700 hasta 40 000 Ω -m. El segundo paquete se encuentra compuesto por rocas ígneas y conglomerados del Terciario, con espesores mínimos del orden de 150 m y máximos de 450 m; su resistividad fluctúa entre 300 y 500 Ω -m.

Subyaciendo al anterior se encuentra el paquete formado por calizas del Cretácico con las formaciones Tamaulipas Superior e Inferior, la baja resistividad que presenta esta sección puede ser debida a las altas temperaturas y a los fluidos con alto grado de salinidad. Los valores oscilan entre 6 y 95 Ω -m. presentándose los más bajos en el sondeo 803.

En esta sección se detecta una serie de fallamientos entre los sondeos 802 y 804, por donde tiene lugar un flujo ascendente que afecta a las lecturas del potencial natural, produciendo una anomalía del orden de 70 mV.

Sección 26-26'.— Esta línea tiene una longitud de 11.1 km, está formada por 9 sondeos y tiene una orientación NW-SE.

El comportamiento de la sección de iso-resistividad aparente muestra pocas variaciones laterales en los diferentes estratos. La sección de potencial natural tampoco ofrece variaciones significativas, aunque se nota una tendencia de flujo hacia arriba entre los sondeos 738 y 741 (Figura 23).

La sección electrostratigráfica tiene una cubierta formada por una serie de rocas volcánicas, con espesores que van desde 120 m, bajo el sondeo 736, hasta 320 m en el 740. Estos materiales están representados por dos capas geoelectricas que presentan resistividades desde un mínimo de 1 350 Ω -m hasta un máximo de 17 200 Ω -m, en las rocas superficiales detectadas por los sondeos 740 y 741.

El segundo paquete se encuentra compuesto también por rocas ígneas y conglomerados terciarios, con un espesor promedio de 300 m y resistividad de 180 a 420 Ω -m.

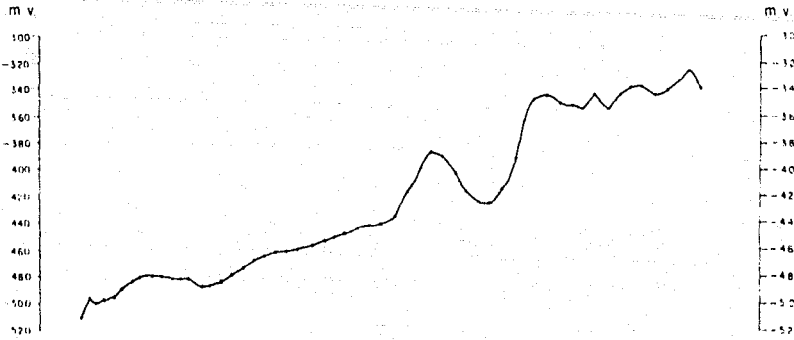
Por último, a una profundidad promedio de 450 m se detecta la roca calcárea basal con resistividad que va de 9 a 84 Ω -m. Estos valores se deben tanto a altas temperaturas como a la influencia de acuíferos profundos.

Sección 22-22'.— Esta sección tiene una longitud de 10.6 km aproximadamente, se ha construido con 12 sondeos geoelectricos y tiene una orientación NW-SE (Figura 24).

Como paquete superficial se han detectado diversos derrames volcánicos, los cuales presentan resistividad que va desde 1 100 hasta 24 000 Ω -m. Esta cubierta muestra dos zonas diferentes: del sondeo 649 al 657 se calcula un espesor promedio de 150 m y del sondeo 658 a 660 se estima una potencia de 70 m. Ambas zonas se encuentran separadas por una falla.

El segundo paquete se encuentra formado por conglomerados terciarios, con un espesor promedio de 260 m y un rango de resistividad comprendido entre 205 y 490 Ω -m.

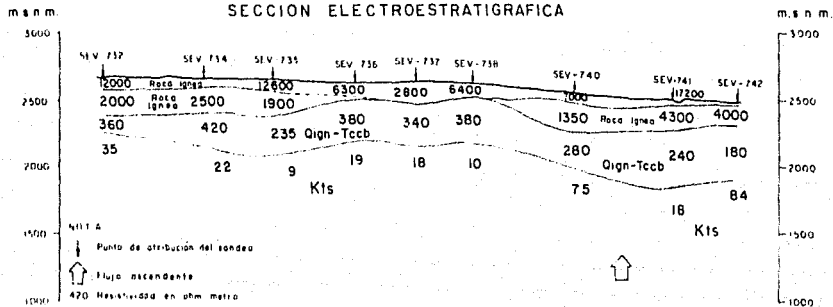
PERFIL DE POTENCIAL NATURAL



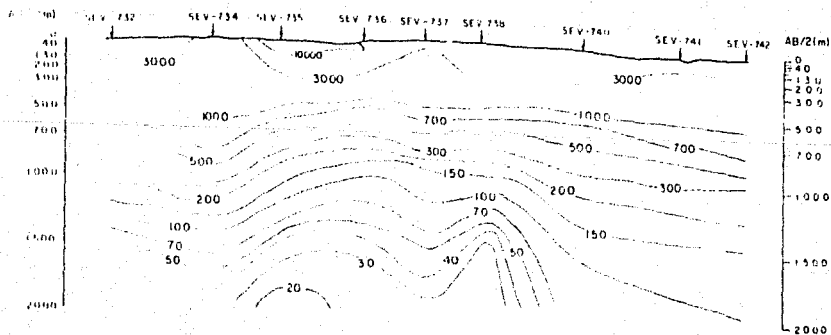
NW

SE

SECCION ELECTROSTRATIGRAFICA



SECCION DE ISO RESISTIVIDAD APARENTE



TESIS PROFESIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA

SECCION 26-26

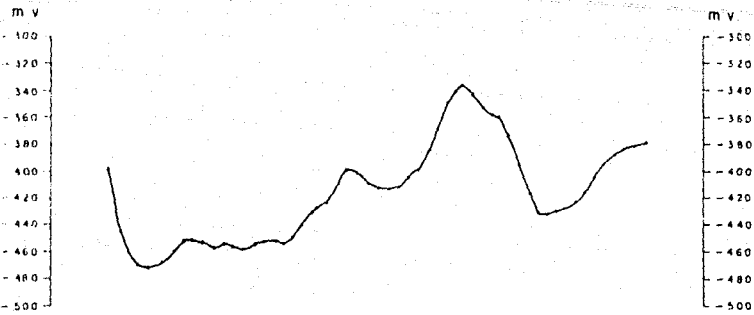
PROYECTO GEOTERMICO LOS HUMEROS DERRUMBADAS

CALDERA LOS HUMEROS

FIGURA-23

Profesor: **Manuel S. García-Castaño**
 Asesor: **Manuel S. García-Castaño**
 Asesor: **Agustín A. Capera Velasco**
 Asesor: **Manuel S. García**
 Escala Horizontal: 1:50,000
 Escala Vertical: 1:20,000

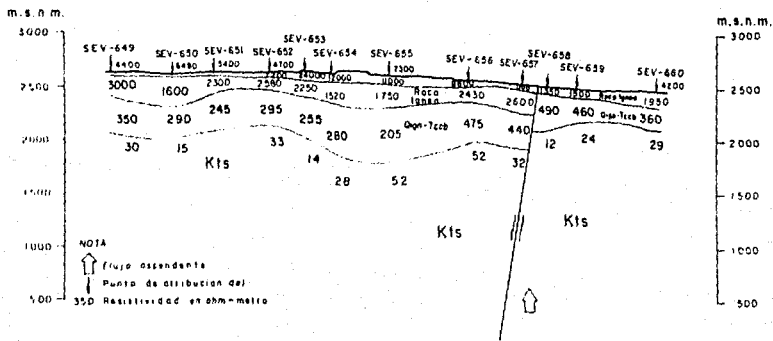
PERFIL DE POTENCIAL NATURAL



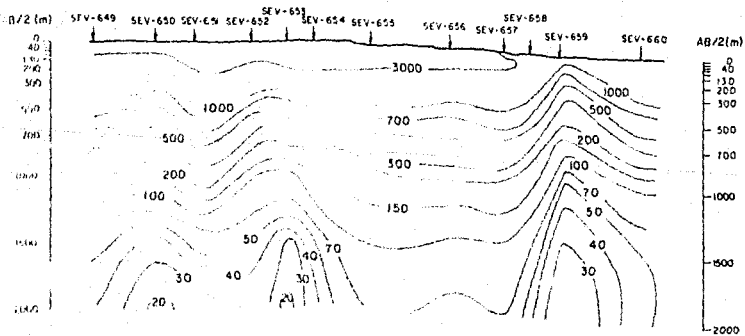
NW

SECCION ELECTROSTRATIGRAFICA

SE



SECCION DE ISO-RESISTIVIDAD APARENTE



TESIS PROFESIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA

PROYECTO GEOTERMICO LOS HUMEROS-DERRUMBADAS
 CALDERA LOS HUMEROS

SECCION 22 - 22'
 FIGURA - 24

Fuente: M. García-Maldonado, R. S. García-López
 Cartografía: C. García-Morales, A. Pineda-Castañeda
 Dibujo: J. B. Hernández-García
 ESCALA HORIZONTAL 1:50,000
 ESCALA VERTICAL 1:20,000

La última capa detectada en esta sección es la roca calcárea de la Formación Tamulipas Superior, cuya resistividad va de 12 a 52 Ω -m. Los valores pequeños, una vez más, dan indicio de la circulación de fluidos hidrotermales en esta zona.

Entre los sondeos 657 y 658 se detecta un fallamiento a partir de la anomalía en el potencial natural, con una amplitud aproximada de 70 mV. Dicha anomalía sugiere también la existencia de un flujo ascendente en la zona.

Sección 18-18'.— Esta sección tiene una longitud aproximada de 11.3 km y consta de 12 sondeos (Figura 25).

En el perfil de autopotencial aparece un máximo con una amplitud aproximada de 120 mV, causado probablemente por un flujo ascendente. De esta anomalía y del comportamiento geoelectrico en la sección de iso-resistividad aparente, se infiere la existencia de una posible falla o fractura entre los sondeos 593 y 594.

La sección electrostratigráfica detecta la existencia de una unidad geoelectrica superficial muy resistiva con espesor promedio de 250 m y resistividad de 1 100 a 16 500 Ω -m. Este medio consta de rocas ígneas de diferentes tipos que observan un engrosamiento hacia la parte Noroeste de la sección.

El segundo paquete se encuentra formado tanto por rocas de origen ígneo como por conglomerados terciarios. Presenta espesores que oscilan entre 200 y 400 m, mostrando su valor más alto al Sureste de la sección. La resistividad que se ha detectado para estas rocas, a lo largo de la sección, va desde 160 hasta 850 Ω -m.

El tercer paquete en la sección 18-18' corresponde a las rocas calcáreas del Cretácico, cuya resistividad oscila entre 10 y 51 Ω -m. La baja resistividad de este paquete puede deberse, como anteriormente se ha dicho, a la existencia de altas temperaturas combinadas con fluidos en un medio permeable ubicado a una profundidad de 200 m aproximadamente.

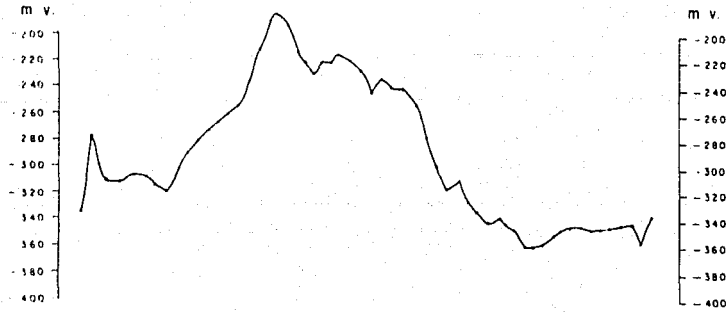
Sección 16-16'.— Esta sección es el límite SW del área estudiada a detalle en La Caldera los Humeros; tiene una longitud total de 11.6 km y se ha construido mediante 9 sondeos (Figura 26).

Las secciones de potencial natural y de iso-resistividad aparente presentan un comportamiento muy suave, lo que indica una homogeneidad lateral muy alta. Es posible suponer un pequeño flujo hacia arriba entre los sondeos 576 y 578, de la pequeña anomalía obtenida en el potencial natural en esta zona.

En general la sección electrostratigráfica presenta igualmente un comportamiento muy homogéneo. El primer paquete está constituido por rocas ígneas muy resistivas (760 a 7 800 Ω -m) con espesores que varían entre 50 y 200 m, teniéndose el mayor valor entre los sondeos 573 y 572.

El segundo paquete se encuentra compuesto como en toda el área, por rocas ígneas y

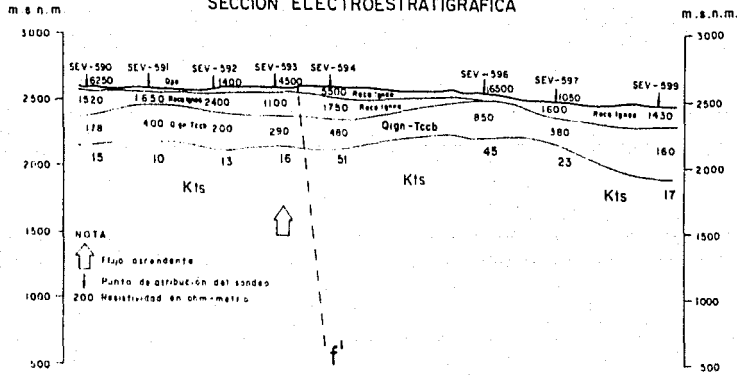
PERFIL DE POTENCIAL NATURAL



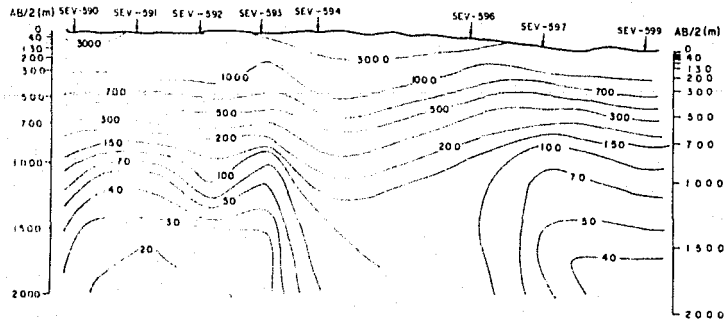
NW

SE

SECCION ELECTROESTRATIGRAFICA



SECCION DE ISO-RESISTIVIDAD APARENTE



TESIS PROFESIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA

PROYECTO GEOTERMICO LOS HUMEROS-DERRUMBADAS

CALDERA LOS HUMEROS. FIGURA-25

SECCION 18-18'

Fernando García-Velázquez

Contardo C. García-Herrera

Daniel J. Hernández-Soriano

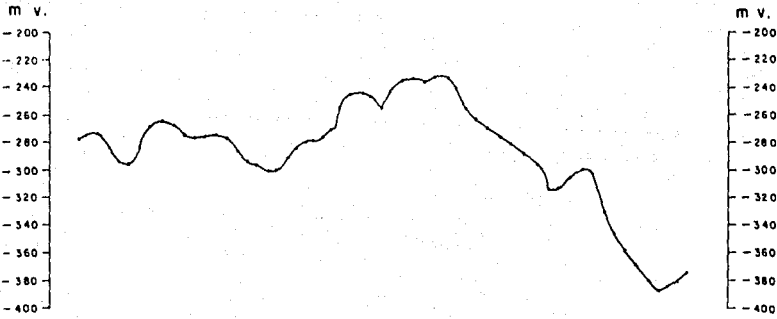
ESCALA HORIZONTAL 1:50,000

ESCALA VERTICAL 1:20,000

Rosario B. García-Durán

Abril A. Cordero-Villalón

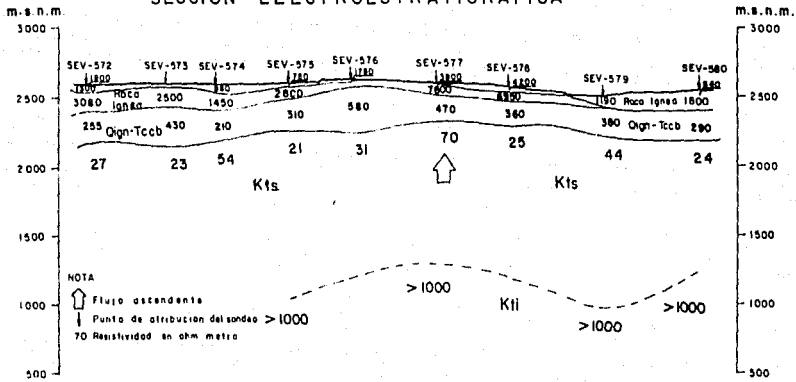
PERFIL DE POTENCIAL NATURAL



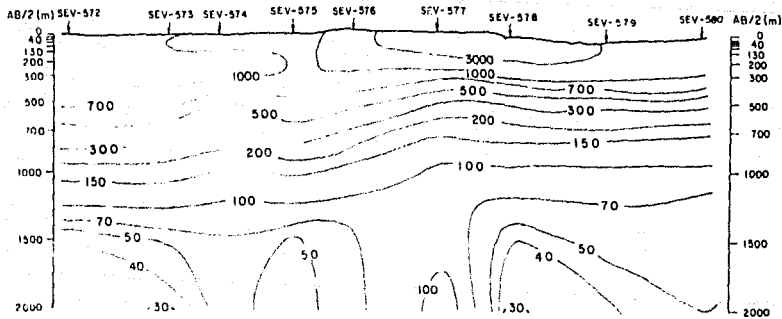
NW

SE

SECCION ELECTROESTRATIGRAFICA



SECCION DE ISO-RESISTIVIDAD APARENTE



TESIS PROFESIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA

PROYECTO GEOTERMICO LOS HUMEROS-DERRUMBADAS
 CALDERA LOS HUMEROS.

SECCION 16-16'

FIGURA-26

Heriberto Garcia-Waldemar
 Ricardo B. Garcia-Duran
 Guillermo C. Garcia-Morales
 Agustin A. Espinoza-Villalobos
 Dibujo: J.A. Hernandez-Garcia
 ESCALA HORIZONTAL 1:50,000
 ESCALA VERTICAL 1:20,000

conglomerados terciarios, con un espesor global promedio de 300 m y resistividad que va desde 210 hasta 580 Ω -m.

El tercer paquete se encuentra constituido por rocas calcáreas del Cretácico con resistividades que oscilan entre 21 y 70 Ω -m. Estos valores se pueden asociar a fluidos hidrotermales que saturan las rocas.

En esta sección, los sondeos 575 al 580 detectan un basamento resistivo a una profundidad promedio de 1 400 m, el cual posiblemente se encuentra formado por calizas impermeables de la Formación Tamaulipas Inferior.

Sección Mazatlaloya.— Esta sección presenta una longitud de 16.7 km y se encuentra construido por 12 sondeos. Esta línea marca el límite sureste del estudio a detalle de La Caldera los Humeros y tiene una orientación aproximada norte-sur (Figura 27).

La primera capa, como en las secciones anteriores, se encuentra constituida por rocas ígneas cuaternarias de varios tipos que poseen en conjunto un espesor máximo de 360 m, detectado por el sondeo 864, y un mínimo de 70 m., detectado por el sondeo 762. La resistividad de esta cubierta rocosa oscila entre 1 100 y 30 000 Ω -m.

El medio subyacente se encuentra formado por rocas ígneas y conglomerados terciarios con un espesor promedio de 400 m. Este paquete muestra un rango de resistividad de 160 a 650 Ω -m.

Por último, se detectan las rocas calcáreas del Cretácico a una profundidad promedio de 600 m, con resistividades que van de 10 a 36 Ω -m.

El perfil de potencial natural muestra una zona de flujo ascendente entre el sondeo 762 y el 1026, alcanzando una amplitud aproximada de 250 mV.

