



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA

FACULTAD DE INGENIERIA

Dirección
60-I-200

4
R. C. P. M.

Señor GUERRERO GUADARRAMA JOSE LUIS.
P r e s e n t e .

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que aprobado por esta Dirección, propuso el Prof. M. C.- Juan Brandi Purata, para que lo desarrolle como tesis para su -- Examen Profesional de la carrera de INGENIERO GEOFISICO.

"PROSPECCIONES ELECTRICA Y MAGNETICA CORRELACIONADA CON LA INGENIERIA DE YACIMIENTOS GEOTERMICOS"

RESUMEN.

- I INTRODUCCION.
 - II ASPECTOS GEOLOGICOS.
 - III PROSPECCION ELECTRICA.
 - IV PROSPECCION MAGNETICA.
 - V CORRELACIONES Y CONCLUSIONES.
- BIBLIOGRAFIA.

Ruego a usted se sirva tomar debida nota de que en cumplimiento con lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar -- Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como -- requisito indispensable para sustentar Examen Profesional; así -- como de la disposición de la Coordinación de la Administración -- Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Atentamente.

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria, D.F., Julio 19 de 1984.

EL DIRECTOR

Dr. Octavio A. Rascón Chávez



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.

**PROSPECCIONES ELECTRICA Y MAGNETICA
CORRELACIONADAS CON LA INGENIERIA DE
YACIMIENTOS GEOTERMICOS**

I N D I C E

	PÁGINA
AGRADECIMIENTOS.	i
RESUMEN.	1
 <u>CAPITULO I</u>	
I INTRODUCCION	7
I.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS -- APROVECHABLES.	9
I.2 MÉTODOS DE EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA.	10
I.3 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO.	15
I.4 EJEMPLO ILUSTRATIVO.	17
 <u>CAPITULO II</u>	
II ASPECTOS GEOLOGICOS.	41
II.1 EJE NEOVOLCÁNICO	45
II.2 ZONA GEOTÉRMICA DE LOS AZUFRES	49
II.3 ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES.	60
II.3.1 OROGRAFÍA E HIDROGRAFÍA.	65
 <u>CAPITULO III</u>	
III PROSPECCION MEDIANTE EL SONDEO ELECTRICO VERTI CAL.	71
III.1 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS.	73

III.2	FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA RESISTIVIDAD -- DEL AGUA	82
III.3	RESISTIVIDAD DEL SISTEMA ROCA-FLUIDO EN MEDIOS POROSOS.	86
III.4	ANÁLISIS DE LA RESISTIVIDAD DEL SISTEMA ROCA- FLUIDO EN MEDIOS FRACTURADOS	91
III.5	LOS AZUFRES, MICH., ESTUDIOS REALIZADOS ----- (1976-1980).	99
III.6	PLANOS DE RECOPIACIÓN GEOELÉCTRICA.	106
	ANÁLISIS CUALITATIVO DE LA INFORMACIÓN GEOELÉC TRICA.	109
	AGRUPACIÓN DE ANOMALÍAS GEOELÉCTRICAS.	125
	ANÁLISIS CUANTITATIVO.	128

CAPITULO IV

IV	PROSPECCION MAGNETICA.	143
IV.1	IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICH. ESTUDIO REALIZA- DO	147
IV.2	PLANOS DE RECOPIACIÓN MAGNÉTICA	154
IV.2.1	INTERPRETACIÓN CUALITATIVA	154
IV.2.2	INTERPRETACIÓN CUANTITATIVA.	165

CAPITULO V

V	CORRELACIONES Y CONCLUSIONES	170
V.1	CORRELACIONES.	170
V.1.1	CORRELACIONES GEOELÉCTRICAS EN LOS AZUFRES, -- MICH.	179
V.1.2	CORRELACIONES DE LA MAGNETOMETRÍA.	183

V.2	DEL PREMODELADO A LA SIMULACIÓN DE YACIMIENTOS' SUGERENCIAS.	185
V.3	ESTIMACIÓN DE LA ENTRADA DE AGUA AL YACIMIENTO GEOTÉRMICO DE LOS AZUFRES, MICH.	190
V.3.1	ESTIMACIÓN DE LA COMPRESIBILIDAD TOTAL PARA -- LOS AZUFRES, MICH.	196
V.3.2	PROCEDIMIENTOS Y CÁLCULOS DE W_e	199
V.3.3	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	208
V.3.4	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CON OTROS MODE-- LOS.	216
V.4	CONCLUSIONES	218
	BIBLIOGRAFIA	222

LISTA DE FIGURAS

	PÁGINA
I-1	FOCOS TERMALES DE LA REPÚBLICA MEXICANA. 8
I-2	MODELO GEOLÓGICO 12
I-3	ISORRESISTIVIDADES APARENTES $AB/2 = 1\ 000\ m.$ 19
I-4	AGRUPACIÓN DE ANOMALÍAS GEOELÉCTRICAS MÁS IM- PORTANTES. 20
I-5	ZONA SUR DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS AZUFRES, MICH. LOCALIZACIÓN DEL PERFIL DE ISORRESISTI- VIDAD APARENTE II-II'. 21
I-6	MODELO SIMPLIFICADO DE UN YACIMIENTO GEOTÉR- MICO Y SUS PARÁMETROS GEOFÍSICOS 22
I-7	ANOMALÍA ISORRESISTIVA DE 20 OHMS-M. 23
I-8	ANOMALÍAS GEOELÉCTRICAS AGRUPADAS. 24
I-9	PLANO GEOHIDROLÓGICO REGIONAL. 27
I-10	COLUMNA LITOLÓGICA Y CROQUIS DE TERMINACIÓN DEL POZO A-18. 28
I-11	COLUMNA LITOLÓGICA Y CROQUIS DE TERMINACIÓN DEL POZO A-26. 28
I-12	COLUMNA LITOLÓGICA Y CROQUIS DE TERMINACIÓN DEL POZO A-31. 29
I-13	SISTEMA ESTRUCTURAL Y LOCALIZACIÓN DE LOS PO- ZOS EN LA ZONA SUR DEL CAMPO DE LOS AZUFRES, MICH. 30
I-14	CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LOS POZOS A-26, -- A-31, A-33 Y A-34. 32
I-15	GRÁFICAS DE GASTO Y PRESIÓN VS TIEMPO DE LOS POZOS A-18, A-26 Y A-31 (PRUEBA DE INTERFE-- RENCIA, AGOSTO, 1983). 33

I-16	CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LOS POZOS A-16, -- A-16 AC, A-17 Y A-18	35
I-17	CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LOS POZOS A-35 Y - A-38	36
II-1	MODELO GEODINÁMICO GENERAL	42
II-2	TECTONISMO EN MÉXICO	46
II-3	EJE NEVOLCÁNICO Y SU DIVISIÓN EN SECTORES .	47
II-4	LINEAMIENTOS GENERALES DE LA PORCIÓN OCCIDEN TAL DEL EJE NEVOLCÁNICO	48
II-5	LOCALIZACIÓN DE LAS AREAS DE ESTUDIO Y MANI- FESTACIONES TERMALES DE MICHOCÁN, MÉXICO. .	51
II-6	RECOPILACIÓN GEOLÓGICA DE LOS AZUFRES, MICH.	56
II-7	COLUMNA LITOLÓGICA Y CROQUIS DE TERMINACIÓN DEL POZO A-1	58
II-8	COLUMNA LITOLÓGICA Y CROQUIS DE TERMINACIÓN DEL POZO A-2	58
II-9	COLUMNA LITOLÓGICA Y CROQUIS DE TERMINACIÓN DEL POZO A-7	59
II-10	COLUMNA LITOLÓGICA Y CROQUIS DE TERMINACIÓN DEL POZO A-8	59
II-11	PLANO GEOLÓGICO DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, - MICH.	62
II-12	SECCIÓN GEOLÓGICA APOYADA EN LOS BARRENOS 4, 3 Y 7, IXTLÁN, MICH.	64
III-1	SECCIÓN Y PLANTA DE LAS LÍNEAS EQUIPOTENCIA- LES.	72

III-2	DISPOSITIVO DEL SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL -- SCHLUMBERGER PARA UNA LECTURA DE LA CURVA DE SONDEO	72
III-3	DISPERSIÓN DE LA CORRIENTE POR EL EFECTO DE LA PRESENCIA DE UNA CAPA DE MAYOR RESISTIVIDAD.	72
III-4	MONOGRAMA DEL FACTOR DE FORMACIÓN F, POROSIDAD \emptyset Y EL FACTOR DE CONSOLIDACIÓN M	87
III-5	MONOGRAMA (2) QUE RELACIONA LA RESISTIVIDAD, EL FACTOR DE FORMACIÓN, LA SALMUERA EQUIVALENTE Y LA TEMPERATURA, SE MUESTRA UN EJEMPLO DE CÁLCULO PARA LA ZONA GEOTÉRMICA DE -- LOS AZUFRES, MICH.	88
III-6	MODELOS DE FRACTURAMIENTO EN ROCAS CON FLUJOS NORMALES A SUS CARAS	92
III-7	PERFIL REGIONAL 1976	100
III-8	LOCALIZACIÓN DE SONDEOS Y PERFILES ELÉCTRICOS EN LOS AZUFRES, MICH	101
III-9	CONFIGURACIÓN ISORRESISTIVA $AB/2 = 1\ 000\ m$. (1976)	102
III-10	LOCALIZACIÓN TOPOGRÁFICA DE LOS POZOS Y AGRUPACIÓN DE ANOMALÍAS GEOELÉCTRICAS (1985) . .	103
III-11	AREA EL CARRIZO; INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL.	107
III-12	ISORRESISTIVIDADES APARENTES $AB/2 = 500\ m$.	110
III-13	ISORRESISTIVIDADES APARENTES $AB/2 = 1\ 000\ m$.	112
III-14	ISORRESISTIVIDADES APARENTES $AB/2 = 1\ 500\ m$.	113
III-15	ISORRESISTIVIDADES APARENTES $AB/2 = 2\ 000\ m$.	114
III-16	ISORRESISTIVIDADES APARENTES $AB/2 = 2\ 500\ m$.	116
III-17	ISORRESISTIVIDADES APARENTES $AB/2 = 3\ 000\ m$.	117

III-18	PERFILES DE RESISTIVIDAD APARENTE 1-1', 2-2', 3-3', 4-4', 5-5' Y 6-6'	119
III-19	PERFILES DE RESISTIVIDAD APARENTE 7-7', 8-8', 9-9' Y 10-10'	122
III-20	PERFILES DE RESISTIVIDAD APARENTE 11-11', --- 12-12', 13-13' Y 14-14'	124
III-21	AGRUPACIÓN DE ANOMALÍAS GEOELÉCTRICAS 10 --- OHMS-M Y MENOS	126
III-22	AGRUPACIÓN DE ANOMALÍAS GEOELÉCTRICAS 20 --- OHMS-M Y MENOS	127
III-23	CONDUCTANCIA LONGITUDINAL.	134
III-24	RESISTIVIDADES DEL CONDUCTIVO.	135
III-25	PROFUNDIDAD A LA CIMA DEL CONDUCTIVO	136
III-26	SECCIONES ELECTROESTRATIGRÁFICAS 1-1', 2-2', 3-3', 4-4', 5-5' Y 6-6'	137
III-27	SECCIONES ELECTROESTRATIGRÁFICAS 7-7', 8-8', 9-9' Y 10-10'	138
III-28	SECCIONES ELECTROESTRATIGRÁFICAS 11-11', --- 12-12', 13-13' Y 14-14'	139
IV-1	COMPONENTES DE LA INTENSIDAD Y DIRECCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO.	145
IV-2	VARIACIÓN DE LA COMPONENTE TOTAL DEL CAMPO - MAGNÉTICO TERRESTRE.	146
IV-3	CORTE LITOLÓGICO DEL BARRENO No. 3	148
IV-4	CORTE LITOLÓGICO DEL BARRENO No. 4	148
IV-5	CORTE LITOLÓGICO DEL BARRENO No. 5	149
IV-6	CORTE LITOLÓGICO DEL BARRENO No. 6	149
IV-7	CORTE LITOLÓGICO DEL BARRENO No. 7	149

IV-8	SECCIÓN GEOLÓGICA APOYADA EN LOS BARRENOS 4, 3 Y 7.	150
IV-9	SECCIÓN GEOLÓGICA APOYADA EN LOS BARRENOS 6 Y 3.	150
IV-10	EJEMPLO DEL MÉTODO DE LOOPS Y GRÁFICA DE VALORES.	152
IV-11	LOCALIZACIÓN DE LÍNEAS MAGNETOMÉTRICAS . . .	155
IV-12	INTERPRETACIÓN CUALITATIVA DE PERFILES MAGNETOMÉTRICOS 1, 2, 3 Y 4	157
IV-13	INTERPRETACIÓN CUALITATIVA DE PERFILES MAGNETOMÉTRICOS 5, 6, 7 Y 8	159
IV-14	INTERPRETACIÓN CUALITATIVA DE PERFILES MAGNETOMÉTRICOS 9, 10, 11 Y 14.	160
IV-15	INTERPRETACIÓN CUALITATIVA DE PERFILES MAGNETOMÉTRICOS 12 Y 13	162
IV-16	INTENSIDAD MAGNÉTICA VERTICAL.	163
IV-17	CONFIGURACIÓN DEL BASAMENTO MAGNÉTICO. . . .	166
V-1	DISTRIBUCIÓN NORMAL DE TEMPERATURAS PLANTA .	175
V-2	DISTRIBUCIÓN NORMAL DE TEMPERATURAS ISOMÉTRICO W	176
V-3	DISTRIBUCIÓN NORMAL DE TEMPERATURAS ISOMÉTRICO E	177
V-4	PLANO DE AGRUPACIÓN DE ANOMALÍAS GEOELÉCTRICAS DICIEMBRE, 1984.	180
V-5	REDES DE FLUJO ELÉCTRICO	181
V-6	PALEORELIEVE Y AGUA SUBTERRÁNEA.	184
V-7	MODELO DE LA ZONA SUR DEL YACIMIENTO GEOTÉRMICO DE LOS AZUFRES, MICH.	192

V-8	MODELO DE LA ZONA NORTE DEL YACIMIENTO GEO-- TÉRMICO DE LOS AZUFRES, MICH.	193
V-9	GRÁFICA DE PRESIÓN MEDIA VS TIEMPO PARA EL - YACIMIENTO DE LOS AZUFRES, MICH.	194
V-10	GRÁFICA SEMILOGARÍTMICA DE PRESIÓN MEDIA VS TIEMPO PARA EL YACIMIENTO DE LOS AZUFRES, -- MICH.	195

RESUMEN

El objetivo de la presente Tesis consiste en mostrar la importancia que tienen las prospecciones eléctrica y magnética durante las etapas de exploración y desarrollo de zonas geotérmicas. Parte de los resultados obtenidos de las campañas de exploración, muestran que los parámetros geoelectrónicos y magnéticos anómalos, están relacionados con los efectos producidos por los yacimientos geotérmicos, siendo posible identificarlos y definir sus fronteras. Finalmente se menciona y en algunos casos se ejemplifica, la forma en que deben intervenir estos parámetros en los procesos de premodelado, modelado y presimulación y simulación de yacimientos geotérmicos.

En el Capítulo I, se menciona el potencial geotérmico de la República Mexicana y se propone la secuencia de estudios para cubrir las etapas de exploración y desarrollo en zonas geotérmicas. Se enfatiza la necesidad de aplicar la geoestadística para aumentar la probabilidad de localizaciones exitosas y definir con mayor precisión la extensión y el potencial del yacimiento en estudio.

Los métodos de evaluación empleados son termodinámicos y volumétricos, por tal motivo constituyen una mezcla de técnicas petroleras y geotérmicas que están siendo desarrolladas como una tecnología propia para la evaluación de los recursos geotérmicos. Este capítulo se ilustra con un ejemplo aplicado a la zona geotérmica de Los Azufres, Mich.

En el Capítulo II, se resumen los aspectos geológicos generales del Eje Neovolcánico, se da la localización y la geología detallada de las zonas estudiadas, mostrando sus particularidades dentro de los contextos regionales del Eje Neovolcánico.

En el Capítulo III, se analizan los factores que determinan la resistividad de un sistema rocoso, poroso, fracturado y saturado 100% por un fluido salino. De este análisis se obtienen las ecuaciones y monogramas que facilitan el cálculo de las resistividades del subsuelo, para posteriormente relacionarlas con las obtenidas por el método Schlumberger y definir las zonas de mayor interés. Se ejemplifica con la zona geotérmica de Los Azufres, Mich. obteniendo valores para sus fronteras y los más representativos del yacimiento. Los estudios realizados en esta zona (1976-1980) son reinterpretados teniendo como objetivo la obtención de un modelo que facilite realizar cálculos de la recarga y del potencial geotermoeléctrico del yacimiento.

En el Capítulo IV, se presenta el estudio magnetométrico de la zona geotérmica de Ixtlán de Los Hervores, Mich., deduciéndose que son las estructuras geológicas las que conducen el fluido geotérmico a la superficie. Tomando en cuenta sus características geológicas y magnéticas se enfatiza la posibilidad de que esta zona esté ligada a las manifestaciones geotérmicas localizadas en el extremo sur-oriental del Graben de Chapala.

En el Capítulo V, se analizan algunas correlaciones publicadas, entre los métodos geoelectricos y las condiciones de yaci---

miento, deduciéndose que necesitan realizarse investigaciones para aplicarlas correctamente. Las correlaciones presentadas para Los Azufres, están basadas en el conocimiento de la zona y en el análisis de los sondeos eléctricos verticales; en el caso de la agrupación de anomalías, están definidas en el capítulo III y sólo se agrupan para enfatizar las zonas con mayores perspectivas de éxito en la perforación de pozos.

Considerando que los estudios de yacimientos geotérmicos se encuentran en una etapa de continua investigación, se hacen sugerencias para lograr una eficiente presimulación y simulación de yacimientos.

Se realizaron cálculos para estimar la recarga del yacimiento de Los Azufres, Mich., tomando como base los estudios geoeléctricos y la geología para la obtención del modelo. El tratamiento de las ecuaciones que rigen este fenómeno, se realizó considerando dos posibilidades, con parámetros optimistas y pesimistas. Los resultados muestran que la condición pesimista ha sido rebasada con la producción actual y la optimista dependerá del patrón de distribución de pozos de producción-inyección.

Al comparar los resultados de la estimación de un sistema -- con recarga y otro confinado, se observa una fuerte reducción en el potencial geotermoeléctrico.

CAPITULO I

CAPITULO I

- I. INTRODUCCION
- I.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS APROVECHABLES
- I.2 MÉTODOS DE EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA
- I.3 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO
- I.4 EJEMPLO ILUSTRATIVO

LISTA DE FIGURAS

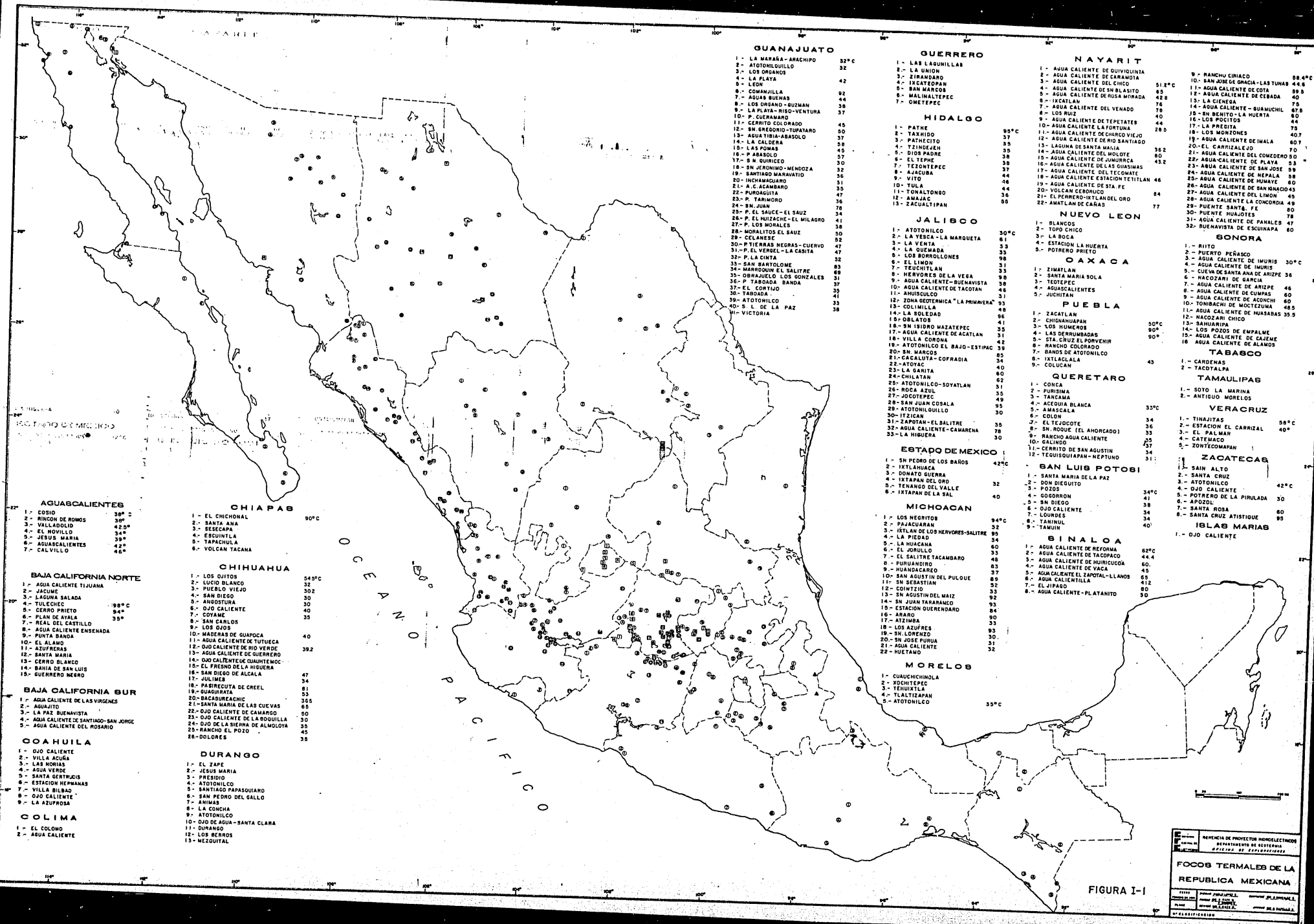
- I-1 FOCOS TERMALES DE LA REPÚBLICA MEXICANA
- I-2 MODELO GEOLÓGICO
- I-3 ISORRESISTIVIDADES APARENTES $AB/2 = 1\ 000\ M$
- I-4 AGRUPACIÓN DE ANOMALÍAS GEOELÉCTRICAS MÁS IMPORTANTES
- I-5 ZONA SUR DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS AZUFRES, MICH. LOCALIZACIÓN DEL PERFIL DE ISORRESISTIVIDAD APARENTE II-II'
- I-6 MODELO SIMPLIFICADO DE UN YACIMIENTO GEOTÉRMICO Y SUS PARÁMETROS GEOFÍSICOS
- I-7 ANOMALÍA ISORRESISTIVA DE 20 OHMS-M
- I-8 ANOMALÍAS GEOELÉCTRICAS AGRUPADAS
- I-9 PLANO GEOHIDROLÓGICO REGIONAL
- I-10 COLUMNA LITOLÓGICA Y CROQUIS DE TERMINACIÓN DEL POZO A-18
- I-11 COLUMNA LITOLÓGICA Y CROQUIS DE TERMINACIÓN DEL POZO A-26

- I-12 COLUMNA LITOLÓGICA Y CROQUIS DE TERMINACIÓN DEL POZO A-31
- I-13 SISTEMA ESTRUCTURAL Y LOCALIZACIÓN DE LOS POZOS EN LA ZONA SUR DEL CAMPO DE LOS AZUFRES, MICH.
- I-14 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LOS POZOS A-26, A-31, -- A-33 Y A-34
- I-15 GRÁFICAS DE GASTO Y PRESIÓN VS TIEMPO DE LOS POZOS A-18, A-26 Y A-31 (PRUEBA DE INTERFERENCIA, AGOSTO, 1983).
- I-16 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LOS POZOS A-16, A-16 AD, A-17 Y A-18
- I-17 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LOS POZOS A-35 Y A-38

I. INTRODUCCION

La Comisión Federal de Electricidad, a través de la Subgerencia de Estudios Geotérmicos, ha elaborado un catálogo de focos termales de la República Mexicana, que sirve como base para los programas de exploración cuyo objetivo es identificar las zonas con mayores probabilidades de generación geotermoeléctrica. Cabe señalar, que desde 1970 dicho catálogo se ha mantenido en constante revisión, ampliación y verificación, conforme avanzan las exploraciones geológicas, geoquímicas y geofísicas. Actualmente, el catálogo (Figura I-1) incluye 338 focos termales, localizados en 27 Estados de la República lo que es indicativo del potencial geotérmico del País, cuyo valor máximo se ha estimado en 18,200 Megawatts (Guiza, J. y Mercado, S., 1979).

Como introducción general del tema que trata la presente tesis, se desea contemplar; desde el concepto de un recurso geotérmico aprovechable, hasta los métodos de exploración y evaluación del potencial geotérmico. Las disciplinas que intervienen en este tipo de investigación son las geociencias y la Ingeniería de Yacimientos, que aun estando vinculados para lograr el mismo objetivo, difieren en su metodología y conceptos. Consecuentemente, muchas de las veces no existe un criterio unificador que pueda facilitar la interpretación de los resultados, lo que se refleja en un aprovechamiento deficiente del recurso geotérmico.



GUANAJUATO

- 1 - LA MARAÑA-ARACHIPO 32°C
- 2 - ATOTONILCO 32
- 3 - LOS ORNANOS 42
- 4 - LA PLAYA 42
- 5 - LEÓN 42
- 6 - COMANILLA 42
- 7 - AGUAS BUENAS 94
- 8 - LOS ORNANOS - BUZMAN 38
- 9 - LA PLAYA - RISO-VENTURA 37
- 10 - P. CUEBARRO 45
- 11 - CEMENTO COLOMADO 45
- 12 - SN. SREGORIO-TUPATARO 50
- 13 - AGUA TIHA-ABASOLO 50
- 14 - LA CALDERA 50
- 15 - LAS POMBAS 45
- 16 - P. ARASOLO 57
- 17 - S. N. BURICEO 45
- 18 - SN. JERONIMO-MENDOZA 32
- 19 - SANTIBAGO MARRATIRO 36
- 20 - INCHAMAGUARO 51
- 21 - A. C. ACAMBARO 47
- 22 - PUROAGUIA 35
- 23 - P. TARIUMORO 76
- 24 - SN. JUAN 76
- 25 - P. EL SAUCE-EL SAUZ 34
- 26 - P. EL NUISACHE-EL MILARRO 41
- 27 - P. LOS MORALES 38
- 28 - MORALITOS EL SAUZ 50
- 29 - CELANESE 52
- 30 - P. TIERRAS NEGRAS-CUERVO 47
- 31 - P. EL VERDELL-LA CASITA 47
- 32 - P. LA CINTA 32
- 33 - SAN BARTOLOME 83
- 34 - MARRONQUE EL SALITRE 69
- 35 - OBRAJUELO LOS GONZALES 37
- 36 - P. TABASCO BANDA 37
- 37 - EL CORTIJO 41
- 38 - TABOADA 41
- 39 - ATOTONILCO 31
- 40 - S. L. DE LA PAZ 38
- 41 - VICTORIA 38

GUERRERO

- 1 - LAS LAQUILLAS
- 2 - LA UNION
- 3 - ZIRANDARO
- 4 - CATAPAN
- 5 - SAN MARCOS
- 6 - MALIHATTEPEC
- 7 - OMETEPEC

HIDALGO

- 1 - PATHE 90°C
- 2 - TARIUMORO 39
- 3 - PATHECITO 39
- 4 - TINDZEGH 38
- 5 - DICE PADRE 35
- 6 - EL TERME 35
- 7 - TEOXTEPEC 44
- 8 - AJACUBA 36
- 9 - VITO 44
- 10 - TULA 44
- 11 - TONALTONDO 44
- 12 - AMAJAC 36
- 13 - ZACUALTIPAN 80

JALISCO

- 1 - ATOTONILCO 30°C
- 2 - LA YESCA - LA MARQUETA 61
- 3 - LA VENTA 33
- 4 - LA QUEMBADA 33
- 5 - LOS BORRLLONES 33
- 6 - EL LIMON 31
- 7 - TECHITLAN 31
- 8 - HERVORES DE LA VEGA 30
- 9 - AGUA CALIENTE-BUENAVISTA 30
- 10 - AGUA CALIENTE DE TACOTAN 46
- 11 - ANHUSCULO 31
- 12 - ZONA DE TERCERICA "LA MINERA" 31
- 13 - COLIMILLA 49
- 14 - LA SOLEDAD 36
- 15 - OBLATOS 41
- 16 - SN. SIDRO HAZATEPEC 35
- 17 - AGUA CALIENTE DE ACATLAN 42
- 18 - VILLA CORONA 42
- 19 - ATOTONILCO DEL BAJO-ESTIPAC 38
- 20 - SN. MARCOS 46
- 21 - CACALUTA-COPRADA 80
- 22 - ATOTAC 40
- 23 - LA SANITA 40
- 24 - CHILATAN 62
- 25 - ATOTONILCO-SOYATLAN 51
- 26 - ROCA AZUL 35
- 27 - JOGOTEPEC 49
- 28 - SAN JUAN COSALA 30
- 29 - ATOTONILCO 30
- 30 - ITZIGAN 30
- 31 - ZAPOTAN-EL SALITRE 35
- 32 - AGUA CALIENTE-CAMARENA 78
- 33 - LA HIGUERA 30

ESTADO DE MEXICO

- 1 - SN PEDRO DE LOS BAÑOS 42°C
- 2 - IXTLHUACA 32
- 3 - DONATO GUERRA 40
- 4 - IXTAPAN DEL ORO 32
- 5 - TERNANCO DEL VALLE 40
- 6 - IXTAPAN DE LA SAL 40

MICHOACAN

- 1 - LOS NEGROITOS 94°C
- 2 - PAJACUARAN 32
- 3 - IXTLAN DE LOS HERVORES-SALITRE 95
- 4 - LA PIEDRA 34
- 5 - LA HUACANA 60
- 6 - EL JORULLO 48
- 7 - EL SALITRE TACAMBARO 48
- 8 - PUQUANDIRO 83
- 9 - HUANCACARCO 83
- 10 - SN AGUSTIN DEL PULOJE 37
- 11 - SN SEBASTIAN 89
- 12 - COINTITO 52
- 13 - SN AGUSTIN DEL MAIZ 92
- 14 - SN JUAN PARARARCO 84
- 15 - ESTACION QUEVEDARRO 95
- 16 - ARARO 84
- 17 - ATIMBA 33
- 18 - LOS AZUFRES 93
- 19 - SN LONERNO 30
- 20 - SN JOSE PURIA 30
- 21 - AGUA CALIENTE 31
- 22 - HUETANO 32

MORELOS

- 1 - CUACHUCHECHINOLA
- 2 - XOCOTPEC
- 3 - TEHUXTLA
- 4 - ZACUALTIPAN
- 5 - ATOTONILCO

NAYARIT

- 1 - AGUA CALIENTE DE QUIVIGUITA
- 2 - AGUA CALIENTE DE CARAMOIA
- 3 - AGUA CALIENTE DEL CHICO 51.8°C
- 4 - AGUA CALIENTE DE SN BLASIO 63
- 5 - AGUA CALIENTE DE ROSA MORADA 42.8
- 6 - IXCATLAN 70
- 7 - AGUA CALIENTE DEL VENADO 70
- 8 - LOS RUIZ 70
- 9 - AGUA CALIENTE DE TEPETATES 70
- 10 - AGUA CALIENTE LA FORTUNA 70
- 11 - AGUA CALIENTE DEL MOLOTE 28.0
- 12 - AGUA CALIENTE DE RIO SANTIAGO 80
- 13 - AGUA CALIENTE DE SANTA MARIA 36.2
- 14 - AGUA CALIENTE DE JUMURICA 43.2
- 15 - AGUA CALIENTE DE LAS GUERRAS 80
- 16 - AGUA CALIENTE DEL TECOMATE 37
- 17 - AGUA CALIENTE DE ESTACION TETITLAN 46
- 18 - AGUA CALIENTE DE STA. FE 84
- 19 - AGUA CALIENTE DE STA. FE 84
- 20 - VOLCAN CERROCUO 84
- 21 - EL FERRERO-DIVISAN DEL ORO 77
- 22 - AMATLAN DE CAÑAS 77

NUEVO LEON

- 1 - BLANCOS
- 2 - TOTO CHICO
- 3 - LA BOCA
- 4 - ESTACION LA HUERTA
- 5 - POTRERO PAXICO

OAXACA

- 1 - ZIMATLAN
- 2 - SANTA MARIA SOLA
- 3 - TEOPEPEC
- 4 - AGUASCALIENTES
- 5 - JUCHITAN

PUEBLA

- 1 - ZACATLAN
- 2 - CHUQUAHUAN
- 3 - LOS HUMEROS 50°C
- 4 - LOS OZOS DE EMPALME 90°C
- 5 - STA. CRUZ EL PORVENCOR 90°C
- 6 - RANCHO COLORADO
- 7 - BANCOS DE ATOTONILCO
- 8 - IXTLACLALA 43
- 9 - COLUCAN

QUERETARO

- 1 - CONCA 34
- 2 - PURISIMA 36
- 3 - TANCAMA 34
- 4 - AGUADA BLANCA 41
- 5 - AMASCALA 35
- 6 - COLON 41
- 7 - EL TEJOCOTE 34
- 8 - SN ROQUE (EL AHORCADO) 33
- 9 - RANCHO AGUA CALIENTE 25
- 10 - GALINDO 45.7
- 11 - CERRITO DE SAN AGUSTIN 34
- 12 - TESOQUIAHUAPAN-HEPTUNO 31

SAN LUIS POTOSI

- 1 - SANTA MARIA DE LA PAZ 34°C
- 2 - DON DIEGUITO 41
- 3 - POZOS 41
- 4 - GODRON 38
- 5 - SN DIEGO 38
- 6 - OJO CALIENTE 34
- 7 - LOURDES 34
- 8 - TAMIHUL 40
- 9 - TAMIHUL 40

SINALOA

- 1 - AGUA CALIENTE DE REFORMA 62°C
- 2 - AGUA CALIENTE DE TACOPACO 44.4
- 3 - AGUA CALIENTE DE HURICUCO 60
- 4 - AGUA CALIENTE DE YACA 45
- 5 - AGUA CALIENTE DE LA BOQUILLA 69
- 6 - AGUA CALIENTE DE LA BOQUILLA 61.2
- 7 - EL PIPADO 40
- 8 - AGUA CALIENTE-PLATANITO 30

SONORA

- 1 - RITO 58.4°C
- 2 - PUERTO PEÑASCO 44.8
- 3 - AGUA CALIENTE DE IMURIS 30°C
- 4 - AGUA CALIENTE DE IMURIS 30°C
- 5 - CUEVA DE SANTA ANA DE ANIZPE 36
- 6 - AGUA CALIENTE DE GARCIA 46
- 7 - AGUA CALIENTE DE ANIZPE 36
- 8 - AGUA CALIENTE DE CUMPARS 60
- 9 - AGUA CALIENTE DE ACONCHI 45
- 10 - TONBACHI DE MOCTEZUMA 48.5
- 11 - AGUA CALIENTE DE HUASABAS 35.5
- 12 - NACOZARI CHICO 36
- 13 - SANHUIRPA 36
- 14 - LOS OZOS DE EMPALME 90°C
- 15 - AGUA CALIENTE DE CAJEME 90°C
- 16 - AGUA CALIENTE DE ALAMOS

TABASCO

- 1 - CARDENAS
- 2 - TACOTALPA

TAMAULIPAS

- 1 - SOTO LA MARINA
- 2 - ANTIGUO MORELOS

VERACRUZ

- 1 - TINAJITAS 58°C
- 2 - ESTACION DEL CARRIZAL 40°C
- 3 - EL PALMAR 40°C
- 4 - CATEMACO 40°C
- 5 - ZONTECOMAPAN 40°C

ZACATECAS

- 1 - SAN JALTO 42°C
- 2 - SANTA CRUZ 42°C
- 3 - ATOTONILCO 42°C
- 4 - OJO CALIENTE 42°C
- 5 - POTRERO DE LA PURILADA 30
- 6 - APOZOL 38
- 7 - SANTA ROSA 80
- 8 - SANTA CRUZ ATISTIQUE 85

ISLAS MARIAS

- 1 - OJO CALIENTE

AGENCIA DE PROYECTOS HIDROELECTRICOS
 DEPARTAMENTO DE REESTERIO
 SERVICIO DE ESTADISTICA

FOCOS TERMALDES DE LA REPUBLICA MEXICANA

ESTADO: GUANAJUATO, GUERRERO, HIDALGO, JALISCO, MICHOACAN, MORELOS, NAYARIT, NUEVO LEON, OAXACA, PUEBLA, QUERETARO, SAN LUIS POTOSI, SINALOA, SONORA, TABASCO, TAMAULIPAS, VERACRUZ, ZACATECAS

FIGURA I-1

Uno de los objetivos del presente capítulo es demostrar la necesidad de utilizar criterios comunes, tanto a las geociencias como a la Ingeniería de Yacimientos; desde las etapas de exploración, desarrollo y modelado del yacimiento, hasta la optimización del aprovechamiento geotérmico. Al final del capítulo se presenta un ejemplo que ratifica lo expuesto.