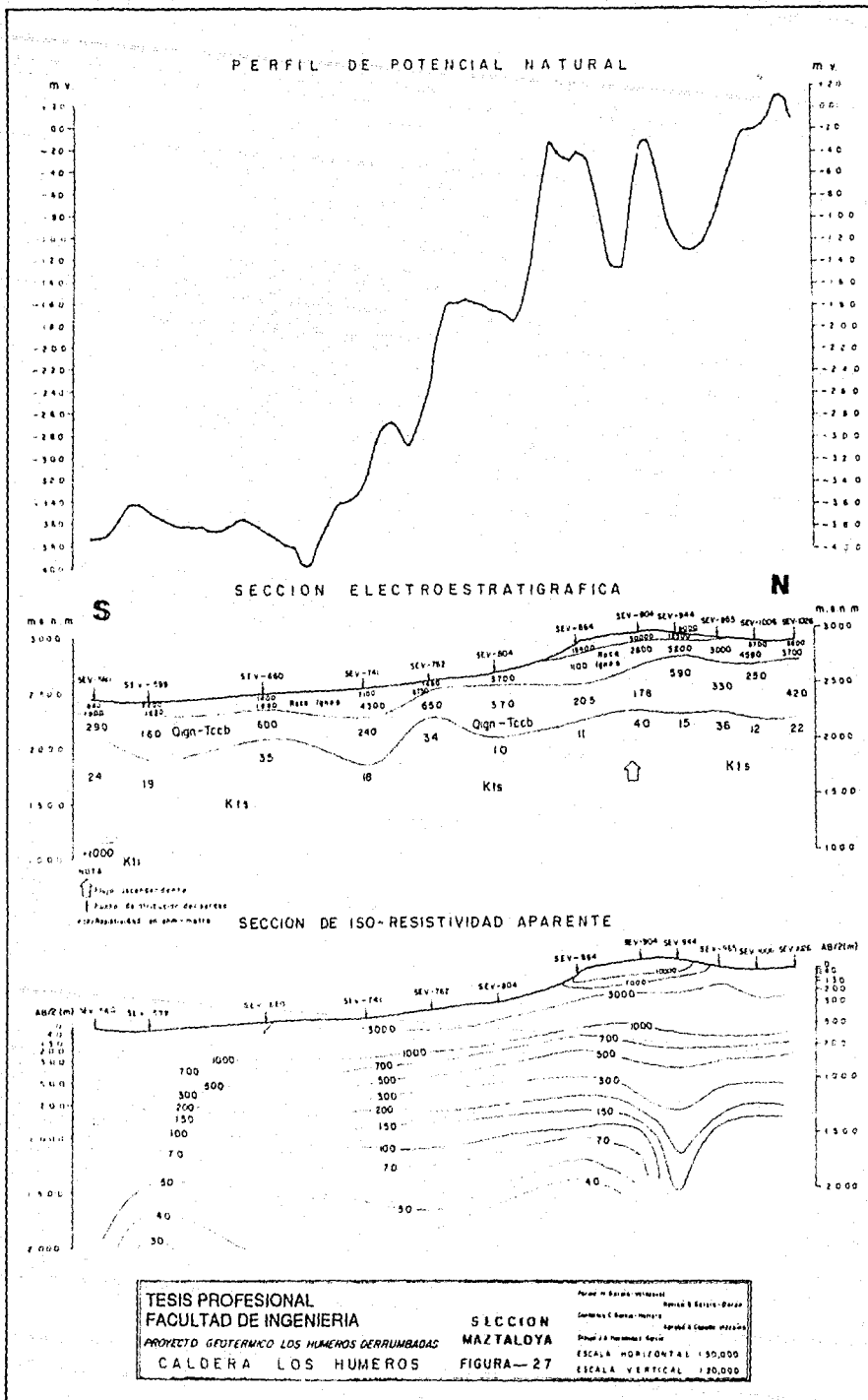
La sección de iso-resistividad aparente muestra, por su parte, un comportamiento homogéneo con una disminución de los valores de resistividad aparente con la profundidad.

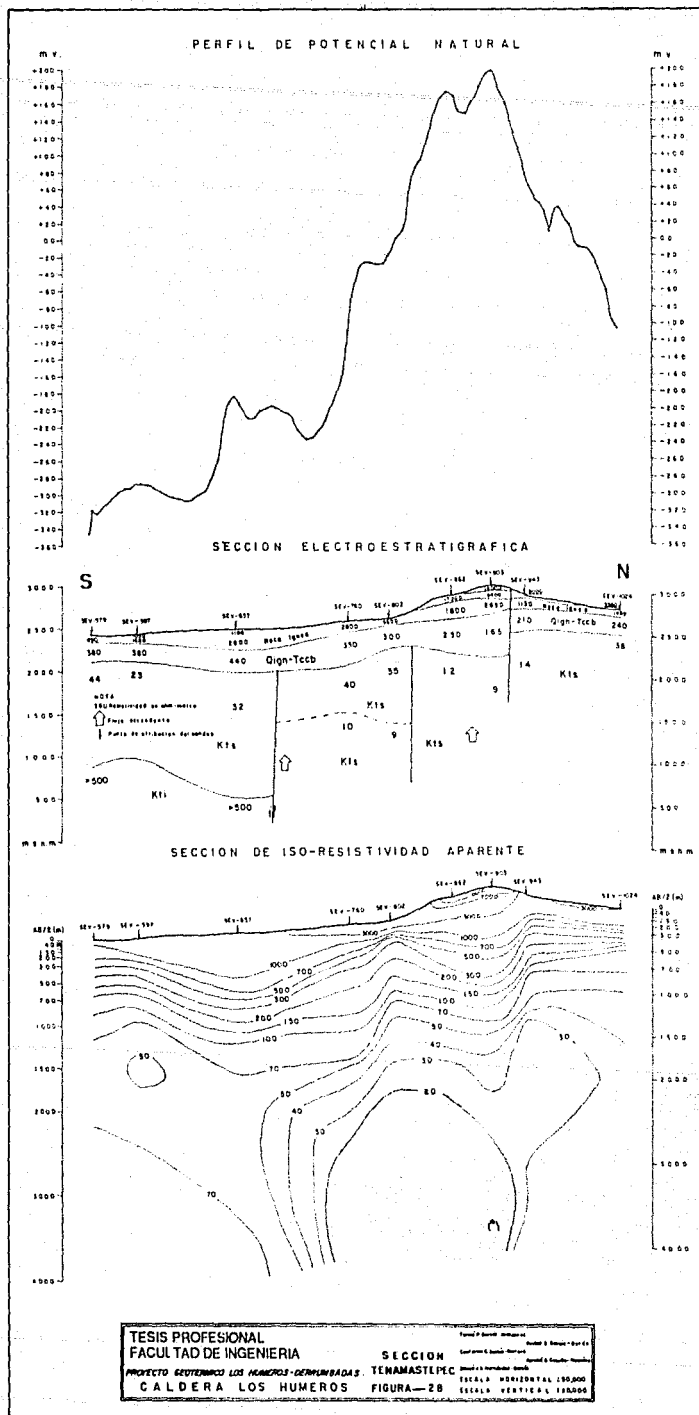
Sección Tenamastepec.— Esta sección tiene una longitud aproximada de 16 km y se encuentra constituida por 9 sondeos (Figura 28).

La primera capa que se observa en la sección electrostratigráfica se encuentra constituida por rocas ígneas del Cuaternario, teniendo su espesor máximo (320 m) en el sondeo 903 y su espesor mínimo (60 m) en el sondeo 802. La resistividad de este paquete ígneo varía entre 1 130 y 17 000 Ω -m.

La segunda unidad detectada la componen rocas ígneas y conglomerados terciarios con un espesor promedio de 350 m y cuya resistividad oscila entre 165 y 440 Ω -m.

Entre los sondeos 802 y 862, así como entre los sondeos 903 y 943, se detecta una serie de fallas manifiestas también por una gran anomalía de 400 mV en el perfil de potencial natural, causada por un flujo ascendente.





La tercera capa se encuentra compuesta por rocas calcáreas cretácicas con resistividad entre 9 y 44 Ω -m. Del sondeo 579 al 657 se registra la roca basal resistiva a una profundidad máxima de 2 000 m. Este basamento está compuesto por rocas calcáreas del Cretácico.

Entre los sondeos 657 y 760 se detecta una falla que afecta sólo a las rocas calcáreas, Esta produce una pequeña anomalía en la respuesta del potencial natural.

Del sondeo 760 al 802 se detecta baja resistividad, de 9 a 10 Ω -m, en el basamento calcáreo; estos valores se deben a la presencia de altas temperaturas, que tal vez indique la existencia de un yacimiento geotérmico de grandes dimensiones en la zona.

Sección Xalapazco.— Esta sección presenta características muy importantes, tiene una longitud de 16 km y se encuentra construida por 15 sondeos (Figura 29).

Al igual que en las secciones anteriores se detecta una primera capa de rocas ígneas cuaternarias, con espesores que van desde 40 m bajo el sondeo 596, hasta 250 m bajo el sondeo 962.

El segundo paquete, constituido por rocas ígneas y conglomerados terciarios, presenta un espesor promedio de 300 m y resistividad desde 150 hasta 850 Ω -m.

El tercer paquete geoelectrónico presenta resistividades bajas que oscilan entre 6 y 52 Ω -m, lo que probablemente se deba a la existencia de altas temperaturas causadas por fluidos hidrotermales presentes en las rocas calcáreas del Cretácico.

Entre los sondeos 860 y 942, en la zona ocupada por el Xalapazco, se detecta una serie de fallas asociadas a los bajos resistivos mencionados. Por dichas fallas deben circular fluidos termales, los cuales se manifiestan en la superficie. El flujo produce una anomalía en el potencial natural del orden de 200 mV, que abarca desde el sondeo 738 hasta el fin de la línea (sondeo 1 023).

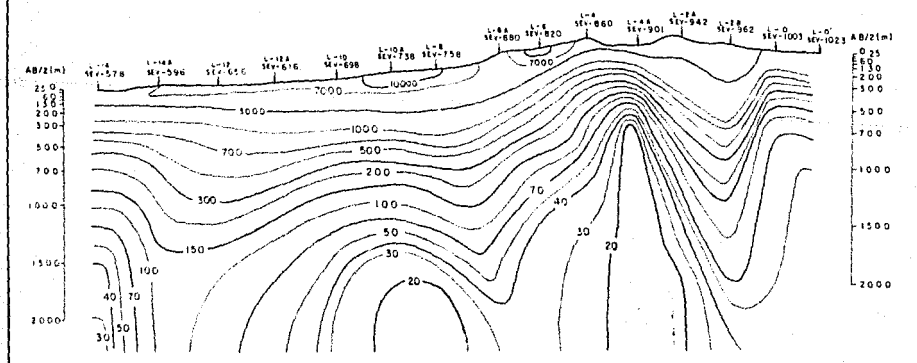
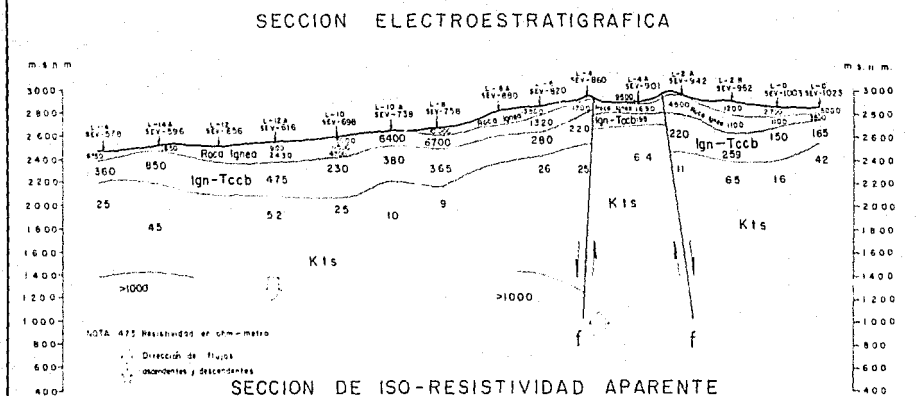
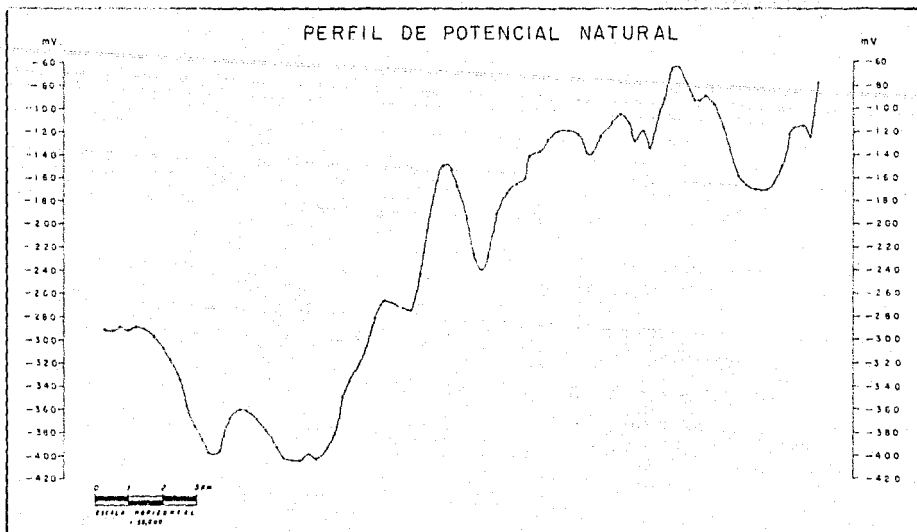
Los sondeos 596 y 820 detectan el basamento resistivo a una profundidad de 1 000 y 1 480 m respectivamente, en los cuales la composición de este medio se relaciona con rocas calcáreas cretácicas.

Por último, la sección de iso-resistividad aparente presenta un comportamiento muy homogéneo, a excepción de los cambios causados por las fallas mencionadas.

Sección Arenas.— Esta sección tiene una longitud de 15,5 km, se ha construido con 13 sondeos y se encuentra aproximadamente al centro del área en La Caldera los Humeros.

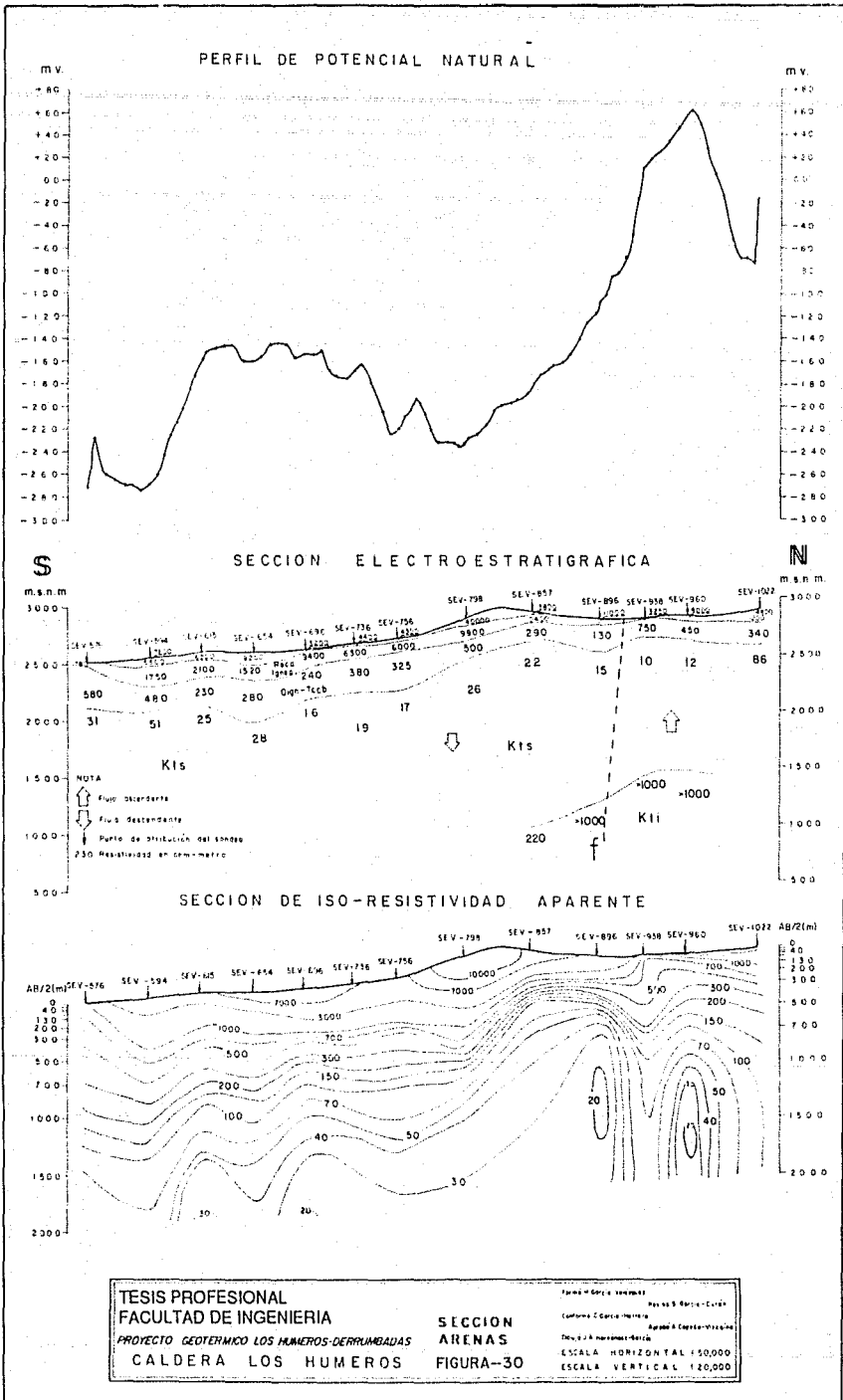
La sección presenta una primera capa de rocas volcánicas del Cuaternario, con espesores que oscilan entre 300 y 500 m. Estos materiales tienen valores de resistividad que van desde 1 230 hasta 40 000 Ω -m (Figura 30).

El segundo paquete, constituido por rocas ígneas y conglomerados de la Formación Cruz Blanca, presenta resistividad que va de 130 a 750 Ω -m y un espesor promedio de 300 m.



<p>TESIS PROFESIONAL FACULTAD DE INGENIERIA</p> <p style="font-size: small;">PROYECTO GEOTERMICO LOS HUMEROS-DERRUMBADAS</p>	<p>SECCION XALAPAZCO FIGURA- 29</p>	<p>CALDERA LOS HUMEROS</p>
---	--	-----------------------------------

Form. y datos: [illegible] Revisó: S. García - Durán
 Conformó: C. Martínez - Martínez Aprobó: A. C. [illegible]
 Dibujo: J. A. [illegible]



El tercer paquete detectado a través de toda la sección corresponde a las rocas calcáreas cuya resistividad oscila entre 10 y 86 Ω -m. Entre el sondeo 896 y 938 se ha inferido la existencia de una falla, tanto por el comportamiento del potencial natural, como por el de iso-resistividad aparente. En esta falla se producen movimientos ascendentes de fluidos, produciendo una anomalía de potencial natural con una amplitud aproximada de 250 mV.

Los bajos valores de resistividad en este tercer paquete están relacionados con la existencia de un posible reservorio geotérmico en el área.

Entre los sondeos 896 al 960, a una profundidad promedio de 1 500 m, se detecta un basamento resistivo probablemente constituido por rocas calcáreas.

Sección Humeros.— Esta sección se ha construido con 12 sondeos y tiene una longitud aproximada de 16.6 km. Presenta una cubierta rocosa formada por rocas ígneas cuaternarias con un espesor máximo de 300 m, en el sondeo 735, y un espesor mínimo de 40 m, en el sondeo 998 (Figura 31). Las resistividades de estas rocas caen dentro del rango entre 1 100 y 15 000 Ω -m.

Como segundo paquete, a lo largo de la sección, se detecta un medio con espesor promedio de 260 m compuesto por rocas ígneas y conglomerados del Terciario, cuya resistividad va de 68 a 475 Ω -m.

El tercer paquete, constituido por rocas calcáreas, presenta resistividades que fluctúan entre 4 y 93 Ω -m. Es de esperarse que estos valores tan bajos sean debidos principalmente a las altas temperaturas de los fluidos que se han mencionado con anterioridad. Es importante hacer notar las fallas existentes, entre los sondeos 935 y 956, y entre los sondeos 998 y 1019, las cuales han sido inferidas del perfil de potencial natural y de la sección electrostratigráfica. A través de estas estructuras se produce la ascensión de fluidos termales que pueden ser observados en la falla de Los Humeros-Loma Blanca.

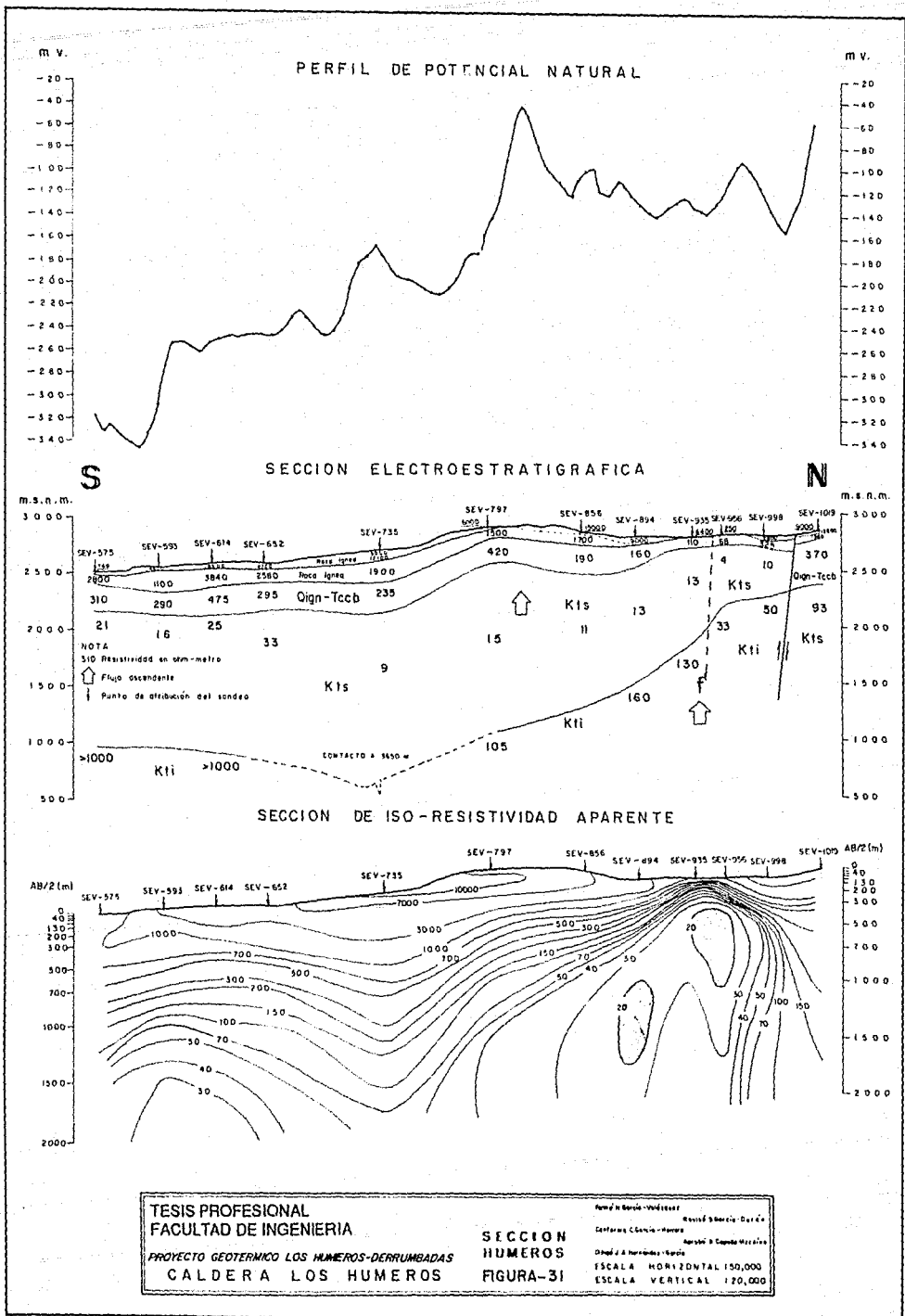
Finalmente, se ha inferido el contacto del basamento resistivo, el cual se encuentra a una profundidad máxima de 3 650 m, según el sondeo 735.

Sección Madero.— Esta sección marca el límite Noroeste del área estudiada a detalle en La Caldera los Humeros; tiene una longitud aproximada de 16 km y se ha construido en base a 9 sondeos (Figura 32).

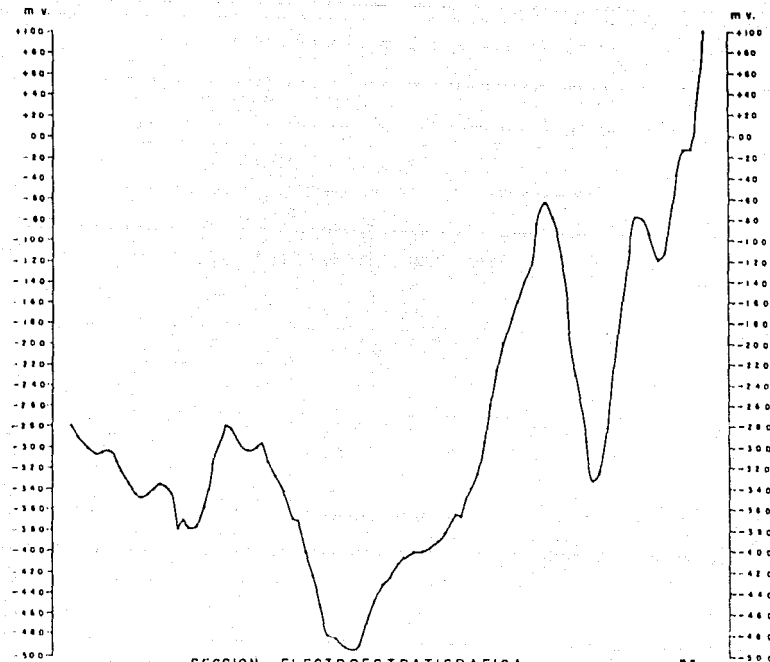
La sección de iso-resistividad aparente presenta un comportamiento muy suave, lo que denota la existencia de un subsuelo homogéneo, deduciéndose condiciones geoelectricas con escasa variación lateral.

La sección electrostratigráfica detecta un primer paquete compuesto por rocas ígneas cuaternarias con espesores que van desde 60 m, bajo el sondeo 931 hasta un máximo de 300 m, bajo el sondeo 732. Esta capa exhibe un rango de resistividad que oscila entre 1520 y 17 500 Ω -m, mostrando su máxima potencia hacia el SW de la sección.

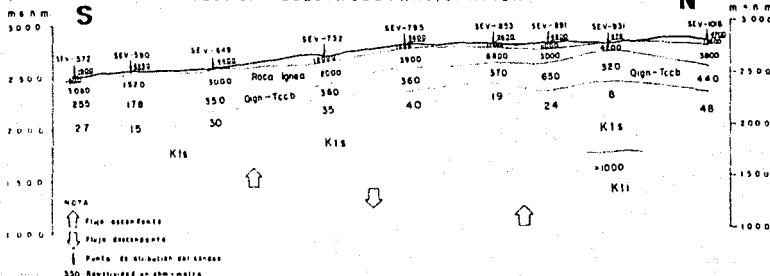
El segundo paquete se encuentra formado por rocas ígneas y por conglomerados del



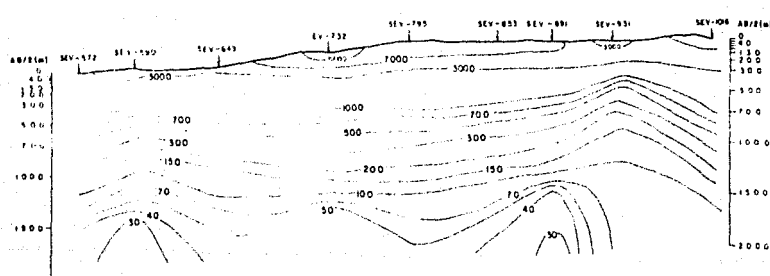
PERFIL DE POTENCIAL NATURAL



SECCION ELECTROESTRATIGRAFICA



SECCION DE ISO-RESISTIVIDAD APARENTE



TESIS PROFESIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA
PROYECTO GEOTERMINO LOS MANOS DERRUMBADAS
CALDERA LOS HUMEROS

SECCION
MADERO
FIGURA-32

Escala Horizontal 1:50,000
 Escala Vertical 1:20,000

Terciario, con resistividades de 178 a 650 Ω -m. Esta capa de rocas presenta un espesor promedio de 250 m.

El tercer paquete se encuentra constituido por calizas del Cretácico y se localiza a una profundidad aproximada de 400 m. La resistividad en este paquete oscila entre 8 y 48 Ω -m. La baja resistividad está relacionada con la existencia de altas temperaturas de fluidos que saturan las rocas. El sondeo 931 detecta un cuerpo resistivo a una profundidad de 1 080 m, el cual puede deberse a rocas calcáreas no permeables que constituyen el basamento.

El potencial natural detecta una serie de zonas con posibles flujos ascendentes y descendentes. La primera zona, con la existencia de un flujo ascendente se ha detectado entre los sondeos 649 y 732, seguida de un flujo descendente, entre los sondeos 732 y 795. Por último, se detecta una gran anomalía en el potencial natural con una amplitud aproximada de 300 mV, que refleja la existencia de un flujo ascendente entre los sondeos 853 y 891.

Configuración del horizonte superior de las rocas calcáreas del Cretácico

Con los sondeos geoelectricos, que detectaron las calizas cretácicas, se elaboró un plano que muestra el techo de las mismas. Los estudios realizados han detectado, en estas rocas, una resistividad que oscila entre 2 y 75 Ω -m, a una profundidad promedio de 400 m.

Con la configuración así obtenida se desprende que dentro de la caldera hay dos estructuras principales en las rocas calcáreas, una de ellas, la de un *horst*, alcanza una altura hasta de 2,800 m.s.n.m. con una orientación N-S; esta estructura tiene su inicio en la parte Norte del poblado de Los Humeros y termina en el Cerro Xalapazco. La otra estructura corresponde a un *graben* localizado al Sureste del Cerro Xalapazco, con una orientación NW-SE, y se encuentra a una altitud entre 2 000 m.s.n.m. y 2 200 m.s.n.m. A lo largo del fallamiento que da lugar a dicho *graben*, existe una serie de manifestaciones termales que dan a esta zona características favorables para la existencia de un yacimiento geotérmico (Figura 33).

III. 4 Conclusiones

Los resultados de los métodos geofísicos empleados en la exploración geotérmica del área La Caldera los Humeros, coinciden en ubicar los prospectos más interesantes en 4 zonas diferentes, denominadas para su referencia como Xalapazco, Humeros, Tenamastepec y Madero (Figura 34).

La zona Xalapazco se localiza sobre el Cerro Xalapazco y tiene una superficie aproximada de 25 km². Se estima que el centro emisor de calor se encuentra en la parte profunda del flanco oriental de dicho cerro, de donde deben provenir las manifestaciones termales observadas en La Caldera. Dentro de esta zona, como un ejemplo de las evidencias geofísicas que sugieren la existencia de un yacimiento, el sondeo eléctrico 901, de la sección transversal Xalapazco, detecta valores de resistividad de 6.4 Ω -m en un medio cubierto por una posible capa sello de hasta 200 m de espesor, la cual está compuesta por rocas ígneas y conglomerados terciarios con alta resistividad.

En segundo término de importancia, la zona Humeros comprende la región circundante a las manifestaciones termales de Los Humeros, con un área de 28 km². En la sección Hume-

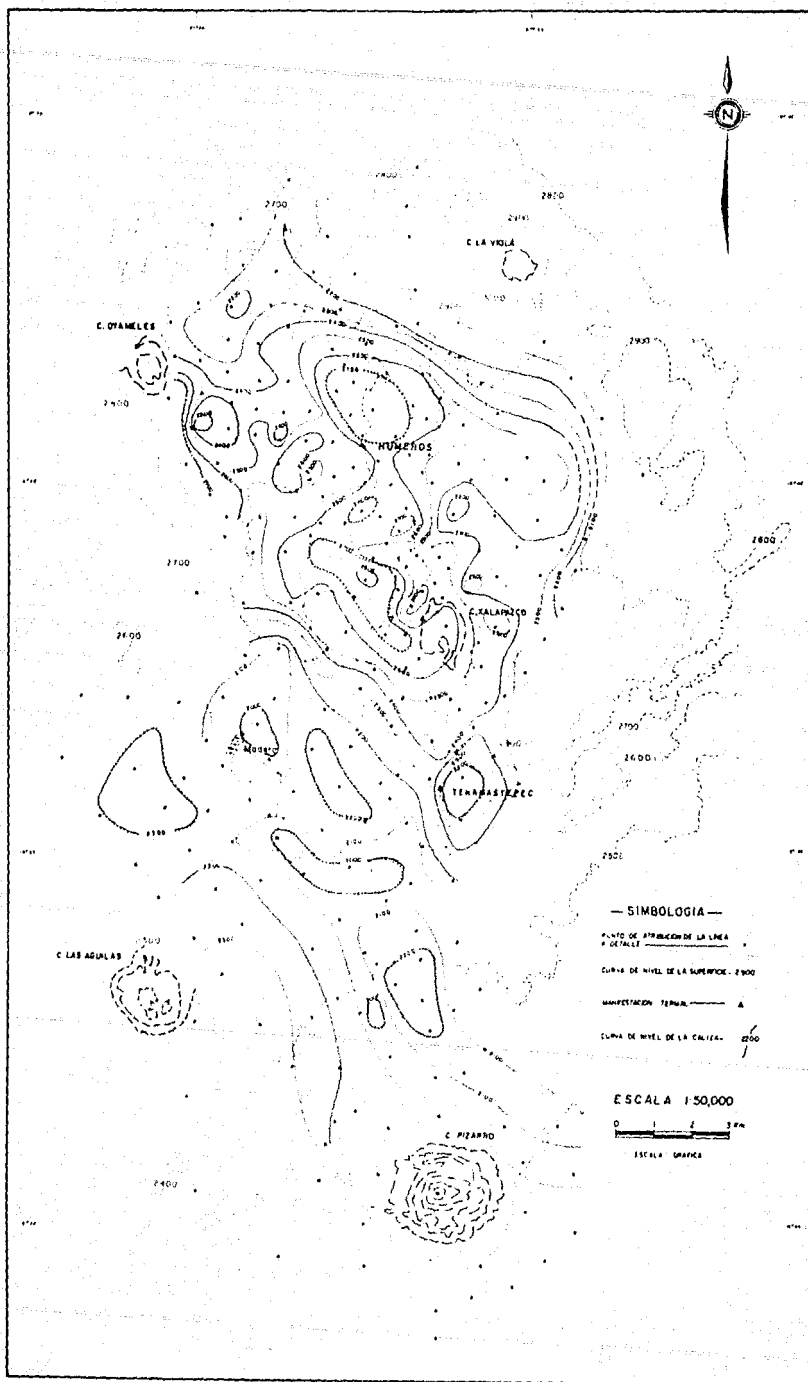


Figura 33.- Configuración del techo de las calizas.

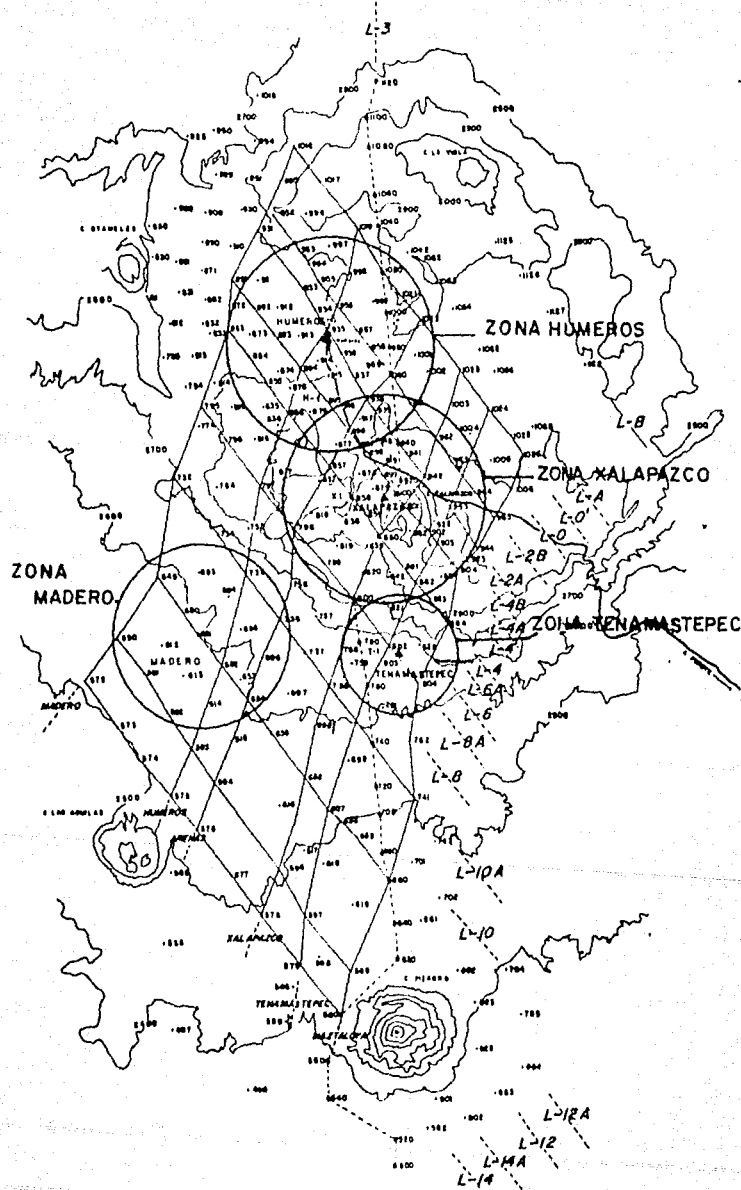


Figura 34.-- Delimitación de las zonas de interés geotérmico.

ros, una de las que atraviesa la zona, se interpretan valores de resistividad de orden de $10 \Omega\text{-m}$ bajo una cubierta totalmente resistiva, aparentemente impermeable, que tiene un espesor máximo de 600 m.

La tercera zona denominada Tenamastepec, cubre un área aproximada de 10 km^2 . La sección *Tenamastepec* cruza a esta zona y revela información muy interesante entre los sondeos 760 y 903, las rocas calcáreas muestran mínimos de $9 \Omega\text{-m}$ bajo una posible capa sello, a través de la cual logran escapar algunas manifestaciones termales. Características similares se encuentran también en la zona Madero, localizada sobre los poblados de Madero y Mancuernas con un diámetro de 5 km, donde el sondeo 651, de la sección 12A, es representativo de las condiciones favorables del lugar. La secuencia electrostatigráfica regional en el área consiste de una cubierta resistiva constituida por rocas ígneas y conglomerados terciarios que deben servir como capa sello; bajo estos materiales aparece un paquete de rocas calcáreas de baja resistividad en el cual quedaría emplazado el yacimiento geotérmico y finalmente, un basamento resistivo, formado en general también por rocas calcáreas.

Por otro lado, la recarga hidráulica proviene de la parte Norte y Noroeste del área, fluyendo hacia la fuente de calor, donde se evapORIZA y tiende a escapar hasta la superficie por medio de las fracturas y fallas ahí existentes, dando lugar a las manifestaciones termales de la caldera.

CAPITULO IV

ESTUDIO A DETALLE EN LOS DOMOS LAS DERRUMBADAS

IV.1 Descripción del área

La zona estudiada a detalle en Los Domos las Derrumbadas (Figura 35) comprende la parte meridional del área de exploración dentro del presente proyecto. La superficie cubierta fue aproximadamente de 225 km² y su localización es la siguiente:

19°10' a 19°24' de Latitud Norte y
97°20' a 97°35' de Longitud Oeste

El área de Las Derrumbadas tiene como límites: al Norte, el Cerro Pinto; al Sur, el poblado de Tepetitlán; al Este, la población de Guadalupe Victoria; y al Oeste, el poblado de Portes Gil. El principal medio de comunicación es la carretera asfaltada, con las vías: San Salvador El Seco-Perote, Zacatepec-Oriental, Zacatepec-El Carmen y San Luis Atexcac-Guadalupe Victoria.

El principal rasgo geológico en esta área son los domos de composición riodacítica (Yañez García, op. cit.) que presentan grandes deslaves por acción del intemperismo y del fracturamiento, por lo cual reciben el nombre de Las Derrumbadas. El resultado de la erosión sobre estos domos da lugar a una serie de lahares, en los que se han identificado 4 etapas de depósito.

Existen diversas evidencias de vulcanismo en la zona, como es el caso del Volcán La Chancla, localizado al Norte de los domos, que se ha cartografiado geológicamente como Qvb. También se encuentra un derrame riodacítico en la porción Norte de dichas estructuras, el cual representa una actividad más reciente ya que aparece cubriendo a los lahares. Las manifestaciones hidrotermales observadas en el domo oriental y en el lugar denominado La Ventana, hacen de este lugar una zona interesante para la existencia de un yacimiento geotérmico.

En la parte Norte de los domos y Sur de San Luis, Atexcac se encuentra una caldera de explosión (axalapazco), donde afloran calizas de las Formaciones Agua Nueva y Méndez, de edad cretácica; otros dos afloramientos de calizas se localizan al sur de los domos, en las sierras La Ventana y Tlachicuca, correspondiendo aquellos a la Formación Guzmantla (Kg2) del Cretácico.