El aspecto económico del proyecto geotérmico no es discutido, pero cabe mencionar que su costo varía de acuerdo a los estudios que se quieran emplear, desde los inicios de la exploración hasta alcanzar la máxima producción.

I.1 RECURSO GEOTÉRMICO APROVECHABLE

Se define como recurso geotérmico aprovechable al calor natural de la tierra, transportado y almacenado en rocas y agua que puede ser utilizado para la generación eléctrica mediante la perforación de pozos profundos, aunque el término puede hacerse extensivo a otro tipo de aprovechamiento.

Una clasificación de los recursos geotérmicos que incluye las características de las etapas preliminares de la exploración, perforación y evaluación, es la siguiente:

Los de primer orden.- Se definen así porque sus características demuestran la presencia de un recurso geotérmico con suficiente energía para garantizar la instalación de una planta geotermoeléctrica convencional, cuyo rango de producción dependerá de las propiedades físicas y termodinámicas del yacimiento geotérmico.

Los de segundo orden.- Se definen así cuando sólo es posible aprovechar las condiciones físicas y termodinámicas del sistema roca-fluido mediante procesos e instalaciones más sofisticadas que las convencionales, repercutiendo en mayores costos de las instalaciones geotermoeléctricas. Como ejemplos se tiene: Los yacimientos de roca seca caliente, que requieren de arreglos de pozos productores-inyectores con un proceso adicional de fracturamiento; los yacimientos con fluido de baja entalpía o presión, que para aprovecharse requieren de plantas de ciclo binario o de baja presión y, los yacimientos con alto contenido de gases, en los que de forma adicional se necesita una planta de tratamiento de gases.

Los de tercer orden.- Son aquellos en los que por sus condiciones físicas y termodinámicas, el recurso geotérmico sólo puede aprovecharse para instalar pequeñas plantas geotermoeléctricas (5 Mw o menos), mediante procedimientos convencionales de producción.

Los de cuarto orden.- Son los recursos geotérmicos que no pueden ser aprovechados (actualmente) para la generación eléctrica, pero tienen cualidades termodinámicas adecuadas para ser utilizados con provecho para la industria o el turismo.

1.2 MÉTODOS DE EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

Analizando los resultados de diversos estudios de zonas geotérmicas en México y los modelos tectónicos regionales, se observa que los focos termales están vinculados a las activida-

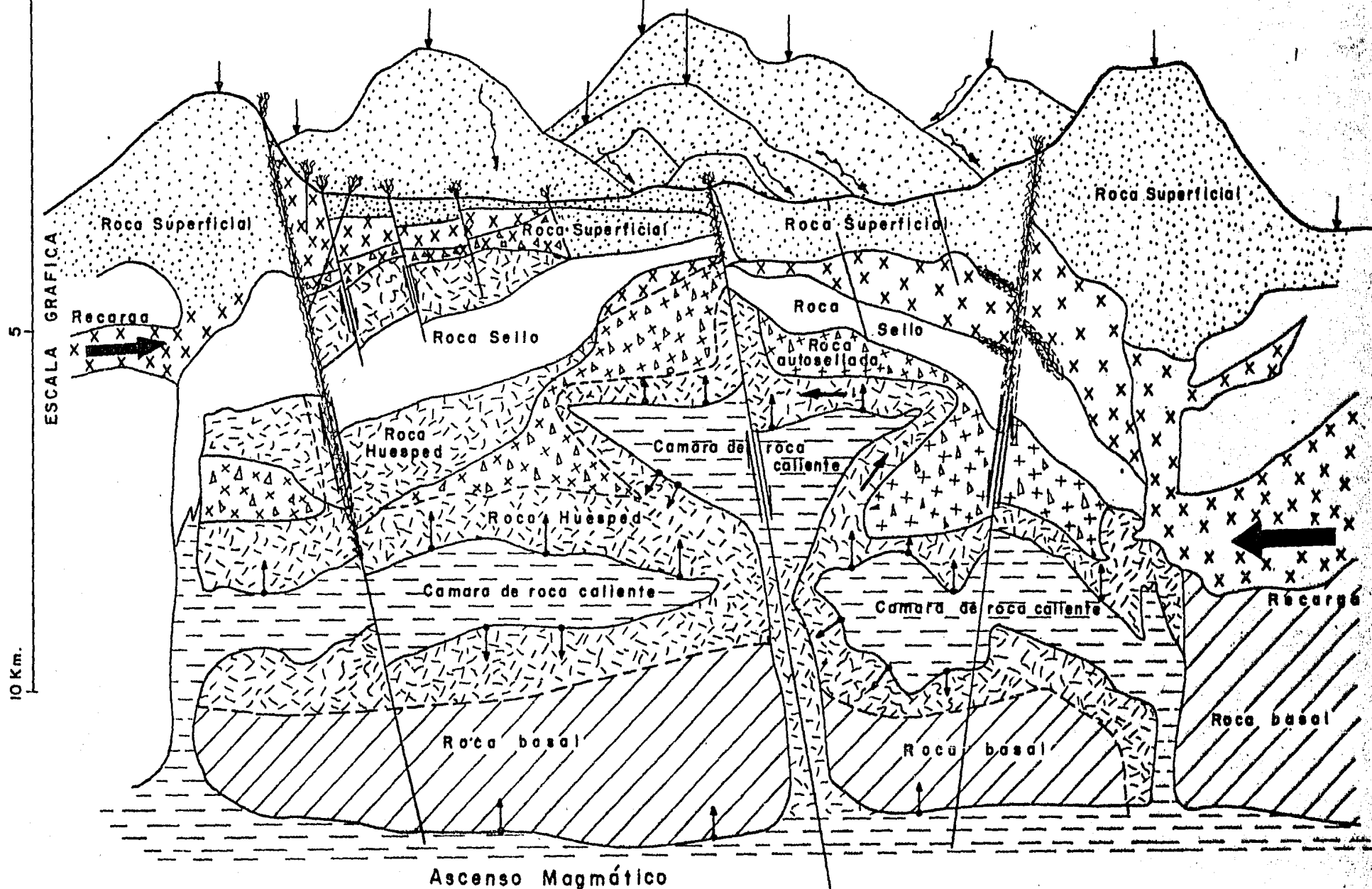
des tectónicas y geodinámicas así como a las reactivaciones volcánicas, vulcanismo pliocuaternario y estructuras corticales -- que permiten el ascenso, entrampamiento del magma y la comunicación de los acuíferos superficiales con la fuente de calor. -- Son varias las condiciones que debe reunir una zona para ser -- considerada como yacimiento comercial y son: fuente calorífica somera o comunicada con los acuíferos superficiales, roca huésped que permita la acumulación y la circulación del fluido; roca sello que impida la disipación de la energía y finalmente, - una fuente continua de recarga para conservar estables los parámetros de producción (Figura I-2).

Bajo las anteriores premisas se enfocan las exploraciones geológicas, geoquímicas, termométricas y geofísicas; iniciándolas con reconocimientos regionales tendientes a definir las zonas con mayores perspectivas de explotación. Los objetivos de los métodos de exploración son amplios y diversos. Considerando sus alcances y limitaciones se propone la siguiente secuencia de actividades y estudios.

1. Realizar una recopilación e investigación de los antecedentes o estudios previos.
2. Fotogrametría y Fotogeología regional.
3. Verificación geológica de campo y muestreo de las temperaturas superficiales.
4. Geoquímica de las manifestaciones termales y manantiales.
5. Geología de detalle de la zona más importante.

0 5 10 Km.
ESCALA GRAFICA

Precipitación pluvial



Ascenso Magmático

FIGURA 1-2 MODELO GEOLOGICO

SÍMBOLOS CONVENCIONALES



Roca volcánica superficial o material de relleno



Roca fracturada



Roca sello



Roca huésped fracturada



Cámara de roca caliente
hipabisal o apofisis de cuerpo magmático



Roca autosellada



Roca basal



Camara magmática



Falla cortical



Falla -



Fractura



Manifestación termal



Precipitación pluvial y escurrimientos



Transferencia de calor

6. Dataciones.
7. Control topográfico de 2° orden.
8. Geoelectricidad mediante el Sondeo Eléctrico Vertical.
9. Gravimetría.
10. Magnetometría terrestre y aérea.
11. Recopilación y agrupación de los parámetros más importantes de cada estudio.
12. Localización de pozos de diámetro pequeño para estudios de gradiente y flujo térmico.
13. Localización de pozos exploratorios que confirmen los estudios y la presencia del yacimiento.
14. Geoquímica de rocas.
15. Análisis y correlaciones de las muestras de los recortes de la perforación.
16. Análisis y correlaciones de los núcleos cortados.
17. Paleomagnetismo.
18. Estudios ambientales.
19. Registros de presión y temperatura durante la perforación.
20. Registros geofísicos.
21. Pruebas de presión.
22. Pruebas de producción.
23. Geofísica de detalle y estudios especiales.
24. Microsismicidad.
25. Geohidrología regional y local.
26. Reinterpretación de los datos de geología y geofísica.
27. Localización de pozos para definir la extensión y el potencial del yacimiento en estudio.

En la secuencia anterior no se mencionan los estudios sísmicos de refracción y reflexión debido a su alto costo y a lo restringido de su aplicación, lo que los hace aplicables sólo en zonas de relieve topográfico suave. La secuencia mostrada es sólo indicativa, ya que pueden realizarse actividades en paralelo o prescindir de algunas de ellas.

1.3 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO

Los métodos de evaluación de un yacimiento geotérmico, proporcionan mejores resultados cuando la distribución y localización de los pozos se realizan mediante un estudio geoestadístico de los parámetros involucrados en la decisión de perforar pozos de exploración y desarrollo.

Los puntos del 19 al 22 son básicos para determinar el potencial del yacimiento, por lo que si por algún motivo los pozos de exploración son fallidos o malos productores, no deben descartarse las posibilidades de éxito, debiendo proseguir con las reinterpretaciones y localización de nuevos pozos que de forma definitiva justifiquen el abandono o el desarrollo del campo. La etapa de evaluación será cubierta con las siguientes actividades:

28. Control del impacto ambiental.
29. Pruebas de Presión.
30. Pruebas de Producción.
31. Estudios Petrofísicos.

32. Registros Geofísicos.
33. Establecer un modelo geohidrológico local.
34. Pruebas de inyección de trazadores para confirmar el modelo geohidrológico.
35. Obtención de un modelo que agrupe los parámetros de -- los estudios geológicos, geoquímicos, geohidrológicos y los obtenidos de las pruebas de presión y producción.
36. Análisis volumétrico del yacimiento y de la recarga.
37. Modelado del Yacimiento.
38. Presimulación del Yacimiento.
39. Simulación del Yacimiento.

Paralelamente a estas actividades, se debe crear un modelo matemático que incluya las condiciones termodinámicas y físicas del yacimiento con objeto de realizar un estudio preliminar de presimulación y cuantificar el comportamiento del yacimiento bajo diferentes condiciones de explotación. Es importante mencionar que en esta etapa no existe historia de producción por lo que se le denomina "presimulación", considerando que el término de "simulación" sólo debe aplicarse cuando las salidas del procesado del modelo se ajustan a una historia de producción, -- para predecir el comportamiento del yacimiento bajo esquemas -- combinados de producción-inyección. Autores como Peaceman y Farug Ali recomiendan tiempos máximos de predicción de $3 N$ donde N es el tiempo de registro de los parámetros de producción. En el caso de yacimientos geotérmicos, dichos parámetros serían -- presión, temperatura, gasto y entalpía.

I.4 EJEMPLO

En la zona geotérmica de Los Azufres, Mich., se realizó un estudio que resume gran parte de lo expuesto en este capítulo.- Este se inició con un análisis que agrupa los estudios geológicos y geofísicos y algunas pruebas de presión y desarrollos de pozos.

OBTENCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DEL YACIMIENTO

Los estudios geoelectrónicos iniciales mostraron la distribución de resistividades en el subsuelo, permitiendo identificar la presencia y los efectos del fluido hidrotermal. La reprogramación de nuevos estudios se realizó con respecto a las necesidades de ampliación y con el fin de confirmar la existencia de las anomalías detectadas inicialmente.

Del estudio realizado en marzo de 1980 y campañas anteriores, se muestra la configuración isorresistiva (Guerrero, 1980) con una separación semielectrónica del arreglo Schlumberger de $AB/2 = 1\ 000\ m$ y la agrupación de anomalías observadas con diferentes separaciones de $AB/2$ (Figuras I-3 y I-4); de este estudio se concluye que la configuración de $20\ Ohm\cdot m$ para $AB/2 = 1\ 000\ m$, coincide con el área donde los efectos hidrotermales se manifiestan más intensamente, en tanto que de la agrupación de anomalías se deduce la existencia de una discontinuidad geoelectrónica separando las anomalías, lo que se interpreta debido a diferencias en las condiciones hidrotermales de cada sector (Nor-

te y Sur). Al analizar los planos (Figuras I-3 y I-4) y el perfil II-II' (Figura I-5) del estudio, se observan variaciones y alineamientos isorresistivos similares a la dirección de las estructuras geológicas y a la amplitud de los eventos volcánicos, además de algunos tramos de las fallas que tienen valores bajos de resistividad ($< 20 \text{ Ohm-m}$), éstas se pueden interpretar como conductores y posiblemente como receptores de fluidos geotérmicos.

De lo anterior se podría pensar en un modelo con estructuras conductoras, rocas receptoras y una capa sello que evite la disipación de la energía, con una distribución de parámetros físicos como los mostrados en la figura I-6.

La forma y extensión geométrica del modelo están dados por las figuras I-7 y I-8, que corresponden a la configuración de 20 Ohms-m para $1\ 000$ de $AB/2$ y la agrupación de anomalías desde 500 hasta $3\ 000 \text{ m}$ de $AB/2$. Formalmente, esta primera opción es muy simple, pero sirve para calcular el potencial geotérmico de la zona.

Otras fuentes de información muy valiosa para las restricciones y consideraciones del modelo son: Las geológicas, geohidrológicas y geoquímicas.

Geológicamente, la secuencia de eventos volcánicos sugiere enfriamientos y calentamientos asociados con los ascensos y descensos de una supuesta cámara magmática; estos efectos térmicos

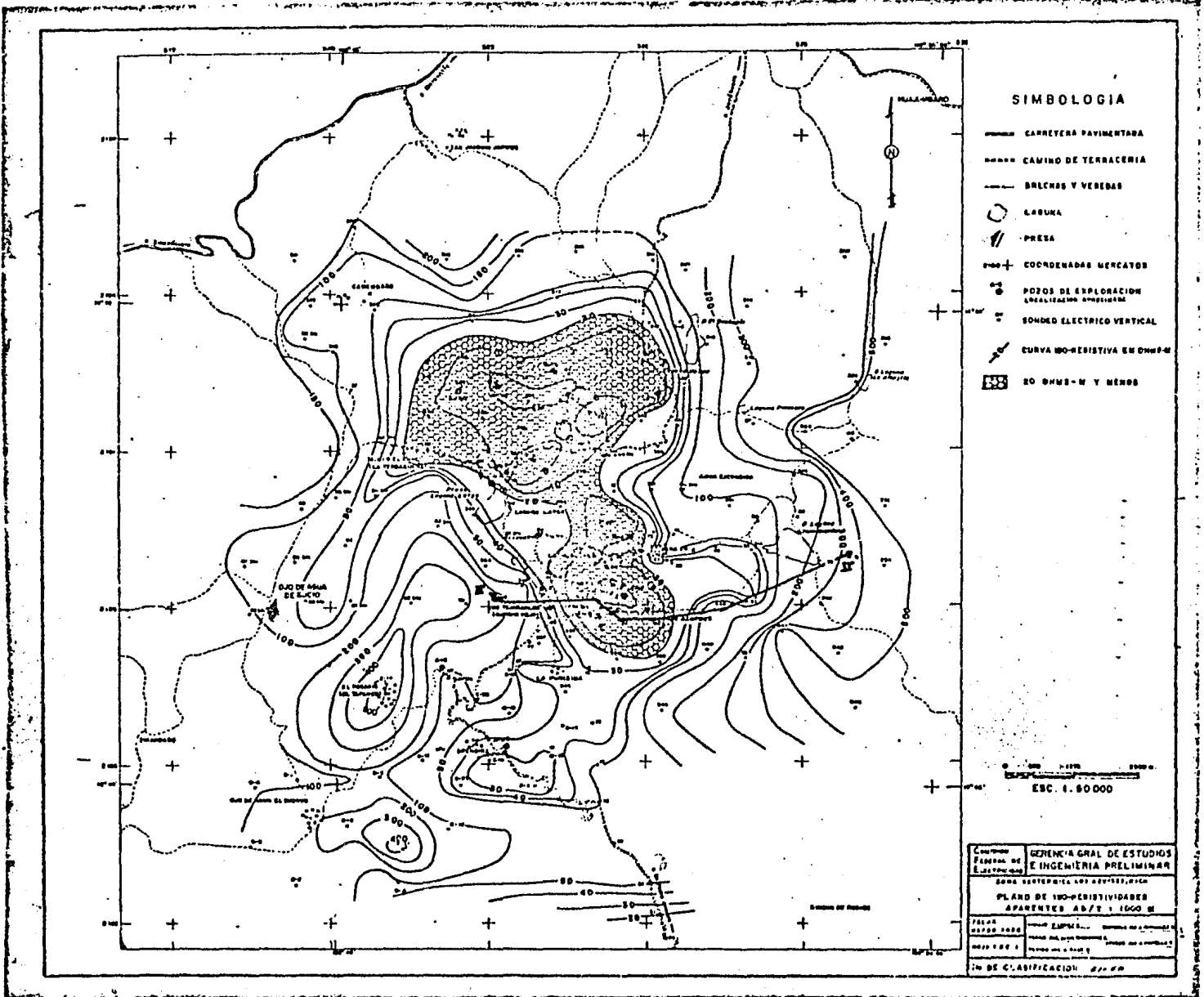


FIGURA I-3

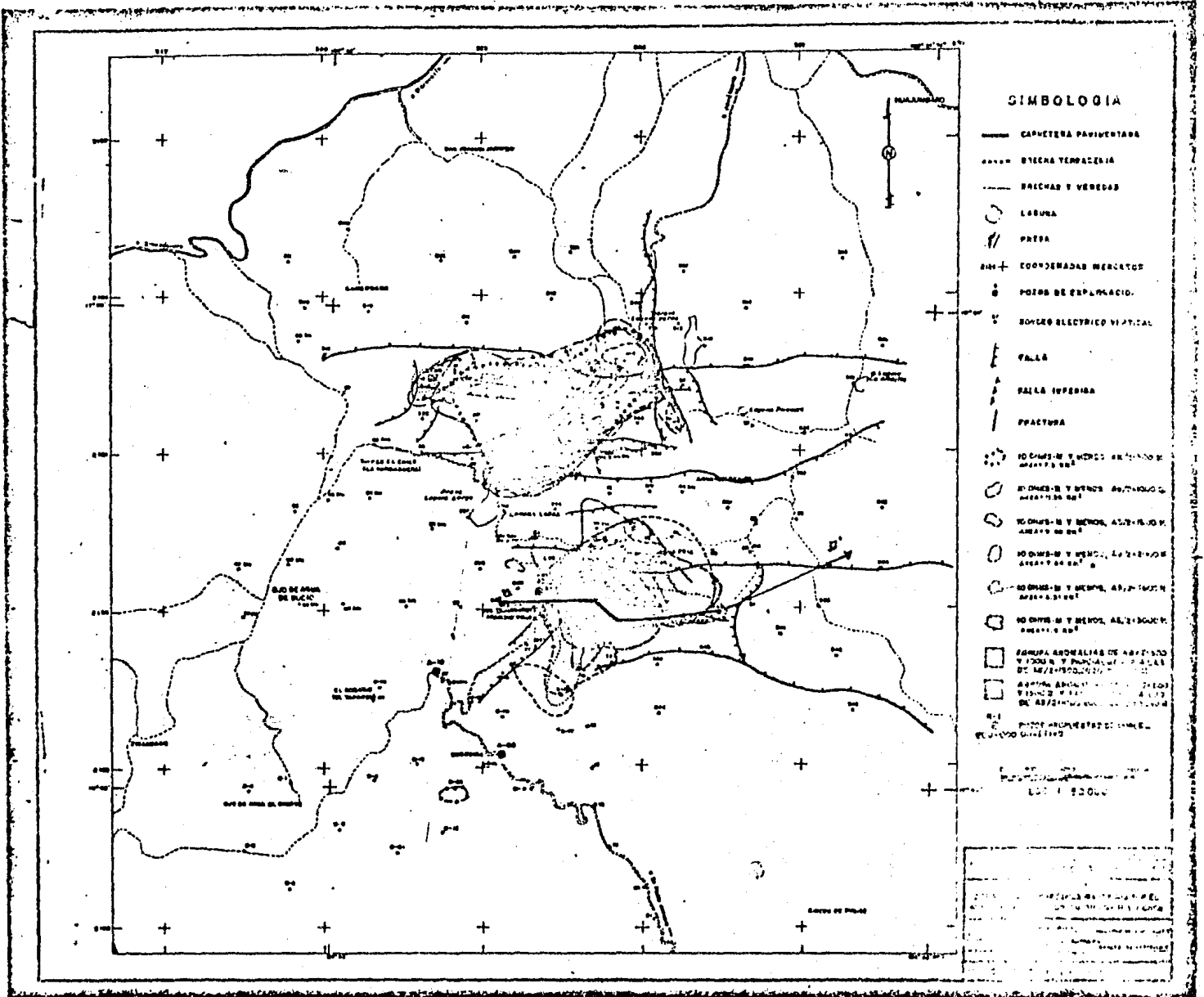
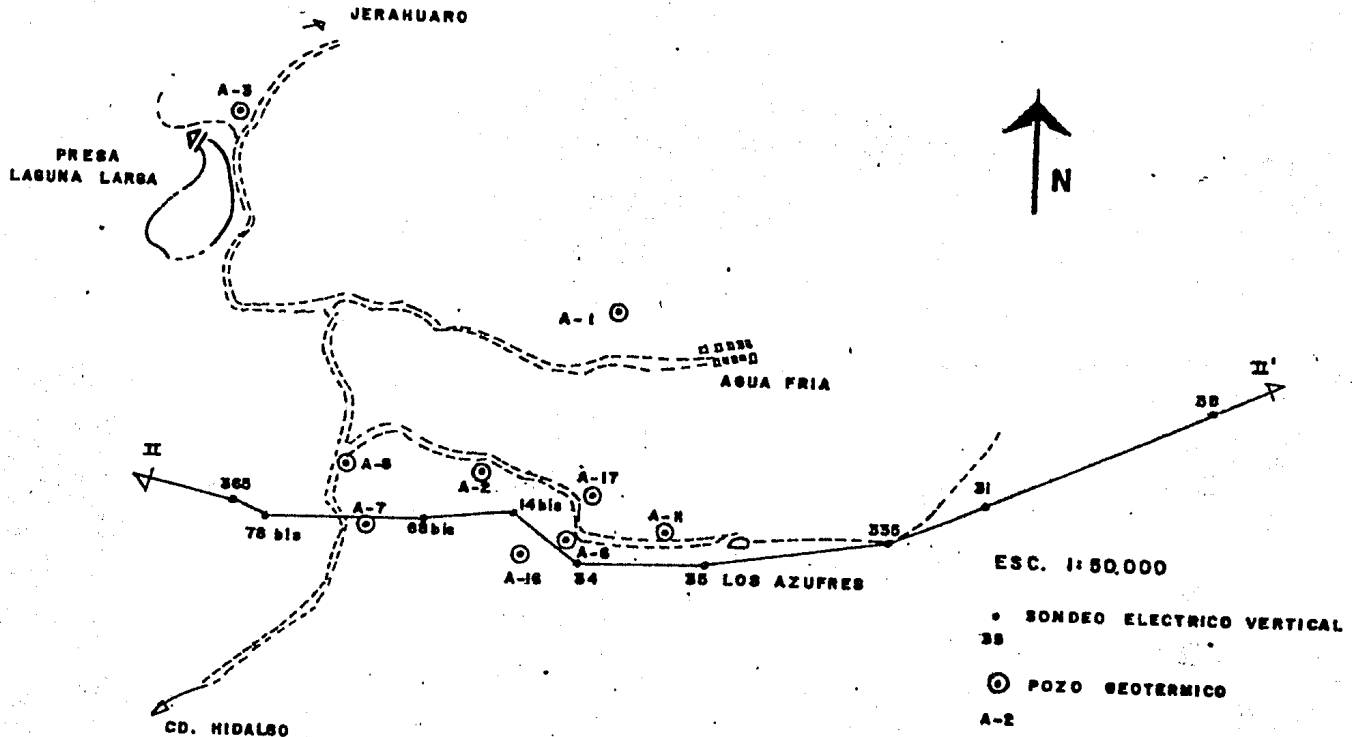
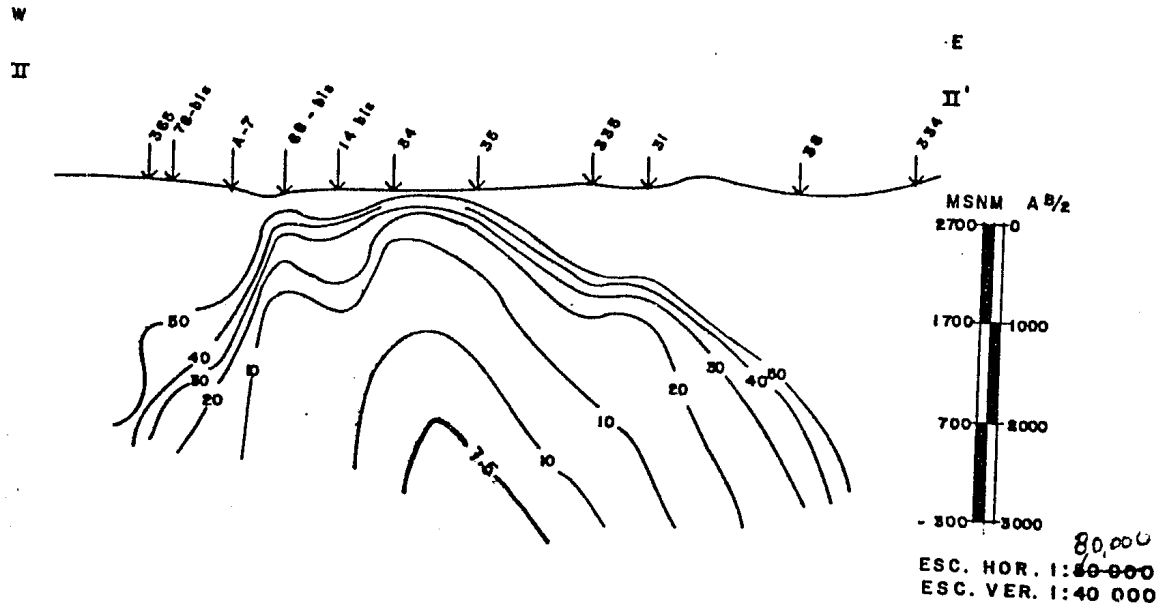


FIGURA I-4

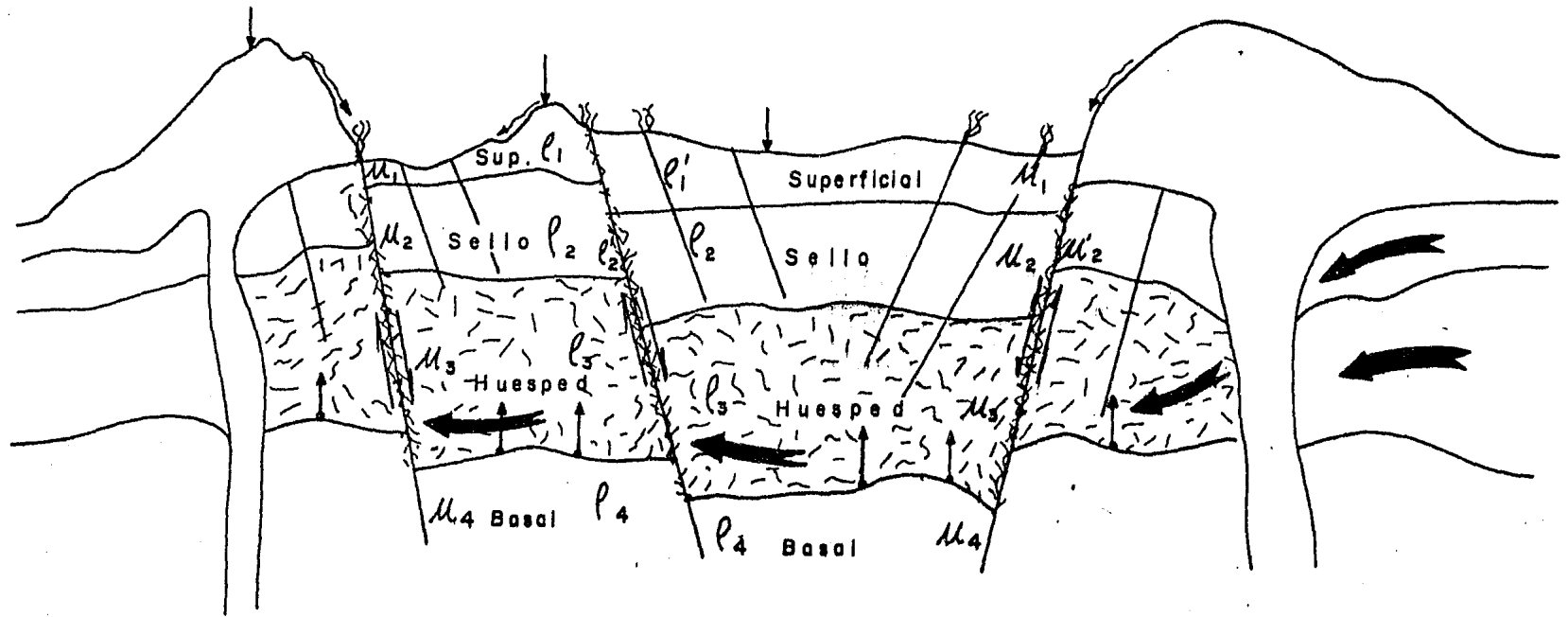
PERFIL DE ISO-RESISTIVIDAD



ZONA SUR DEL CAMPO GEOTERMICO DE LOS AZUFRES MICH.