Una estructura relevante dentro del área está constituida por el intrusivo sienítico del Terciario, cuyos afloramientos se localizan en la porción Norte de los domos y en la base del Cerro Pinto. La intrusión de este cuerpo dejó una aureola de metamorfismo en las rocas sedimentarias que se encuentran circundando a los domos (Yáñez-García, *op. cit.*). Evidencias claras de este fenómeno han sido observadas al Oeste del área, cerca del poblado Portes Gil.

IV. 2. Trabajo de campo

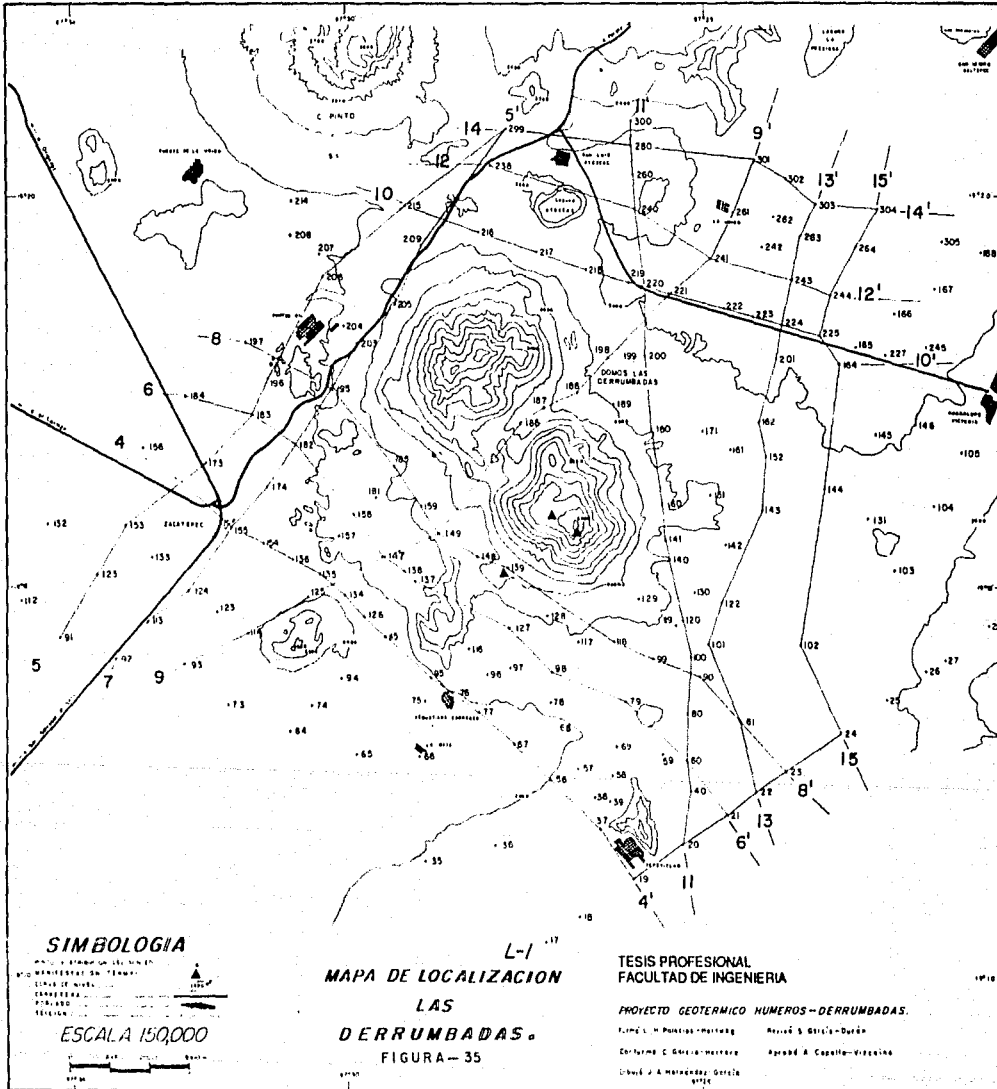
La exploración geoelectrica del área Las Derrumbadas consistió de un total de 170 sondeos Schlumberger con distancia eléctrica AB igual a 4 000 m. Los puntos de observación, distribuidos a lo largo de líneas, quedaron separados a intervalos del orden de 1 km. En el presente informe sólo se hace referencia a 13 líneas (Figura 35), mismas en las que se efectuó un levantamiento de autopotencial, empleando el método de *salto de rana* con estaciones de observación a un intervalo constante de 200 m.

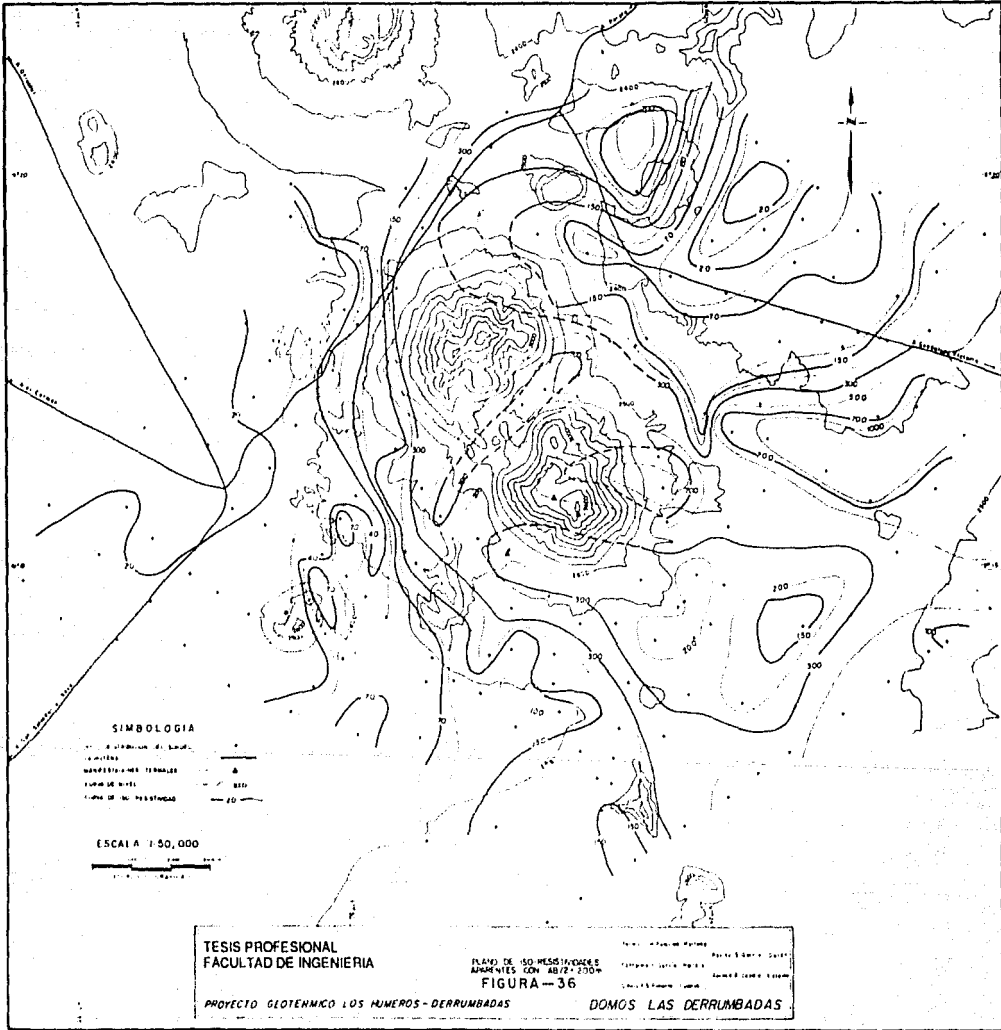
IV. 3. Resultados

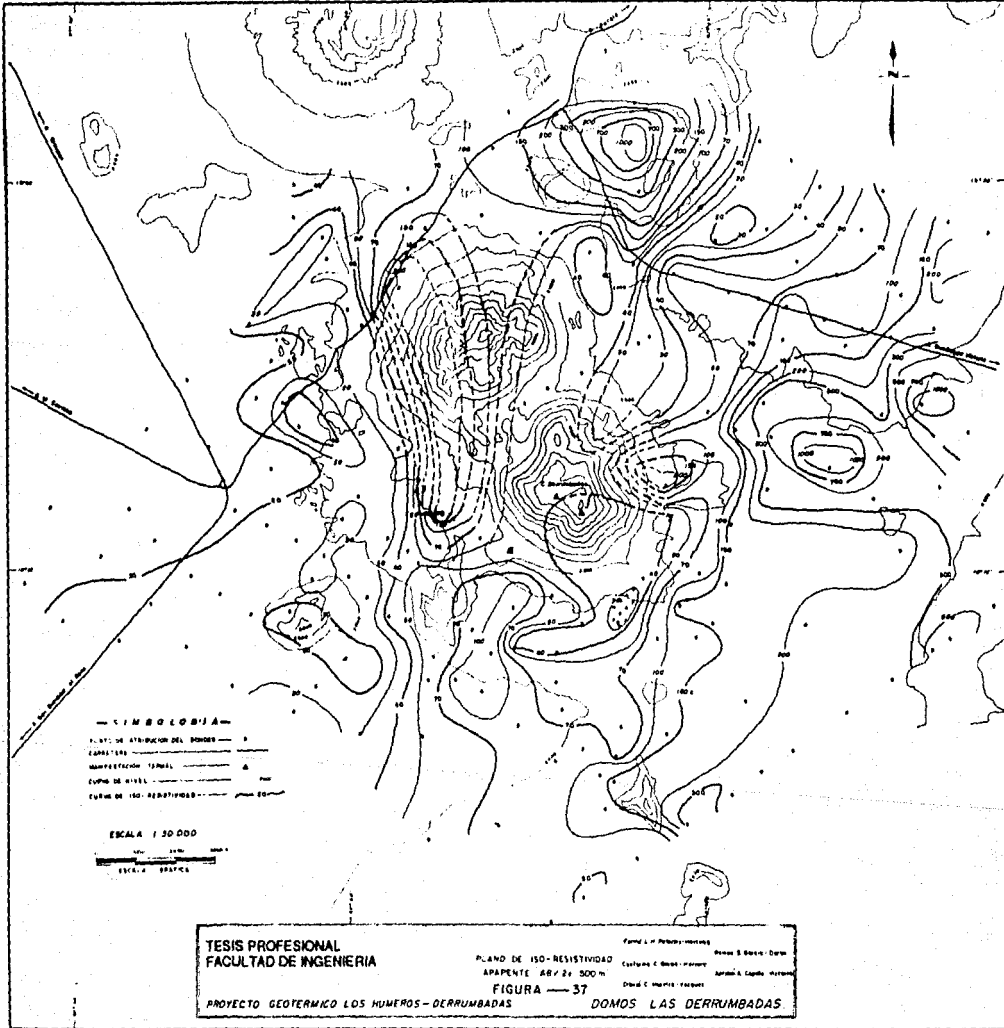
Los resultados, tanto de los sondeos eléctricos como del levantamiento de potencial natural, se muestran, como los de La Caldera los Humeros. En primer lugar aparecen las configuraciones de la resistividad aparente a 5 diferentes profundidades teóricas de investigación, AB/2 igual a 200, 500, 1 000, 1 500 y 2 000 m. Después se analizan individualmente las trece líneas de estudio, mostrándose el perfil de autopotencial, la sección electrostatigráfica y la sección de iso-resistividad aparente de cada una de ellas. Finalmente, se muestra el plano de isoconductancia longitudinal del área.

a) Planos de iso-resistividad aparente.—A una separación eléctrica AB/2=200 m sobresalen dos zonas con mínimos de resistividad aparente ($\rho_a < 20 \Omega \cdot m$), localizados al NE y Oeste de los domos, que se han asociado a los acuíferos de la zona norte y de Zacatepec respectivamente (Figura 36). Destacan también dos zonas de alta resistividad aparente ($300 \Omega \cdot m < \rho_a < 1\,000 \Omega \cdot m$), causadas por los materiales eyectados del volcán "La Chancha", al Norte de los domos, y del volcán El Cerro Alto; al Este del domo sur. Los valores máximos de resistividad aparente, que oscilan entre 70 y 200 $\Omega \cdot m$, son producidos por los diferentes materiales de relleno y por las rocas calcáreas del Cretácico.

En el plano AB/2=500 m, se observa la configuración de bajos resistivos ($\rho_a < 40 \Omega \cdot m$) causados por los acuíferos mencionados y se nota la prolongación del acuífero Norte hacia el Sur, lo que representa una situación favorable para la recarga del sistema geotérmico en esta área (Figura 37). Los máximos de resistividad, que se originan por el efecto de los derrames volcánicos, empiezan a disminuir en tamaño a esta profundidad de investigación. En la parte SE de los domos se detecta un bajo resistivo ($\rho_a < 30 \Omega \cdot m$) causado posiblemente por el efecto de fluidos termales de un yacimiento geotérmico. Los valores de resistividad aparente menores a 70 $\Omega \cdot m$, localizados al Sur de los domos, deben tener su origen por un efecto combinado del acuífero Zacatepec y los fluidos hidrotermales provenientes del centro de los domos. El contorno de resistividad formado por valores que oscilan entre 70 y 300 $\Omega \cdot m$, es provocado por el efecto de materiales fluviales y rocas calcáreas del Cretácico, las cuales, dado su potencial y su buena permeabilidad, pueden constituir un yacimiento geotérmico. A una abertura eléctrica de AB/2=1 000 m se detecta principalmente







una gran zona anómala de baja resistividad aparente ($\rho_a < 70 \Omega \cdot m$), localizada sobre el domo Sur. (Figura 38). Este mismo comportamiento ha sido interpolado hacia el centro de los domos ya que físicamente es imposible realizar sondeos eléctricos sobre ellos. La baja resistividad de esta zona probablemente sea causada por la ascensión de fluidos, en forma semejante a un cono invertido, cuyo centro se encuentra en el domo Sur. A esta profundidad de investigación se siguen detectando las zonas de baja resistividad aparente al Norte y oeste de los domos, por el efecto de los acuíferos superficiales y por la posible circulación de fluidos hidrotermales. Los valores que oscilan entre 70 y 300 $\Omega \cdot m$ se deben, probablemente, al efecto de las rocas calcáreas de grandes espesores con buena permeabilidad.

A la profundidad de investigación $AB/2=1\ 500$ m se registra una disminución general del bajo resistivo localizado sobre el domo Sur. Este fenómeno es debido, posiblemente, a la forma cónica de la circulación de fluidos termales, mencionados. Como sucede con los planos anteriores, prevalece la baja resistividad por el efecto de la combinación acuífero-fluidos hidrotermales y los valores medios por el efecto de las rocas permeables (Figura 39).

La resistividad aparente, entre 150 y 300 $\Omega \cdot m$, obtenida al Norte de los domos, se explica en particular al intrusivo sienítico localizado en esta zona, el cual debe presentar alteración de sus componentes minerales originales.

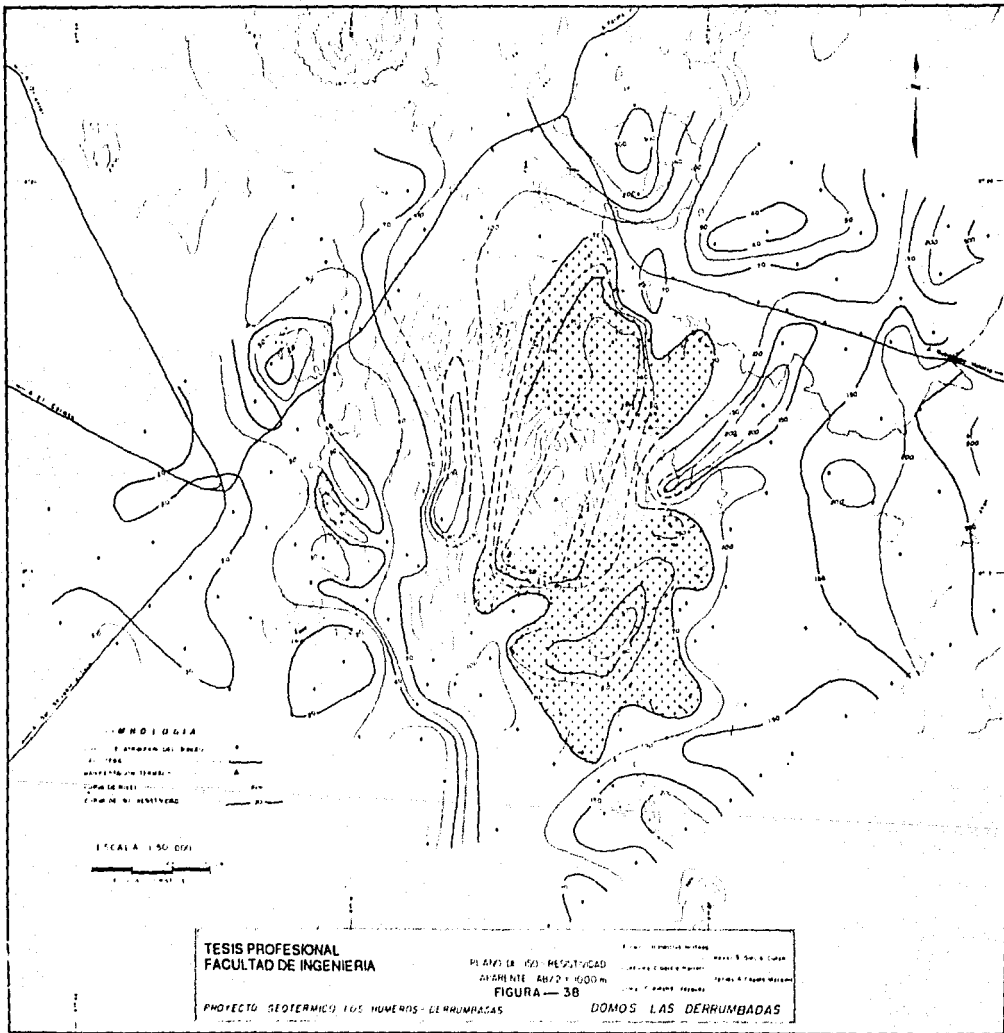
A una distancia eléctrica de $AB/2=2\ 000$ m, continúa la disminución de la baja resistividad causada por fluidos hidrotermales provenientes del domo sur de Las Derrumbadas (Figura 40). Asimismo, se nota un aumento general de los valores de resistividad aparente por efecto de las rocas calcáreas, que oscilan entre 70 y 300 $\Omega \cdot m$. Son claros también los efectos del intrusivo sienítico, localizado al norte de los domos, sobre la resistividad de la zona.

b) Secciones de autopotencial, electrostratigráficas y de iso-resistividad aparente

Sección 5-5'. -Esta sección se encuentra al Oeste de Los Domos las Derrumbadas y tiene una longitud de 12 km. Se ha construido con 6 sondeos y tiene una dirección aproximada de SW-NE. (Figura 41).

La cubierta geoelectrónica se encuentra compuesta por lahares con espesores que van de 20 a 60 m. Del sondeo 173 al 196 se detectan bajas resistividades, del orden de 30 $\Omega \cdot m$, debido a que los lahares están afectados por el acuífero Zacatepec; del sondeo 196 hasta el final de la sección (SEV 299) no existen evidencias de dicho acuífero, ya que la resistividad de los lahares aumenta hasta 1 210 $\Omega \cdot m$.

Los sondeos 173 y 183 detectan, a una profundidad promedio de 70 m, un material asociado a los conglomerados del Terciario, con resistividad del orden de 27 $\Omega \cdot m$, dada la cercanía del acuífero antes mencionado, que influye hasta los 550 m de profundidad, desde el sondeo 173 al 215, afectando a las rocas calcáreas del Cretácico. Por otra parte, entre los sondeos 215 y 299, se detecta una falla o contacto geológico casi vertical que produce una anomalía en el potencial natural del orden de 80 mV, originada posiblemente por un ascenso de fluidos hidrotermales dentro de rocas calcáreas de las formaciones Agua Nueva y Tamauilipas Superior, así como por la influencia del intrusivo ígneo sienítico detectado entre estos mismos sondeos.