LOCALIZACION DE LA SECCION II - II'

FIGURA I-5



 Manifestación termal

 Falla geológica

 Fractura

 Fracturamiento

 Roca huesped

 Recarga

 Transferencia de calor

$$\rho_1 \approx \rho_2$$

$$\rho_2 > \rho_3$$

$$\rho_3 < \rho_4$$

$$\rho'_1 < \rho_1$$

$$\rho'_2 < \rho_2$$

$$\mu_1 \approx \mu_2$$

$$\mu_2 \approx \mu_3$$

$$\mu_3 < \mu_4$$

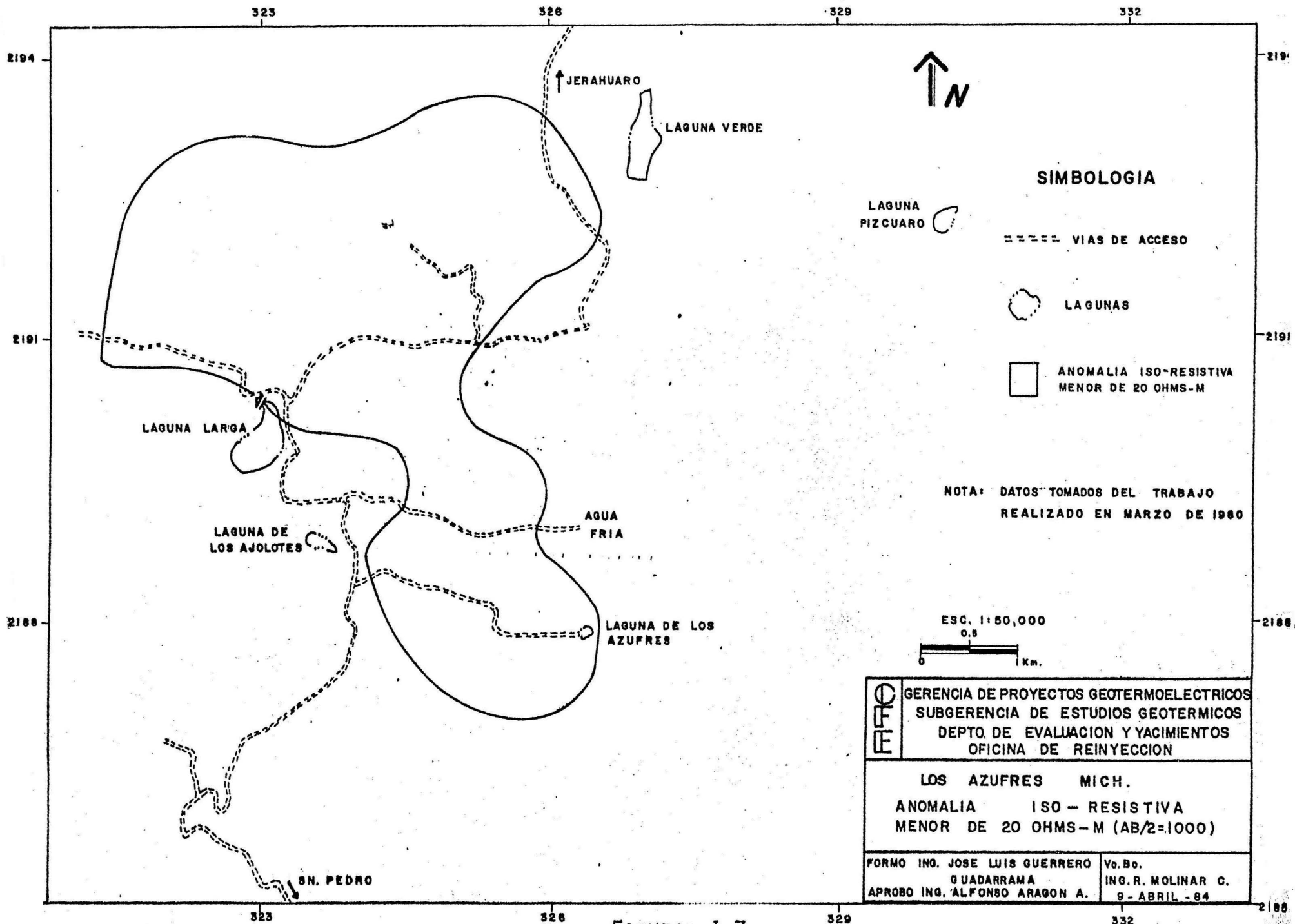
$$\mu'_2 > \mu_2$$

ρ = Resistividad

μ = Permeabilidad magnética.

Modelo simplificado de un yacimiento geotérmico y sus parametros geofísicos.

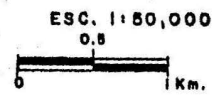
FIGURA I-6



SIMBOLOGIA

- ==== VIAS DE ACCESO
- LAGUNAS
- ANOMALIA ISO-RESISTIVA MENOR DE 20 OHMS-M

NOTA: DATOS TOMADOS DEL TRABAJO REALIZADO EN MARZO DE 1980



	GERENCIA DE PROYECTOS GEOTERMIOELECTRICOS SUBGERENCIA DE ESTUDIOS GEOTERMICOS DEPTO. DE EVALUACION Y YACIMIENTOS OFICINA DE REINYECCION
	LOS AZUFRES MICH. ANOMALIA ISO-RESISTIVA MENOR DE 20 OHMS-M (AB/2=1000)
	FORMO ING. JOSE LUIS GUERRERO GUADARRAMA APROBO ING. ALFONSO ARAGON A.

FIGURA I-7

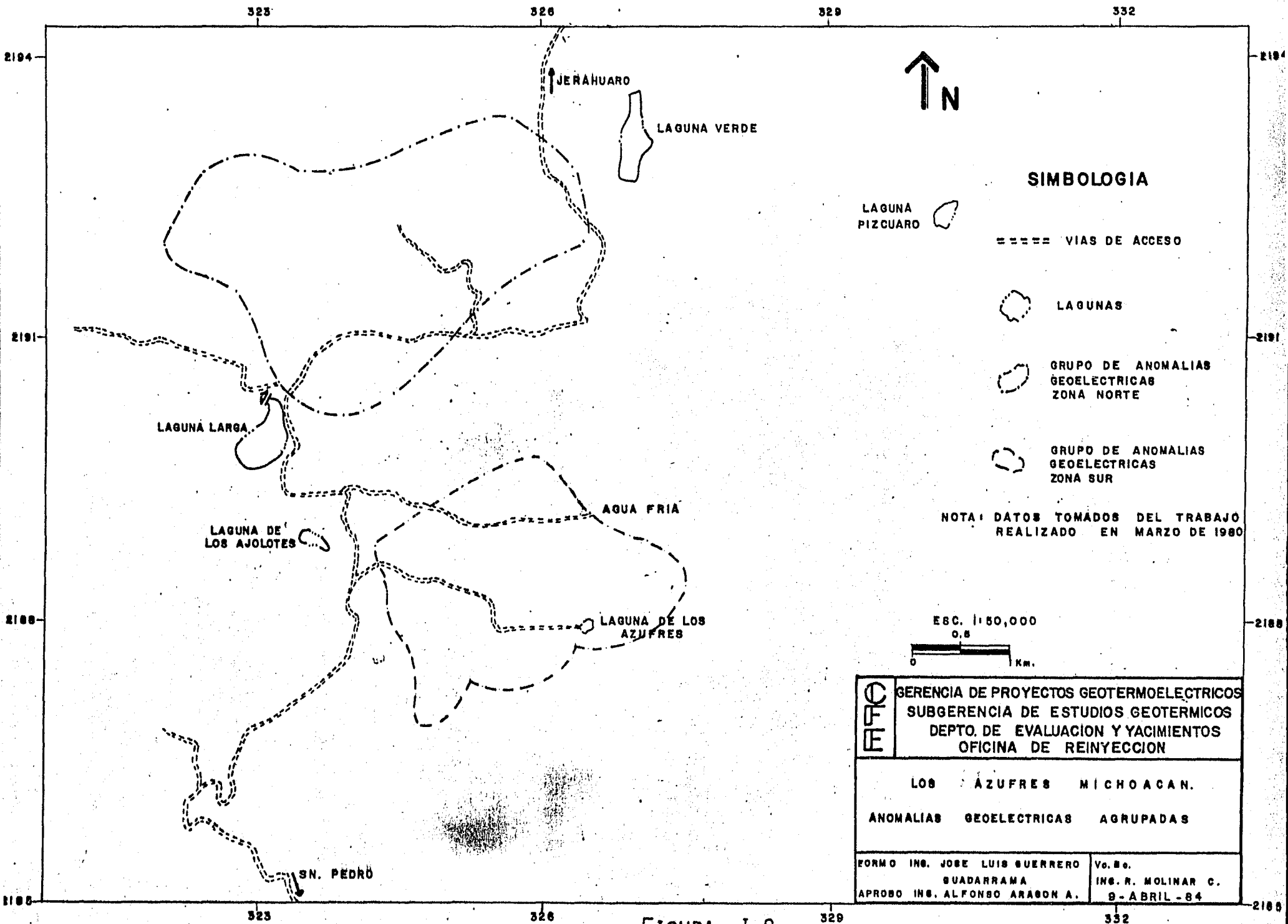


FIGURA I-8

son comprobados por los estudios de mineralogía y paleomagnetismo de rocas superficiales, núcleos y recortes de perforación. - Dicha comprobación está basada en la interpretación de paleotemperaturas que han afectado la zona, deduciéndose que la zona -- norte del campo es susceptible de un recalentamiento actual, -- mientras que la zona sur tiende a estabilizarse. (Aumento, F. y Gutiérrez N., L.C.A., 1980). Otro aspecto geológico importante es la identificación de paleoprocesos de autosellamiento de las fracturas, que están restringiendo el flujo convectivo hacia las rocas accesibles; por otra parte, existen procesos activos de autosellamiento favorecidos por la formación y acumulación de arcillas y minerales de origen hidrotermal (hematita, calcita, cuarzo, zeolita, pirita, epidota, etc.).

El estudio geohidrológico "Los Azufres-Cuitzeo, Edo. de Michoacán", realizado por los Ings. Cedillo, F., Silva, R. y Vargas, H.J. (Informe No. 37-81 de la Oficina de Geología, CFE) cubre una zona de 5 000 Km² y muestra los panoramas regional y local del comportamiento hidrológico; además de que recopila la información hidrológica desde 1955 hasta 1977.

En este ejemplo se analiza la distribución de niveles piezométricos de los Valles de Maravatío y Cuitzeo, encontrándose que la diferencia promedio entre ellos es de 200 m, siendo el nivel del Valle de Maravatío el más alto.

Como la zona de Los Azufres está localizada en una Sierra que separa los dos Valles, es muy probable que el ascenso y con

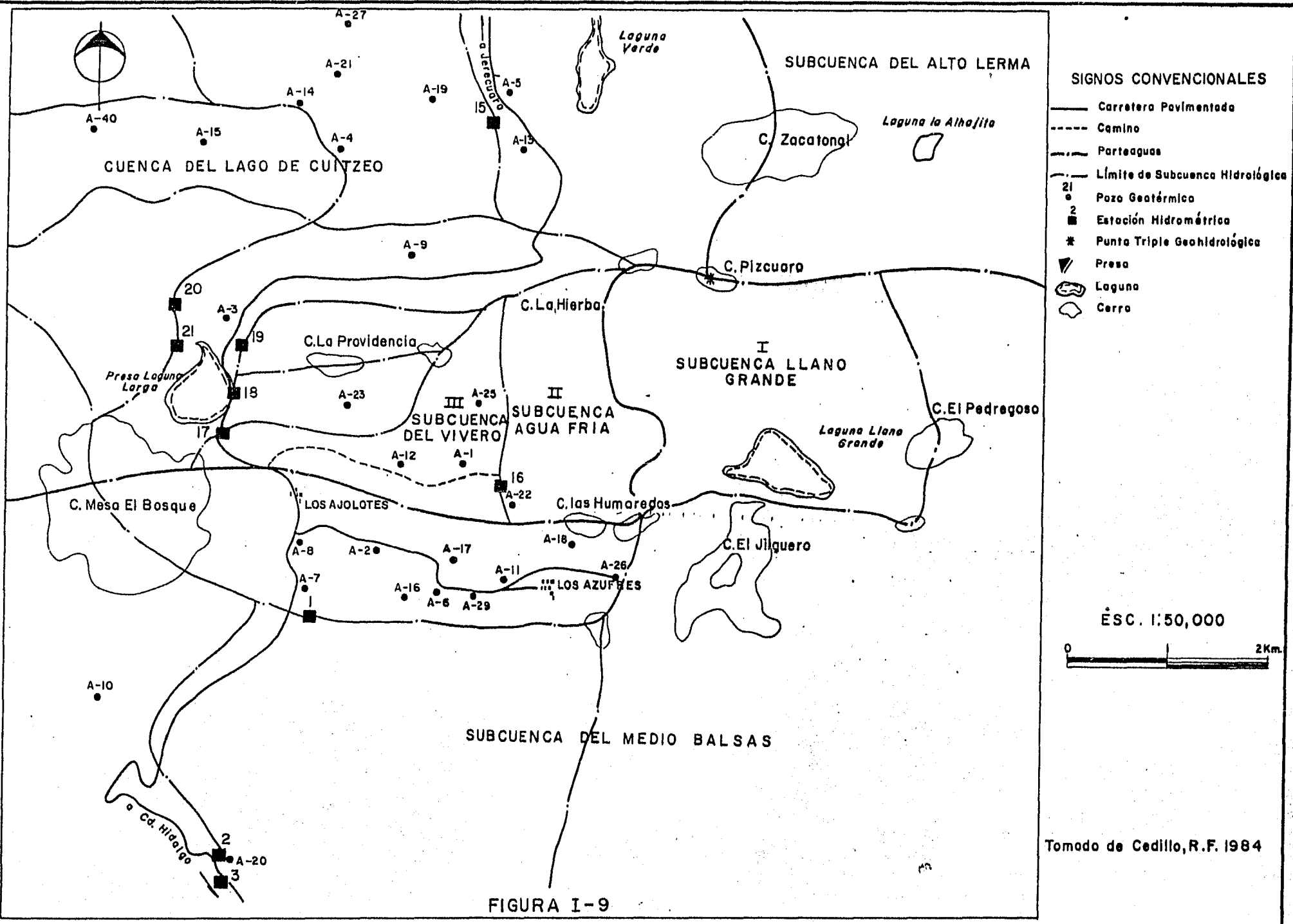
ducción de los fluidos sea facilitado por el intenso fracturamiento. Las fallas geológicas de dirección ENE-WSW son normales y su principal buzamiento es hacia el norte; por lo tanto, los flujos en dirección N-S se verán restringidos por ser más impermeable la roca en la dirección del rumbo de la falla. Localmente, sólo los alineamientos de los conductos de los aparatos volcánicos recientes parecen modificar el sistema hidrológico inicial y podrían estar propiciando los canales de conducción hacia la fuente de calor.

En cuanto a la fuente de recarga, se observa que la Sierra de San Andrés-Los Azufres, divide a tres cuencas hidrológicas; al W la cuenca cerrada del Lago de Cuitzeo, al S la del Medio Balsas y al NE el Alto Lerma, lo que significa que las condiciones para la recarga son excelentes por los posibles aportes de cada cuenca (Figura I-9).

La geoquímica de Los Azufres, basada en los datos proporcionados por los geotermómetros SiO_2 y NaKCa , no dio resultados confiables, variando los valores de temperaturas calculadas y su interpretación, en los mismos puntos de muestreo (Guiza, J. y Mercado, S., 1976-79).

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y TERMODINÁMICOS DEL YACIMIENTO.

El análisis cualitativo del estudio de interferencia entre los pozos productores A-18 y A-31 el A-26, observador, localizados en la zona SE del yacimiento (Figuras I-10, I-11, I-12 y I-13),



- SIGNOS CONVENCIONALES**
- Carretera Pavimentada
 - - - Camino
 - - - - Parteaguas
 - - - - Límite de Subcuenca Hidrológica
 - 21 Pozo Geotérmico
 - 2 Estación Hidrométrica
 - * Punta Triple Geohidrológica
 - ▽ Presa
 - Laguna
 - Cerro

ESC. 1:50,000



Tomado de Cedillo, R.F. 1984

FIGURA I-9

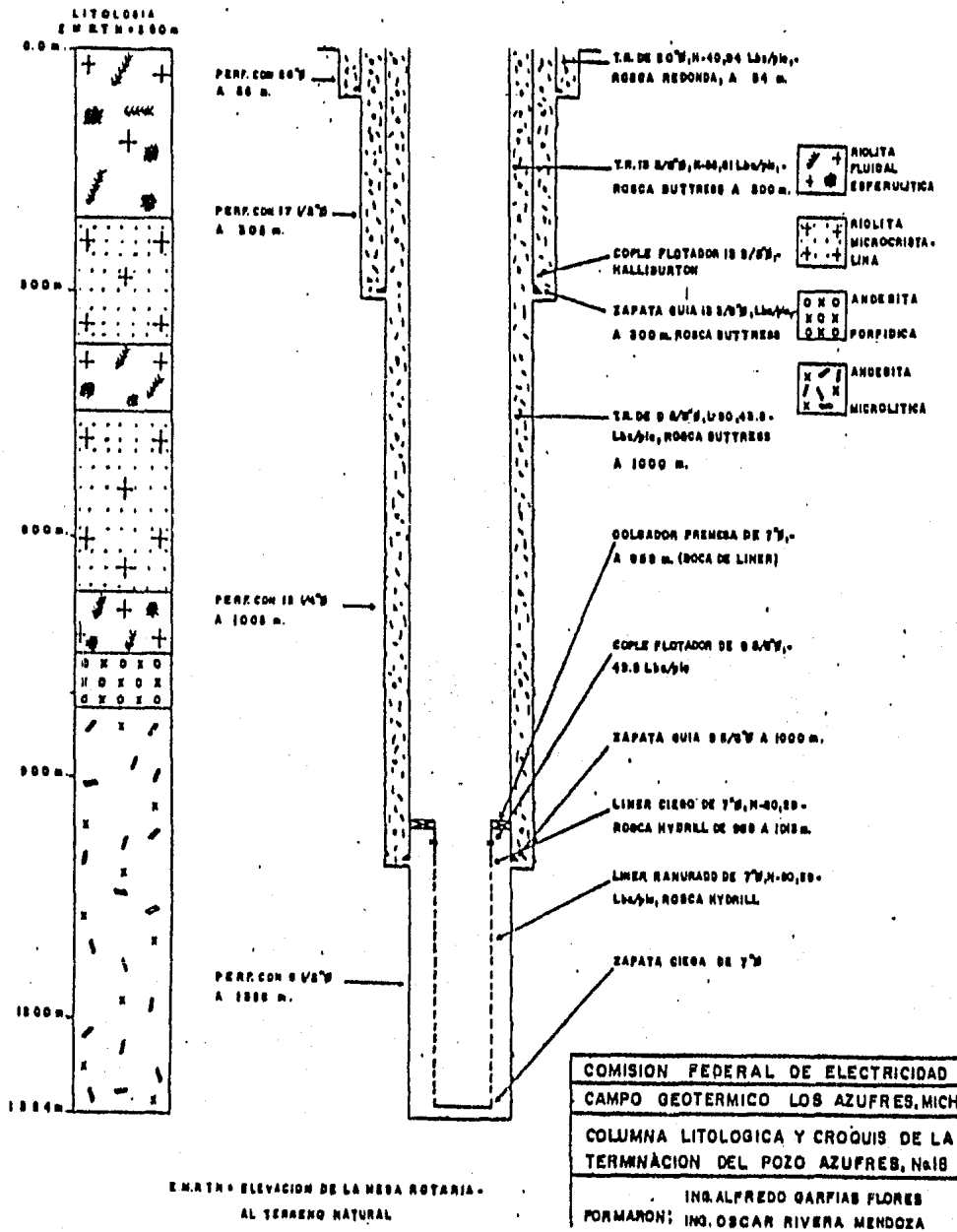


Figura 1-10

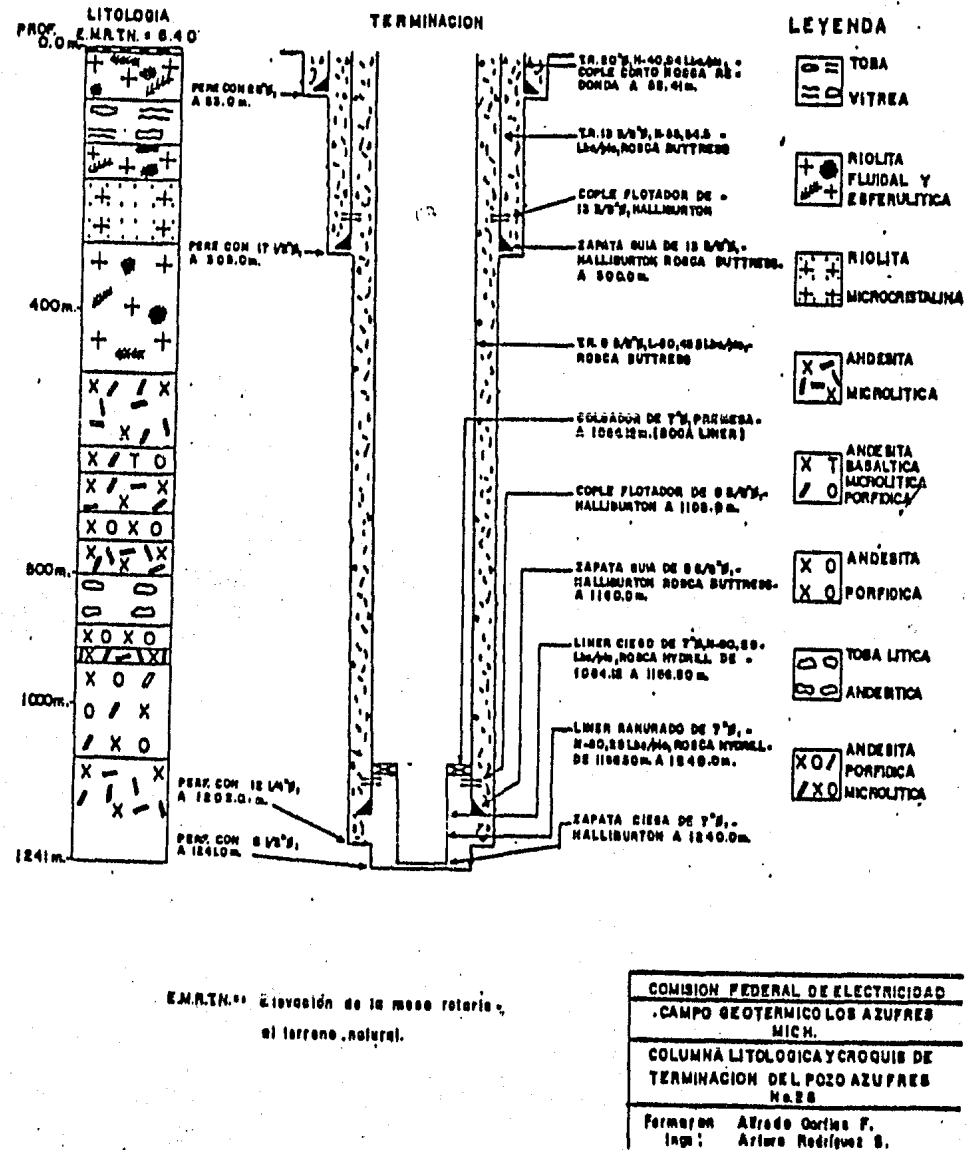
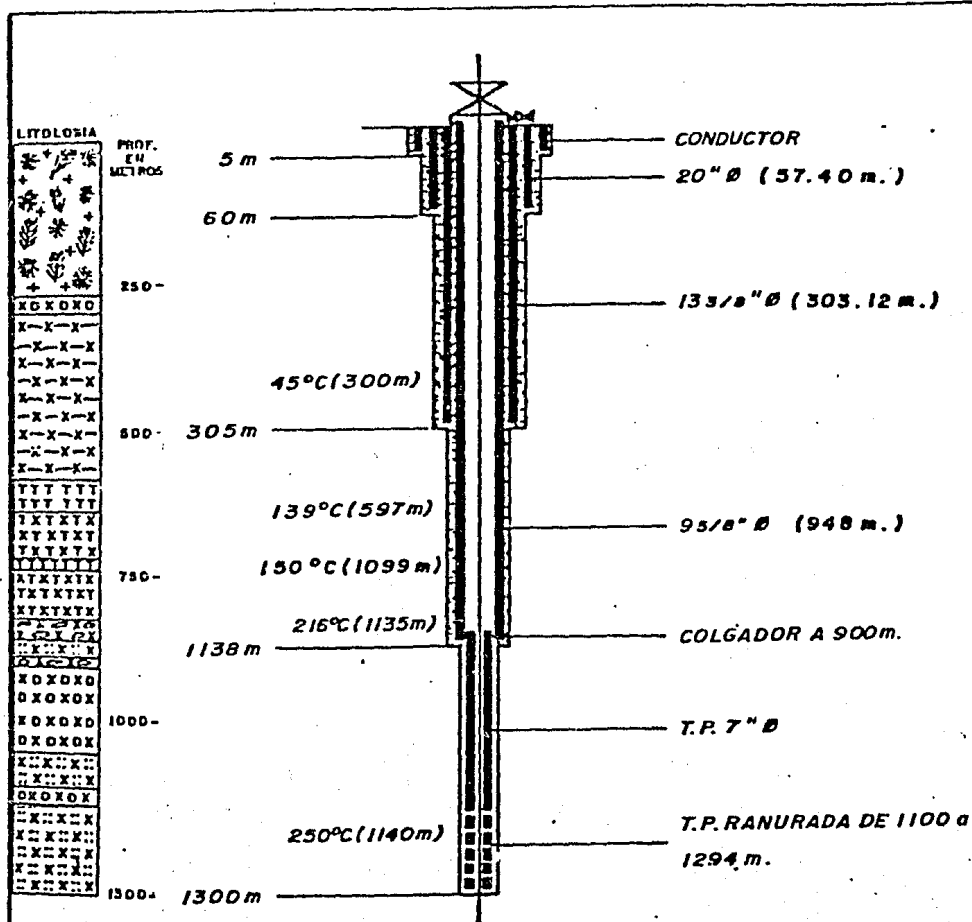


Figura 1-11



POZO Az - 31

Figura 1-12

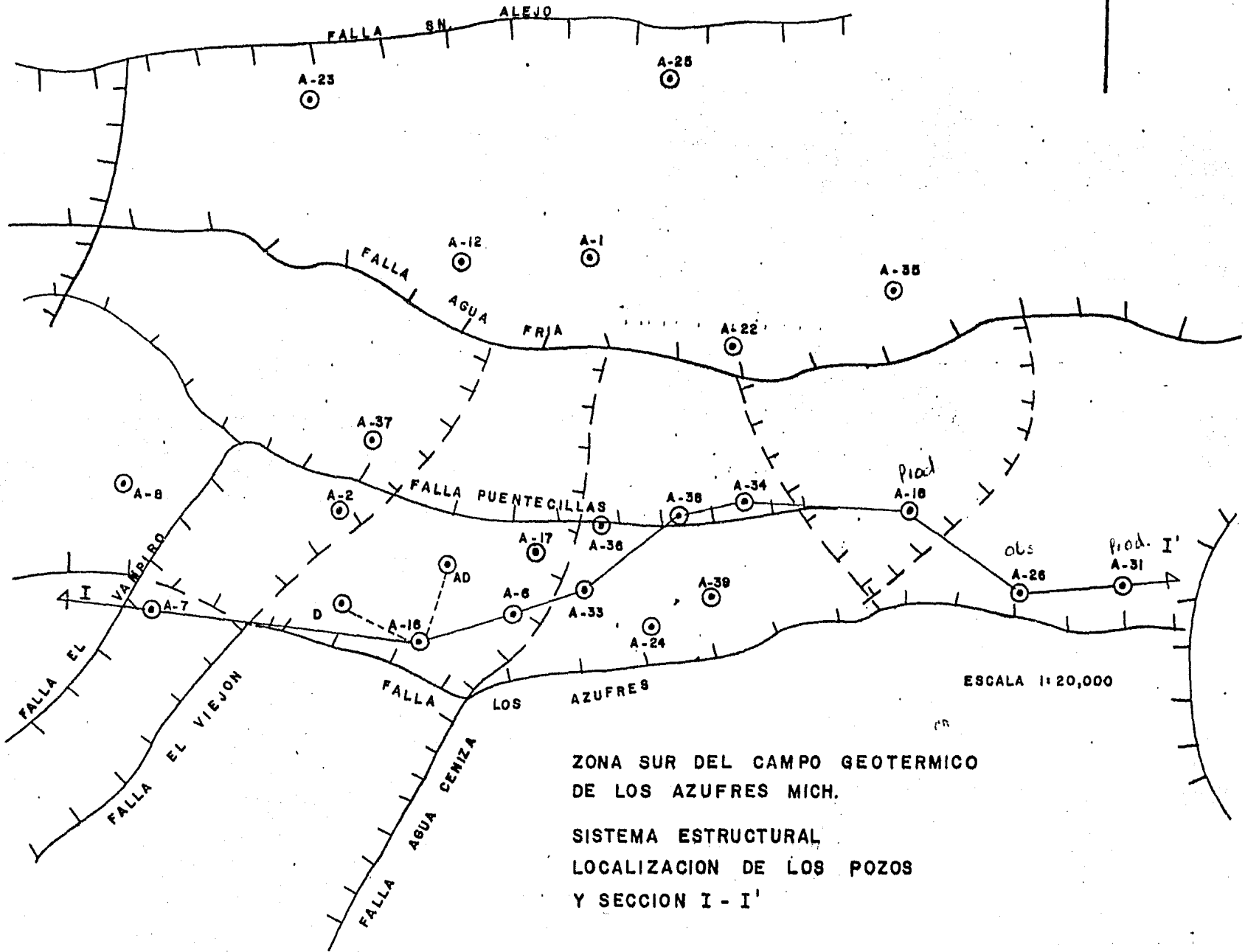
324

325

326

327

328



ESCALA 1:20,000

ZONA SUR DEL CAMPO GEOTERMICO DE LOS AZUFRES MICH.