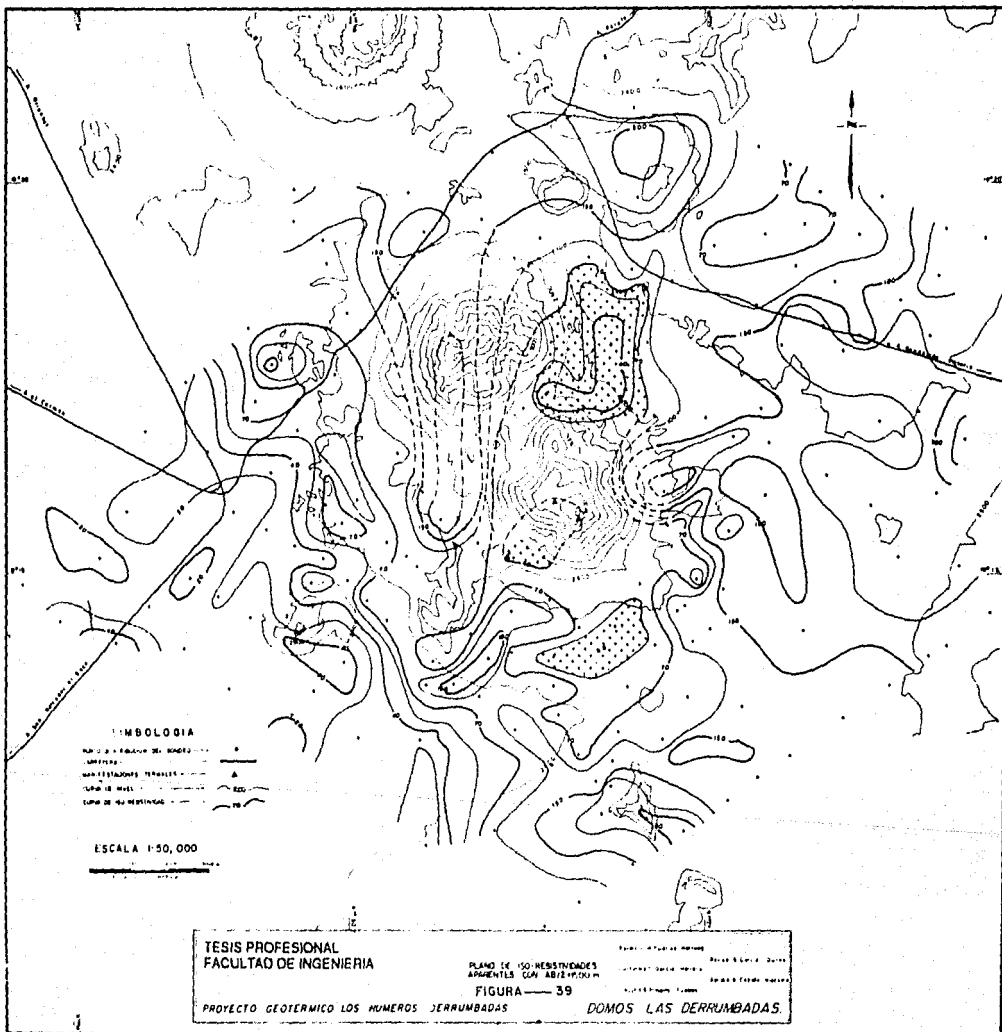


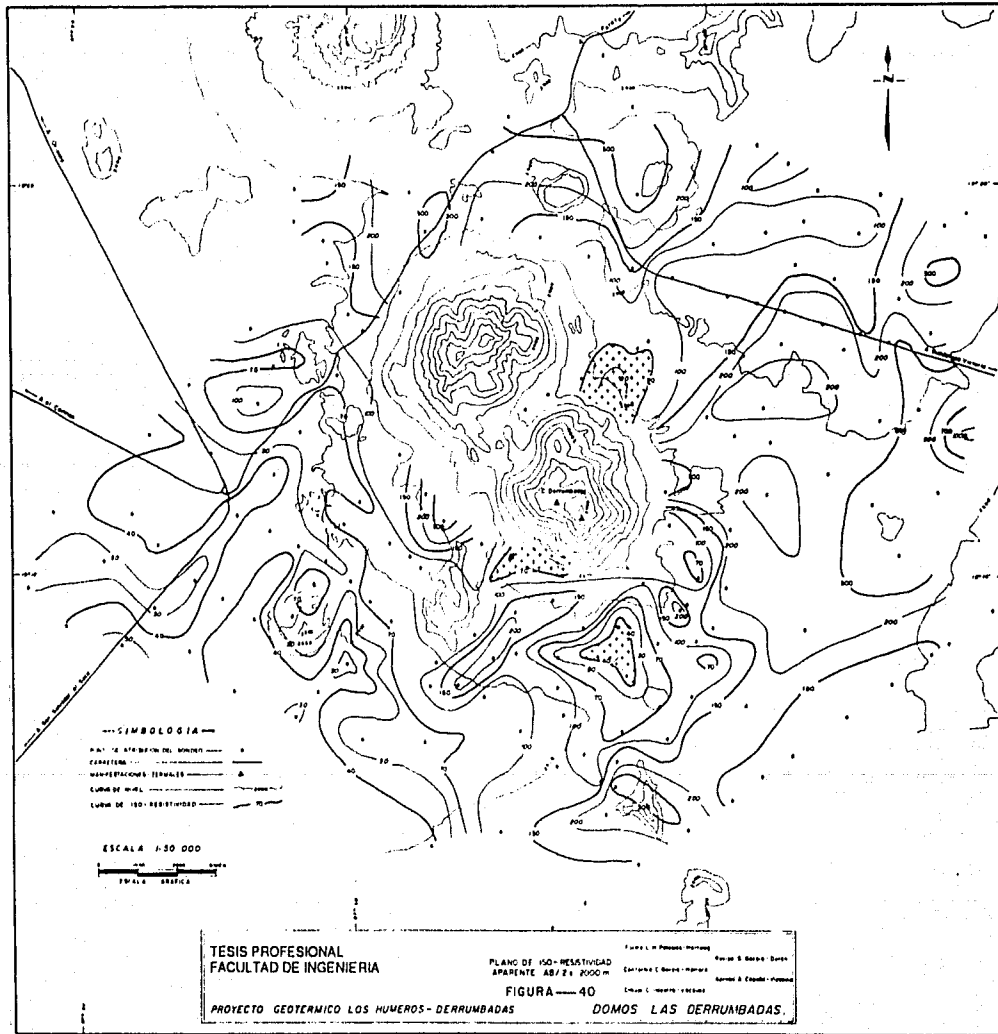
TESIS PROFESIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA

PLANO DE 150' RESOLUCION
AVANTE 1872 x 1000 m
FIGURA - 38

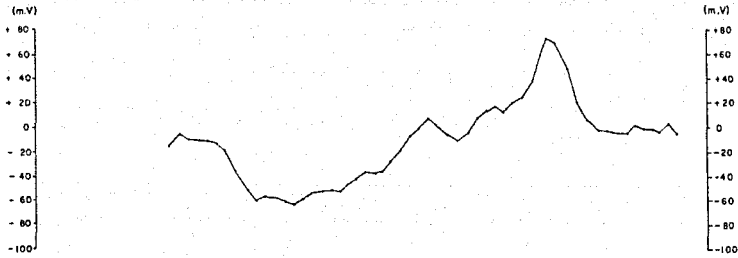
PROYECTO GEOTERMICO LOS NUMEROS - LAS DERRUMBADAS

DOMOS LAS DERRUMBADAS

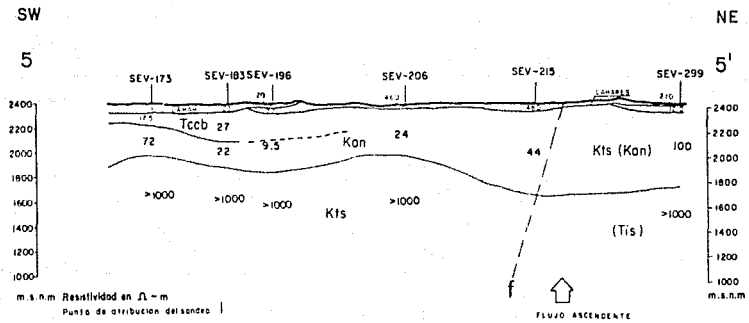




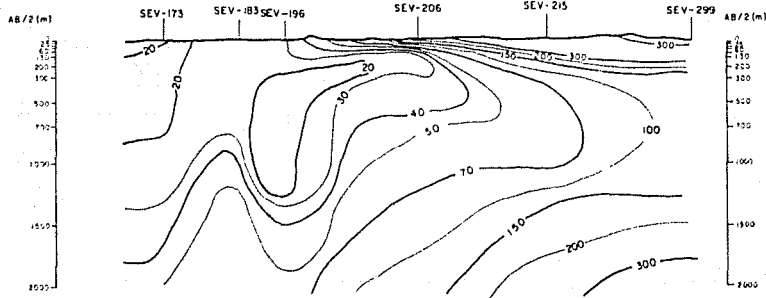
PERFIL DE POTENCIAL NATURAL



SECCION ELECTROESTRATIGRAFICA



SECCION DE ISO-RESISTIVIDAD APARENTE



ESCALA HORIZONTAL 1:50000
ESCALA VERTICAL 1:20000

TESIS PROFESIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA

SECCION - 5 - 5'
FIGURA - 41

FORMA Y CONTENIDO
CONTENIDO Y ORGANIZACION
DISEÑO Y GRAFICACION

El basamento presenta resistividad mayor a 1 000 Ω -m y se divide en dos partes: del sondeo 173 al 215 formado por calizas de la Formación Tamaulipas Superior y del 215 al 299 por el intrusivo sienítico.

La sección de iso-resistividad aparente muestra un mínimo bajo el sondeo 196, con resistividad menor a 20 Ω -m, causado por el acuífero Zacatepec, ya que no parece estar ligado a un flujo hidrotermal.

Sección 7-7'.— Esta sección tiene una longitud de 13 km, se encuentra formado por 9 sondeos y tiene una dirección aproximada SW-NE (Figura 42).

La primera capa está constituida por espesores máximos de 100 m de lahares cuya resistividad va desde 24 hasta 2 380 Ω -m. Los valores más pequeños se deben a la influencia de las aguas salinosas superficiales del acuífero Zacatepec; esto es muy notable en la parte Sur de la sección, entre los sondeos 155 y 195. La segunda capa, localizada entre los sondeos anteriores, está compuesta por rellenos de conglomerados terciarios con espesores máximos de 200 m y con resistividad entre los 19 y los 43 Ω -m; estos valores son también el resultado del acuífero Zacatepec.

Se ha detectado la existencia de una falla entre los sondeos 203 y 205; esta falla es notable tanto en las secciones de potencial natural, por una anomalía positiva de 60 mV., como en la sección de iso-resistividad aparente.

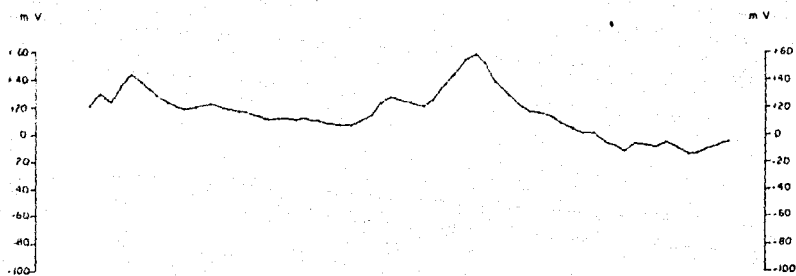
Entre los sondeos 205 y 299 se tiene una segunda capa con un espesor de hasta 750 m compuesta por dos tipos de roca: del sondeo 155 al 203 por calizas de la Formación Tamaulipas Superior, y del sondeo 205 al 299 por el intrusivo sienítico del Terciario.

La baja resistividad aparente, menor a 20 Ω -m, que se observa en la sección de iso-resistividad aparente tiene su origen igualmente en el acuífero Zacatepec, entre los sondeos 155 y 182.

Sección 9-9'.— Esta sección cruza a Los Domos las Derrumbadas con orientación SW-NE. Su longitud es de 19 km y se ha formado con 11 sondeos. Una de las características más importantes de esta sección es una gran anomalía que aparece en las tres respuestas, la cual se ha interpretado con un posible yacimiento geotérmico (Figura 43). La sección presenta características muy diferentes a uno y otro lado del domo riodacítico (Qrio) de Las Derrumbadas:

En la porción sur se detecta una primera capa de lahares con espesor máximo de 60 m y valores altos de resistividad, de 3 000 a 3 800 Ω -m. Le subyace una capa de conglomerados terciarios con resistividad entre 19 Ω -m, en el extremo sur debido a la influencia del acuífero Zacatepec, y 450 Ω -m en la zona más cercana a los domos. El tercer medio en esta parte de la sección se encuentra formado por calizas cretácicas de la Formación Guzmanla, de la cual existen afloramientos en la Sierra La Ventana; estas rocas se encuentran a profundidades que van desde 140 m, en la parte más cercana a los domos, hasta 700 m al Sur de la sección. La resistividad de la Formación Guzmanla varía de 750 a 80 Ω -m, este último valor se debe al alto fracturamiento de la roca en las zonas de falla detectadas en este lugar. El

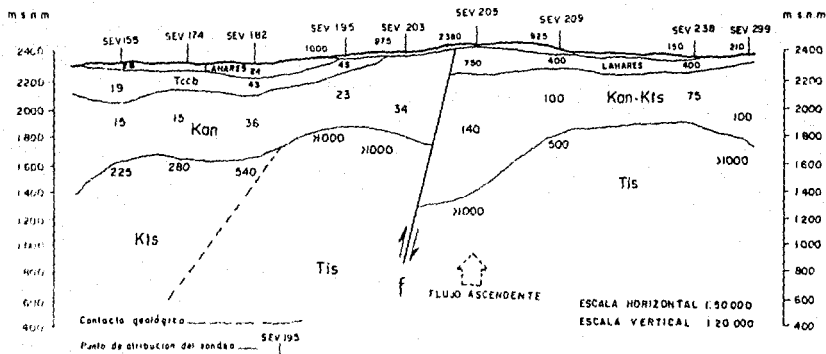
PERFIL DE POTENCIAL NATURAL



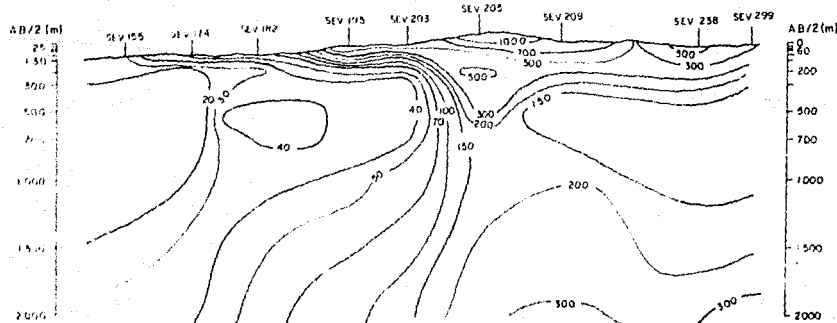
SW
7

SECCION ELECTROESTRATIGRAFICA

NE
7'



SECCION DE ISO-RESISTIVIDAD APARENTE



TESIS PROFESIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA

SECCION 7 — 7'

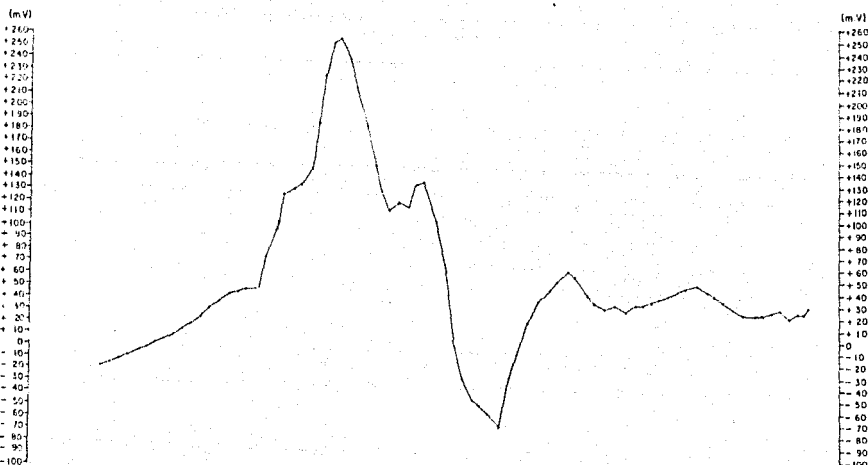
FIGURA — 42

PROYECTO GEOTERMICO LOS HUMEROS - DERRUMBADAS

Formado por: *[Firma]*
 Ing. *[Nombre]*
 Director de Geología
 Ing. *[Nombre]*
 Asesor
 Ing. *[Nombre]*
 Asesor

DOMOS LAS DERRUMBADAS

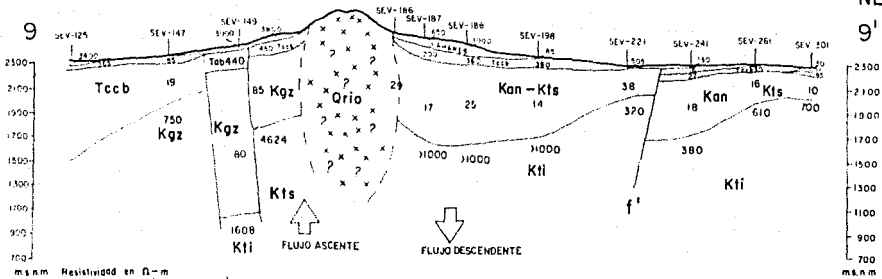
PERFIL DE POTENCIAL NATURAL



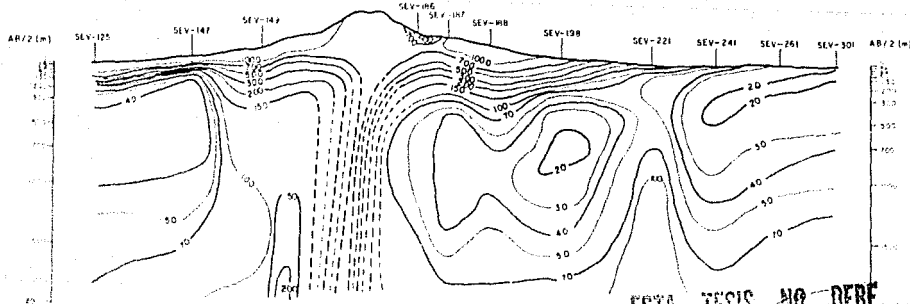
SW

SECCION ELECTROESTRATIGRAFICA

NE



SECCION DE ISO-RESISTIVIDAD APARENTE



ESCALA HORIZONTAL 1:50,000
ESCALA VERTICAL 1:20,000

TESIS PROFESIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA

SECCION 9-9'
FIGURA 43

PROYECTO GEOTERMICO LOS HUMEROS-DERRUMBADAS

DOMOS LAS DERRUMBADAS

ESTA TESIS NO DEBE

REPRODUCIRSE SIN EL CONSENTIMIENTO

fallamiento permite la salida de gases hidrotermales que se manifiestan, entre otros lugares, en la base de la Sierra La Ventana.

La segunda parte de esta sección, al Norte de los domos, se encuentra formada por una cubierta de lahares, con espesores hasta de 100 m y con resistividad comprendida entre 650 y 1 000 Ω -m. Estos lahares son detectados en los sondeos 186 a 198, teniendo su límite entre este último y el sondeo 221. La segunda capa está formada por conglomerados terciarios a lo largo de toda esta parte, con espesores máximos de 200 m y con resistividad entre los 30 y 505 Ω -m; los valores más pequeños en esta capa se deben a la existencia del acuífero Norte, claramente notable en la sección de iso-resistividad aparente, entre los sondeos 241 y 301. La tercera capa se encuentra formada por calizas cretácicas de las formaciones Agua Nueva y Tamaulipas Superior, con espesores que van de 200 a 660 m y valores de resistividad relativamente bajos que van de 10 a 38 Ω -m, por el contenido arcilloso de este tipo de roca y por las altas temperaturas existentes en esta parte de la sección.

Entre los sondeos 221 y 241 se ha detectado una falla, que se interpreta por la pequeña anomalía en el potencial natural, por el comportamiento de la resistividad aparente y por los resultados de la interpretación electroestratigráfica.

El basamento resistivo, en general, se encuentra formado por rocas calcáreas de la Formación Tamaulipas Inferior. Entre los sondeos 188 y 198 se ha detectado un mínimo de -60 mV en la respuesta del potencial natural debido a un flujo descendente, encontrándose el correspondiente flujo ascendente sobre la parte central de los domos, de acuerdo con las manifestaciones termales, resultando una gran anomalía dipolar con una amplitud de 320 mV.