SISTEMA ESTRUCTURAL LOCALIZACION DE LOS POZOS Y SECCION I - I'

218

219

218

217

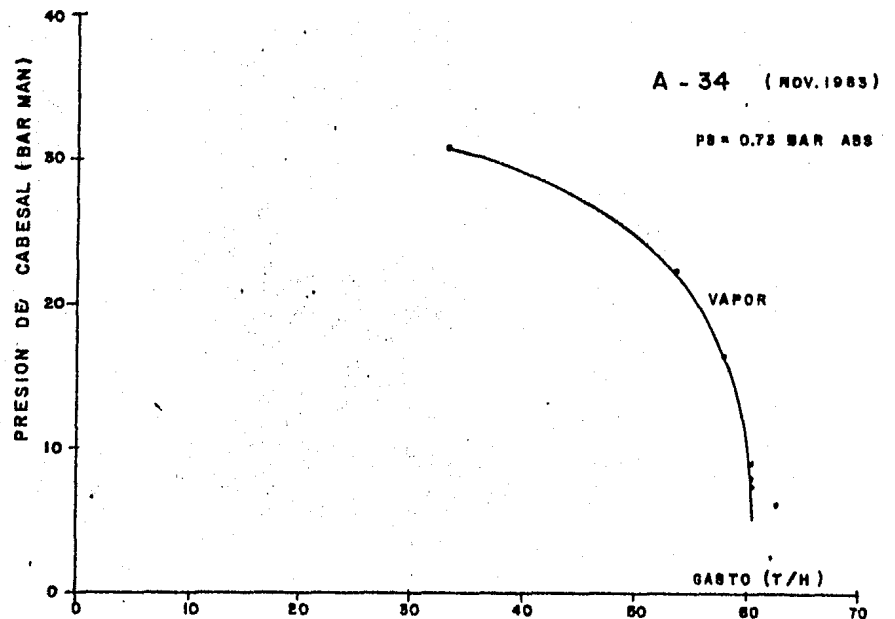
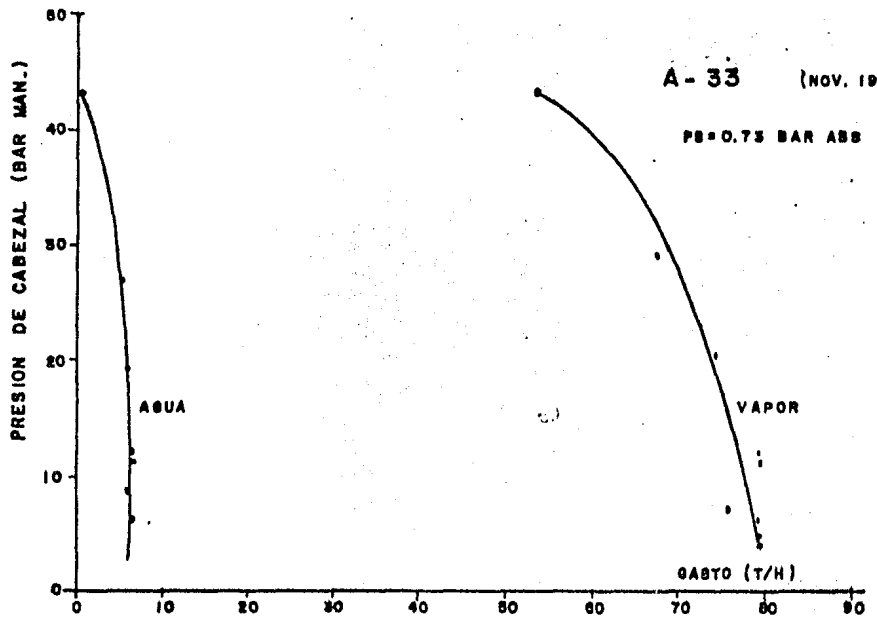
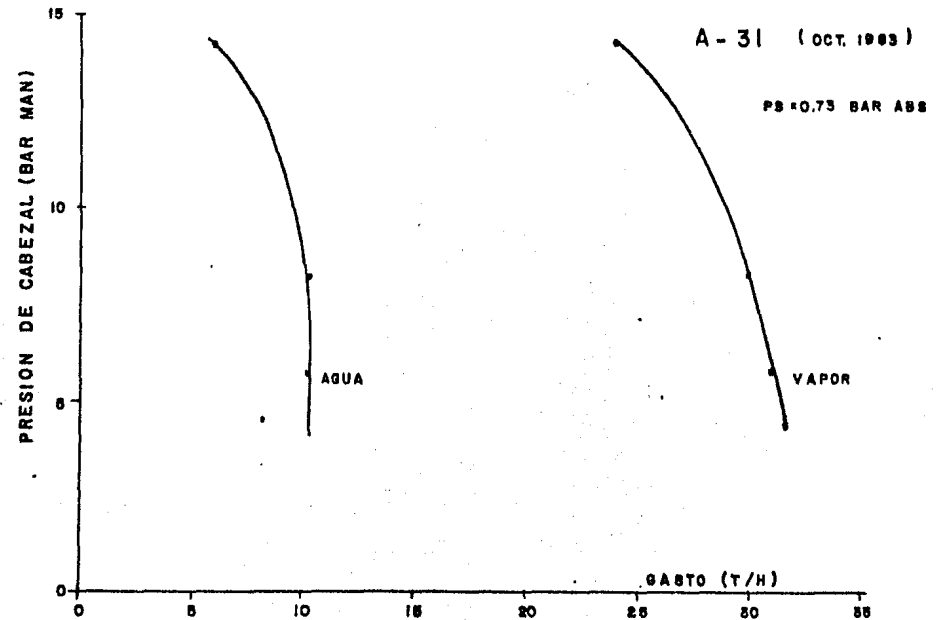
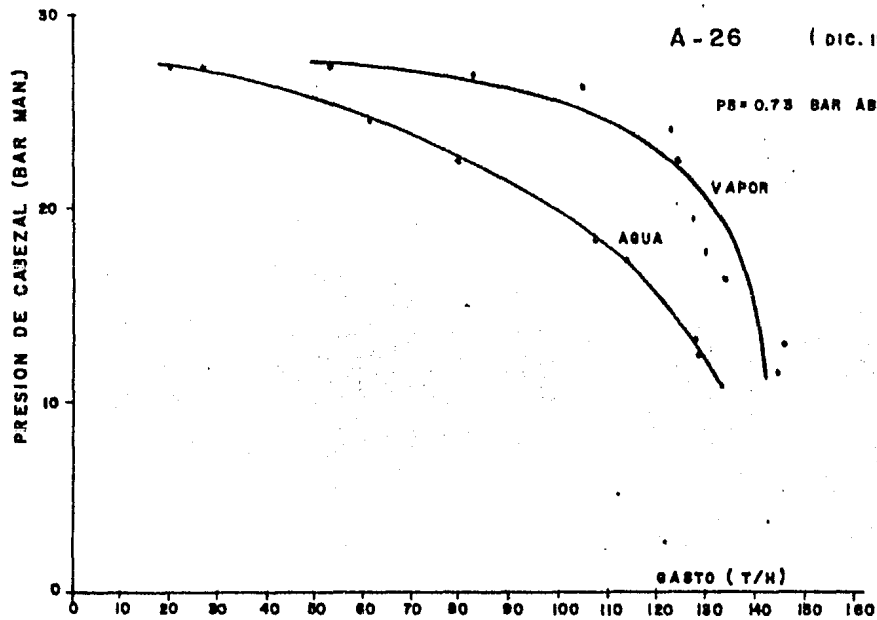
permite apreciar las siguientes características físicas y termodinámicas.

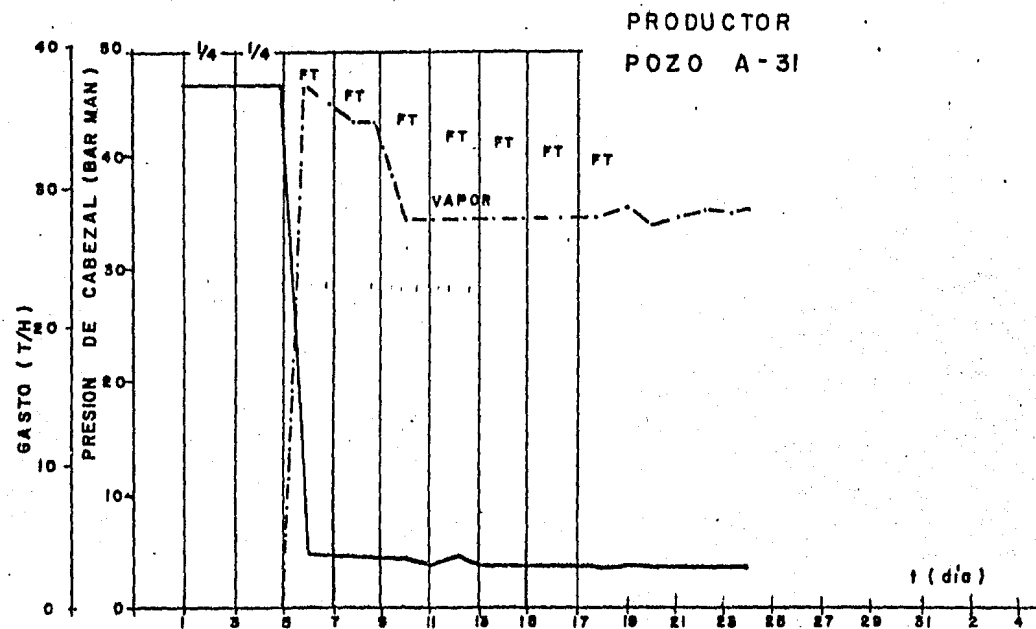
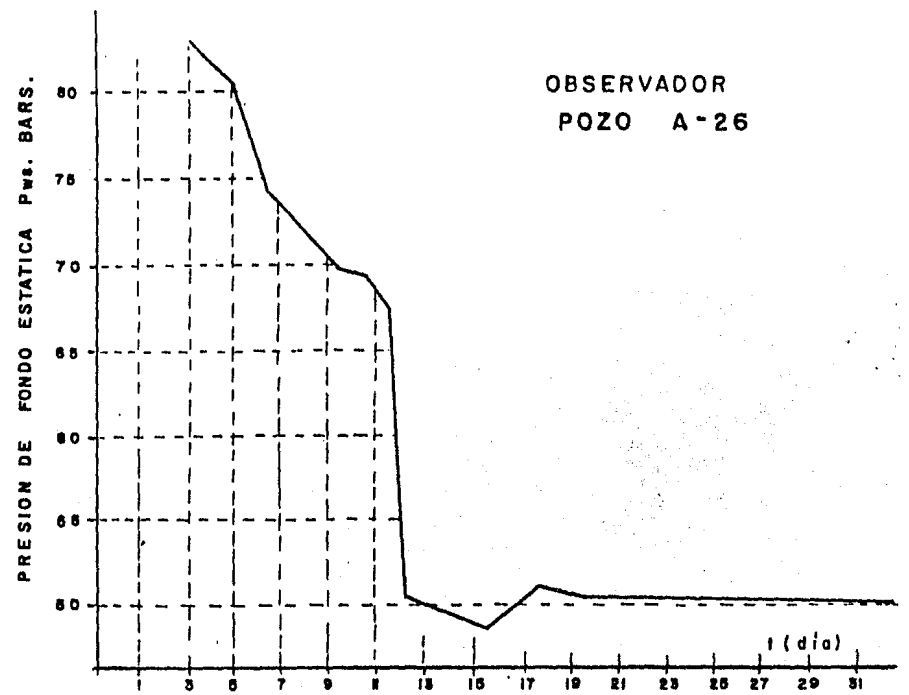
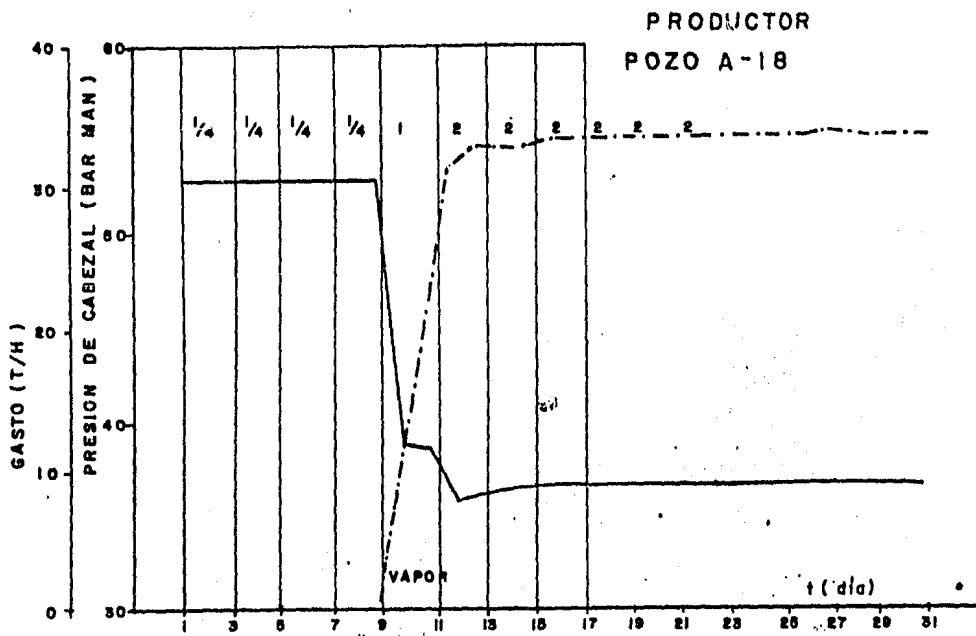
- a). Petrográficamente, se identifica un autosellamiento -- que limita la porosidad y permeabilidad del pozo A-31, localizado en la porción E de la falla geológica de -- Los Azufres, lo que se refleja en una baja producción de fluido (Figura I-14 y Tabla I-1).

- b). Los pozos A-18 y A-26 se localizan dentro de la anomalía geoelectrica de 20 Ohm-m y el pozo A-31 en el extremo E de la misma (Ver Figuras I-3 y I-4). El perfil geoelectrico II-II' muestra valores de resistividad más bajos a mayor profundidad (Ver Figura I-5), -- por lo que se producen mejores condiciones geofísicas -- al profundizar el pozo A-31.

- c). Los parámetros de presión y gasto de la prueba de interferencia (Figura I-15) muestran que existe una gran comunicación en el yacimiento y una rápida estabilización de los mismos parámetros, interpretándose esto como líneas directas de flujo. El rápido arribo de la onda de presión es explicado por un modelo de roca fracturado, saturado 100% de agua. Es probable entonces que el pozo A-31 refleje sólo los efectos locales del autosellamiento por estar penetrando parcialmente en el yacimiento.

CURVAS CARACTERISTICAS DE LOS POZOS :





AGOSTO 1983

FIGURA I-15

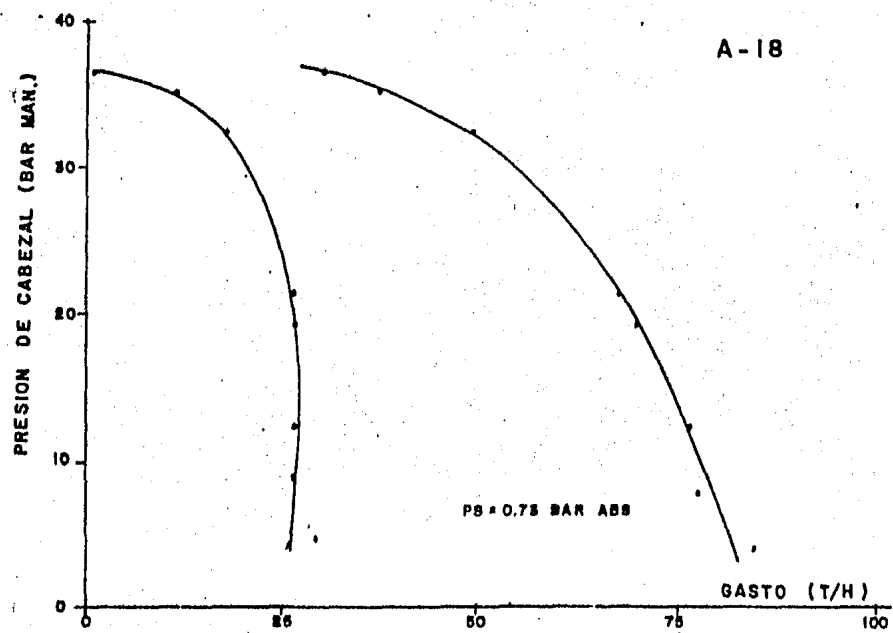
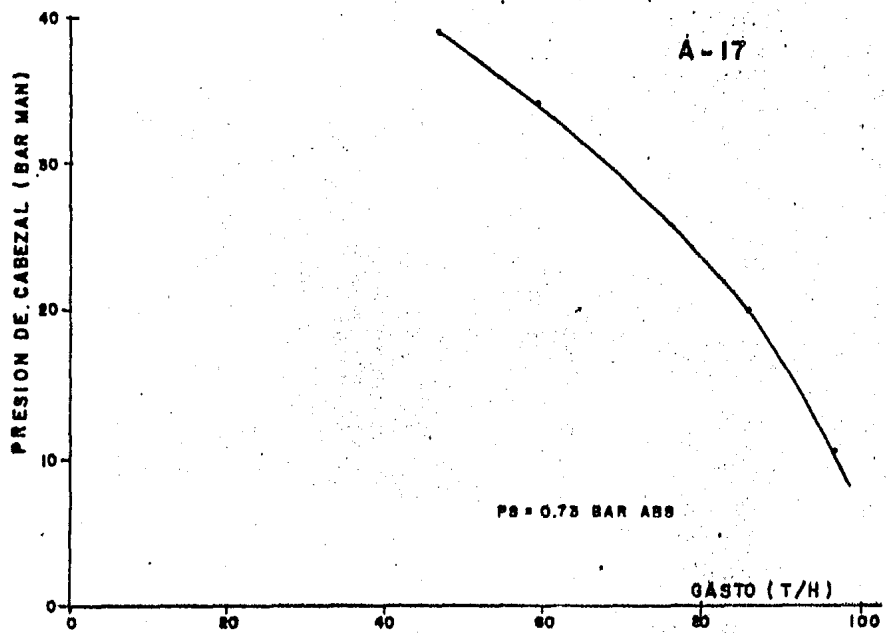
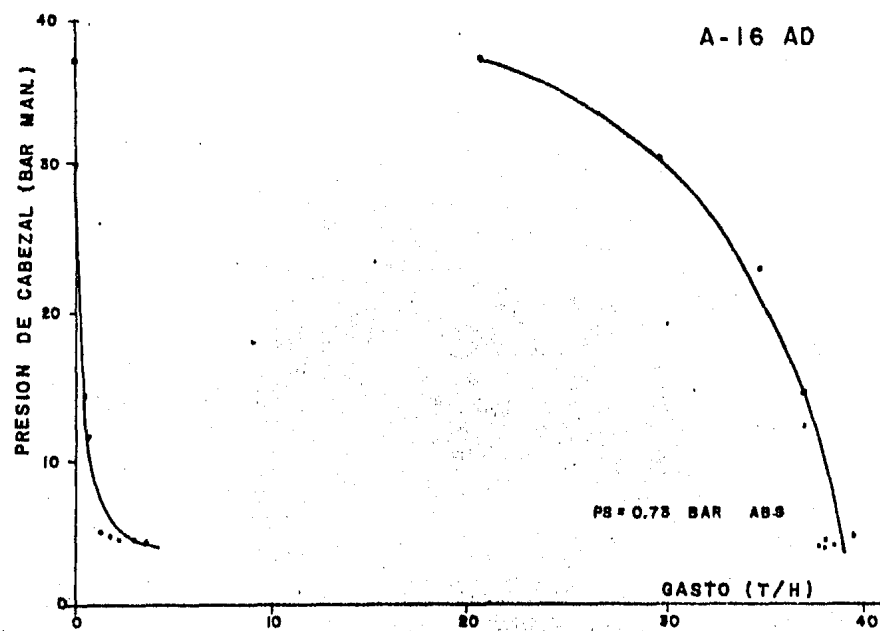
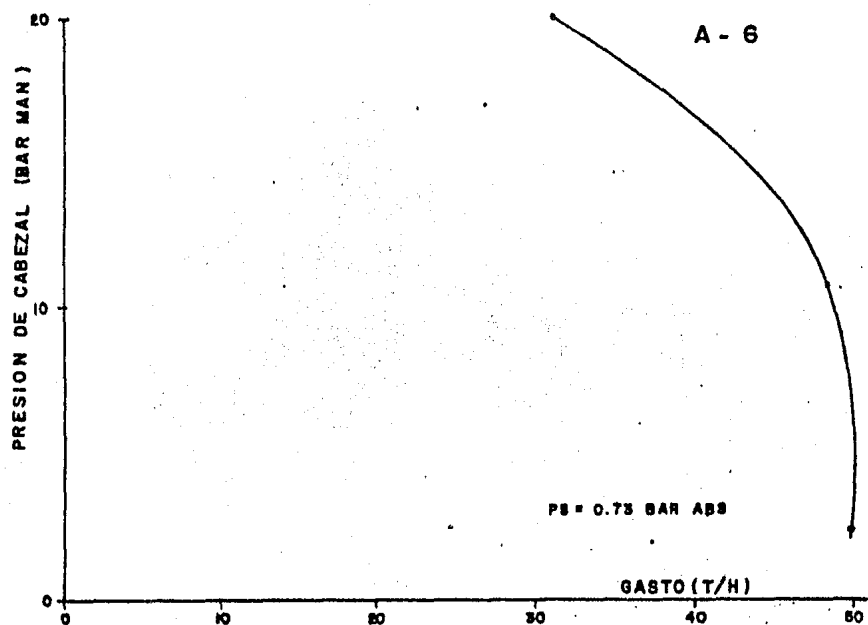
ZONA SUR

POZO	PROFUNDIDAD TOTAL (m)	BASE DEL L. R. (m)	CIMA DEL L.R. (m)	INTERVALO PRODUCTOR (m)	PRODUCCION		ENTALPIA Kj/Kg	PRESION CABEZAL BARS.ABS	CALIDAD %	PRESION SEPARACION BARS.ABS
					VAP Ton/hr	AGUA Ton/hr				
A-6	900	881	648	233	45.5	2.8	2661.8	11.43	94	8
A-16AD	1049	1039	778.8	260.2	34.8	2.7	2620.2	12.34	93.5	8
A-17	627	622	561	61	91.5	0.5	2661	11.43	99.5	8
A-33	1038	683	602.5	435.5	60.0	3.3	2662	9.73	94.8	8
A-34	1273	856	744.7	528.3	58.0	3.0	2662	10.93	95.1	8
A-36	1050	1034	675.8	374.2	16	0.8	2662	9.33	95	8
A-38	752	748	643.2	108.8	120.0	6.2	2662	12.43	94.9	8
A-16	1324	1322	1101.3	222.7	31	49	1521	9.7	39.1	8

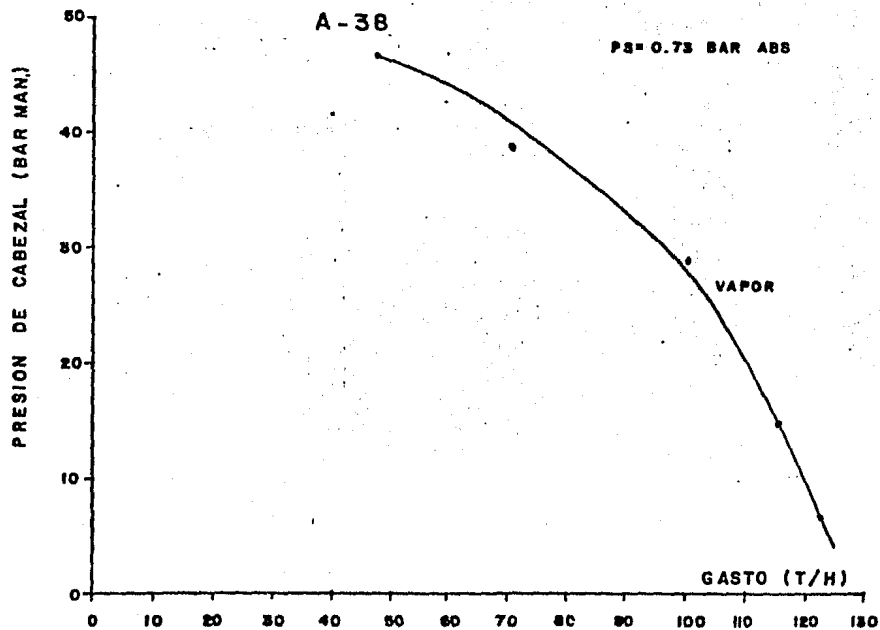
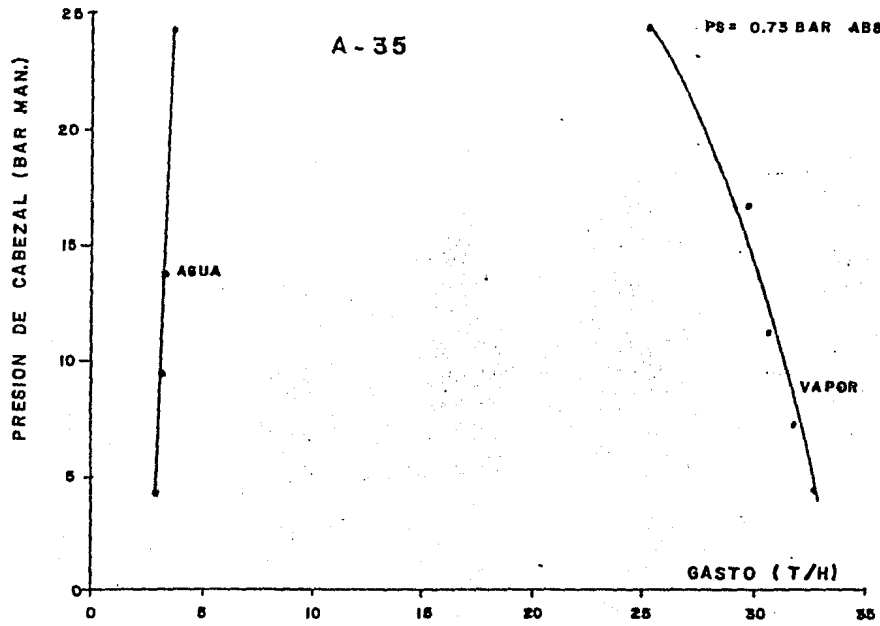
ZONA SURESTE

POZO	PROFUNDIDAD TOTAL TOTAL	BASE DEL L. R. (m)	CIMA DEL L. R. (m)	INTERVALO PRODUCTOR (m)	PRODUCCION		ENTALPIA Kj/Kg	PRESION CABEZAL BARS.ABS	CALIDAD %	PRESION SEPARACION BARS.ABS
					VAP Ton/hr	AGUA Ton/hr				
A-18	1328	1324	1013	315	69	71	2079	9.73	49.3	8
A-26	1241	1240	1165.5	78.5	97	183	1430.7	13.13	34.6	8
A-31	1300	1293	1097.7	202.3	29.8	7	2216.9	3.13	80.9	0.75

CURVAS CARACTERISTICAS DE LOS POZOS : (AGOSTO 1983)



CURVAS CARACTERISTICAS DE LOS POZOS = (NOV. 1985)



d). Las condiciones termodinámicas de los fluidos en el yacimiento medidos mediante registros en los pozos, nos indican presiones y temperaturas de fondo muy diferentes: A-18 273°C a 33 bars, A-26 246°C a 85 bars y --- A-31 265°C a 48 bars, lo que se refleja en la relación agua-vapor que produce cada uno de ellos y en la entalpía del sistema. Lo anterior, permite explicar al --- autosellamiento a partir de fenómenos de represiona--- miento, ascenso digital del fluido termal y la contami nación con flujos subterráneos fríos.

CONCLUSIONES DEL EJEMPLO

a). El análisis de las curvas características de los pozos localizados en la zona S (Figuras I-14, I-16 y I-17), además de los datos de producción de los pozos A-2, -- A-22, A-35 y A-37, nos indica la posibilidad de ex---- traer 750 toneladas-hora de vapor con una presión de - 10 bars y una entalpía de 2,300 Kj/Kg capaces de produ cir 75 Megawatts.

b). Un análisis del cálculo volumétrico considerando: Un yacimiento radial, confinado, sin recarga, con una superficie igual a la mostrada en la agrupación de anoma lías geoelectricas, un espesor de 1 000 m, porosidades en la fractura del 20%, en la roca 5% y 100% saturado de fluidos hidrotermales a 250°C en una fase; nos indi ca que si se producen 75 Megawatts por un período de 3

años, las condiciones iniciales de producción (presión, temperatura y entalpía) declinan de forma exponencial, hasta alcanzar un abatimiento del 20% de sus valores - iniciales por lo que, tendrían que perforarse contínuamente nuevos pozos para mantener la producción de 75 - Mw, durante 10 años.

- c). Este estudio demuestra que es viable la instalación de un turbogenerador de 55 Mw, por métodos convencionales de producción y una recarga mínima del yacimiento o diseñando un sistema de pozos productores-inyectores que recirculen los fluidos para ser recalentados y alcan--zar las condiciones termodinámicas de producción.

N O T A: Las gráficas y datos de producción fueron proporcionados por el Ing. G. Jaimes M., del Depto. de Evaluación de Yacimientos.

CAPITULO II

CAPITULO II

- II ASPECTOS GEOLOGICOS
- II.1 EJE NEOVOLCÁNICO
- II.2 ZONA GEOTÉRMICA DE LOS AZUFRES
- II.3 ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES
- II.3.1 OROGRAFÍA E HIDROGRAFÍA

LISTA DE FIGURAS

- II-1 MODELO GEODINÁMICO GENERAL
- II-2 TECTONISMO EN MÉXICO
- II-3 EJE NEOVOLCÁNICO Y SU DIVISIÓN EN SECTORES
- II-4 LINEAMIENTOS GENERALES DE LA PORCIÓN OCCIDENTAL DEL EJE NEOVOLCÁNICO
- II-5 LOCALIZACIÓN DE LAS AREAS DE ESTUDIO Y MANIFESTACIONES TERMALES DE MICHOACÁN, MEXICO
- II-6 RECOPIACIÓN GEOLÓGICA DE LOS AZUFRES, MICH.
- II-7 COLUMNA LITOLÓGICA Y CROQUIS DE TERMINACIÓN DEL POZO A-1
- II-8 COLUMNA LITOLÓGICA Y CROQUIS DE TERMINACIÓN DEL POZO A-2
- II-9 COLUMNA LITOLÓGICA Y CROQUIS DE TERMINACIÓN DEL POZO A-7
- II-10 COLUMNA LITOLÓGICA Y CROQUIS DE TERMINACIÓN DEL POZO A-8
- II-11 PLANO GEOLÓGICO DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICH.
- II-12 SECCIÓN GEOLÓGICA APOYADA EN LOS BARRENOS 4, 3 Y 7, IXTLÁN, MICH.

II ASPECTOS GEOLOGICOS

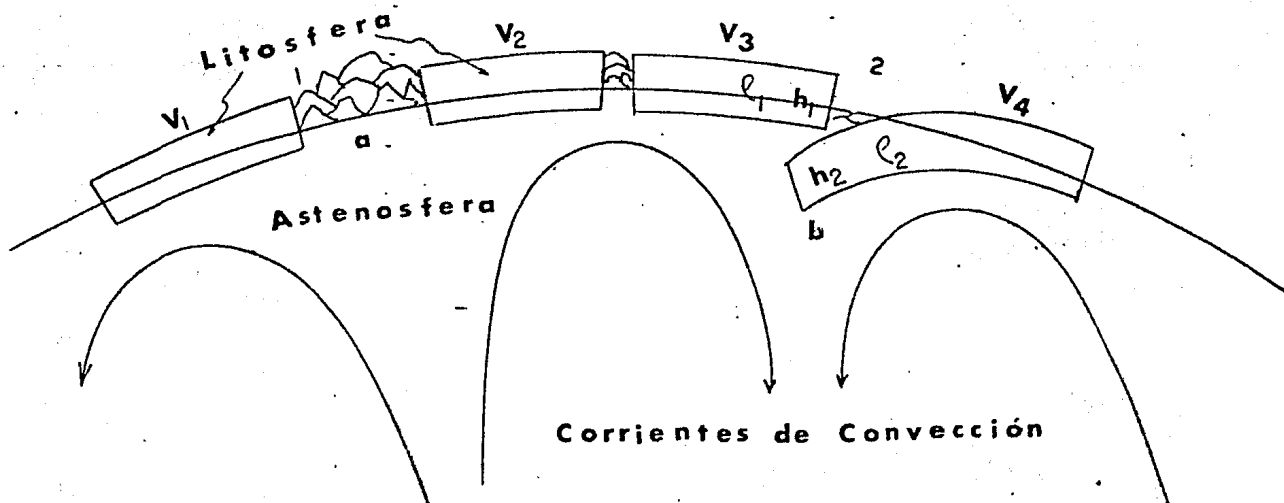
Los aspectos geológicos generales del Eje Neovolcánico, son analizados para comprender los mecanismos geodinámicos y tectónicos que le dieron origen, así como para clasificar y ubicar las zonas en estudio. Los estudios geológicos proporcionan modelos que simplifican la interpretación de la geofísica y al sumarse -- con los aspectos geológicos generales, permiten desarrollar las hipótesis de la génesis y magnitud del yacimiento geotérmico.

Es ampliamente aceptado que los campos geotérmicos, se localizan en áreas de tectonismo y vulcanismo reciente o actual, principalmente asociados a los bordes activos de placas o a fallas intracontinentales, donde existen los mayores flujos de calor de la superficie terrestre; si se combinan las características tectónicas, volcánicas y de flujo térmico, tales áreas de interés geotérmico serían:

- a).- Cordilleras Centro-Oceánicas, donde se crea nueva corteza por medio de la intrusión y extrusión de rocas -- ígneas. En este proceso las pérdidas de calor suman -- el 20% de los totales y ocurren a lo largo de las cordilleras oceánicas en expansión con un área de $5.5 \times 10^{11} \text{ m}^2$ equivalente al 1% de la superficie terrestre.
- b).- Zonas de subducción, definidas como franjas de contacto entre dos placas al ocurrir la colisión y tienen como resultado el consumo de la litósfera del elemento --

subduccionado. Esta porción de litósfera que se introduce genera material magmático que se elevará dentro de la placa superior utilizando como conductos las zonas débiles que se crean por el choque de las placas.

Un modelo geodinámico representativo (Fig. II-1) es el que muestra los movimientos convergentes y divergentes de la litósfera, considerada rígida y fría, que tiene como propiedad la facilidad a deslizarse sobre la atmósfera; la rigidez de los elementos que componen la litósfera, están en función de la densidad y las presiones litostáticas, por otro lado, son las corrientes de convección las que establecen la dirección y el patrón de los movimientos relativos, ocurriendo zonas de tensión y compresión.



- (1) Movimiento divergente
- (2) Movimiento convergente
- a Cordillera de Expansión
- b Zona de subducción

h_1, h_2 Espesores
 v_1, v_2, v_3 Velocidades
 ρ_1, ρ_2 Densidades

FIGURA II-1 MODELO GEODINAMICO GENERAL

A continuación se presenta una posible clasificación de los sistemas geotérmicos, considerando la generación y ascenso del magma en la corteza terrestre a profundidades relativamente someras, y las condiciones petrofísicas y termodinámicas del sistema roca-fluido.

- a).- Sistemas magmáticos activos, se manifiestan por un cierto número de volcanes recientes en actividad, donde el flujo de agua es sobre y hacia las rocas y cráteres parcialmente fundidos. Su aprovechamiento por medio de pozos está supeditado a la entrada de agua al yacimiento o a un sistema de inyección - producción.

Los movimientos y desplazamientos del magma son continuos y para su estudio se recomienda usar técnicas sísmológicas, geoeléctricas y estructurales en los flancos de los volcanes; como ejemplo de este sistema está el Kilauea en Hawai.

- b).- Sistemas en roca seca caliente, son aquellos en donde la fuente quedó atrapada por rocas de muy baja permeabilidad y poca porosidad, que impidieron el ascenso y circulación del fluido termal pero favorece la conducción de calor. Este recurso es económicamente aprovechable provocando un sistema de circulación hidrotermal artificial, mediante fracturamiento hidráulico.

Los métodos geofísicos que se aplican con éxito son los gravimétricos, magnéticos, termométricos y geoeléct

tricos, que tendrán como objetivo detectar la profundidad a la roca caliente y su ambiente geológico. Como ejemplos de estos sistemas están los campos geotérmicos de Los Geysers, Montañas Jemez, Montañas Cosso en E.U.A.

- c).- Sistemas de convección hidrotermal, se definen así a los propiciados por intrusiones ígneas en rocas porosas, permeables que contienen agua o bien que las intrusiones favorecieron un sistema de fracturas que comunican a las rocas permeables y porosas con el ascenso magmático. El flujo de las aguas meteóricas hacia la fuente, es facilitado por las fallas, para posteriormente circular en el medio y calentarse provocando la convección y el transporte de la energía; el ascenso y acumulación de los fluidos hidrotermales están restringidos a la roca huésped y roca sello. El modelo del capítulo I figura No. I-1 muestra un sistema de este tipo.

Para su estudio este sistema presenta mayores contrastes en sus propiedades eléctricas, magnéticas, gravimétricas, elásticas, térmicas y estructurales. Por tal motivo, los métodos geofísicos de exploración se pueden aplicar con un mayor grado de certidumbre.

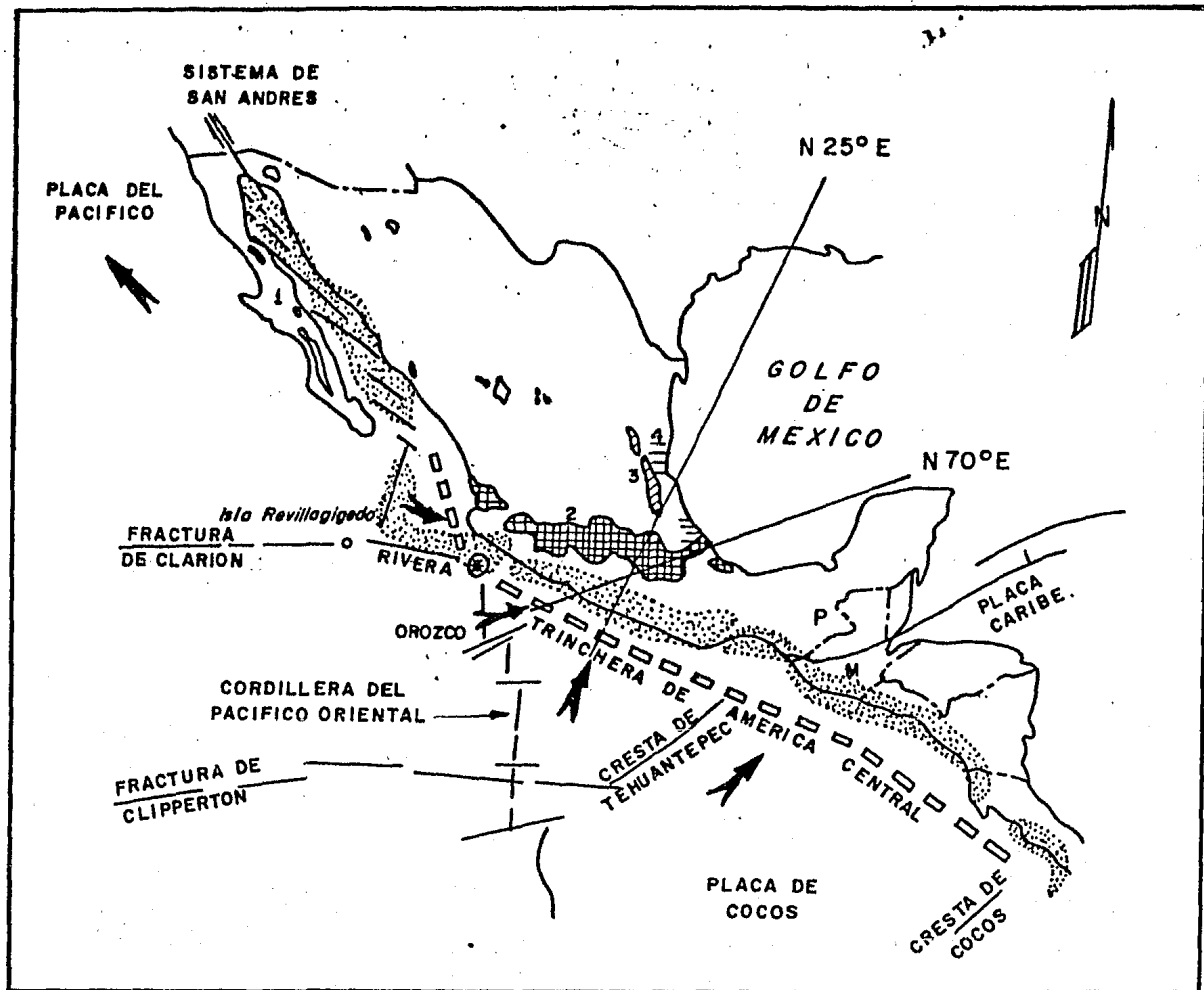
II.1 EJE NEOVOLCÁNICO

En el Eje Neovolcánico son los choques de placas que le dan origen a la actividad volcánica y tectónica (Figura II-2),-- distinguiéndose dos sectores de rasgos independientes que son el Occidental y el Centro Oriental (Figura II-3).

En el sector Occidental el vulcanismo y los movimientos tectónicos, están relacionados con la subducción de la Placa Rivera bajo la Placa Americana (Figura II-2), originando alineamientos generales NW-SE y N-S de las estructuras y emisiones volcánicas (Figura II-4). Diversas emisiones son monogenéticas y los alineamientos estructurales podrían haberse originado en un mismo sistema de esfuerzos. Por lo expuesto y dado lo reciente de la última actividad volcánica, se considera que los mecanismos que le dieron origen a este sector, aún se mantienen activos. Individualmente la actividad de los Volcanes del Ceboruco, Tequila y Colima están vinculados con cámaras magmáticas.

El sector Centro Oriental (Figura II-3) se identifica porque en él se localizan los grandes estratovolcanes de México alineados en dirección E-W, así como un sistema de grabens que parece cortarlo, generando depresiones donde se acumulan productos aluviales, lacustres y efusivos, originándose los grandes valles (de México, de Cuitzeo, de Puebla, etc.).

En el Oriente de este sector, existe un graben de dirección N-S (Geben de Libres-Oriental), limitado al E por el sistema Pico de Orizaba - Cofre de Perote y al Sur por el Graben de Tehua--



TECTONISMO EN MEXICO ELEMENTOS TECTONICOS ACTUALES

☒ Localización de los sismos superficiales

↗ Dirección de los movimientos de las placas

1.- Provincia magmática Californiana ó pacífica

2.-Eje neovolcánico transmexicano

3.-Vulcanismo de la Sierra Madre Oriental

4.-Vulcanismo de los planicies del Golfo de México

Tomada del artículo de Demont, A y Robin, C 1975

FIGURA II-2

Eje Neovolcánico Division en Sectores

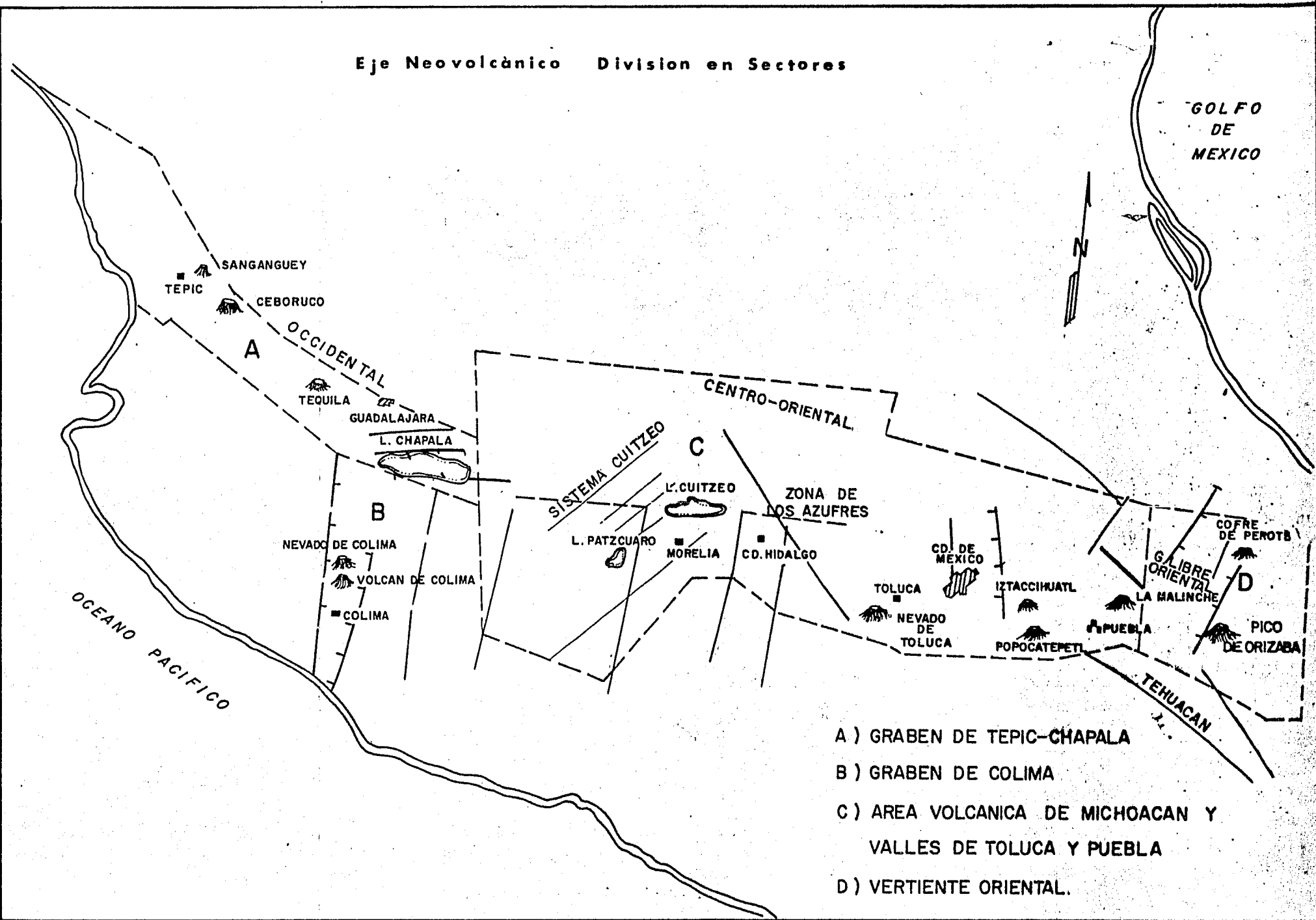


FIGURA II-3

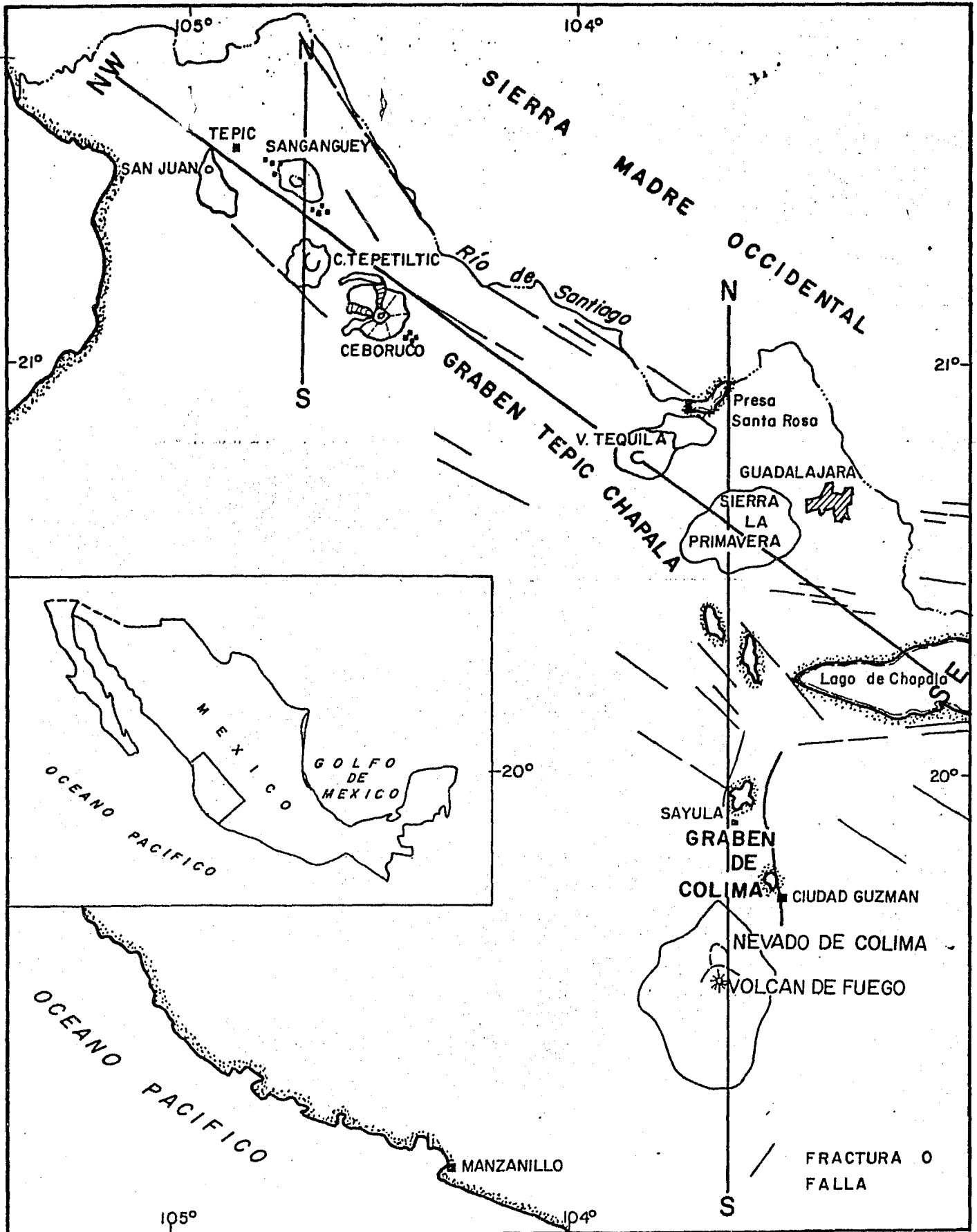


FIGURA II-4

cán; este graben por sus características tectonoestructurales se manifiesta como el límite del Eje Neovolcánico y presenta actividad volcánica reciente manifiesta en la Caldera de Los Humeros y Las Derrumbadas, Puebla (Figura II-3).

La actividad tectónica y la evolución geodinámica del sector Centro-Oriental está íntimamente relacionada con la subducción de la "Placa de Cocos" bajo la Placa Americana, que se hunde de forma oblicua con una dirección N-60°-70°E, correspondiendo con la dirección regional de compresión máxima (Figura II-2).

Los sistemas geotérmicos en el Eje Neovolcánico dadas sus características litológicas y estructurales corresponden a: Convección hidrotermal y de roca seca caliente. Los sistemas mixtos se originan cuando se manifiestan reactivaciones en las evoluciones magmáticas propiciando un autosellamiento y por lo tanto un transporte más activo de calor por conducción.

Sistemas geotérmicos similares a los existentes en el Eje Neovolcánico son los que aportan el 80% de la producción geotermoelectrica mundial, lo que es indicativo de la importancia que reviste su exploración y explotación.

II.2 ZONA GEOTÉRMICA DE LOS AZUFRES

La zona geotérmica de Los Azufres, se localiza en el sector Centro-Oriental del Eje Neovolcánico en el Estado de Michoacán, entre las coordenadas geográficas 19°52'-19°43' de Latitud Norte y 100°36'30"-100°45'20" de Longitud Oeste, en una superficie apro

ximada de 210 Km² (Figura II-5).

El ambiente estructural y geodinámico de la zona está relacionado con los efectos de la subducción de la Placa de Cocos y la dirección regional de compresión máxima. Los alineamientos estructurales más importantes para los fines geotérmicos, son los E-W que dan origen a un fracturamiento local muy intenso, que propicia el ascenso magmático y la comunicación de los acuíferos superficiales con la fuente de calor.

En la figura I-1, se muestra conceptualmente el resultado de las actividades volcánicas, que fueron propiciadas por las condiciones estructurales en la zona, resultando un sistema hidrotermal convectivo muy importante dadas sus condiciones litológicas y la amplitud del sistema.

Las manifestaciones hidrotermales están vinculadas con el sistema estructural E-W, coincidiendo con ellas los yacimientos de caolín, que son un renglón económico muy importante en la zona, ya que su volumen y calidad permiten una explotación de relevancia.

Se realizó una síntesis geológica con el objeto de contar con un modelo para la interpretación cualitativa y cuantitativa de los estudios geofísicos; para obtenerla se analizaron los siguientes planos y datos:

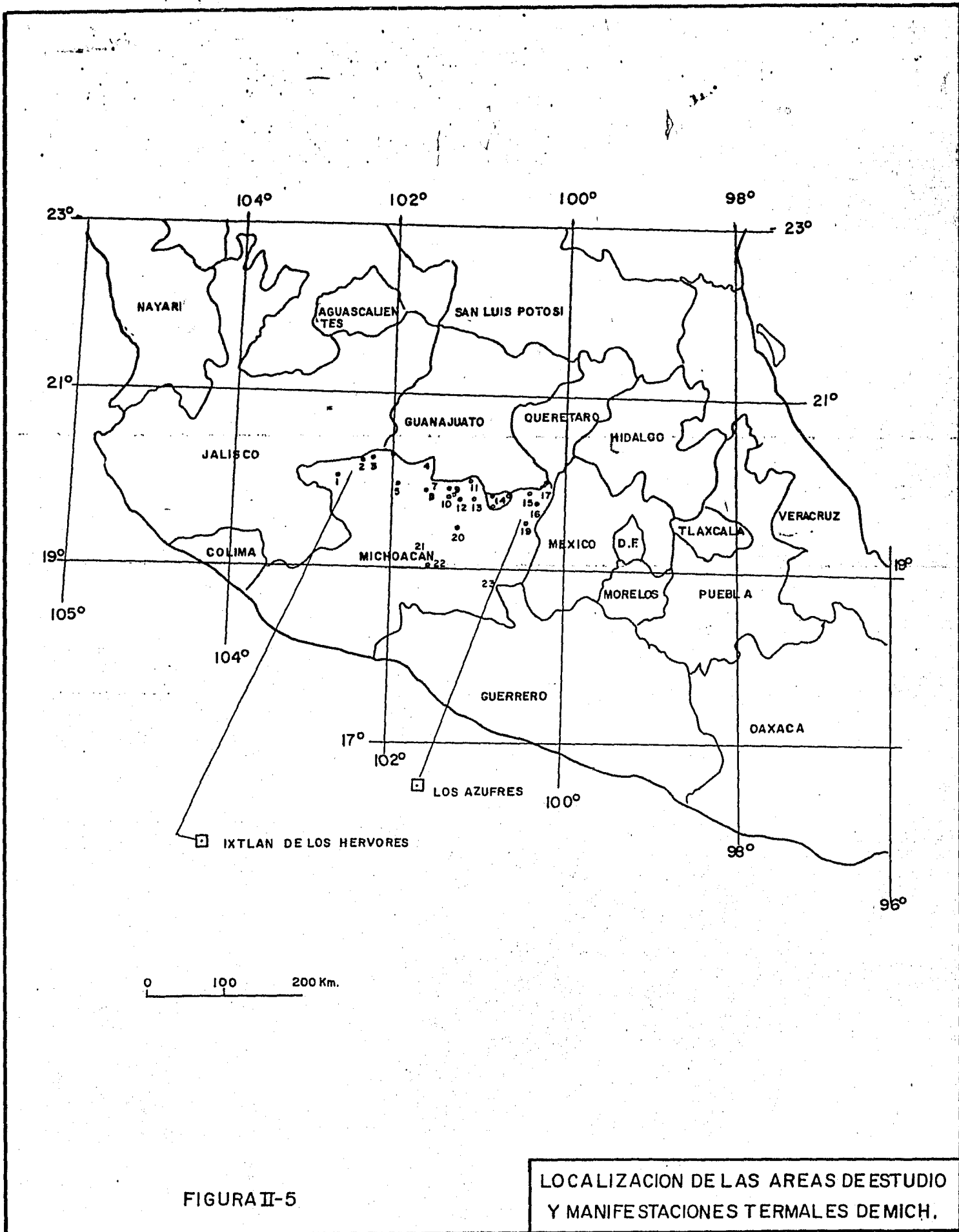


FIGURA II-5

LOCALIZACION DE LAS AREAS DE ESTUDIO Y MANIFESTACIONES TERMALES DE MICH.

MANIFESTACIONES TERMALES DEL ESTADO DE MICHOACÁN

1. Los Negritos y Pajacuarán.
2. Ixtlán de Los Hervores y El Salitre.
3. Yurécuaro.
4. La Piedad.
5. Tirimacuaro.
6. Isaac Arriaga.
7. Puruándiro, Jeroché y Baño El Salitre.
8. Baño Caliente y Sipancuaro.
9. Huandacareo y La Estancia.
10. Las Arenas, San Sebastián y El Salitre.
11. San Agustín del Pulque.
12. San Agustín del Maíz, Copandaro y Nispo.
13. San Juan Tararameo y El Pantano.
14. Araró, Atzimba, Taimeo, Estación Queréndaro, Coro, Belisario Domínguez, La Mina, Sacapendo, Pedregal Queréndaro, La Herradura e Indaparapeo.
15. Los Azufres, Laguna Loa Azufres, Pozo Maritaro, San Alejo, - San Pedro, Los Ajolotes, Agua Fría, Currutaco, Pozo Hediondo, Tejamaniles, Puenteceillas, El Chino 1°, El Chino 2°, El Chino 3°, El Nopalito 1°, El Nopalito 2°, El Nopalito 3°, Espinazo del Diablo, El Chiflador y El Cerro del Gallo.
16. La Luz.
17. Buena Vista y Tepetongo.
18. San Lorenzo y La Rosa.
19. San José Purua.
20. Cointzio.

21. La Huacana.
22. Jorullo.
23. Huetamo de Núñez y Cahuaro.

NOTA: Se consideran manifestaciones termales aquellos manantiales de temperaturas mayores de 30°C.

FIGURA II-5
(Complemento)

Fotogeológico Regional.

Tectónico Regional.

Geológico Regional.

Geológico de Detalle.

Dataciones de Núcleos de Pozos.

Petrografía y Mineralogía Óptica y Descriptiva de las Muestras de los Recortes de Perforación y Núcleos.

Datos Paleomagnéticos de Rocas Superficiales.

Dataciones de Rocas Superficiales.

Gran cantidad de resultados se presentan en la Tabla II-1 -- que muestra: La relación de dataciones, columna litológica, ubicación cronológica de los eventos volcánicos y una interpretación preliminar. De esta tabla se deduce inicialmente: Que hay una ausencia local de eventos volcánicos, que están presentes en el Eje Neovolcánico, existiendo la posibilidad de encontrarlos a profundidad; otra deducción es para la roca interpretada como basamento, posiblemente de origen o producto de la Sierra Madre Occidental y necesita estar más fundamentada para poder confirmar su origen y clasificación.

El plano de recopilación geológica (Figura II-6) muestra la distribución de los eventos magmáticos y sirvió como modelo base para la interpretación de los sondeos eléctricos verticales y la magnetometría.

Para este estudio, las rocas volcánicas que se consideran -- más importantes para la interpretación geofísica son las siguientes:

10 ⁶ Años	GEOLÓGICA	LITOLÓGICA	DESCRIPCIÓN	EDAD K/ar(años)	PALEOMAGNETICA	AZUFRES	DESCRIPCIÓN	UTILIZADA	INTERPRETACION					
1 1.5 2 4 6 8 10	CUATERNARIO TERCIARIO CENOZOICO TERCIARIO	Gel Qlp Qpr Qpd Qpdb Qpfi	Aluvias Lavas y piroclasticas Tobas y arenas pumiticas Riolito "Yerbabuena" Dacita "Sn Andres" Dibases Riolito "Agua Fria"	 0.36 x 10 ⁶ ± 0.1 (1) 1.0 x 10 ⁶ ± 0.4 1.2 x 10 ⁶ ± 0.4	 0.72 0.89 0.84	BRUNHES JARAMILLO	① M2 A	N Brunhes N Met Jeremillo	Tobas Riolitos Dacitas Sn. Andres Orf Riolito Fluidal	Qvc - Qd Qlp - Qrv Qdp Qrv { 1.29 ± 0.4 } { 1.42 ± 0.48 } { Orf	EJE NEOVOLCANICO			
			GILSA OLDUVAI REUNION "X"											
			KAENA MAMMOTH						G3				HIATUS DISCORDANCIA CRONOLOGICA (?)	
			COCHITI NUNIVAK SIDUFJALL						G4					
			Andesito "Rancho Viejo"	5.0 x 10 ⁶ ± 0.4						N	Andesitas	Tmsa	EJE NEOVOLCANICO	
			Andesitas Dacitas Tobas	(2) 5.9 x 10 ⁶ ± 0.6 (2) 5.9 x 10 ⁶ ± 0.6 (2) 5.9 x 10 ⁶ ± 0.6						N/R	Andesitas	Tmsa		
			Andesitas Basaltos Tobas	(2) 10.1 x 10 ⁶ ± 0.6 (2) 10.1 x 10 ⁶ ± 0.6 (2) 10.1 x 10 ⁶ ± 0.6						N/R	Andesitas	Tmsa	SIERRA MADRE OCCIDENTAL (?) BASAMENTO	

FUENTES

*** Gutierrez Negrin - A Lopez M HF-64-82 C FE.
 *** Gutierrez Negrin - De Aumento F HF- 5-20 C FE.
 * In, Perlasca R. - Geología
 (1) Muestra del cono A-7 Norte T-11
 U: Muestras de cono y nucleos de basos
 (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10) (11) (12) (13) (14) (15) (16) (17) (18) (19) (20) (21) (22) (23) (24) (25) (26) (27) (28) (29) (30) (31) (32) (33) (34) (35) (36) (37) (38) (39) (40) (41) (42) (43) (44) (45) (46) (47) (48) (49) (50) (51) (52) (53) (54) (55) (56) (57) (58) (59) (60) (61) (62) (63) (64) (65) (66) (67) (68) (69) (70) (71) (72) (73) (74) (75) (76) (77) (78) (79) (80) (81) (82) (83) (84) (85) (86) (87) (88) (89) (90) (91) (92) (93) (94) (95) (96) (97) (98) (99) (100)

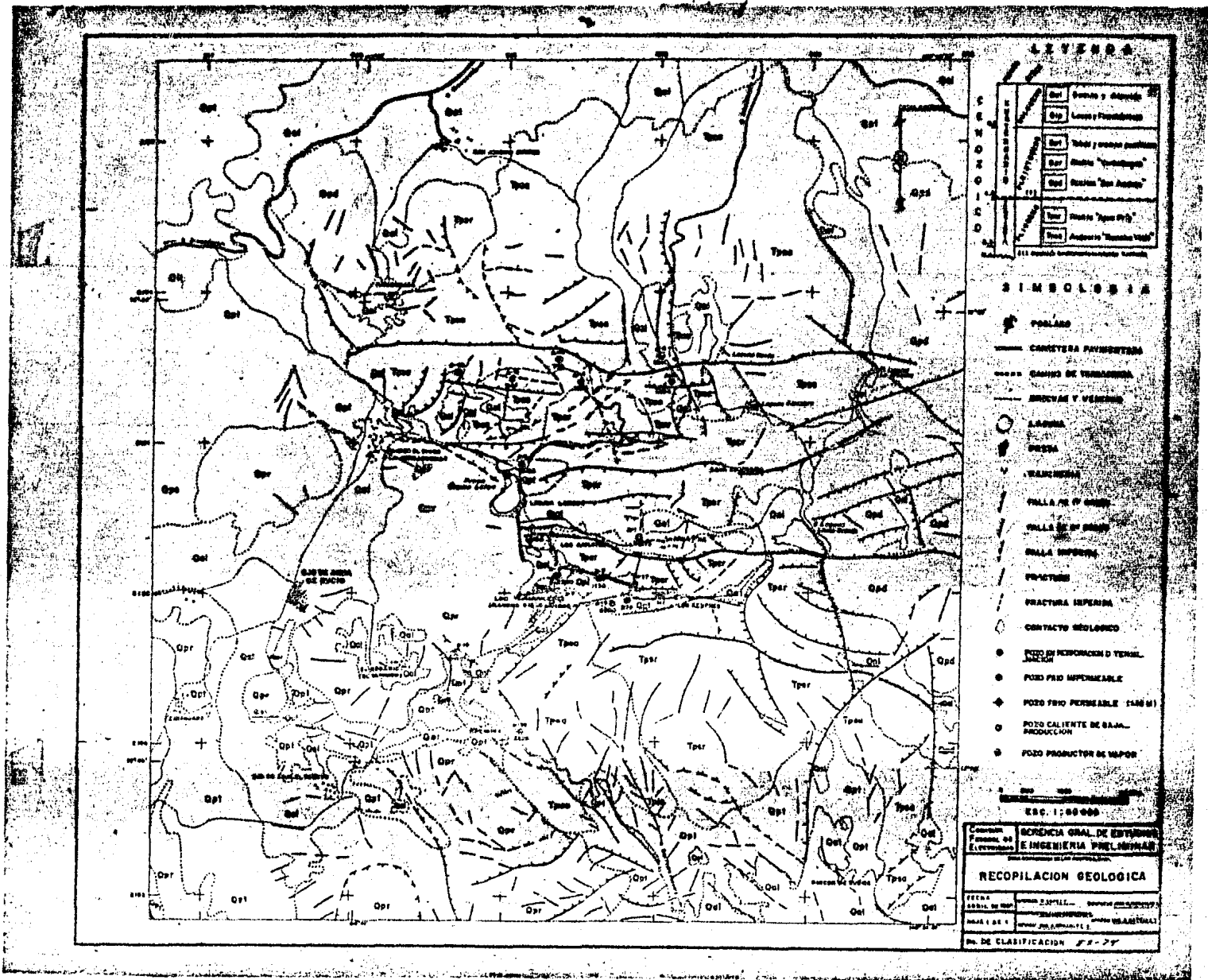
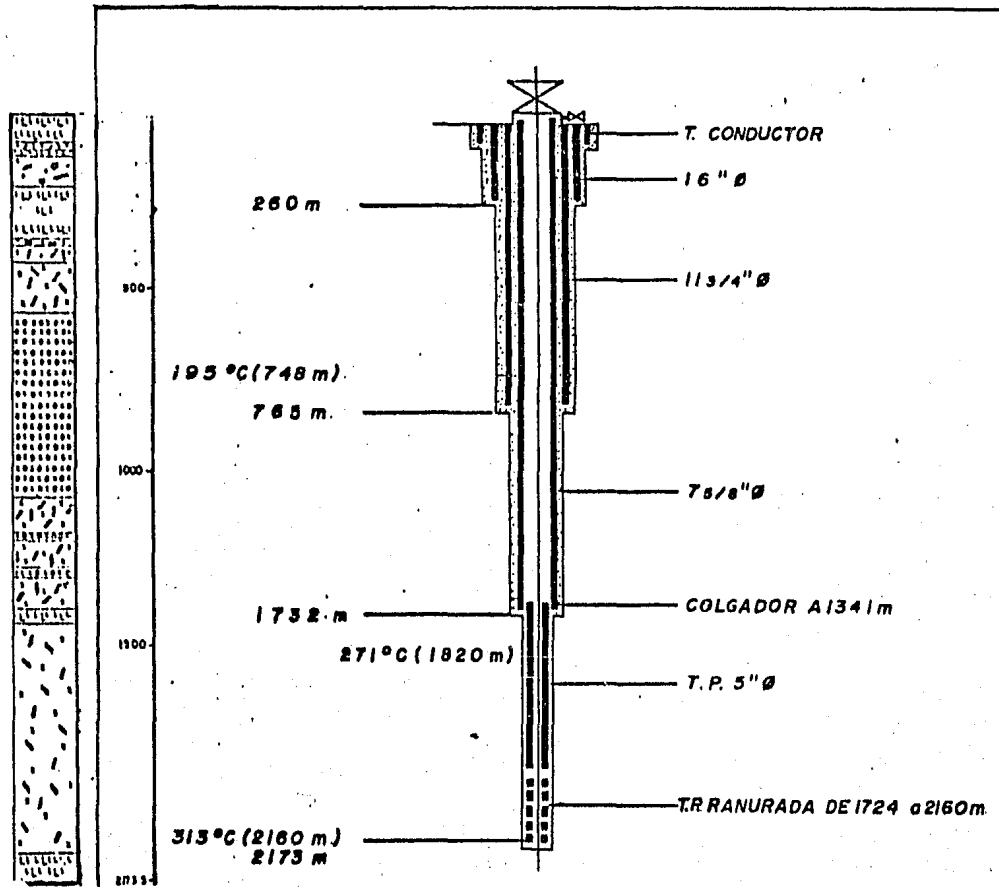