Sección 11-11'.— Esta sección, con una longitud de 17.5 km, se encuentra formada con 16 sondeos de la línea regional 3 y tiene una orientación aproximada N-S (Figura 44).

En la cubierta rocosa se diferencian dos tipos de material ígneo básico (Qvb): el primero de ellos, con un espesor máximo de 100 m, se encuentra localizado entre los sondeos 120 y 180, y presenta resistividad desde 1300 hasta 8 500 Ω -m; el segundo material, es el eyectado por el volcán La Chancla, localizado entre los sondeos 240 y 300 con un espesor máximo de 180 m y muestra un rango de resistividad de 500 a 1 800 Ω -m.

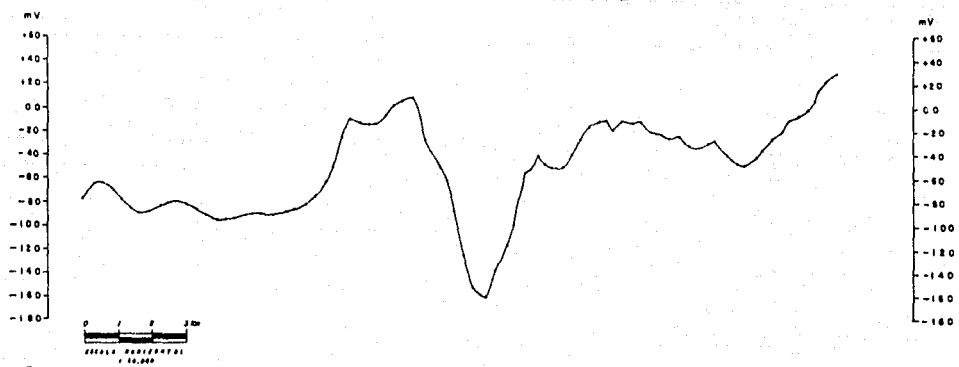
Entre los sondeos 20 y 220 existen como segunda capa, a una profundidad promedio de 100 m, conglomerados del Terciario con resistividad de 150 a 650 Ω -m.

Como tercera capa se tiene un potente paquete de rocas calcáreas cuya resistividad comprende el rango 27 a 525 Ω -m, y posee un espesor máximo de 1 250 m, en el sondeo 60.

Entre los sondeos 140 y 180 se detecta una serie de fallas, que también son notables en la respuesta del potencial natural; esta revela la existencia de un flujo ascendente entre los sondeos 180 y 160, produciendo una anomalía con una amplitud de 160 mV. Las fallas también afectan a las curvas de iso-resistividad aparente.

De manera similar se detecta una falla entre los sondeos 220 y 240; este tipo de estructura, probablemente, fue la causante de los derrames ígneos básicos en la zona.

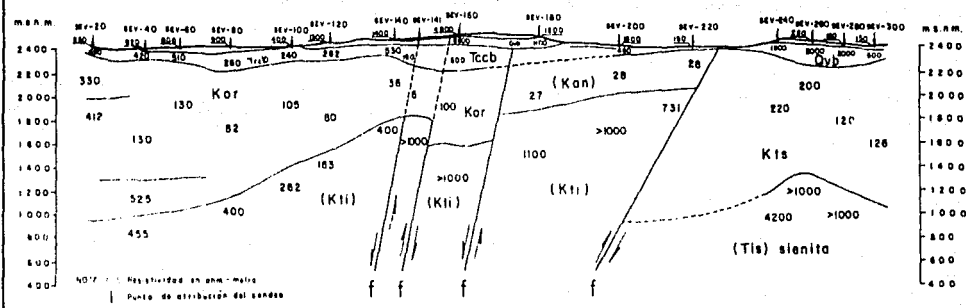
PERFIL DE POTENCIAL NATURAL



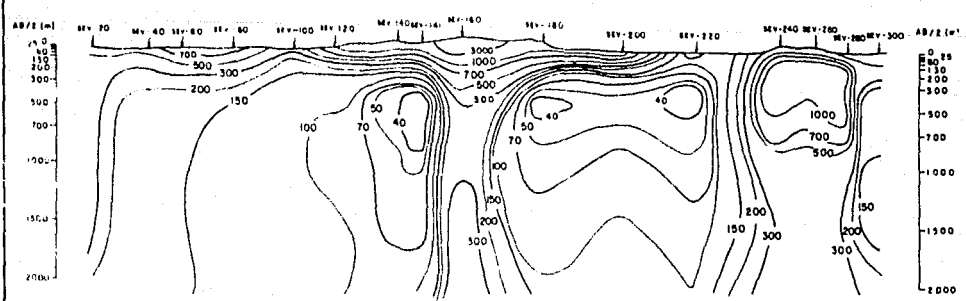
S
II

N
II'

SECCION ELECTROESTRATIGRAFICA



SECCION DE ISO-RESISTIVIDAD APARENTE



ESC HORIZONTAL 1:50.000
ESC VERTICAL 1:20000

TESIS PROFESIONAL FACULTAD DE INGENIERIA SECCION II — II' FIGURA — 44 PROYECTO GEOTERMICO LOS NUMEROS - DERRUMBADAS	Autor: L. H. Pineda - Marín Profesor: C. Gómez - Marín Director: J. A. Hernández - Barón	Revisor: S. García - Barón Asesor: R. Capellán - Barón
	DOMOS LAS DERRUMBADAS	
	(Empty space for additional notes or signatures)	
	(Empty space for additional notes or signatures)	

En la sección de iso-resistividad aparente, entre los sondeos 140 y 141, se detecta un mínimo causado por el posible yacimiento en el subsuelo al pie de los domos. El bajo resistivo localizado entre los sondeos 180 y 220 se debe a los posibles flujos hidrotermales en rocas calcáreas, los cuales producen una resistividad de $28 \Omega \cdot m$.

En esta misma sección, entre los sondeos 240 y 300 y a 1 100 m bajo la superficie, se detecta el intrusivo sienítico terciario. La línea 11-11' constituye el límite oriental de la intrusión de este cuerpo, ya que no se le registra en las líneas ubicadas al Este de la misma.

El basamento resistivo, en general, se encuentra formado por rocas calcáreas de las formaciones Tamaulipas Superior e Inferior debiendo estar a una profundidad máxima de 1 400 m, en el sondeo 60. La resistividad de este medio oscila desde 163 hasta más de 1 000 $\Omega \cdot m$.

Sección 13-13'.—Esta sección tiene una longitud de 15 km, se localiza al Este de los domos y está construida con 12 sondeos eléctricos verticales (Figura 45).

Como primer paquete geoelectrico se encuentran lahares y conglomerados con un espesor máximo de 270 m. El segundo paquete geoelectrico está formado por calizas de la Formación Orizaba ($50\text{-}205 \Omega \cdot m$), con un espesor máximo de 1100 m bajo el sondeo 61. Una falla localizada entre los sondeos 162 y 152, separa a las rocas de la Formación Orizaba de las de las formaciones Agua Nueva y Tamaulipas Superior produciendo un abrupto cambio en el perfil de potencial natural, con una amplitud de 90 mV, y una anomalía en la sección de iso-resistividad aparente. Dentro de estas dos formaciones aparecen dos zonas diferenciadas por su resistividad: una, influenciada por el acuífero del Norte en los sondeos 243 y 303 ($\rho_a < 40 \Omega \cdot m$) y otra, menos permeable con resistividad mayor a $100 \Omega \cdot m$. El basamento resistivo se encuentra formado por rocas calcáreas de la Formación Tamaulipas Inferior.

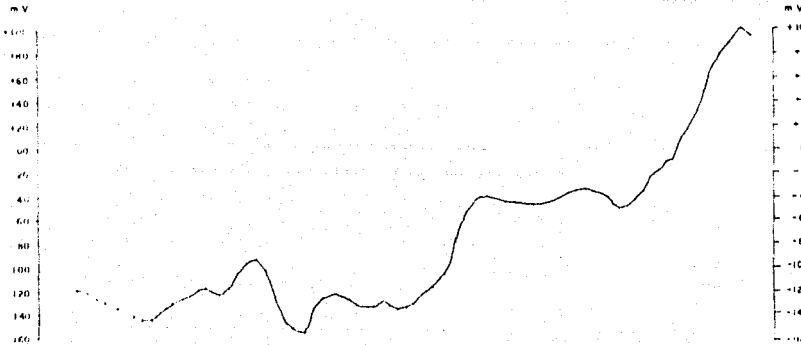
En la sección de iso-resistividad aparente se nota la presencia del acuífero de la zona Norte, entre los sondeos 243 y 303, con resistividad aparente menor a $40 \Omega \cdot m$. Este acuífero también baja la resistividad de los conglomerados y lahares, que forma la cubierta, hasta valores inferiores a los $100 \Omega \cdot m$.

Sección 15-15'.—Esta sección se ubica en el extremo oriental del área estudiada a detalle, tiene una longitud de 13.2 km, está constituida por 8 sondeos y tiene una orientación aproximada Norte-Sur (Figura 46). La cubierta geoelectrica en esta zona la constituyen depósitos de pómez (Qpo) y conglomerados terciarios, con un espesor promedio de 150 m. El sondeo 144 detecta dos tipos de derrames básicos (Qvb) provenientes del volcán El Alto, presentando un espesor máximo de 140 m y valores de resistividad mayores a los $1000 \Omega \cdot m$. El efecto resistivo de estos derrames es también notable en la sección de iso-resistividad aparente.

Bajo esos materiales volcánicos el segundo paquete geoelectrico se encuentra formado por las calizas de las formaciones Tamaulipas Superior y Orizaba, separadas por una falla entre los sondeos 144 y 164. Estas formaciones calcáreas muestran un rango de resistividad entre 55 y $200 \Omega \cdot m$, con un espesor máximo del orden de 800 m.

Como basamento resistivo, en toda la sección, se ha supuesto la existencia de las calizas de la Formación Tamaulipas Inferior. Entre los sondeos 24 y 102, en este mismo medio,

PERFIL DE POTENCIAL NATURAL



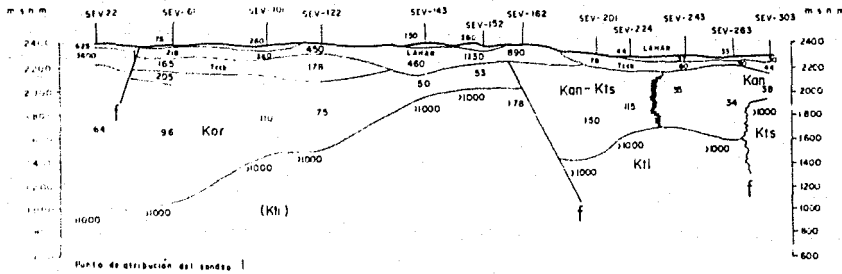
S

N

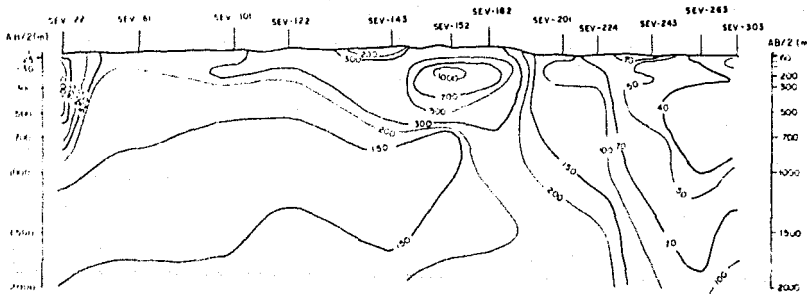
13

13'

SECCION ELECTROSTRATIGRAFICA



SECCION DE ISO-RESISTIVIDAD APARENTE



TESIS PROFESIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA

SECCION 13 — 13'

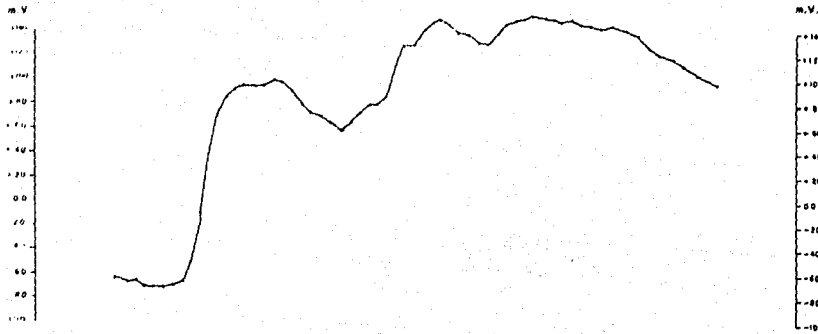
FIGURA — 45

PROYECTO GEOTERMICO LOS HUMEROS - DERRUMBADAS

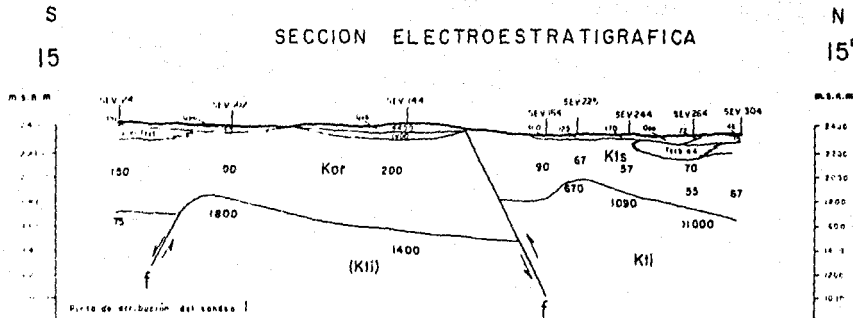
DOMOS LAS DERRUMBADAS

ESCALA HORIZONTAL 1:10000
ESCALA VERTICAL 1:20000

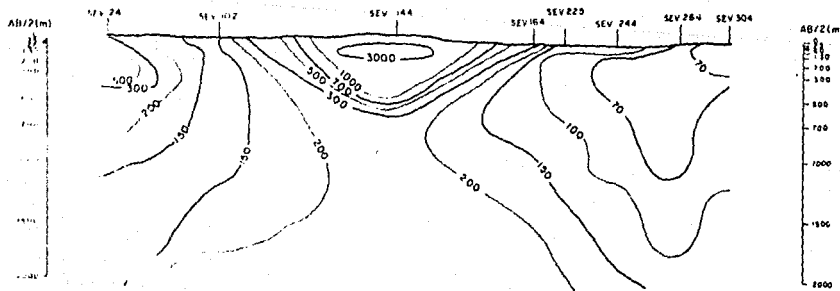
PERFIL DE POTENCIAL NATURAL



SECCION ELECTROESTRATIGRAFICA



SECCION DE ISO-RESISTIVIDAD APARENTE



TESIS PROFESIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA

SECCION 15 — 15'

FIGURA — 46

PROYECTO GEOTERMICO LOS HUMEROS - DERRUMBADAS

ESTRATIGRAFIA Y RESISTIVIDAD APARENTE
C. BARRERA
DIPLOMA EN INGENIERIA
DOMOS LAS DERRUMBADAS.

ESCALA HORIZONTAL 1 50 000
ESCALA VERTICAL 1 20 000

se detecta una posible falla por el tipo de anomalía que se registra en la respuesta del potencial natural, la cual es del orden de 180 mV.

Sección 14-14'.—Esta sección, tiene una longitud de 9.8 km, y representa el límite Norte del área estudiada a detalle. Se encuentra construida con 5 sondeos, tiene una orientación NW-SE y se puede dividir en 2 partes (Figura 47):

La primera incluye los sondeos 299 y 280 y presenta las siguientes características: una cubierta de unos 200 m de espesor compuesta por material ígneo básico eyectado del Volcán La Chancla; una segunda capa constituida por 800 m de rocas calcáreas de las formaciones Agua Nueva y Tamaulipas Superior; como basamento resistivo, a una profundidad de 1060 m, se detecta el intrusivo sienítico con resistividad mayor a 1 000 Ω -m.

Entre los sondeos 280 y 301 se interpreta una falla a partir de las respuestas del potencial natural y de la resistividad aparente.

La segunda parte de esta sección, definida por el sondeo 301, detecta como primera capa 60 m de pómez que desaparecen en los sondeos adyacentes. Bajo esta cubierta, entre los sondeos 301 y 304, aparece un promedio de 140 m de conglomerados del Terciario, con resistividad de 29 a 113 Ω -m. Como tercera capa, entre los sondeos 301 y 304, se tiene un paquete de rocas calcáreas de las formaciones Agua Nueva y Tamaulipas Superior, con un espesor promedio de 300 m y un rango de 18 a 67 Ω -m en su resistividad; estas formaciones constituyen el acuífero Norte, que tiende a desaparecer entre los sondeos 301 y 304.

El basamento, que también es resistivo en esta parte de la sección, lo forman las calizas de la Formación Tamaulipas Inferior a una profundidad de 220 m bajo el sondeo 301.

Sección 12-12'.—Esta sección está construida con 5 sondeos, tiene una longitud de 9.3 km y es paralela a la sección 14-14'.

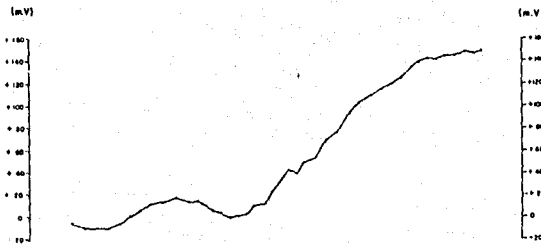
El primer paquete a lo largo de toda la sección se encuentra constituido por lahares del Cuaternario y conglomerados del Terciario. El sondeo 240 detecta el material ígneo básico (Qbv), con espesor máximo de 120 m, que constituye parte importante del Volcán la Chancla (Figura 48).

Como segunda capa se detectan calizas de las formaciones Agua Nueva y Tamaulipas Superior, con resistividad que va de 18 a 220 Ω -m. Dentro de este medio y bajo el sondeo 241, se localiza el acuífero Norte cuya extensión puede inferirse al observar la sección de iso-resistividad aparente. Entre el sondeo 241 y 240 se interpreta una falla a partir de las tres respuestas geofísicas; la falla produce una diferencia de potencial con una amplitud de 50 mV aproximadamente.

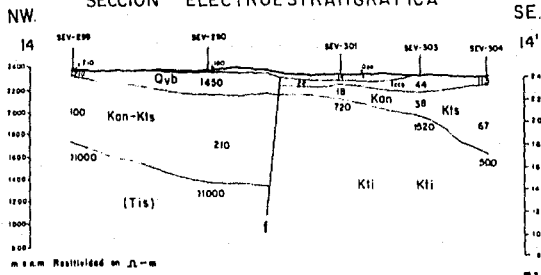
El intrusivo sienítico es detectado por los sondeos 238 y 240 causando también una diferencia de potencial de 170 mV aproximadamente. Como basamento resistivo entre los sondeos 241 y 244 se encuentran rocas de la Formación Tamaulipas Inferior, a una profundidad promedio de 500 m, con un rango de resistividad entre 380 y 1 050 Ω -m.

PERFIL DE POTENCIAL NATURAL

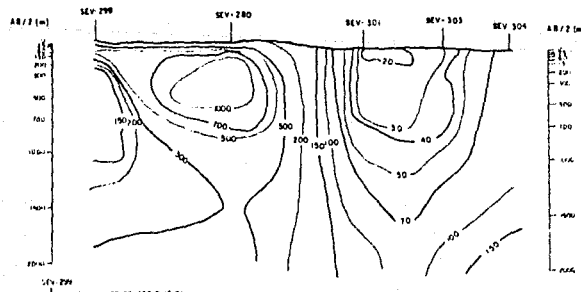
SECCION - 14-14'



SECCION ELECTROESTRATIGRAFICA



SECCION DE ISU-RESISTIVIDAD APARENTE



ESC. HORIZONTAL 1:50000
ESC. VERTICAL 1:20000

TESIS PROFESIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA

SECCION 14-14'
FIGURA - 47

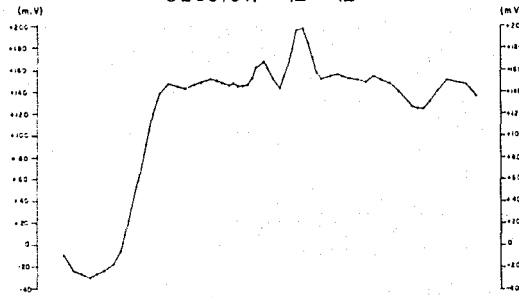
PROYECTO DETERMINAR LOS NUMEROS-DERIVADAS

Nombre: J. A. Torres-Hernandez
Carrera: Geofisica
Fecha: 28 de Mayo de 1968

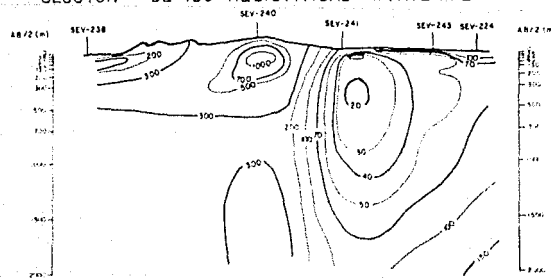
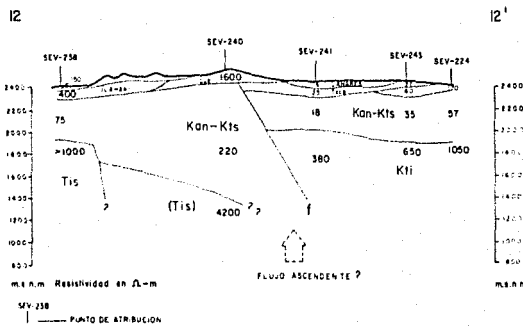
Nombre: Esteban Bernal
Cargo: Asesor
Fecha: 28 de Mayo de 1968

PERFIL DE POTENCIAL NATURAL

SECCION - 12 - 12'



NW SECCION ELECTROSTRATIGRAFICA SE.



ESC. HORIZONTAL 1:50000
 ESC. VERTICAL 1:20000

TESIS PROFESIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA
 SECCION 12-12'
 FIGURA - 4 B
 PROYECTO GEOTERMICO LOS NUMEROS DERRUMBADAS

Sección 10-10'.—Esta sección (Figura 49) de 11 km de longitud se localiza al Norte de Los Domos las Derrumbadas y sigue casi totalmente el camino que va de San Luis Atexcac al poblado de Guadalupe Victoria; está construida por 11 sondeos y tiene una orientación aproximada NW-SE. Los diferentes métodos empleados detectan las siguientes características:

Como primer paquete geoelectrico, con espesor promedio de 100 m, lahares y conglomerados con resistividad que van desde 30 hasta 500 Ω -m, denotando los valores más bajos la presencia del acuífero Norte en esos materiales.

El segundo paquete geoelectrico se encuentra constituido por rocas de las formaciones Agua Nueva y Tamaulipas Superior, con resistividad que va desde 26 hasta 115 Ω -m. Los valores menores dentro de ese rango se encuentran en la parte central de la sección, entre los sondeos 218 y 222, y denotan la existencia de un acuífero con unos 300 m de espesor, que alimentaría al posible yacimiento geotérmico, el cual podría localizarse al Sur de esta zona. Esa parte central se encuentra limitada por dos fallas: la primera se localiza entre los sondeos 217 y 218, y es también detectada por las dos secciones anteriormente descritas: la segunda, entre los sondeos 222 y 223, sólo es detectada por las secciones de iso-resistividad aparente y electrostratigráfica de esta línea.

El intrusivo sienítico es mapeado por los sondeos 215, 216 y 217 a una profundidad promedio de 600 m, arrojando una resistividad mayor a 1 000 Ω -m, y una diferencia de potencial de 150 mV, aproximadamente.

El basamento resistivo de esta sección lo constituyen las rocas calcáreas de la Formación Tamaulipas Inferior, con resistividad de 140 a 850 Ω -m, a una profundidad máxima de 600 m.

Sección 8-8'.—Esta sección, trazada a lo largo de la base Sur de los domos, tiene una longitud de 17 km, está construida con 12 sondeos y tiene una orientación NW-SE, (Figura 50).

La cubierta geoelectrica en la sección electrostratigráfica esta constituida por lahares del Cuaternario y conglomerados del Terciario, con resistividad de 43 a 2 000 Ω -m y espesores máximos de 240 m, bajo el sondeo 23. Entre los sondeos 197 y 185, como segundo paquete se detectan 380 m de rocas calcáreas de la Formación Agua Nueva, con resistividad baja (18 a 24 Ω -m) debido a la influencia del acuífero Zacatepec. Este fenómeno es claramente visible en la sección de iso-resistividad aparente.

En los sondeos 185 y 148 se producen diferencias de potencial hasta de 70 mV, debido a un flujo hidrotermal ascendente a través de fallas, lo cual queda demostrado por las manifestaciones superficiales localizadas en la base del Domo. Estas fallas, que llegan hasta el basamento, también son registradas en la sección de iso-resistividad aparente. Entre los sondeos 159 y 149 aparece el cambio de facies de las formaciones Agua Nueva y Guzmantla, aflora esta última en la Sierra Ventana. El espesor de las calizas debe ser de aproximadamente 600 m con resistividad que oscila entre 48 y 200 Ω -m, al noroeste de las fallas.

En el intervalo comprendido entre los sondeos 149 y 118, la Formación Guzmantla (de 14 a 200 Ω -m) se ve afectada por la cercanía de fluidos hidrotermales, como lo prueban

Sección 10-10'.—Esta sección (Figura 49) de 11 km de longitud se localiza al Norte de Los Domos las Derrumbadas y sigue casi totalmente el camino que va de San Luis Atexcac al poblado de Guadalupe Victoria; está construida por 11 sondeos y tiene una orientación aproximada NW-SE. Los diferentes métodos empleados detectan las siguientes características:

Como primer paquete geoelectrico, con espesor promedio de 100 m, lahares y conglomerados con resistividad que van desde 30 hasta 500 Ω -m, denotando los valores más bajos la presencia del acuífero Norte en esos materiales.

El segundo paquete geoelectrico se encuentra constituido por rocas de las formaciones Agua Nueva y Tamaulipas Superior, con resistividad que va desde 26 hasta 115 Ω -m. Los valores menores dentro de ese rango se encuentran en la parte central de la sección, entre los sondeos 218 y 222, y denotan la existencia de un acuífero con unos 300 m de espesor, que alimentaría al posible yacimiento geotérmico, el cual podría localizarse al Sur de esta zona. Esa parte central se encuentra limitada por dos fallas: la primera se localiza entre los sondeos 217 y 218, y es también detectada por las dos secciones anteriormente descritas: la segunda, entre los sondeos 222 y 223, sólo es detectada por las secciones de iso-resistividad aparente y electrostratigráfica de esta línea.

El intrusivo sienítico es mapeado por los sondeos 215, 216 y 217 a una profundidad promedio de 600 m, arrojando una resistividad mayor a 1 000 Ω -m, y una diferencia de potencial de 150 mV, aproximadamente.

El basamento resistivo de esta sección lo constituyen las rocas calcáreas de la Formación Tamaulipas Inferior, con resistividad de 140 a 850 Ω -m, a una profundidad máxima de 600 m.

Sección 8-8'.—Esta sección, trazada a lo largo de la base Sur de los domos, tiene una longitud de 17 km, está construida con 12 sondeos y tiene una orientación NW-SE, (Figura 50).

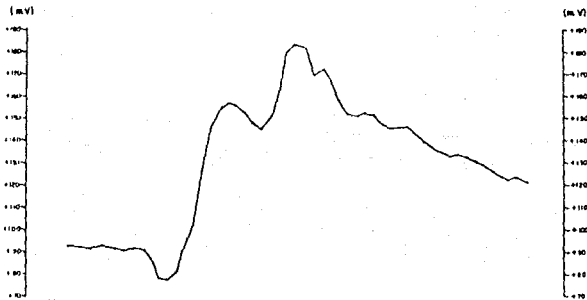
La cubierta geoelectrica en la sección electrostratigráfica esta constituida por lahares del Cuaternario y conglomerados del Terciario, con resistividad de 43 a 2 000 Ω -m y espesores máximos de 240 m, bajo el sondeo 23. Entre los sondeos 197 y 185, como segundo paquete se detectan 380 m de rocas calcáreas de la Formación Agua Nueva, con resistividad baja (18 a 24 Ω -m) debido a la influencia del acuífero Zacatepec. Este fenómeno es claramente visible en la sección de iso-resistividad aparente.

En los sondeos 185 y 148 se producen diferencias de potencial hasta de 70 mV, debido a un flujo hidrotermal ascendente a través de fallas, lo cual queda demostrado por las manifestaciones superficiales localizadas en la base del Domo. Estas fallas, que llegan hasta el basamento, también son registradas en la sección de iso-resistividad aparente. Entre los sondeos 159 y 149 aparece el cambio de facies de las formaciones Agua Nueva y Guzmanla, aflora esta última en la Sierra Ventana. El espesor de las calizas debe ser de aproximadamente 600 m con resistividad que oscila entre 48 y 200 Ω -m, al noroeste de las fallas.

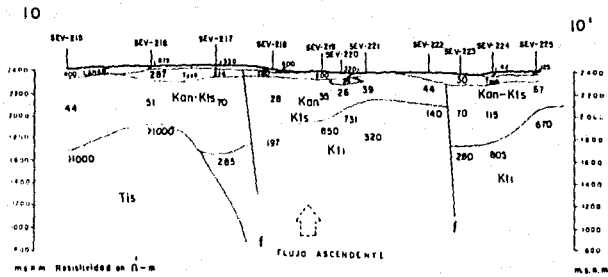
En el intervalo comprendido entre los sondeos 149 y 118, la Formación Guzmanla (de 14 a 200 Ω -m) se ve afectada por la cercanía de fluidos hidrotermales, como lo prueban

PERFIL DE POTENCIAL NATURAL

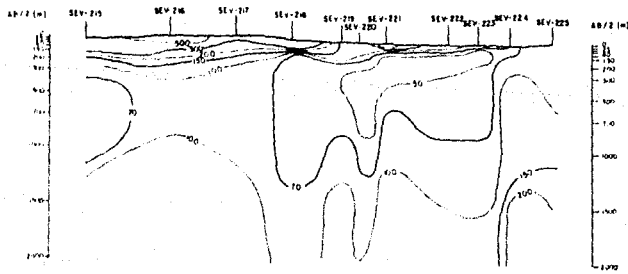
SECCION - 10-10'



NW. SECCION ELECTROESTRATIGRAFICA SE



SECCION DE ISO-RESISTIVIDAD APARENTE



ESC HORIZONTAL 1 : 50000
ESC VERTICAL 1 : 20000

TESIS PROFESIONAL
 FACULTAD DE INGENIERIA
 SECCION 10-10'
 FIGURA- 49
 PROYECTO GEOTERMICO LAS FUENTES-DERRUMBADAS

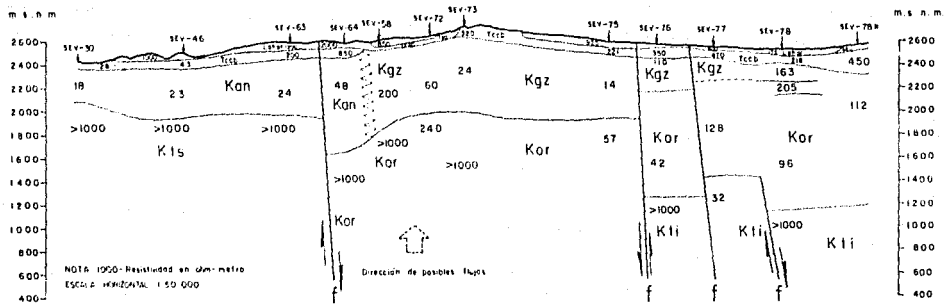
PERFIL DE POTENCIAL NATURAL



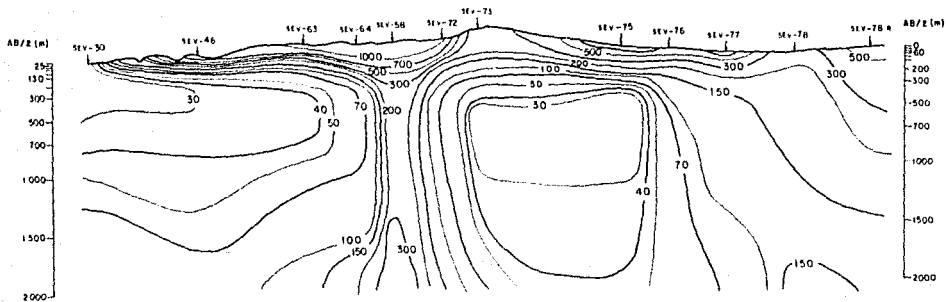
NW
8

SECCION ELECTROESTRATIGRAFICA

SE
8'



SECCION DE ISO-RESISTIVIDAD APARENTE



TESIS PROFESIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA

SECCION 8—8'
FIGURA—50

Forma: S. H. Pineda - Montoya
Corte: S. H. Pineda - Montoya
Diseño: J. A. Hernández - Barrios

Elaboró: S. Barrios - Durán
Revisó: J. A. Capriles - Alvarado

PROYECTO GEOTERMICO LOS HUMEROS-DERRUMBADAS DOMOS LAS DERRUMBADAS.

las manifestaciones en la base de los domos. Este paquete de rocas calcáreas muestra un espesor máximo de 650 m.

Entre los sondeos 118 y 23 se interpreta un sistema de fallas que producen una disminución en el espesor de la Formación Guzmantla a sólo unos 200 m y un acercamiento del basamento resistivo para alcanzar 1 400 m de profundidad.

Dentro del sistema de fallas señalado, se detecta un paquete del orden de 1 000 m de espesor, constituido por rocas calcáreas de la Formación Orizaba con resistividad que va de 32 a 46 Ω -m, las cuales sobreyacen al basamento resistivo de la Formación Tamaulipas inferior.

Sección 6-6'.—Esta sección (Figura 51) tiene una longitud de 17 km, se ha construido mediante 12 sondeos y es paralela a la sección 8-8'.

Del sondeo 184 al 138 se detecta una primera capa geoelectrica compuesta por lahares Cuaternarios y conglomerados del Terciario, con un espesor máximo de 300 m y con resistividad que va desde 8 500 Ω -m, en la base de la Sierra la Ventana (sondeo 138), hasta 19 Ω -m en el sondeo 184. Esta baja resistividad se debe a la presencia del acuífero Zacatepec que influye también en las calizas de la Formación Agua Nueva hasta una profundidad de 700 m. La influencia de este acuífero es evidente en la sección de iso-resistividad aparente para esta zona. Entre los sondeos 147 y 138 se infiere la existencia de una falla, tanto en la respuesta de potencial natural, con una anomalía positiva de 140 mV, como en las curvas de resistividad aparente; esta anomalía constituye una importante evidencia de la existencia de flujos ascendentes de este lugar. La zona de falla parece coincidir en esta sección, con los cambios de facies entre las formaciones Agua Nueva a la Guzmantla y de la Tamaulipas Superior a la Orizaba, estas últimas como basamento resistivo de la zona.

Entre los sondeos 138 y 127 se observa una cubierta de rocas calcáreas de la Formación Guzmantla con cierto grado de alteración (220-850 Ω -m) y un espesor de 200 a 850 m; subyaciendo a esa unidad se encuentra la Formación Guzmantla parcialmente saturada (41 a 85 Ω -m) con un espesor máximo de 950 m.

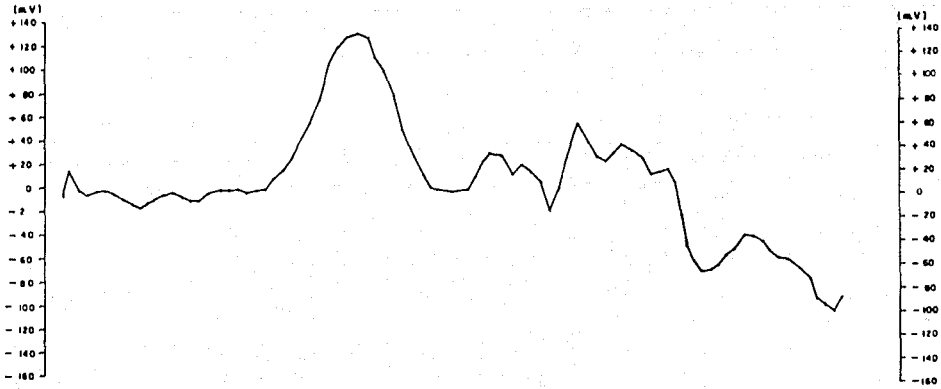
En el intervalo comprendido del sondeo 127 al 98 se infiere una gran falla que pone en contacto a las formaciones Guzmantla y Orizaba, según se ha interpretado de la anomalía de autopotencial (100 mV de amplitud), relacionada con un flujo ascendente, y de la forma que adoptan las curvas de iso-resistividad.

Entre los sondeos 98 y 21, el primer paquete geoelectrico tiene un espesor aproximado de 200 m y está compuesto por lahares, pómez y conglomerados con una resistividad que oscila entre 210 y 2 500 Ω -m.

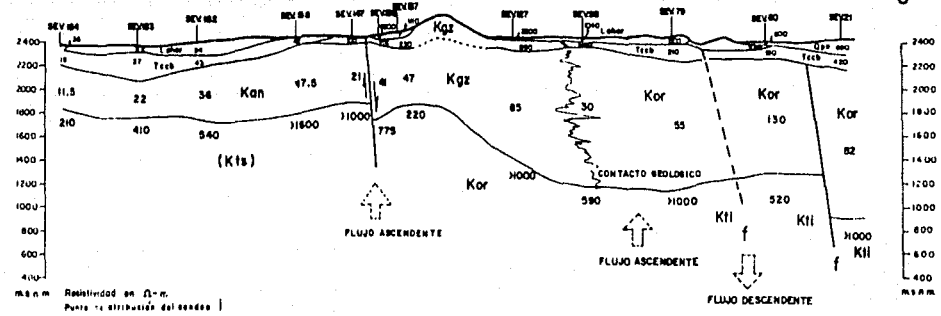
Entre los sondeos 79 y 60 en el segundo paquete de rocas, es posible inferir la existencia de otra falla; esto es notable en el potencial natural, donde se presenta una anomalía negativa del orden de 60 mV, la cual está relacionada con un flujo descendente en esta zona. La Formación Orizaba muestra aquí los valores de resistividad inferiores a 55 Ω -m.

Entre el sondeo 60 y 21 existe otra falla que afecta tanto a las rocas calcáreas de la Formación Orizaba, como al basamento resistivo. Este está constituido por las calizas de la

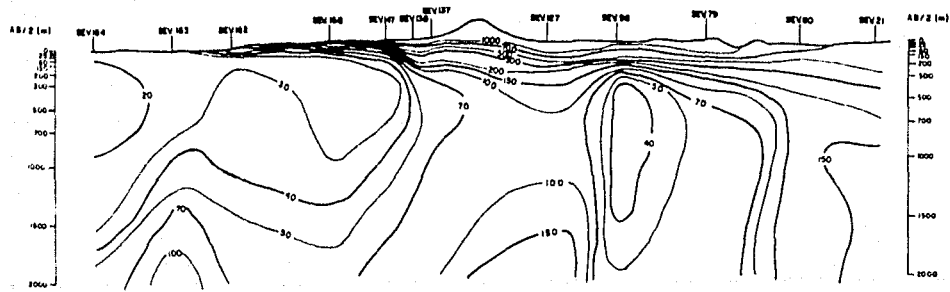
PERFIL DE POTENCIAL NATURAL



SECCION ELECTROESTRATIGRAFICA



SECCION DE ISO-RESISTIVIDAD APARENTE



ESCALA HORIZONTAL 1:50.000
 ESCALA VERTICAL 1:20.000

TESIS PROFESIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA
SECCION 6 — 6'
FIGURA — 51
PROYECTO GEOTERMICO LOS NUMEROS - DERRUMBADAS

Facultad de Ingenieria
 Carrera de Geofisica
 Departamento de Geofisica
 1981

Autor: S. García Borda
 Asesor: A. Capote Pizarro

DOMOS LAS DERRUMBADAS.

Formación Tamaulipas Superior registrada entre los sondeos 184 a 147 y por la Formación Orizaba interpretada entre los sondeos 138 y 127, y por la Formación Tamaulipas Inferior vista entre los sondeos 98 al 21.

Sección 4-4'.— La sección 4-4' (Figura 52) está localizada al Sur de Los Domos las Derrumbadas, tiene una longitud de 16 km y una orientación NW-SE. Se encuentra formada por 14 sondeos que detectan una cubierta geoelectrica con espesores que van de 60 a 300 m, profundizándose hacia el noroeste. Este primer paquete está constituido por lahares, pómez, conglomerados y materiales lacustres. (Q1).

Entre los sondeos 156 y 95 se nota la influencia del acuífero Zacatepec sobre los conglomerados terciarios y la Formación Agua Nueva, que constituyen la segunda capa en esta parte, hasta una profundidad de 700 m en promedio. El efecto del acuífero se marca también en la sección de resistividad aparente, donde los valores son menores a $30 \Omega \cdot m$.