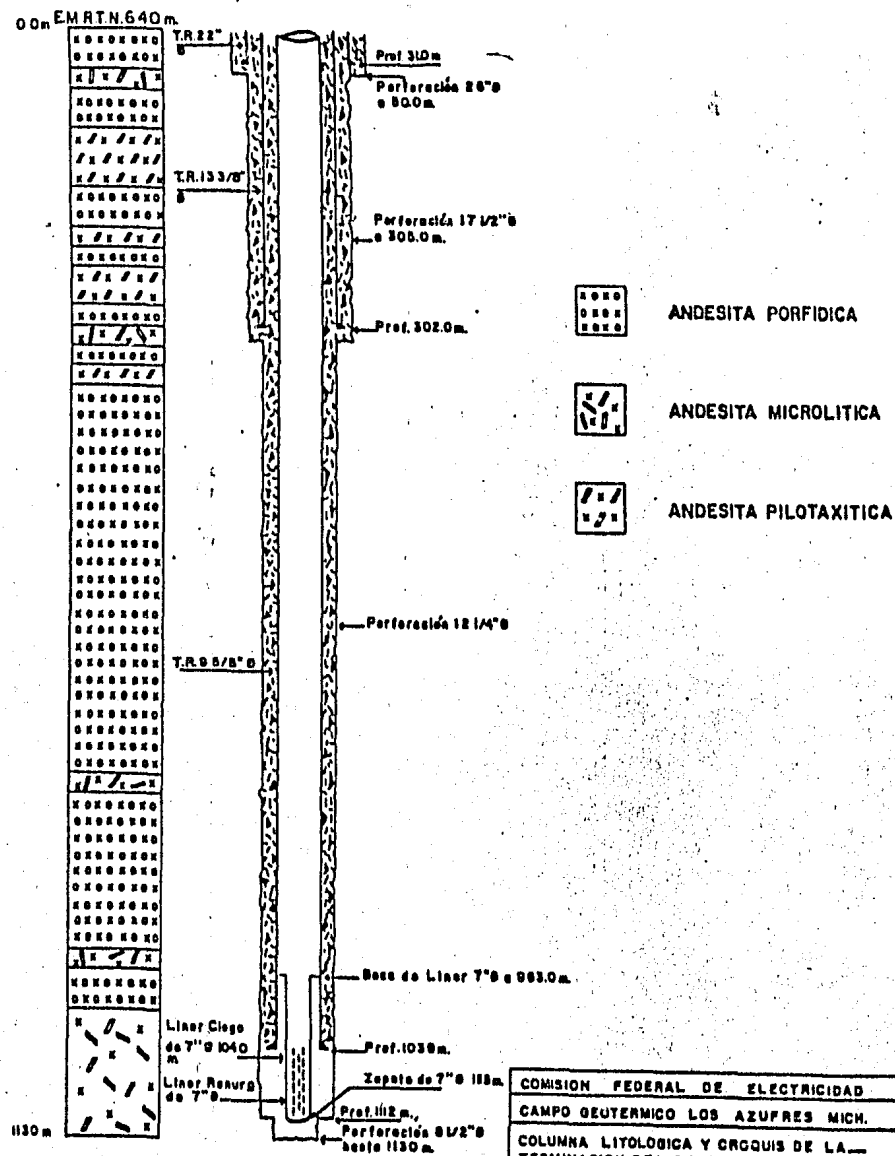
FIGURA II-6

- a). Andesitas "Rancho Viejo" (Tpsa).- Es la roca más antigua encontrada superficialmente, se presenta con variaciones importantes, de sana a totalmente deleznable -- por alteración hidrotermal. Por su posición cronologica, podría ser identificada como la andesita microlítica o pilotaxítica de los reportes de terminación de pozos, pero dada la complejidad de los eventos andesíticos es muy complicada su interpretación. La zona productora de los pozos de exploración, se presenta con - alternancias de andesitas y riolitas fracturadas con - alto grado de alteración hidrotermal. Las andesitas - y riolitas muestran evidencias de autosellamiento y paleo-temperaturas de importancia (Croquis de termina---ción de pozos A-1, A-2, A-7, A-8, ver reportes de mineralogía Figuras II-7, 8, 9 y 10).
- b). La Riolita "Agua Fría" (Qpri).- Es una roca, en la -- que está reflejada la intensa actividad geotérmica y - estructural a la que ha estado expuesta la zona, la roca varía de sana a totalmente afectada por el hidrotermalismo y el autosellamiento.
- c). Los Domos Riolíticos o Riolitas "Yerbabuena" (Qpr).- - Es una roca con la característica principal de no es---tar afectadas por el tren estructural de fracturamien---to existente en la zona, sólo en los contactos con --- otras unidades se observa fracturada. Como conclusión, se piensa que estas emisiones riolíticas utilizaron co---



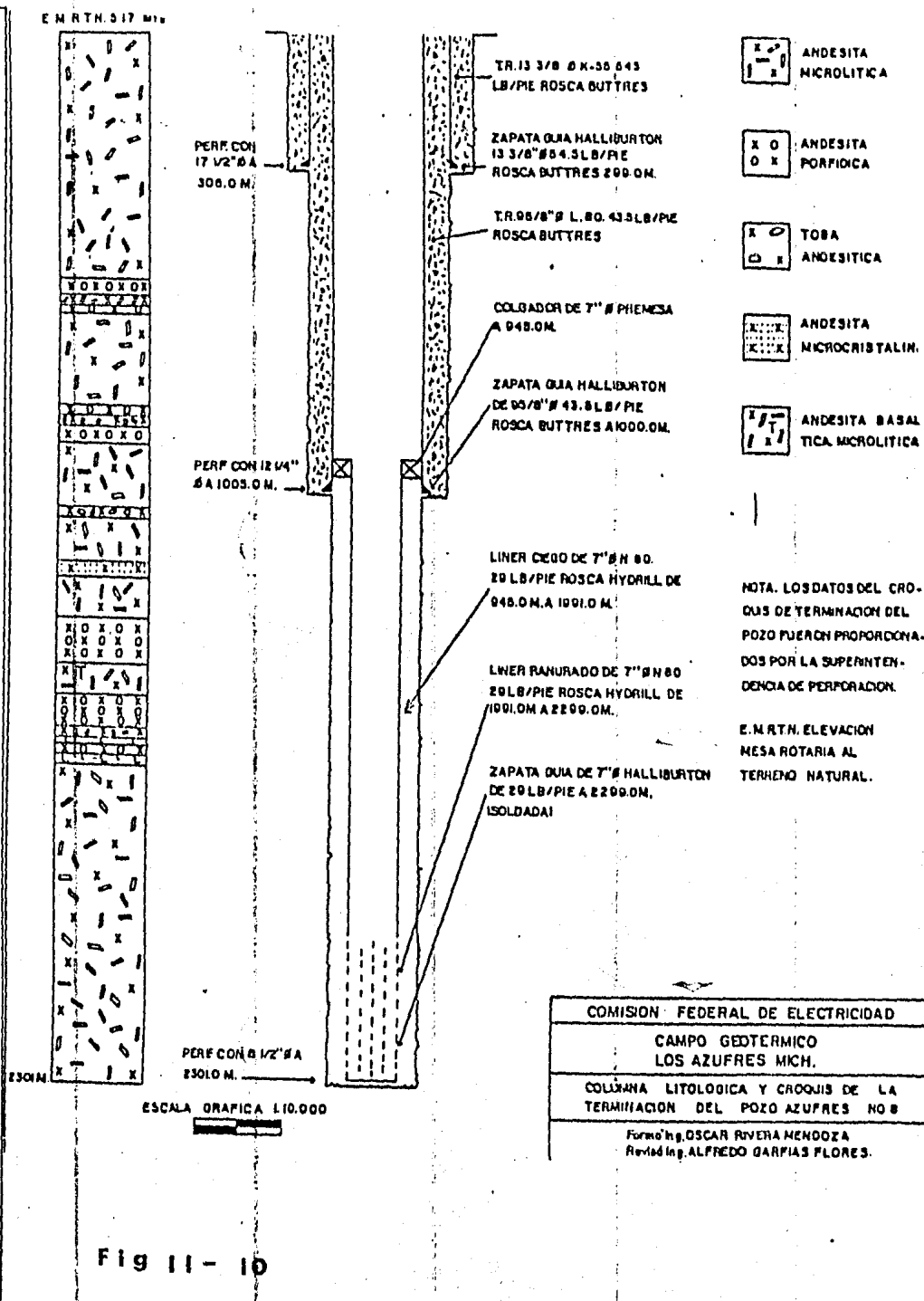
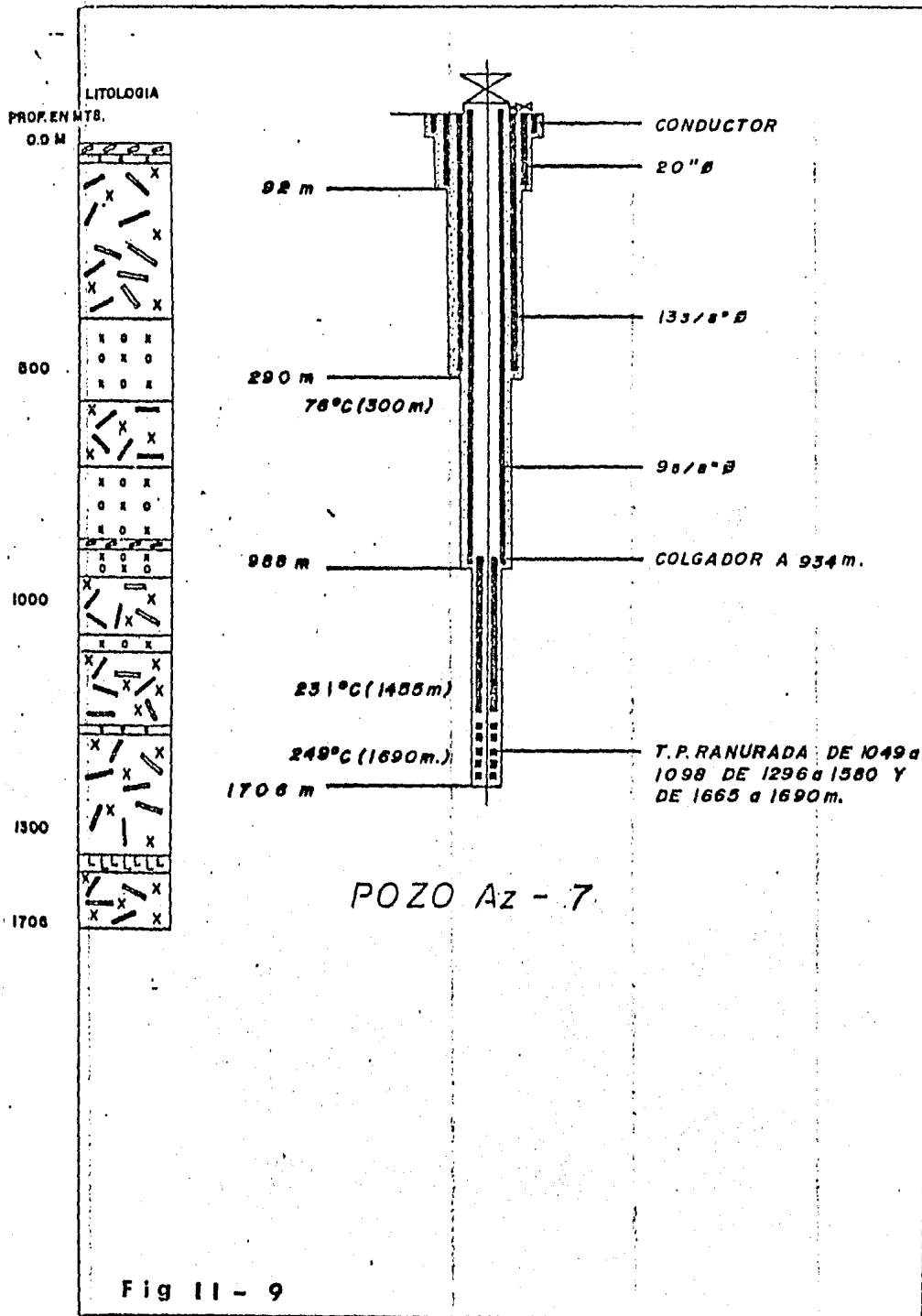
POZO Az-1



Fig 11-7



COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD	
CAMPO GEOTERMICO LOS AZUFRES MICH.	
COLUMNA LITOLOGICA Y CROCQUIS DE LA TERMINACION DEL POZO AZUFRES N° 2.	
Forma: Ing. A. Garfias P.	
Actualizado: Ing. O. Rivera M.	
MEXICOD.P.	Fecha original: Mayo de 1979
	Fecha actual: Noviembre de 1979

Fig 11-8



-  ANDESITA MICROLITICA
-  ANDESITA PORFIDICA
-  TOBA ANESITICA
-  ANDESITA MICROCRISTALINA
-  ANDESITA BASAL TICA MICROLITICA

NOTA. LOS DATOS DEL CROQUIS DE TERMINACION DEL POZO FUERON PROPORCIONADOS POR LA SUPERINTENDENCIA DE PERFORACION.

E.M.R.T.N. ELEVACION MESA ROTARIA AL TERRENO NATURAL.

COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
 CAMPO GEDTERMICO LOS AZUFRES MICH.
 COLUMNA LITOLOGICA Y CROQUIS DE LA TERMINACION DEL POZO AZUFRES NO 8
 Formó Ing. OSCAR RIVERA MENDOZA
 Revisó Ing. ALFREDO GARCIA FLORES.

mo conducto para su extrusión las zonas de debilidad - del sistema estructural NW-SE, pensándose también en - la posibilidad de que los conductos se hayan originado con un sistema estructural N-S que tiene poco reflejo superficial en el área de estudio.

En base a la información geológica se considera que la importancia geotérmica de la zona de Los Azufres está vinculada con un ambiente geológico propicio para la acumulación y entrapamiento de los fluidos hidrotermales. Sus características corresponden a un modelo hidrotermal convectivo cercano a la fuente de calor, -- que tiene comunicación con los acuíferos superficiales, por medio de fallas y fracturas, facilitando la recarga geohidrológica del yacimiento.

II.3 ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES

La zona geotérmica de Ixtlán de Los Hervores se localiza en el límite W del sector Centro-Oriental del Eje Neovolcánico, en los límites orientales del graben de Chapala en el Estado de Michoacán entre las coordenadas geográficas 20°06' y 20°15' de Latitud Norte y 102°20'-102°27' de Longitud Oeste, con una superficie aproximada de 150 Km² (Figura II-5).

El ambiente estructural y tectónico de esta zona está relacionado con los efectos de la subducción de la Placa de Cocos y a la transición de los efectos de frontera de los sectores occidental y centro oriental del Eje Neovolcánico Mexicano (Figura II-3).

Las estructuras más importantes de la zona de estudio son: Las fallas de Ixtlán-Encinal y la de Los Nogales, cuyos trazos superficiales son perpendiculares entre sí; la primera con rumbo general NW-SE y un echado aproximado de 80° hacia el SW y la del Encinal con rumbo NE-SW y echado al SE de aproximadamente 80° (Figura II-11). A la falla de Ixtlán-Encinal se le dan dos diferentes evoluciones, la primera de edad pliocénica por estar cortando los sedimentos lacustres del Plioceno Medio, aflorantes en el poblado de La Angostura y El Capulín, y a las rocas volcánicas del Pleistoceno Superior existentes en el Cerro San Cristóbal. La segunda evolución de la falla de Ixtlán es debida a el paralelismo que tienen los aparatos volcánicos recientes de edad Pleistocénica Media-Superior y son las últimas efusiones volcánicas de la zona originada por una posible reactivación de la falla.

Resumiento, se puede indicar que en la zona de estudio, existen tres direcciones estructurales principales: a) Las originadas por el Graben de Chapala, b) Las del Plioceno Medio-Superior y c) Las relacionadas con el Pleistoceno Medio Superior; siendo estas últimas las que probablemente conducen y entrapan el fluido hidrotermal.

En el plano geológico (Figura II-11), se muestran los diferentes eventos volcánicos, así como su cronología y las principales estructuras existentes en la zona. Los barrenos hechos en esta porción del Graben de Chapala nos permite observar las secuencias volcánicas que tienen intercalaciones de lodolitas, deducién

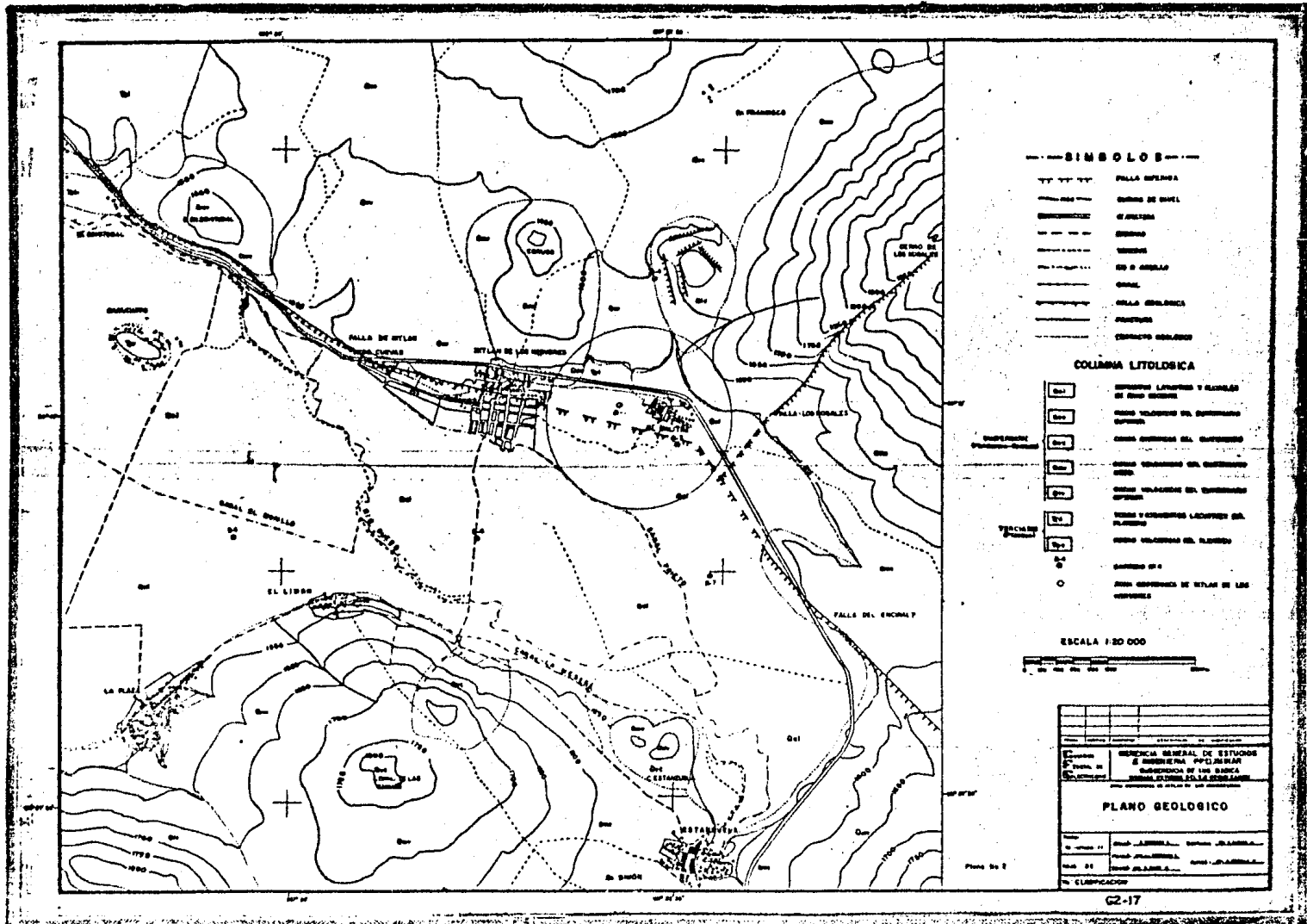


FIGURA II-11

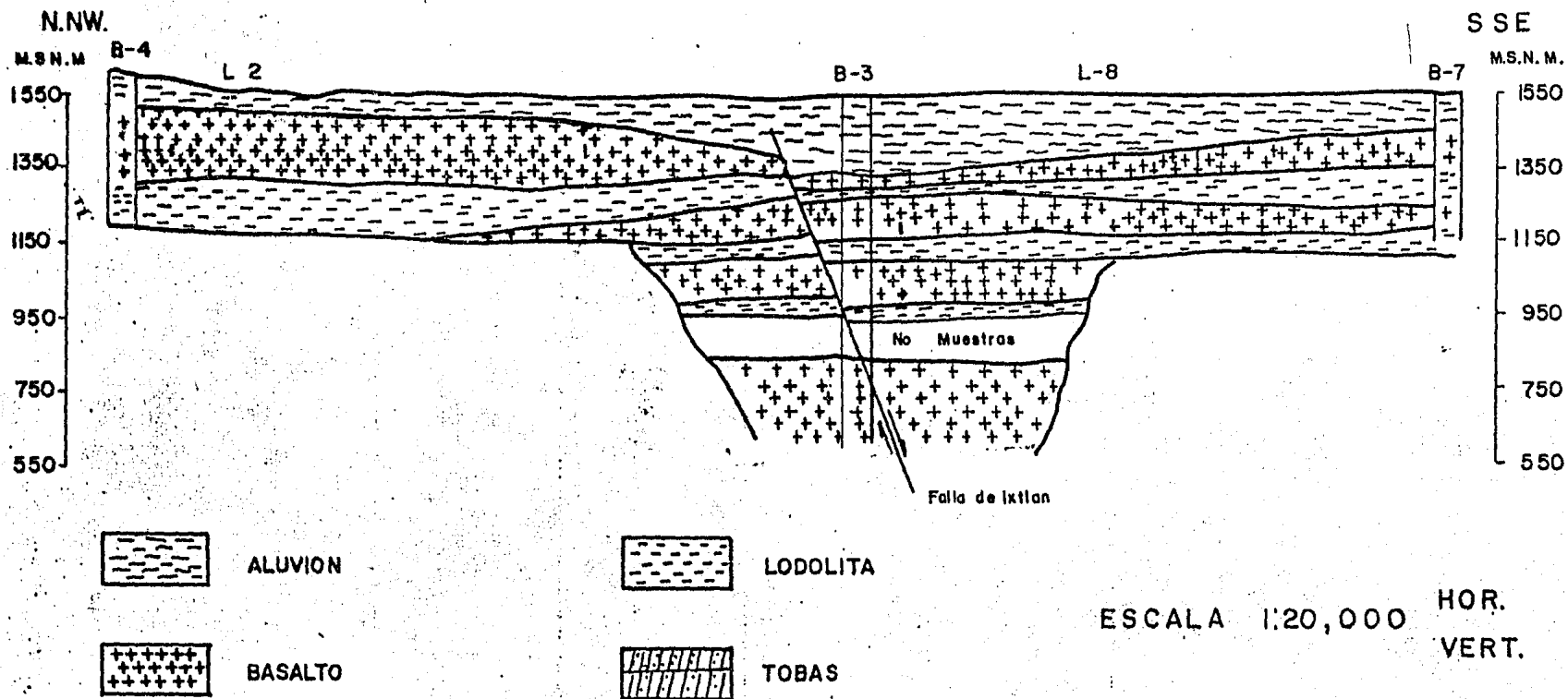
dose que ocurrieron emisiones intermitentes de productos volcánicos, ignorándose la ubicación y origen de los focos emisores (Figura II-12).

La actividad volcánica más reciente tiene rasgos bien definidos en sus coladas y sus aparatos volcánicos muestran cierta alineación paralela a la falla de Ixtlán-Encinal. Las otras actividades presentan características de un vulcanismo más antiguo, por la posición que guardan unas con respecto de las otras y su morfología general, se les dá la siguiente clasificación geocronológica:

	Qal	Depósitos lacustres y aluviales
Cuaternario (Pleistoceno-Reciente)	Qsv	Rocas volcánicas del Cuaternario Superior.
	Qvc	Conos cineríticos.
	Qpv	Rocas volcánicas del Cuaternario Medio.
Terciario (Plioceno)	Qiv	Rocas volcánicas del Cuaternario Inferior.
	Tpl	Tobas y sedimentos lacustres.
	Tpv	Rocas volcánicas del Plioceno.

Las manifestaciones geotérmicas están íntimamente ligadas a la falla de Ixtlán-Encinal y se observan como hervideros y pequeños volcanes de lodo con temperaturas medias de 80°C; se ubican a lo largo de la falla paralelamente a la carretera Zamora-La Barca, entre el Km 26 al 28½ aproximadamente. Las aguas subterráneas

ZONA GEOTERMICA DE IXTLAN DE LOS HERVORES, MICH.
 SECCION GEOLOGICA APOYADA
 EN LOS BARRENOS 4-3-7



- L-2 Cruce del perfil magnetométrico No 2
- B-4 Barreno No 4
- /// Falla geológica
- Corte litológico del barreno fuera de Escala

Formó: Ing. J.L. Guerrero G.

Fig 11-12

neas que son fuente de aprovisionamiento de los poblados de Ixtlán y El Salitre, tienen temperaturas medias de 50°C , estimándose un volumen extraído por ese concepto, de $109 \times 10^6 \text{ m}^3$ en un lapso de 20 años y se podría interpretar como un aporte continuo de recarga al acuífero que es calentado por la fuente de calor.

La importancia geotérmica de la zona de Ixtlán de Los Hervores está fundamentada en los sistemas estructurales descritos y en una amplitud mucho mayor a la observada en el plano geológico, ya que se tienen manifestaciones termales en los poblados de El Limón y La Plaza y a lo largo de la Sierra de Pajacuarán hasta Los Negritos, todas ellas de la misma familia geoquímica de aguas y por tal del mismo origen geotérmico.

El sistema geotérmico en estudio sería el hidrotermal convectivo de líquido dominante con alta entalpía, suficiente para la generación geotermoeléctrica convencional.

II.3.1 OROGRAFÍA E HIDROGRAFÍA

El relieve topográfico del área de estudio es mixto, plano y accidentado; las partes bajas y planas corresponden al extremo oriental de la Ciénega de Chapala, con una altura promedio de 1,525 msnm. Las partes altas corresponden a los sistemas orográficos de la Sierra de Pajacuarán, de rumbo general E-W con una altura máxima de 2,310 msnm y a la Sierra del Encinal de rumbo general N-S con una altura máxima de 2,210 msnm.

Los principales cerros que se localizan en el área de estudio son: Cerro de Los Nogales, con 2,020 msnm localizado al NE de Ixtlán y el Cerro de Las Chivas con 1,810 msnm al Sur. Otros cerros de menor prominencia como el de Camucuat, Estanzuela, San Cristóbal y El Coruco, circundan el área y se les considera aparatos volcánicos independientes, ligados al tectonismo regional del que se deriva el Graben de Chapala.

La hidrografía de las sierras que circundan el área de estudio, muestra que existe distribución y reparto de las aguas de arroyada; ésto permite clasificarla como una zona de infiltración que alimenta a las aguas subterráneas que se acumulan en las alternancias de lodolitas y basaltos de la Ciénega, que constituyen una fuente importante de recarga.

El extremo oriental de la Ciénega de Chapala es drenado por el Río Duero, que muestra haber tenido diferentes cauces, pero siempre con la tendencia de fluir hacia el NW, constituye la corriente principal de un área de captación de aproximadamente 4,000 Km².

En conclusión, el área de estudio reúne condiciones estructurales y orográficas favorables de captación y transmisión de aguas subterráneas.

CAPITULO III

CAPITULO III

- III. PROSPECCION MEDIANTE EL SONDEO ELECTRICO VERTICAL
- III.1 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS
- III.2 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA RESISTIVIDAD DEL AGUA
- III.3 RESISTIVIDAD DEL SISTEMA ROCA-FLUIDO EN MEDIOS POROSOS
- III.4 ANÁLISIS DE LA RESISTIVIDAD DEL SISTEMA ROCA-FLUIDO EN MEDIOS FRACTURADOS
- III.5 LOS AZUFRES, MICH., ESTUDIOS REALIZADOS ----- (1976-1980)
- III.6 PLANOS DE RECOPIACIÓN GEOELÉCTRICA
 - : ANÁLISIS CUALITATIVO DE LA INFORMACIÓN GEOELÉCTRICA
 - : AGRUPACIÓN DE ANOMALÍAS GEOELÉCTRICAS
 - : ANÁLISIS CUANTITATIVO

LISTA DE FIGURAS

- III-1 SECCIÓN Y PLANTA DE LAS LÍNEAS EQUIPOTENCIALES
- III-2 DISPOSITIVO DEL SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL ----- SCHLUMBERGER PARA UNA LECTURA DE LA CURVA DE SONDEO
- III-3 DISPERSIÓN DE LA CORRIENTE POR EL EFECTO DE LA PRESENCIA DE UNA CAPA DE MAYOR RESISTIVIDAD
- III-4 MONOGRAMA DEL FACTOR DE FORMACIÓN F, POROSIDAD \emptyset Y EL FACTOR DE CONSOLIDACIÓN M

- III-5 MONOGRAMA (2) QUE RELACIONA LA RESISTIVIDAD, EL FACTOR DE FORMACIÓN, LA SALMUERA EQUIVALENTE Y LA TEMPERATURA SE MUESTRA UN EJEMPLO DE CÁLCULO PARA LA ZONA GEOTÉRMICA DE LOS AZUFRES.
- III-6 MODELOS DE FRACTURAMIENTO EN ROCAS CON FLUJOS NORMALES A SUS CARAS
- III-7 PERFIL REGIONAL 1976
- III-8 LOCALIZACIÓN DE SONDEOS Y PERFILES ELÉCTRICOS EN LOS AZUFRES, MICH.
- III-9 CONFIGURACIÓN ISORRESISTIVA $AB/2 = 1\ 000\ M$ (1976)
- III-10 LOCALIZACIÓN TOPOGRÁFICA DE LOS POZOS Y --- ÁGRUPACIÓN DE ANOMALÍAS GEOELÉCTRICAS (1985)
- III-11 AREA EL CARRIZO; INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL
- III-12 ISORRESISTIVIDADES APARENTES $AB/2 = 500\ M$
- III-13 ISORRESISTIVIDADES APARENTES $AB/2 = 1\ 000\ M$
- III-14 ISORRESISTIVIDADES APARENTES $AB/2 = 1\ 500\ M$
- III-15 ISORRESISTIVIDADES APARENTES $AB/2 = 2\ 000\ M$
- III-16 ISORRESISTIVIDADES APARENTES $AB/2 = 2\ 500\ M$
- III-17 ISORRESISTIVIDADES APARENTES $AB/2 = 3\ 000\ M$
- III-18 PERFILES DE RESISTIVIDAD APARENTE 1-1', 2-2', 3-3', 4-4', 5-5' Y 6-6'.
- III-19 PERFILES DE RESISTIVIDAD APARENTE 7-7', 8-8', 9-9' Y 10-10'.
- III-20 PERFILES DE RESISTIVIDAD APARENTE 11-11', - 12-12', 13-13' Y 14-14'.
- III-21 AGRUPACIÓN DE ANOMALÍAS GEOELÉCTRICAS 10 OHMS-M Y MENOS

III-22 AGRUPACIÓN DE ANOMALÍAS GEOELÉCTRICAS 20 OHMS-M
Y MENOS

III-23 CONDUCTANCIA LONGITUDINAL

III-24 RESISTIVIDADES DEL CONDUCTIVO

III-25 PROFUNDIDAD A LA CIMA DEL CONDUCTIVO

III-26 SECCIONES ELECTROESTRATIGRÁFICAS 1-1', 2-2', 3-3',
4-4', 5-5' Y 6-6'.