Entre los sondeos 134 y 95 se puede inferir un cambio de facies de la Formación Agua Nueva a la Guzmantla, y de la Tamaulipas Superior a la Orizaba. Se detecta también una falla entre los sondeos 95 y 77, que produce una pequeña anomalía en la respuesta del potencial natural, del orden de 60 mV, explicable con un flujo ascendente en este sitio.

Entre los sondeos 67 y 56 se interpreta una gran falla cuyo bloque noroeste muestra un segundo paquete geoelectrico con la Formación Guzmantla y un tercer paquete con la Formación Orizaba. El bloque sureste, en cambio, presenta a la Formación Orizaba como segundo del sondeo 156 al 134, debiendo estar formado por la Formación Tamaulipas Superior. Entre los sondeos 115 y 67, el basamento de la Formación Orizaba muestra valores pequeños de resistividad ($29-46 \Omega \cdot m$) a 1200 m de profundidad; es probable que allí se encuentre un yacimiento geotérmico importante para los fines del presente estudio.

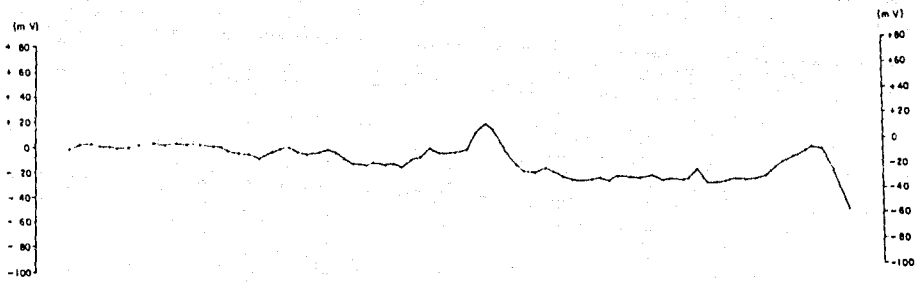
c) Plano de isoconductancia longitudinal (S) con la serie de sondeos eléctricos realizados en el área Los Domos las Derrumbadas, fue posible construir, dado el tipo de curva de resistividad aparente que se obtuvo, un plano de isoconductancia longitudinal (Figura 53), que delimita 4 comportamientos distintos.

Un plano de isoconductancia longitudinal generalmente proporciona información diferente a la de planos de iso-resistividad, ya que aquel involucra las características geoelectricas globales de un paquete de rocas, desde la superficie hasta el basamento resistivo. La interpretación cualitativa que se obtiene del análisis de la conductancia longitudinal es útil para diferenciar profundidad y tipo de basamento, cambios de facies, zonas permeables, etc.

Al Norte de los domos se configura en forma aproximada el intrusivo sienítico, limitado por la curva de conductancia $S = 10$ ohms, que encierra valores menores a ésta.

El intervalo comprendido entre 10 y 30 ohms, con un gradiente suave, refleja una predominancia calcárea en las formaciones, correspondiendo los valores más bajos donde las calizas se hacen más someras o afloran. Esas características pueden ser observadas al Sur y Este de los domos.

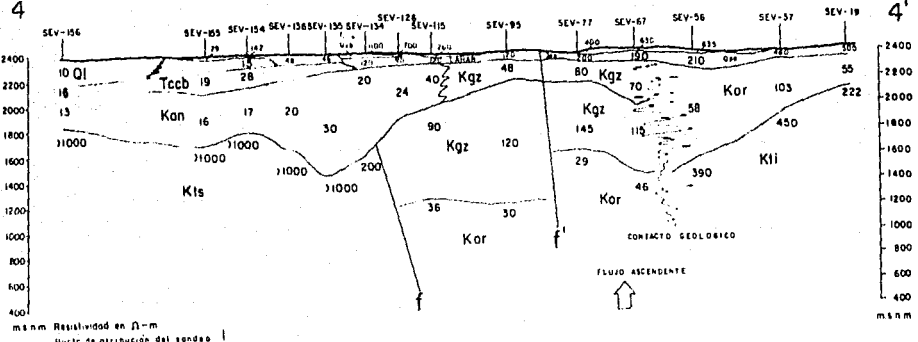
PERFIL DE POTENCIAL NATURAL



NW
4

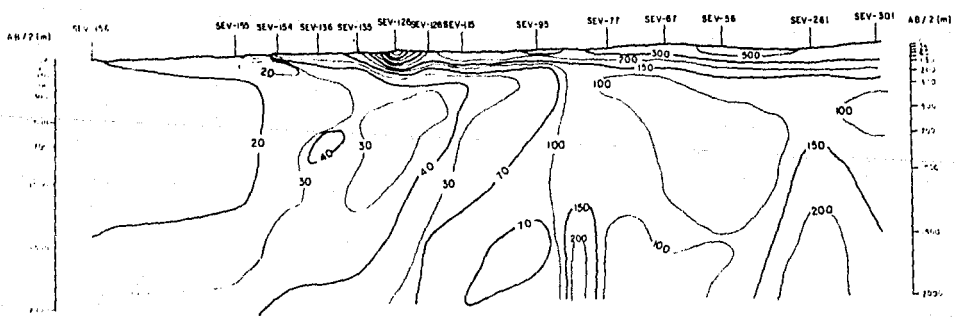
SECCION ELECTROESTRATIGRAFICA

SE
4'



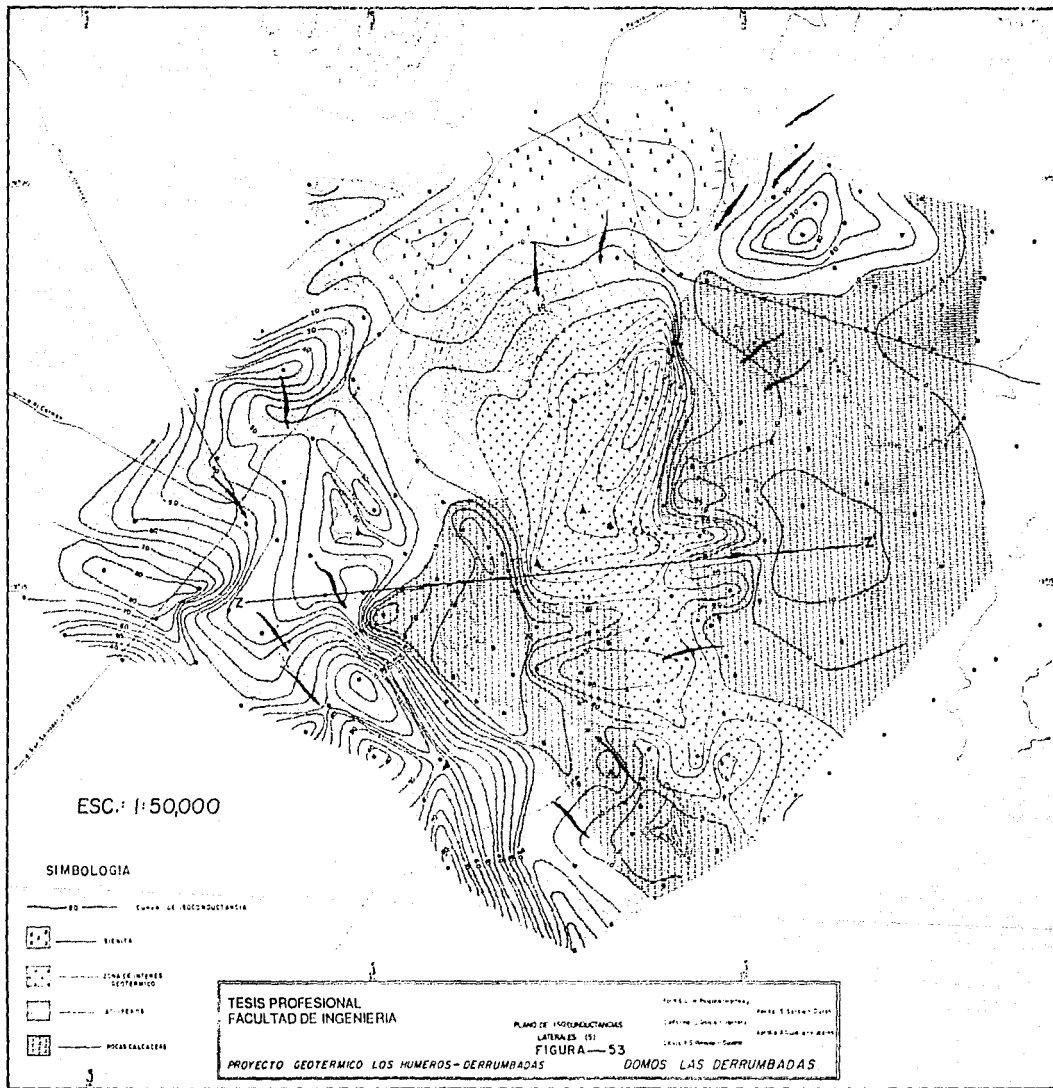
ms/m Resistividad en $\Omega \cdot m$
Punto de atribución del sondaje

SECCION DE ISO-RESISTIVIDAD APARENTE



ESCALA HORIZONTAL 1:50000
ESCALA VERTICAL 1:20 (ms)

TESIS PROFESIONAL FACULTAD DE INGENIERIA PROYECTO GEOTERMICO LOS HUMEROS - DERRUMBADAS	SECCION 4 — 4'	Forma: M. R. Sánchez Martínez Escala: 5. Sánchez Durán
	FIGURA — 52	Cálculo: Z. Sánchez Martínez Autores: R. Sánchez Durán
	DOMOS LAS DERRUMBADAS	Escala: 1:50000



La generalidad de los valores de 20 a 80 ohms con alto gradiente, que caen dentro de la zona localizada al Noreste, Norte, Oeste y Sur de Las Derrumbadas, corresponden a medios permeables ocupados por acuíferos.

Finalmente, la franja de superficie que incluye la zona Sureste de los domos, y a estos mismos, parece estar afectada de manera importante por la circulación de fluidos hidrotermales, mostrando un rango de 5 a 55 ohms en su conductancia longitudinal.

IV.4. — Conclusiones

Los resultados de la interpretación geológico-geofísica en el área Los Domos Las Derrumbadas, sugieren la existencia de un yacimiento geotérmico con las siguientes características:

i) Los planos de iso-resistividad aparente muestran la probable presencia de un acuífero de grandes dimensiones al Norte de los domos. Asimismo, para $AB/2=1\ 000$ y $1\ 500$ m, los valores de baja resistividad al centro del área parecen confirmar las manifestaciones hidrotermales de Las Derrumbadas, indicando una fuente de calor relativamente somera.

ii) En las secciones electroestratigráficas 9-9', 11-11', 13-13', 8-8', 6-6' y 4-4' se detectan horizontes geoelectríficos, que son evidencias de un posible yacimiento, en el flanco Norte del domo Sureste y al Sur del mismo. Por otra parte, al Suroeste de los domos, se encuentra una serie de acuíferos superficiales en los cuales no existen vestigios de origen termal. La capa sello de dicho reservorio estaría constituida por la cubierta de lahares y conglomerados cuyos espesores rebasan 500 m en algunas zonas.

iii) El plano de isoconductancia longitudinal delimita al intrusivo sienítico al Norte de los domos, coincidiendo con el estudio aeromagnético regional, que interpreta un gran cuerpo de forma tabular (anomalía C, Figura 4) en ese mismo sitio.

La importancia del intrusivo radica en que forma una barrera a la recarga proveniente de las sierras orientales, la obliga a fluir hacia los domos. El plano de conductancia ubica también las zonas más interesantes en los flancos Norte, Este y Oeste, donde aparecen levantamientos y fallamientos de calizas cretácicas, que forman los receptáculos del yacimiento geotérmico. Una sección idealizada de esa zona se muestra en la Figura 54.

iv) Las características favorables pueden prolongarse hacia el Sur de los domos, según lo demuestra la línea geoelectrífica regional 2, por lo cual, de obtenerse buenos resultados en la perforación exploratoria, se recomienda continuar los estudios a detalle en dicha área.

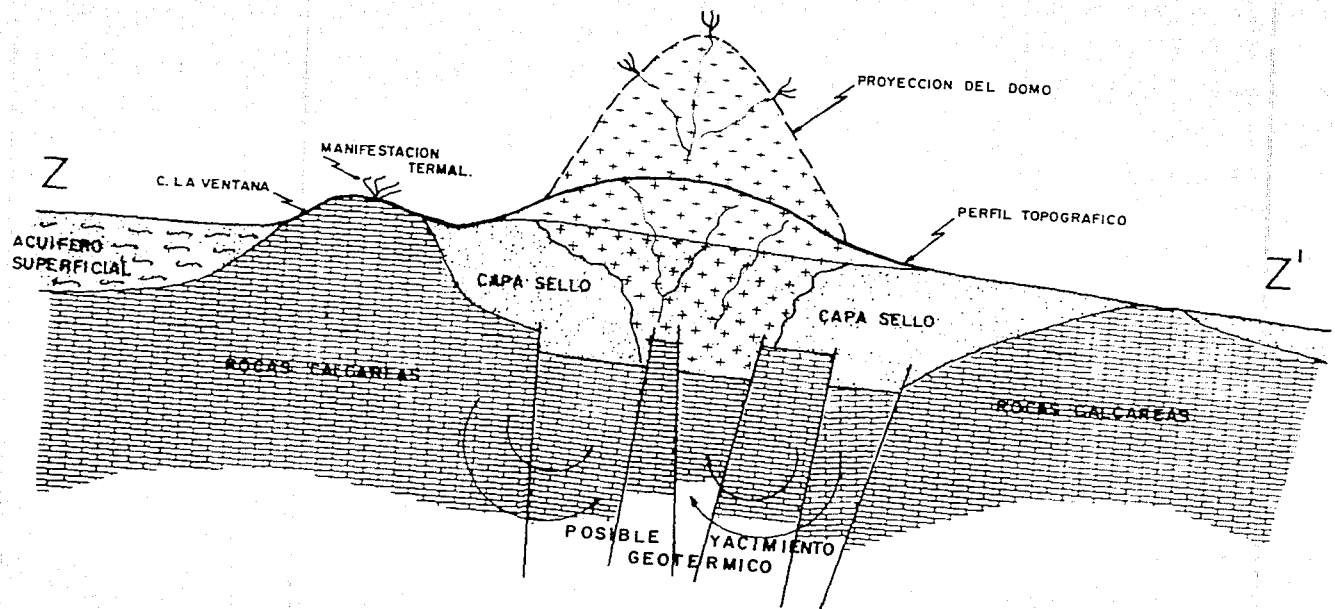


Figura 54.- Sección geológica idealizada Z-Z' de Los Dornos las Derrumbadas.

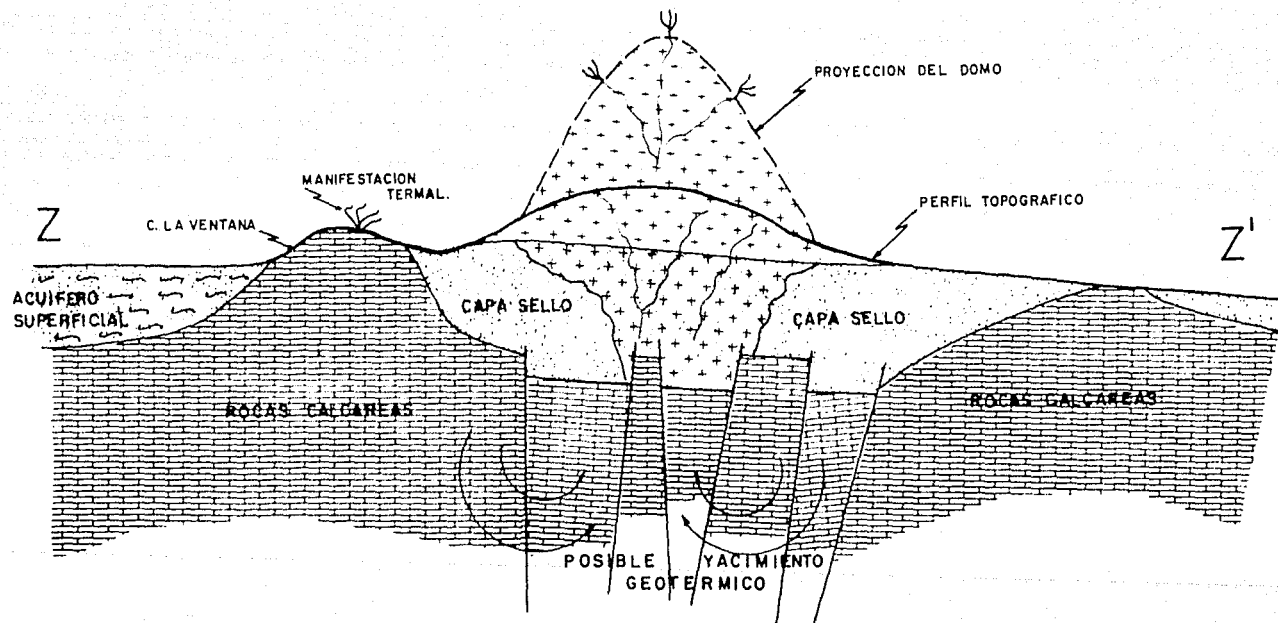


Figura 54.- Sección geológica idealizada Z-Z' de Los Domos las Derrumbadas.

REFERENCIAS CITADAS

- Alvarez-Béjar, Román, 1980, *Levantamiento Telúrico y de Autopotencial en la zona de Los Humeros-Derrumbadas*: México, D.F., Comisión Federal de Electricidad, informe inédito.
- 1981, *Outlining Tectonism and Faulting with teluries in Los Humeros-Derrumbadas geothermal area*: México, D. F., Univ. Nal. Autón. Méx., Inst. Geofísica, Geofísica Internacional, edición especial dedicada a Los Humeros-Las Derrumbadas.
- Arellano-Guadarrama, Francisco y Romero González, Carlos, 1980, *Prospección geofísica por medio de sondeos eléctricos verticales en la porción Norte del Valle de Mexicali y campo geotérmico de Cerro Prieto, B.C.N.*: México, D. F., Inst. Politéc Nal., Esc. Sup. Ing. Arquitectura, tesis profesional.
- Crowing, R. F., 1979, *The self potential method in geothermal exploration*: Engineering Geoscience, Univ. of California, Berkeley, Cal.
- De la Cruz, R., Clacy, G. R. T. y Reyes-Zamora, Alfonso, 1968, *Primera expedición al campo de Los Humeros, Pue.*: México, D. F., Comisión Federal de Electricidad, informe inédito.
- Dobrin, M. B., 1976, *Introduction to geophysical prospecting*: New York, Mc Graw-Hill, third edition.
- Flores-Luna, Carlos, Alvarez-Béjar, Román, Singh, K. S. y Urrutia-Fojsgauchi, Jaime, 1980, *Aeromagnetic survey of Los Humeros Caldera*: México, D. F., Univ. Nal. Autón. Méx., Inst. Geofísica, Geofísica Internacional.
- García-Durán, Salvador, 1968, *Informe sobre las mediciones de flujo térmico efectuados en Los Humeros, Pue.*: México, D. F., Comisión Federal de Electricidad, informe inédito.
- Lima-Lobato, Enrique, 1980, *Programa Gosh para calculadora de bolsillo*: Comunicación Personal.
- Organización Latinoamericana de Energía, 1976, *Metodología de la Exploración Geotérmica. Fase de pre-factibilidad*: Quito, Boletín Energético No. 5.
- Orellana S., Ernesto, 1972, *Prospección geofísica en corriente continua*: Ed. Paraninfo, Madrid.
- Palacios-Hartweg, L. H. y Vázquez-Contreras, Adolfo, 1980, *Estudio aeromagnético del área de Los Humeros-Derrumbadas*: México, D.F., Memorias de la III Reguición Nacional de Geotecnia y Geoterma.
- Palma-Pérez, Oswaldo y Reyes-Vermont, Pablo, 1979, *Estudio de la zona geotérmica de Araró, Mich.*: México, D. F., Univ. Nal. Autón. Méx., Fac. Ingeniería, tesis profesional, inédita.
- Ruiz-Reyes, J. A., 1980, *Interpretación de Anomalías Magnéticas por el método de prismas*: Comunicación Personal.
- Technical Training Course No. 2, 1980, *Geophysical Exploration Methods for Geothermal Resources*: San Diego, Cal.
- Yáñez-García, Camilo y Casique-Vázquez, Jorge, 1980, *Informe geológico del Proyecto Geotérmico Los Humeros-Derrumbadas*: México, D. F., Comisión Federal de Electricidad, informe inédito.