III-27 SECCIONES ELECTROESTRATIGRÁFICAS 7-7', 8-8', 9-9'
Y 10-10'.

III-28 SECCIONES ELECTROESTRATIGRÁFICAS 11-11', 12-12',-
13-13' Y 14-14'.

III PROSPECCION MEDIANTE EL SONDEO ELECTRICO VERTICAL

El método del sondeo eléctrico vertical está basado en el principio de las superficies o líneas equipotenciales y proporciona medidas cuantitativas de las propiedades eléctricas y conductoras del subsuelo. La aplicación de esta técnica en la exploración de los recursos geotérmicos es para detectar las resistividades anómalas que sobresalen del contorno regional.

La obtención de los datos de un sondeo, se basa en medir -- gradientes de potencial en la superficie a la intensidad de corriente inducida. Los aspectos litológicos y estructurales influyen en la relación entre la corriente inducida y la caída de potencial leída, por lo que las técnicas de interpretación son de tipo cualitativo y cuantitativo, siendo las dos muy importantes para determinar la influencia de los efectos geotermales y el modelo geoelectrico que represente las condiciones geológico-estructurales del subsuelo.

Las siguientes figuras (III-1, 2 y 3) muestran el principio del sondeo, el dispositivo y los efectos de dispersión de corriente por la presencia de una capa de mayor resistividad, lo anterior es concerniente al principio y a la aplicación del sondeo eléctrico vertical Schlumberger, para la exploración en zonas geotérmicas.

Durante un estudio geofísico mediante el SEV en zonas geotérmicas, es necesario analizar los factores involucrados en la

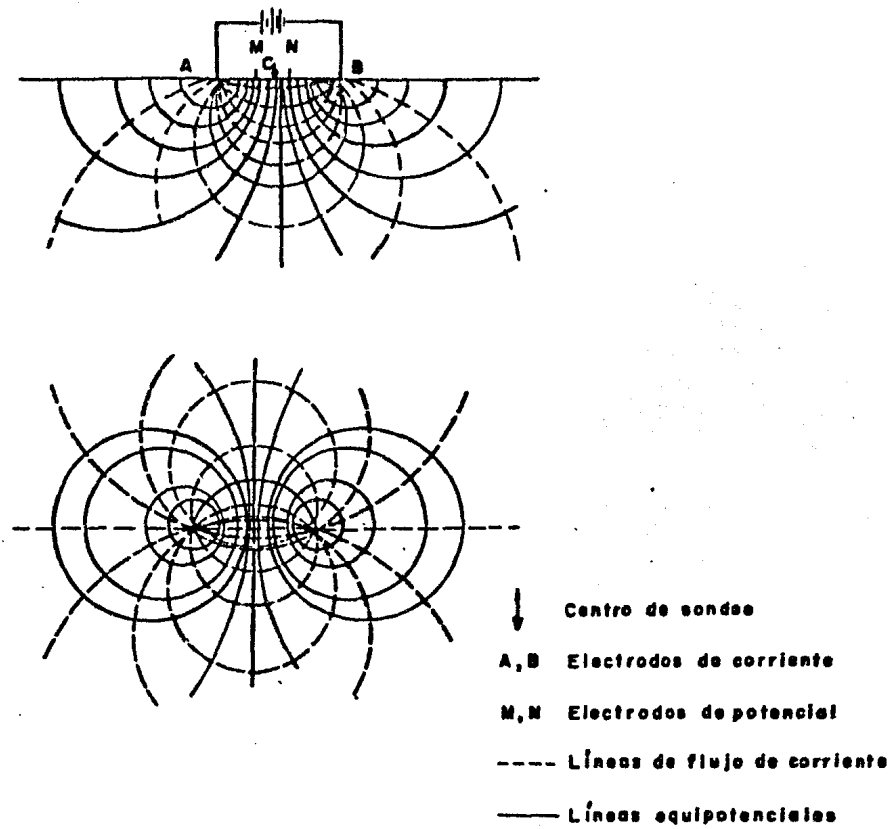


Figura III-1 Sección y planta de las líneas de corriente y equipotenciales

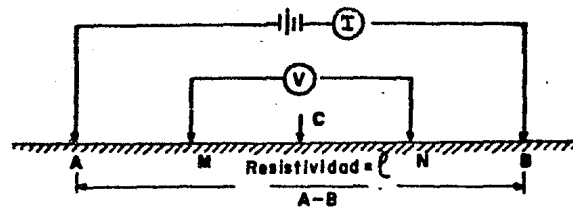


Figura III-2 Dispositivo del sondeo eléctrico vertical Schlumberger para una lectura de la curva de sondeo.

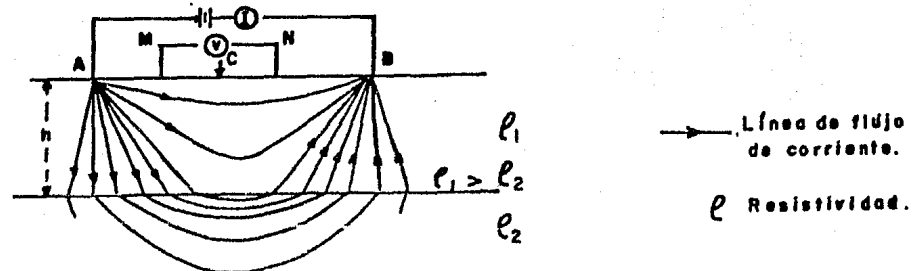


Figura III-3 Dispersión de la corriente por el efecto de la presencia de una capa de mayor resistividad.

resistividad del subsuelo y el contraste de la zona importante - con el medio que lo rodea, para asociar los resultados con el am biente geológico y los efectos hidrotermales o geotérmicos.

La resistividad del sistema roca-fluido hidrotermal, se pue de analizar agrupando los fctores que intervienen en su medición de la siguiente forma:

Factores que intervienen en la resistividad de las rocas.

Factores que intervienen en la resistividad del agua.

Resistividad del sistema roca-fluido en medios porosos y -- fracturados.

III.1 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS

La resistividad de las rocas secas depende de su composi--- ción mineralógica, porosidad, geometría de los granos, textura, - arreglo cristalino y material cementante. Como no se pueden rea lizar mediciones por separado de cada propiedad, se han conjunta do en este inciso los datos reportados por diversos autores cen cernientes a la resistividad de las rocas (Orellana, S.E., 1972; Parkhomenko, E.I., 1967; Keller, et al., 1970).

La siguiente tabla muestra los valores típicos de resistivi dad para diferentes minerales, los rangos de variación son am--- plios y ésto es debido al grado de impurezas que pueden presen-- tar.

RESISTIVIDAD (ohms-m)

MINERAL	10^{-6} - 10^{-3}	10^{-3} - 1	1 - 10^{+3}	10^6 - 10^{15}
CALCOPIRITA	X			
BORNITA	X			
MAGNETITA	X			
PIRITA	X			
PIRROTITA	X			
COBALTINA		X		
GALENA		X		
ILMENITA		X		
MANGANITA		X		
MARCASITA		X		
CUPRITA			X	
PIROLUSITA			X	
RUTILO			X	
TETRAEDRITA			X	
URANITA			X	
DIELECTRICOS	-----			
AZUFRE				X
CALCITA				X
CUARZO				X
FELDESPATOS				X
MICAS				X
PETROLEO				X
MARMOL				X

TABLA III-1 RESISTIVIDADES DE MINERALES

La resistividad de las rocas tienen un gran margen de variación, dependiente del contenido de minerales y arreglo granular.

La siguiente tabla III-2 muestra el orden de los valores de resistividad medidos en laboratorio a condiciones estandar para diferentes tipos de rocas. También muestra el porcentaje de variación con respecto a un incremento de presión de 1 000 Kg/cm². Estos datos fueron recopilados de Dobrin, 1961; Parkhomenko, --- 1967; Zohdy, 1973 y Keller, 1975.

R O C A	RESISTIVIDAD (Ohms-m)	PRESION Kg/cm ²	VARIACION (%)
GRANITO	$3.0 \times 10^{7\pm 1}$	10^3	22
DIORITA	$2 \times 10^{5\pm 1}$	10^3	22
GABRO	$10^4 - 1.4 \times 10^6$	10^3	22
DIABASA	$10^4 - 3 \times 10^6$	10^3	23
BASALTO	$2.5 \times 10^{5\pm 1}$	10^3	22
PERIDOTITA	$2.4 \times 10^{5\pm 1}$	10^3	42
PIZARRA	$6 \times 10^{4\pm 1}$	10^3	33
ARENISCA	$10^5 - 1.9 \times 10^7$	10^3	48
LUTITA	$10^6 - 2.45 \times 10^7$	10^3	67

TABLA III-2 RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS

El factor temperatura fue analizado para diferentes tipos de rocas y las expresiones de Jost, 1934; Bullard, 1939 y Bullen, 1940, fueron estudiadas para llegar a la fórmula empírica que -- permite calcular la conductividad de una roca con respecto a las variaciones de temperatura (Coster, 1946; Keller, 1975). Es una función exponencial que muestra los incrementos de la conductividad con la temperatura donde la variación se considera como una

propiedad intrínseca de cada roca, ésta a su vez depende del tipo de cristalización y contenido de minerales. Su aplicación es tá restringida a temperaturas mínimas de 300°C.

$$\sigma = A_1 e^{-V_1/kt} + A_2 e^{-V_2/kt} \quad - - \text{III-1}$$

donde:

σ = Conductividad (Mho-cm⁻¹)

ρ = 1/ resistividad (Ohms-m)

t = Temperatura absoluta (°k)

A_1, A_2 = Constantes determinadas por el número de iones disponibles de conducción.

V_1, V_2 = La energía de activación requerida para liberar los --- iones.

$k = 13.8 \times 10^{-21}$ (Joules/°k) constante de Boltzmann.

eV = 1602×10^{-19} (Joules) Electrón Volt.

La siguiente tabla muestra los valores de las constantes para diferentes tipos de roca, estos valores pueden ser tomados para evaluar rocas similares, siempre y cuando, tengan una similitud aproximada en composición.

R O C A	A_1 (Mho.cm ⁻¹)	V_1 (e.V)	A_2 (Mho.cm ⁻¹)	V_2 (e.V)
GRANITO 1	5×10^{-4}	0.62	10^5	2.5
GRANITO 2	4.5×10^{-4}	0.62	10^5	2.5
GABRO	7×10^{-3}	0.70	10^5	2.2
BASALTO	7×10^{-3}	0.57	10^5	2.0
PERIDOTITA	4×10^{-2}	0.81	10^5	2.3
ANDESITA	6×10^{-3}	0.70	10^5	1.6
GNEISS	10^{-2}	0.96	--	---

TABLA III-3 VALORES DE A_1, A_2, V_1 Y V_2 PARA DIFERENTES

El análisis mineralógico de las rocas que intervinieron en la determinación de A_1 , A_2 , V_1 y V_2 es el siguiente:

GRANITO	80%	Feldespatos (ortoclasas y plagioclasa sódica)
	19%	Cuarzo
	0.5%	Biotita
	0.5%	Muscovita
GABRO	65%	Plagioclasa básica
	35%	Olivino (serpentina y magnetita incluidos - como parte del olivino).
GNEISS	80%	Cuarzo
	20%	Biotita y Muscovita.
PERIDOTITA	85%	Olivino
	8%	Serpentina y Magnetita
	7%	Plagioclasa y Hornblenda.
BASALTO	70%	Fenocristales de Plagioclasa básica y Olivino más Feldespato.
	30%	Olivino, Serpentina y Magnetita (matriz).

Nótese la ausencia de rocas sedimentarias por ser éstas las que tienen mayor variación en la definición de la conductividad.

Para ejemplificar el uso de la ecuación III-1, a continuación se analizan tres muestras de rocas volcánicas pliocuaternarias; de la zona geotérmica de Los Azufres, Mich., obteniéndose los resultados que muestran las variaciones de la resistividad -

por efecto de la temperatura y presión.

ROCA	COMPOSICION
ANDESITA (1) BASALTICA	50% Plagioclasa 30% Augita 12% Magnetita 8% Olivino
Localización:	Falla de Agua Ceniza.
DACITA (2) PORFIDICA	50% Cuarzo y Feldespatos Alcalinos 30% Plagioclasa 15% Hornblenda 5% Piroxenos
Localización:	100 m al N 40° E del pozo A-17.
RIOLITA (3) ESFERULITICA	96% Cuarzo y Feldespato Alcalinos 4% Plagioclasa Sódica.
Localización:	200 m al Sur del pozo A-6.

Las constantes de las rocas son tomadas de la Tabla III-3 - por la similitud en composición mineralógica (los datos de la mineralogía fueron proporcionados por el Ing. Viggiano del Laboratorio de Petrografía del Depto. de Exploración, CFE).

ROCA	A ₁	V ₁	A ₂	V ₂
(1) ANDESITA	6 x 10 ⁻³	0.7	10 ⁵	1.6
(2) DACITA	4.7 x 10 ⁻³	0.62	10 ⁵	2.5
(3) RIOLITA	8 x 10 ⁻²	0.96	--	---

Las temperaturas de cálculo seleccionadas para este yacimiento son:

300°C (que coinciden con las condiciones máximas de la zona de explotación del yacimiento).

500°C (como posible temperatura de la fuente).

APLICANDO LA FORMULA III-1

$$\sigma = A_1 e^{-V_1/kt} + A_2 e^{-V_2/kt}$$

$$\sigma = A_1 e^{-C_1/T} + A_2 e^{-C_2/T}$$

$$k = 13.8 \times 10^{-21} \text{ (Joules/°k)}$$

$$eV = 16.02 \times 10^{-17} \text{ Joules}$$

$$T(\text{°k}) = 273 + (\text{°C})$$

$$C_1 = \frac{V_1}{k} \quad C_2 = \frac{V_2}{k}$$

$$300^\circ\text{C} = 573^\circ\text{k}$$

$$500^\circ\text{C} = 773^\circ\text{k}$$

Para la andesita (1)

Cálculo de C_1

$$C_1 = \frac{0.7 \times 16.02 \times 10^{-17}}{13.8 \times 10^{-21}}$$

$$C_1 = 8,126.1$$

Cálculo de C_2

$$C_2 = \frac{1.6 \times 16.02 \times 10^{-17}}{13.8 \times 10^{-21}}$$

$$C_2 = 18,573.91$$

$$\sigma_A = 6 \times 10^{-3} e^{-\frac{8126.1}{T}} + 10^5 e^{-\frac{18,573.91}{T}}$$

RESULTADOS PARA LA ANDESITA:

ANDESITA	300°C	500°C
σ (mho-cm ⁻¹)	5×10^{-9}	1.63×10^{-7}
ρ (ohm-cm)	2×10^8	6.12×10^6
σ (mho-m ⁻¹)	5×10^{-7}	1.63×10^{-5}
ρ (ohm-m)	2×10^6	6.12×10^4

Para la Dacita (2)

Cálculo de C₁

$$C_1 = \frac{0.62 \times 16.02 \times 10^{-17}}{13.8 \times 10^{-21}}$$

$$C_1 = 7,197.4$$

Cálculo de C₂

$$C_2 = \frac{2.5 \times 16.02 \times 10^{-17}}{13.8 \times 10^{-21}}$$

$$C_2 = 29,021.74$$

$$\sigma_D = 4.7 \times 10^{-3} e^{-\frac{7197.4}{T}} + 10^5 e^{-\frac{29,573.9}{T}}$$

RESULTADOS PARA LA DACITA:

DACITA	300°C	500°C
σ (mho-cm ⁻¹)	1.65×10^{-8}	4.25×10^{-7}
ρ (ohm-cm)	6.06×10^7	2.35×10^6
σ (mho-m ⁻¹)	1.65×10^{-5}	4.25×10^{-6}
ρ (ohm-m)	6.06×10^5	2.35×10^4

Para la Riolita (3)

Cálculo de C_1

$$C_1 = \frac{0.96 \times 16.02 \times 10^{-17}}{13.8 \times 10^{-21}}$$

$$C_1 = 11,144.35$$

Constantes A_2 y V_2 no significativas.

$$\sigma_R = 8 \times 10^{-3} e^{-\frac{11,144.55}{T}}$$

RESULTADO PARA LA RIOLITA:

RIOLITA	300°C	500°C
σ (mho-cm ⁻¹)	2.86×10^{-9}	4.38×10^{-8}
ρ (ohm-cm)	3.5×10^8	2.28×10^7
σ (mho-m ⁻¹)	2.86×10^{-7}	4.38×10^{-6}
ρ (ohm-m)	3.5×10^6	2.28×10^5

TABLA III-4 VALORES DE RESISTIVIDAD VS TEMPERATURA Y LA PRESIÓN DE LAS MUESTRAS DE LOS AZUFRES, MICH.

R O C A	TEMPERATURA (°C)	RESISTIVIDAD (ohms-m)	PRESION 10^3 Kg/cm ² Variación (1)
ANDESITA (1)	300	2.0×10^6	22%
(1)	500	6.12×10^4	22%
DACITA (2)	300	6.1×10^5	22%
(2)	500	2.4×10^4	22%
RIOLITA (3)	300	3.5×10^6	22%
(3)	500	2.3×10^5	22%

Los resultados mostrados en la Tabla III-4 son el producto de un análisis numérico de las ecuaciones de Coster, 1946 y Keller, 1975, éstos no han sido comprobados en laboratorio para conocer la extensión de aplicabilidad y la validez de la ecuación. La variación de la resistividad para un incremento de presión está basada en los experimentos de Parkhomenko, 1967. El autor señala que, en algunas rocas la resistividad decrece continuamente con el incremento de presión y en otras la resistividad decrece cuando se aplican bajas presiones para después incrementarse con altas presiones.

III.2 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA RESISTIVIDAD DEL AGUA

Las aguas que saturan el medio poroso de las rocas facilitan la conducción eléctrica. Una posible clasificación de aguas subterráneas sería:

1. Aguas bicarbonatadas con una salinidad media de 400 ppm característica de aguas juveniles en rocas ígneas o --- aguas normales en sedimentos continentales.
2. Aguas sulfatadas con una salinidad media de 5000 ppm, - también característica de aguas juveniles, normales o - geotérmicas.
3. Aguas cloruradas con una salinidad que excede de 10,000 ppm, característica de rocas sedimentarias depositadas en medios marinos o geotérmicos.

Los datos de la siguiente Tabla III-5 se basan en la recopilación de Chebontarev, 1962, donde se analizan cientos de muestras de aguas para diferentes condiciones geológicas; obteniéndose el rango de valores y el valor promedio de la resistividad de las muestras, medidas a 20°C.

	Resistividad (ohm-m)	
	Rango	media
Ignea Basáltica Sulfatada.	3 -40	7.6
Ignea Basáltica Bicarbonatada.	0.5-80	11.0
Metamórfica Sulfatada.	1.5-9	3.6
Metamórfica Bicarbonatada.	0.9-80	7.6
Sedimentaria Clorurada.	0.3-7.1	0.9
Yacimiento Petrolero Clorurado.	0.05-0.95	0.16

TABLA III-5 RESISTIVIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La resistividad de la salmuera depende de la concentración de sales Bockris, 1970 y Fuoss, 1967 obtienen la siguiente fórmula.

$$\rho_w = 10/AC \quad \text{---- III-2}$$

A = es la conductividad equivalente (Fuoss, 1967).

$$A = B_0 - B_1 C^{\frac{1}{2}} + B_2 C \text{ Inc} + \dots \text{ III-3}$$

c = concentración molar.

B = depende de la química de la solución y se denomina -
Coeficiente de Concentración Resistiva.

Otra fórmula empírica desarrollada en 1980 fue presentada -
por Ucock, et al, basada en datos experimentales ajustando un po-
linomio del siguiente tipo:

$$\rho_w = b_0 + b_1 T^{-1} + b_2 T + b_3 T^2 + b_4 T^3 \text{ --- III-4}$$

donde:

T = Temperatura

b = Coeficiente de resistividad térmica empírico

ρ_w = Resistividad del agua.

La validez de esta ecuación es para los rangos de temperatu-
ra 22 a 400°C y de concentración salina de 1 a 26% en peso, com-
probándose los resultados con una aproximación de $\pm 2\%$.

Ejemplificando la aplicación de la ecuación III-4 se tienen
los siguientes resultados de la Tabla III-6.

TEMPERATURA °C	KCl CaCl2 Medidas		KCl CaCl2 Calculadas	
	Ohm-m	Ohm-m	Ohm-m	Ohm-m
22	0.220	0.227		
25			0.252	0.219
42	0.189	0.185		
50			0.161	0.169
66	0.137	0.129		
75			0.117	0.117
88	0.105	0.1		
100		0.09	0.0935	0.0897
150			0.0692	0.0654
152	0.069	0.065		
200			0.0579	0.0563
201	0.058	0.056		
222	0.055			
225		0.0544	0.0546	0.0544
250			0.0525	0.0538
262	0.0503	0.0535		
300			0.0508	0.0661
350			0.0525	0.0642
400			0.0586	0.0835

TABLA III-6 VARIACIÓN DE LA RESISTIVIDAD DE UNA SALMUERA AL 3% W DE SALES CON RESPECTO A DIFERENTES - TEMPERATURAS.

III-3 RESISTIVIDAD DEL SISTEMA ROCA-FLUIDO EN MEDIOS POROSOS

La función empírica conocida como Ley de Archie permite calcular la resistividad de una roca con saturación total de salmuera. Inicialmente esta Ley era válida para rocas sedimentarias, - Brace, et al, 1965 realizaron pruebas para aplicarla a rocas --- cristalinas, ígneas y metamórficas comprobando su aplicación.

$$\rho_r = a \rho_f \emptyset^{-m} \quad \text{----- III-5}$$

donde:

ρ_r = resistividad de la roca.

ρ_f = resistividad del fluido.

\emptyset = porosidad total de la roca.

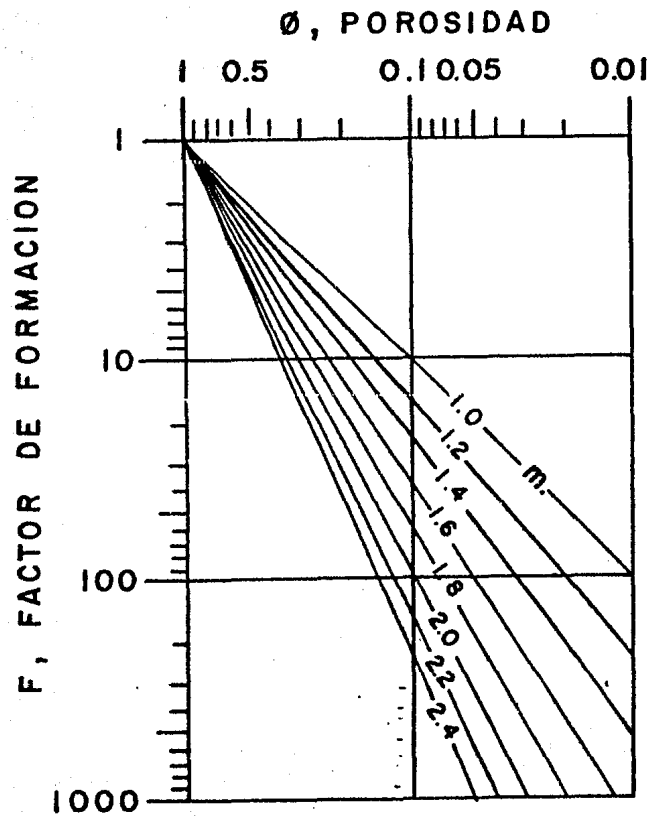
a = constante de proporcionalidad.

m = factor que depende del grado de consolidación de la roca.

El factor de formación se define como:

$$\frac{\rho_r}{\rho_f} = F = a \emptyset^{-m} \quad \text{----- III-6}$$

Existen monogramas para poder calcular cualquiera de los -- parámetros F , \emptyset^m conociendo "a" y dos de ellos; "a" es un número muy cercano a la unidad que varía de 0.6 a 1.4 sólo en el caso de rocas ígneas puede llegar a valer 3.5 (Figuras III-4 y --- III-5).



m, FACTOR DE CONSOLIDACION

FIGURA III-4 MONOGRAMA DEL FACTOR DE FORMACIÓN F, POROSIDAD Ø Y EL FACTOR DE CONSOLIDACIÓN M.

(MEIDAY, T., 1980).

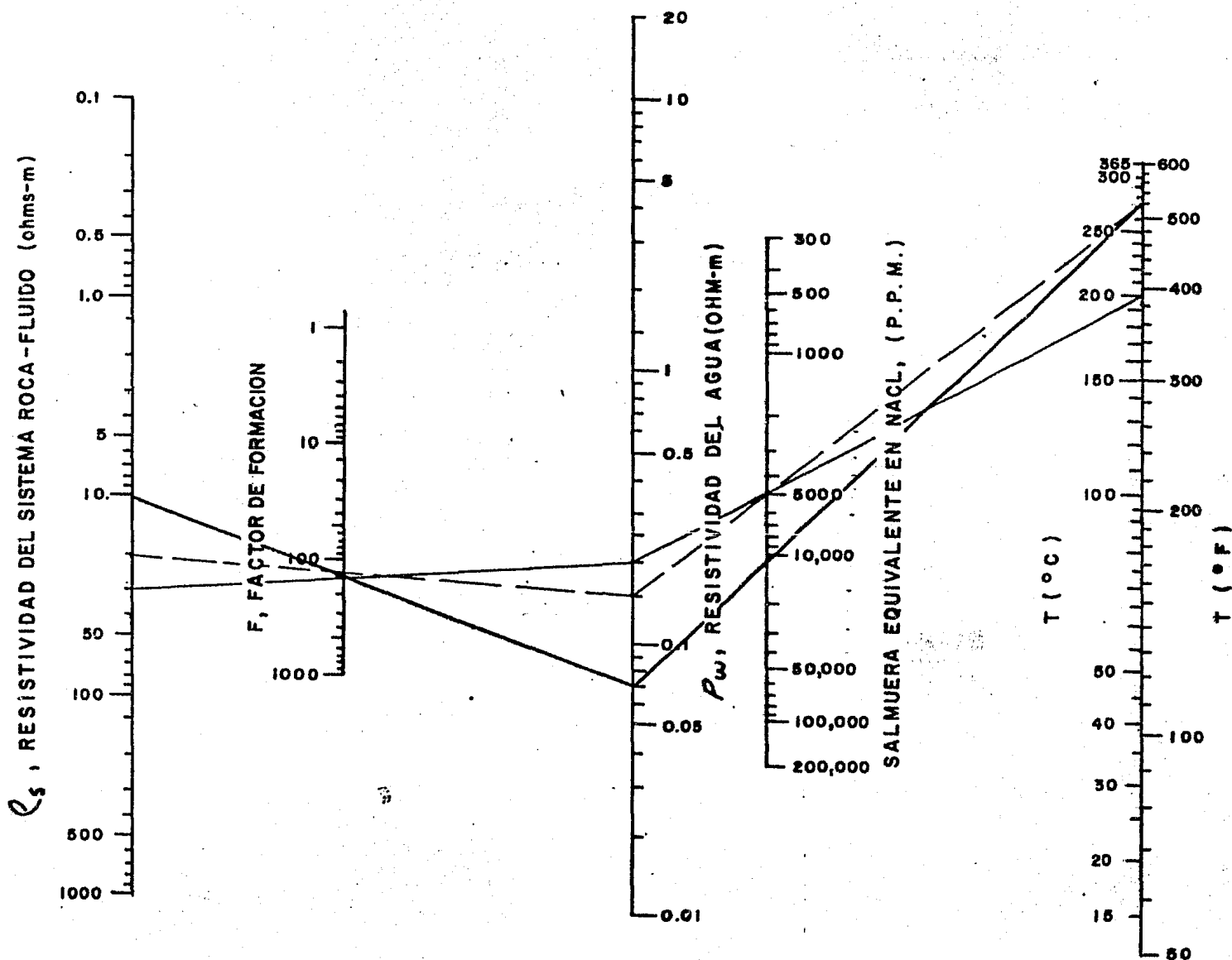


FIGURA III-5 MONOGRAMA (2) QUE RELACIONA LA RESISTIVIDAD, EL FACTOR DE FORMACIÓN, LA SALMUERA EQUIVALENTE Y LA TEMPERATURA. SE MUESTRA UN EJEMPLO DE CÁLCULO PARA LA ZONA GEOTÉRMICA DE LOS AZUFRES.

(MEIDAY, T., 1980).

La aplicación de la Ley de Archie para varios tipos de rocas fue estudiada por Parkhomenko, 1976; Layugan B.D., 1980; Meiday T., 1980. De sus experiencias se presenta la siguiente relación de fórmulas y monogramas.

Ley de Archie para diferentes tipos de roca:

Roca dentrítica débilmente cementada, arena, arenisca y caliza con un rango de porosidad del 25 al 45% generalmente terciaria.

$$F = 0.88 \phi^{-1.37} \quad \text{----- III-7}$$

Roca sedimentaria con cementación que varía de moderada a bien cementada con un rango de porosidad del 18 al 35% generalmente del Mesozoico.

$$F = 0.62 \phi^{-1.72} \quad \text{----- III-8}$$

Roca sedimentaria bien consolidada con un rango de porosidad del 5 al 25% generalmente del Paleozoico.

$$F = 0.62 \phi^{-1.95} \quad \text{----- III-9}$$

Roca volcánica con gran contenido de poros como las tobas, lavas tipo aa y lavas tipo pahoehoe. Con un rango de porosidad del 20 al 80%.

$$F = 3.5 \phi^{-1.44} \quad \text{----- III-10}$$

Rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas, con una porosidad menor que el 10%.

$$F = 1.4 \phi^{-1.55}$$

----- III-11

El monograma Fig. III-5, de correlación de los parámetros de resistividad, factor de formación, salmuera equivalente y temperatura, se considera como lo más representativo para los cálculos y se puede utilizar conjuntamente con las ecuaciones anteriores. Ejemplificando la aplicación de las ecuaciones anteriores y los monogramas con datos reales de Los Azufres.

DATOS DEL EJEMPLO:

Temperatura media 270°C, muestreada en los pozos por medio de registros de temperatura.

La equivalencia en NaCl de la salmuera varía entre 5,000 y 10,000 ppm.

Con estos dos datos se lee la resistividad de la salmuera que varía 0.15 a 0.07 (ohm-m). Para el cálculo del factor de formación se utiliza la ecuación III-11 con una porosidad total de 5%, siendo $F = 145.5$. Uniendo los puntos correspondientes, se tiene una resistividad de roca-fluido del yacimiento que varía de 10 a 20 (ohm-m) resultados que serán discutidos más adelante en este capítulo.

III-4 ANÁLISIS DE LA RESISTIVIDAD DEL SISTEMA ROCA-FLUIDO EN MEDIOS FRACTURADOS.

Los resultados anteriores son para rocas porosas o cuando se tiene un modelo de porosidad equivalente (Ley de POISEVILLE para flujo capilar). Para un mejor análisis y obtener mejores resultados se recurre a modelos fracturados como los sugeridos por Parkhomenko que son de la clasificación de Mechai, las ecuaciones que rigen el flujo eléctrico en sistemas fracturados también fueron sugeridos por Meiday T., 1981 y modificadas por Pric kett, G.R. y Grose, L.T., 1983. En la Figura III-6 se muestran los modelos, la dirección de flujo y sus ecuaciones donde:

ρ_s = Resistividad del sistema roca-fracturas-fluido (ohm-m)

ρ_r = Resistividad de la roca (ohm-m)

ρ_f = Resistividad del relleno de las fracturas (ohm-m)

ϕ_f = Porosidad de la fractura.

ρ_s, ρ_r y ρ_f = Son calculadas considerando el medio saturado 100% de salmuera.

Para una mejor comprensión de la aplicación de los modelos y sus ecuaciones, se ilustra con un ejemplo bajo las siguientes condiciones:

- Salmuera geotérmica con una equivalencia en NaCl de --- 5000 a 10,000 ppm.
- Temperaturas de yacimiento entre 200 y 270°C.
- Porosidad de roca sana igual a 5%.

Este dato fue obtenido de las pruebas de presión, de -- los análisis petrofísicos realizados por el IIE y por -

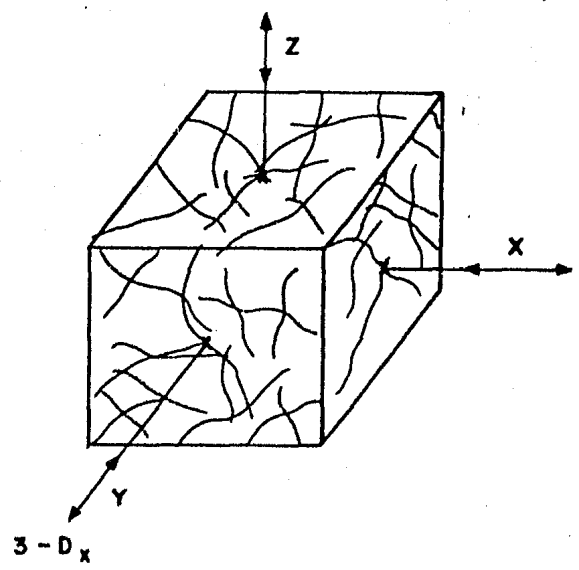
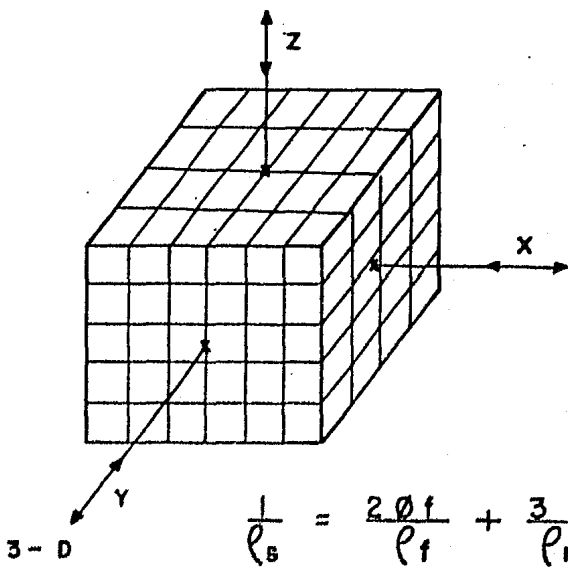
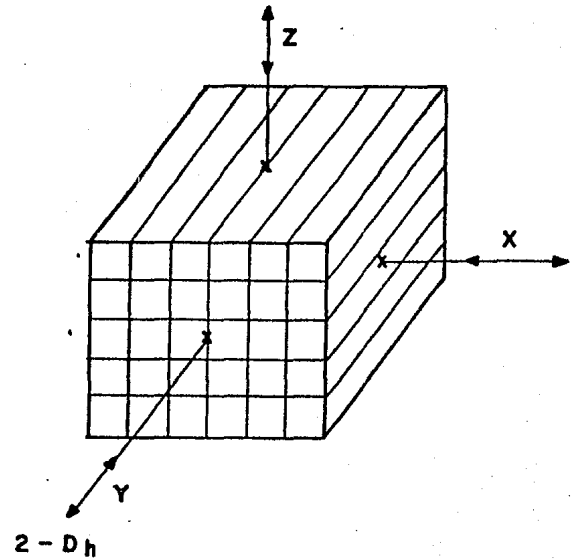
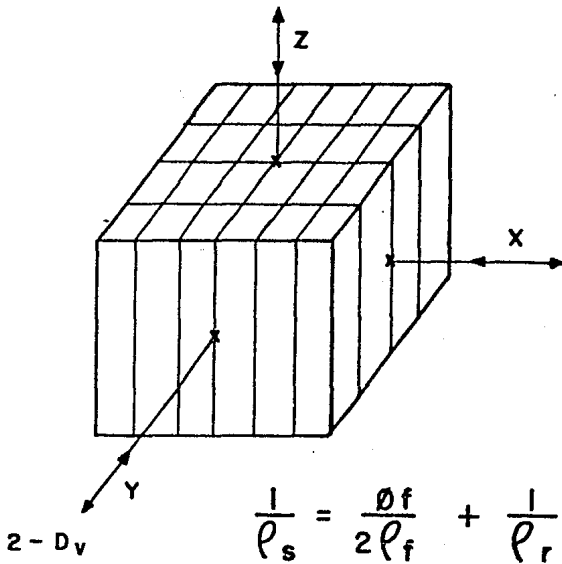
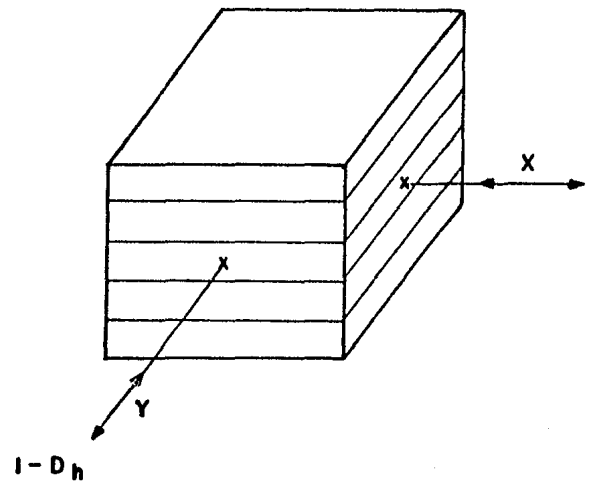
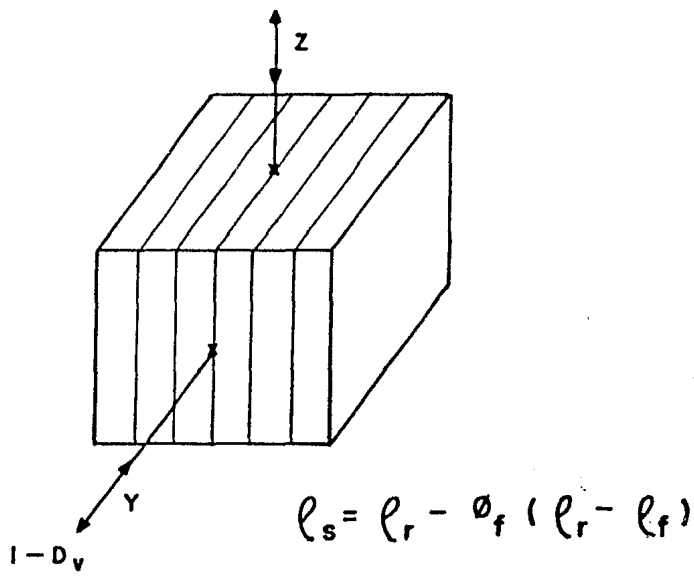


Figura III-6 Modelo de fracturamiento en rocas con flujos normales a a sus caras. (Clasificación de Nechai 1979)

datos estadísticos del índice de alteración hidrotermal.

- Porosidad del relleno de las fracturas entre 20 y 30%
Este dato es estimado para las condiciones del yacimiento y considerando el criterio de la industria petrolera para yacimientos fracturados.

El relleno de las fracturas se considera como una roca porosa, aplicando la Ley de Archie para la ecuación III-10 con una porosidad de 20%, tenemos:

$$\begin{aligned}
 F &= 3.5 \phi^{-1.44} && \text{----- III-10} \\
 \phi &= 0.20 \\
 F &= 3.5 \times 0.20^{-1.44} \\
 F &= 35.53
 \end{aligned}$$

Con el factor de formación de 35.53 se entra a la Figura III-2 que muestra el monograma (2) y se lee:

$$\begin{aligned}
 \rho_f &= 3.5 \text{ (ohm-m) medidas a } 10,000 \text{ ppm } 270^\circ\text{C} \\
 \rho_f &= 7.0 \text{ (ohm-m) medidas a } 5,000 \text{ ppm } 270^\circ\text{C} \\
 \rho_f &= 10.0 \text{ (ohm-m) medidas a } 5,000 \text{ ppm } 200^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

Del ejemplo anterior la resistividad de la roca varia de:

$$\begin{aligned}
 \rho_r &= 10 \text{ (ohm-m) medidas a } 10,000 \text{ ppm } 270^\circ\text{C} \\
 \rho_r &= 20 \text{ (ohm-m) medidas a } 5,000 \text{ ppm } 270^\circ\text{C} \\
 \rho_r &= 30 \text{ (ohm-m) medidas a } 5,000 \text{ ppm } 200^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

El modelo de Nechai seleccionado es 2 DH cuya ecuación es:

$$\frac{1}{\rho_s} = \frac{\phi f}{2\rho_f} + \frac{1}{\rho_r}$$

Para las condiciones dadas en la fractura y roca sana tenemos:

$$\text{NaCl} = 10,000 \text{ ppm}$$

$$T = 270 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\rho_f = 3.5 \text{ (ohm-m) resistividad en la fractura.}$$

$$\rho_r = 10 \text{ (ohm-m) resistividad en la roca.}$$

$$\phi_f = 0.2$$

$$\frac{1}{\rho_s} = \frac{0.20}{2(3.5)} + \frac{1}{10} = 0.1286 \text{ (mho-m}^{-1}\text{)}$$

$$\rho_s = 7.8 \text{ (ohm-m) que es la resistividad del sistema roca-fractura salmuera.}$$

Para los modelos de Nechai 3D y 3D_x con las mismas condiciones:

$$\frac{1}{\rho_s} = \frac{2\phi_f}{\rho_f} + \frac{3-2\phi_f}{\rho_r(3-\phi_f)}$$

$$\frac{1}{\rho_s} = \frac{2(0.2)}{3.5} + \frac{3 - (2(0.2))}{10(3-0.2)}$$

$$\frac{1}{\rho_s} = 0.2072 \text{ (mho-m}^{-1}\text{)}$$

$$\rho_s = 4.83 \text{ (ohm-m).}$$

Cambios de condiciones para el sistema:

$$\text{NaCl} = 5,000 \text{ ppm}$$

$$t = 270 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\rho_f = 7.0 \text{ (ohm-m) resistividad en la fractura.}$$

$$\rho_r = 20.0 \text{ (ohm-m) resistividad en la roca.}$$

$$\emptyset f = 0.2$$

Modelo 2-DH

$$\frac{1}{\rho_s} = \frac{\emptyset f}{2\rho_f} + \frac{1}{\rho_r}$$

$$\frac{1}{\rho_s} = 0.0643 \text{ (mho-m}^{-1}\text{)}$$

$$\rho_s = 15.55 \text{ (ohm-m) resistividad del sistema.}$$

Modelos 3-D ó 3-D_x con las condiciones anteriores:

$$\frac{1}{\rho_s} = \frac{2\emptyset f}{\rho_f} + \frac{3-2\emptyset f}{\rho_r(3-\emptyset f)}$$

$$\frac{1}{\rho_s} = 0.1036 \text{ (mho-m}^{-1}\text{)}$$

$$\rho_s = 0.65 \text{ (ohm-m)}$$

Cambiando las condiciones de:

$$\text{NaCl} = 5,000 \text{ ppm}$$

$$T = 200 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\rho_f = 10 \text{ (ohm-m)}$$

$$\rho_r = 30 \text{ (ohm-m)}$$

$$\emptyset f = 0.20$$

Modelo 2-DH

$$\frac{1}{\rho_s} = \frac{\phi f}{2\rho_f} + \frac{1}{\rho_r}$$

$$\frac{1}{\rho_s} = 0.0433 \text{ (mho-m}^{-1}\text{)}$$

$$\rho_s = 23.07 \text{ (ohm-m)}$$

Modelos 3-D y 3-D_x en cualquier dirección de flujo.

$$\frac{1}{\rho_s} = \frac{2\phi f}{\rho_f} + \frac{3-2\phi f}{\rho_r(3-\phi f)}$$

$$\frac{1}{\rho_s} = 0.071 \text{ (mho-m}^{-1}\text{)}$$

$$\rho_s = 14.09 \text{ (ohm-m)}$$

Finalmente se tiene la siguiente Tabla de resultados:

DATOS: $\phi_r = 0.05$ $F_r = 145.5$ $\phi_f = 0.20$ $F_f = 35.53$					
MODELO	TEMP. (°C)	NaCl ppm	ρ_r (ohm-m)	ρ_f (ohm-m)	ρ_s (ohm-m)
2-DH	270	10,000	10	3.5	7.8
3-D, D _x					4.83
2-DH	270	5,000	20	7.0	15.55
3-D, D _x					9.65
2-DH	200	5,000	30	10.0	23.07
3-D, D _x					14.09

DATOS: $\emptyset_r = 0.05$ $Fr = 145.5$ $\emptyset_f = 0.030$ $Ff = 19.81$					
MODELO	TEMP. (°C)	NaCl ppm	ρ_r (ohm-m)	ρ_f (ohm-m)	ρ_s (ohm-m)
	270	10,000	10	2.5	
2-DH					6.25
3-D, D_x					3.04
	270	5,000	20	3.0	
2-DH					10.0
3-D, D_x					4.09
	200	5,000	30	4.5	
2-DH					15.0
3-D, D_x					6.14

TABLA III-7 RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS PARA DETERMINAR LA RESISTIVIDAD DEL SISTEMA (ρ_s) ROCA, FRACTURAS Y FLUIDO HIDROTÉRMICO GEOTÉRMICO.

Donde:

- \emptyset_r = Porosidad de la roca sana.
- Fr = Factor de formación de la roca sana.
- \emptyset_f = Porosidad equivalente del medio fracturado.
- Ff = Factor de formación en las fracturas.
- ρ_r = Resistividad de la roca sana saturada 100% de salmuera.
- ρ_f = Resistividad en las fracturas saturadas 100% de salmuera.
- ρ_s = Resistividad del sistema roca fracturada con saturación del 100% de salmuera.

La aplicación del procedimiento analizado se puede hacer ex ten sivo en cualquier tipo de yacimiento geotérmico, para conocer la aplicabilidad de los estudios geoelectric os y sus correlaciones.

En caso de que se haga de forma preliminar durante la exp lo r a c i o n y sólo se cuenten con datos de manantiales termales, se recomienda que el análisis geoquímico trate de evaluar la contaminación del fluido geotérmico con las aguas meteóricas o superficiales. Por otro lado y de acuerdo a la clasificación de yaci m i e n t os geotérmicos (Sanyal, et al., 1979), las probabilidades de que el yacimiento de Los Azufres sea exitoso son:

De acuerdo al tipo de fluido y temperatura		40.7%
De acuerdo a los tipos de litología		51.1%
De acuerdo a la Geometría del poro y fractu <u>r</u> <u>a</u> <u>m</u> <u>i</u> <u>e</u> <u>n</u> <u>t</u> <u>o</u>		68.7%
De acuerdo a la salinidad		41.4%
Baja salinidad	2,000 - 5,000 ppm	52.3%
Moderada salinidad	5,000 -35,000 ppm	30.4%

Para hacer una evaluación del potencial del campo se debe cu an t i f i c a r la extensión areal de las anomalías y correlacionarlas con los datos de yacimientos.

Con esta parte se termina el análisis de los factores que es t á n involucrados con la resistividad del sistema. Más adelante se analizarán datos y resultados para la interpretación del es t u d i o geoelectric o en la zona geotérmica de Los Azufres, Mich.

III.5 LOS AZUFRES, MICH. ESTUDIOS REALIZADOS (1976-1980)

En este inciso se presenta una integración de cinco programas de exploración geoelectrica mediante el SEV, se analizan 288 sondeos con una separación semielectrónica de 10 a 4 000 m de $AB/2$. La localización, extensión y generalidades geológicas del área se mencionan en el capítulo II de este trabajo.

El primer programa (Enero-Febrero, 1976), tuvo como objetivos: Comprobar la aplicación del método de exploración y observar las variaciones geoelectricas regionales; para lograrlos, se explora mediante un perfil regional de 23 Km de longitud con 22 sondeos regularmente espaciados, que cruza la zona de alteración hidrotermal. Los resultados (Figura III-7) fueron ampliamente satisfactorios, justificándose un programa regional y la localización de un pozo exploratorio el Azufres-1 (A-1).

El estudio regional (Mayo-Diciembre, 1976), cubrió un área de aproximadamente 70 Km² con 50 sondeos en cruz y 45 simples -- (Figura III-8). Tuvo como objetivos: Verificar las anomalías -- iniciales, cuantificar su extensión areal y estudiar los efectos laterales mediante los sondeos en cruz. Parte de los resultados se presentan en la configuración iso-resistiva de $AB/2 = 1\ 000$ m (Figura III-9), donde se observan anomalías de baja resistividad que contrastan con las altas resistividades de los domos riolíticos y los derrames volcánicos con poca o nula alteración hidro-- termal. Se comprueba además que las variaciones laterales tie-- nen un efecto de poca importancia y no altera el rango de valo--

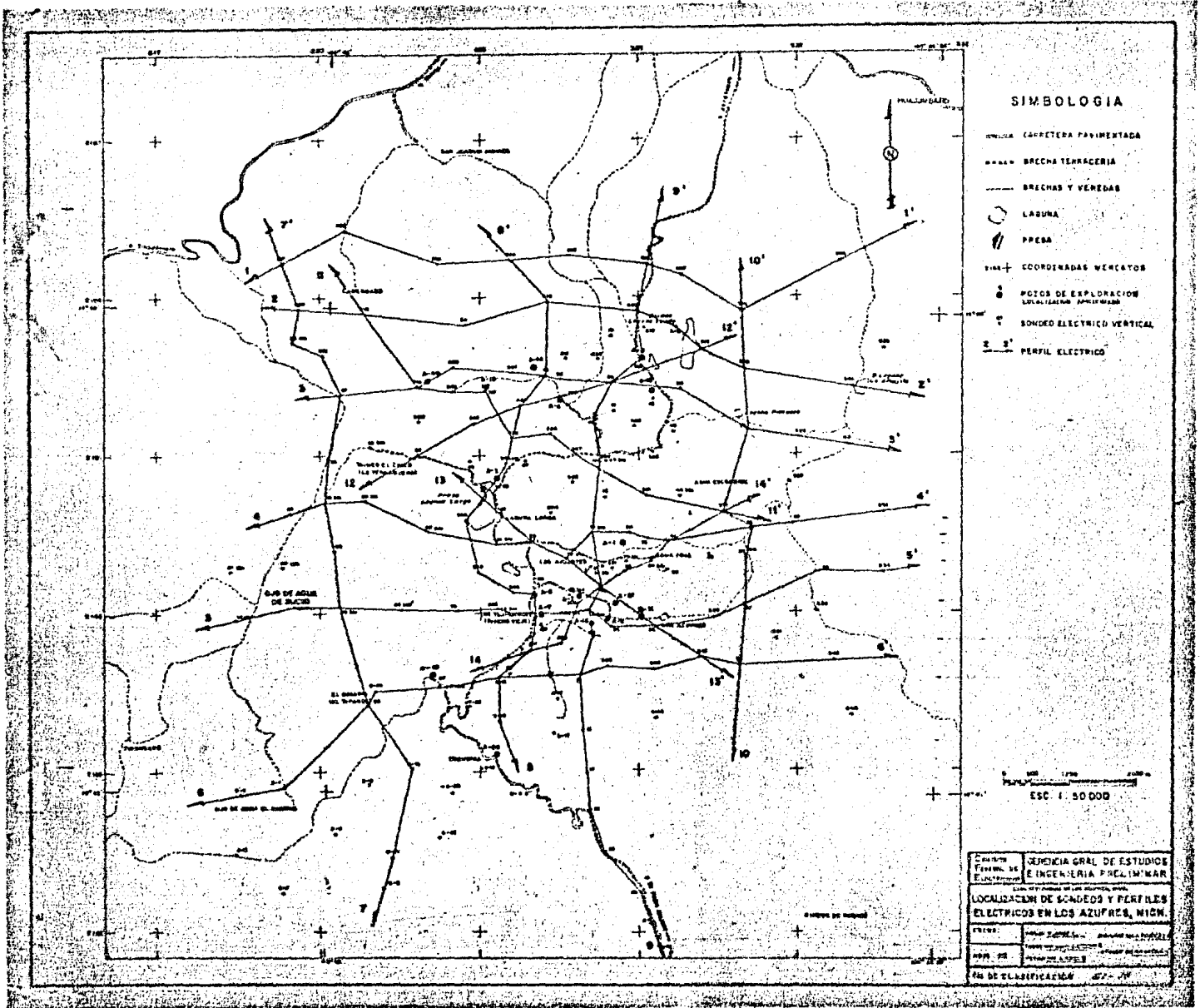
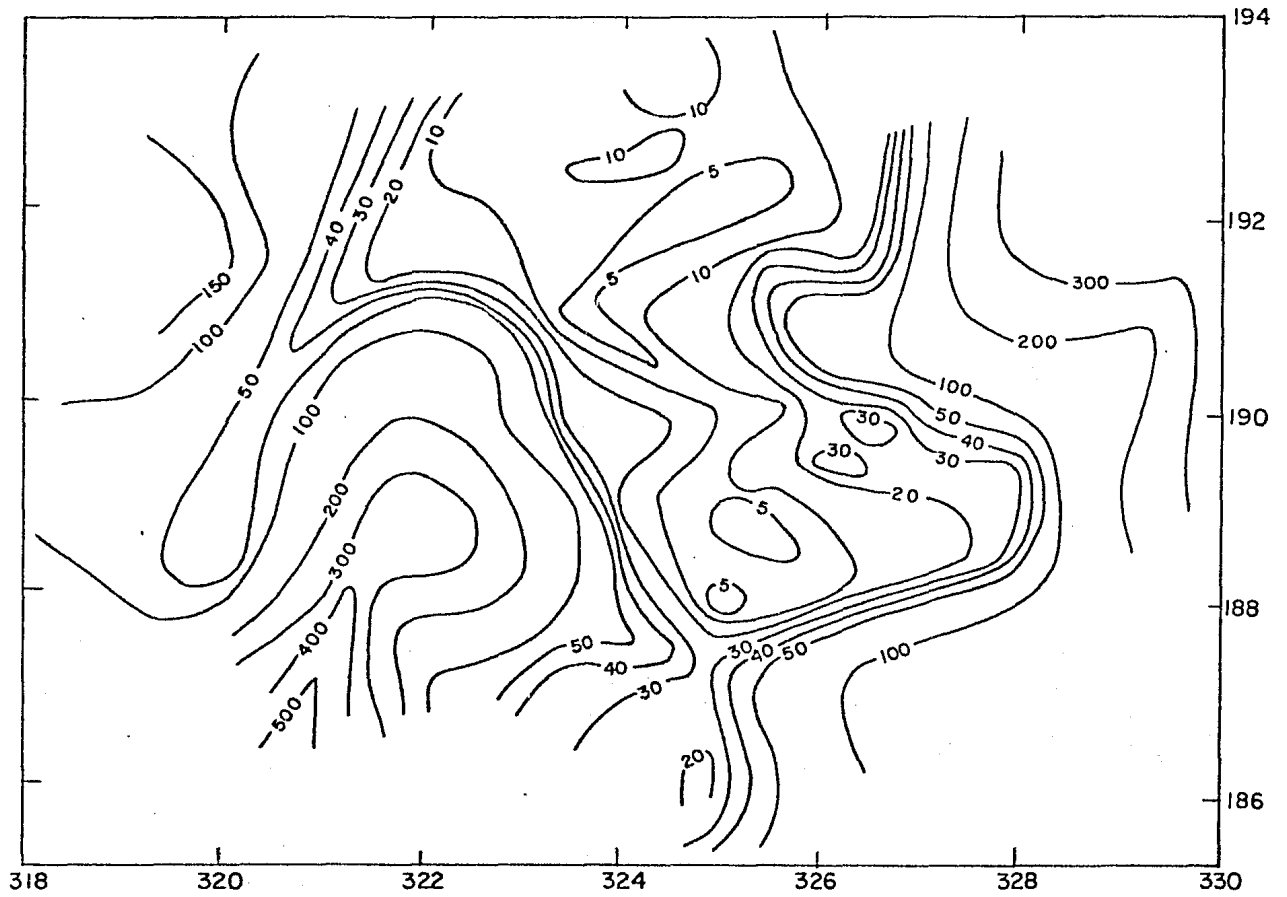


FIGURA III-8



— 20 — CONFIGURACION ISORRESISTIVA

$$\frac{AB}{2} = 1000 \text{ m.}$$

DIC. - 1976.

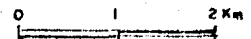
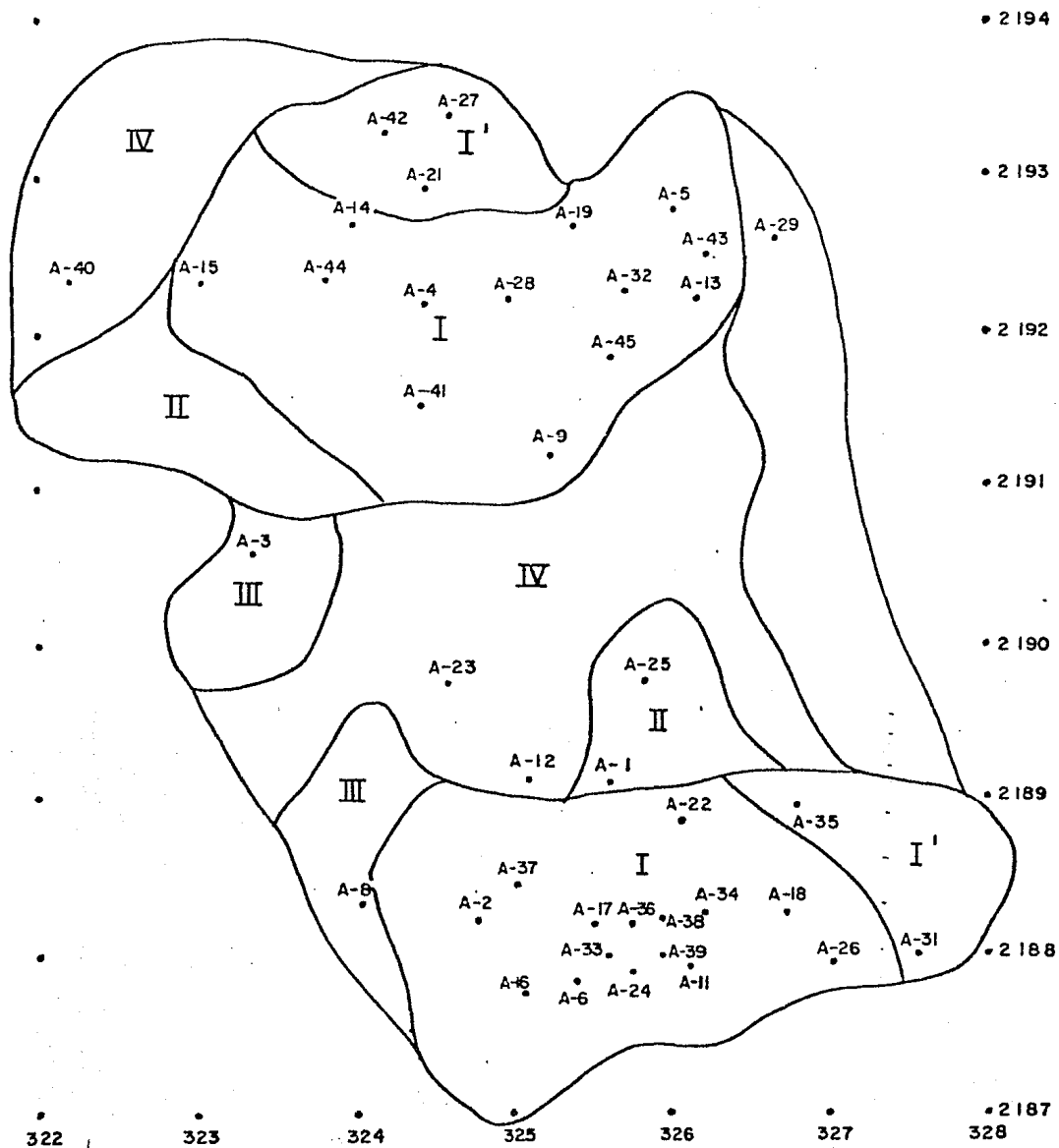


FIGURA III-9



I y I' en producción

II y III en desarrollo

IV y V en exploración

Localización topográfica de los pozos
y agrupación de anomalías geofísicas

FEBRERO 1985

ESC. 1:50,000

FIGURA III-10

SONDEO	ℓ ₁	ℓ ₂	ℓ ₃	ℓ ₄	ℓ ₅	E1	E2	E3	E4	*CON.LONG.	*PROF.CIMA	RESISTIV.
E-1	3800	380	900	22		14	91	181			236	22
E-2	2600	1300	660	70	17	10	75	355	675		1115	17
E-3	9999	4000	775	80	20	6	42	232	1112		280	20
E-4	6550	2175	780	50	25	9	25	267	1107		1408	25
E-5	3200	1600	540	19	40	7	40	533	1934	102	580	19
E-6	5500	1350	300	18	280	8	180	408	2500	139	596	18
E-8	650	3400	700	74	18	4	13	301	581		399	18
E-10	60	30	62	24	240	5	35	93	1813	76	318	24
E-11	83	27	19	710		30	315	2415		127	345	19
E-12	420	6300	200	13	1350	30	84	300	2580	198	414	13
E-14	1600	650	2800	11		8	18	114			140	11
E-15	2200	145	490	10	42	9	41	401	678	68	451	10
E-16	60	825	9	18	28	28	196	1996		222	224	9
E-17	90	550	8			17	221				238	8
E-18	100	750	8	40		40	170	1040		130	210	8
E-19	600	240	9	240		30	390	1220		136	420	9
E-21	3400	1700	3500	820	25	10	160	300	450		920	25
E-23	3800	250	140	12	250	12	108	358	1638	137	478	12
E-24-bis	300	100	660	55	11	13	64	131	911		1119	11
E-25	70	1000	230	10	290	18	90	365	1905	191	473	10

E1 = Profundidad a la base del estrato 1 en metros.

ℓ1 = Resistividad calculada en ohms-m del estrato 1

* Conductancia longitudinal en mhos-m

* Profundidad a la cima del conductivo en metros.

res ni la interpretación estructural. Como resultado de la interpretación de este programa, se localizaron los pozos exploratorios A-2, A-3, A-4, A-5, A-6, A-10, A-14 y A-20 (Figura III-10); confirmándose la presencia del yacimiento pero sin cuantificar su extensión máxima, porque varias anomalías a diferentes intervalos de configuración quedaron abiertas como lo muestra la configuración de la Figura III-9, motivo por lo cual se decidió continuar con los estudios regionales con un programa de 20 sondeos en la zona sur del campo (Area de Erendira, Nov., 78-Enero, 79), cubriendo 43 Km². Los resultados del procesado de la configuración se presentaron en 11 planos de configuración cualitativa y 7 planos de configuración cuantitativa, Escala 1:20,000; que muestran los posibles límites del yacimiento hacia el sur. La interpretación cuantitativa de los sondeos se presenta en la Tabla III-8 que muestra la relación de espesores, resistividades, conductancia longitudinal, resistividades del conductivo y profundidad a la cima del conductivo.

Durante los meses Junio-Julio, 1979 se realizó la integración de los programas anteriores obteniendo 8 planos Escala 1:50,000 que facilitan la interpretación global, donde se reúne la información y se enfatizan las zonas donde las posibilidades de localizaciones exitosas de pozos productores son más probables; como las anomalías iso-resistivas importantes quedaron abiertas hacia el Norte de la zona, se continuaron los estudios con un nuevo programa de 71 sondeos, cubriendo un área adicional de 45 Km², los objetivos consistieron en continuar las anomalías

de baja resistividad y confirmar las dudosas (Marzo-Junio, 1980). La presentación de los resultados reagrupa toda la información y se vacía en 12 planos y 14 secciones (cualitativas y cuantitativas).

Durante el último programa se intercala un estudio de detalle (Area El Carrizo), para localizar estructuras o zonas permeables en el subsuelo. Se tomó en cuenta los resultados del pozo A-10 que en el intervalo de 160 a 300 m manifiesta los efectos de una gran permeabilidad. Este estudio consistió de 30 sondeos de 10 a 1,500 m de AB/2, cubriendo un área de 2.25 Km². Los resultados se presentan en 10 planos y 5 secciones de los cuales - el más importante (Figura III-11), presenta la interpretación estructural y la localización de los barrenos para comprobar las anomalías dadas por el rango de valores de resistividad.

Dada la creciente importancia de la zona geotérmica de Los Azufres, Mich., por las características propias del yacimiento, fue necesario afinar las anomalías mediante una malla de aproximadamente 250 m y los resultados son parte de la recopilación final presentada en Mayo de 1984 por la Oficina de Geofísica. En estos resultados se observa que las anomalías conservan su amplitud y tendencia iso-resistiva. Sólo las configuraciones de AB/2 = 2,500 y 3,000 m se enriquecieron con más datos.

III.6 PLANOS DE RECOPILOCIÓN GEOELÉCTRICA

Los planos analizados en este inciso son los obtenidos de - Marzo a Junio de 1980, correspondiendo al quinto programa de ex-

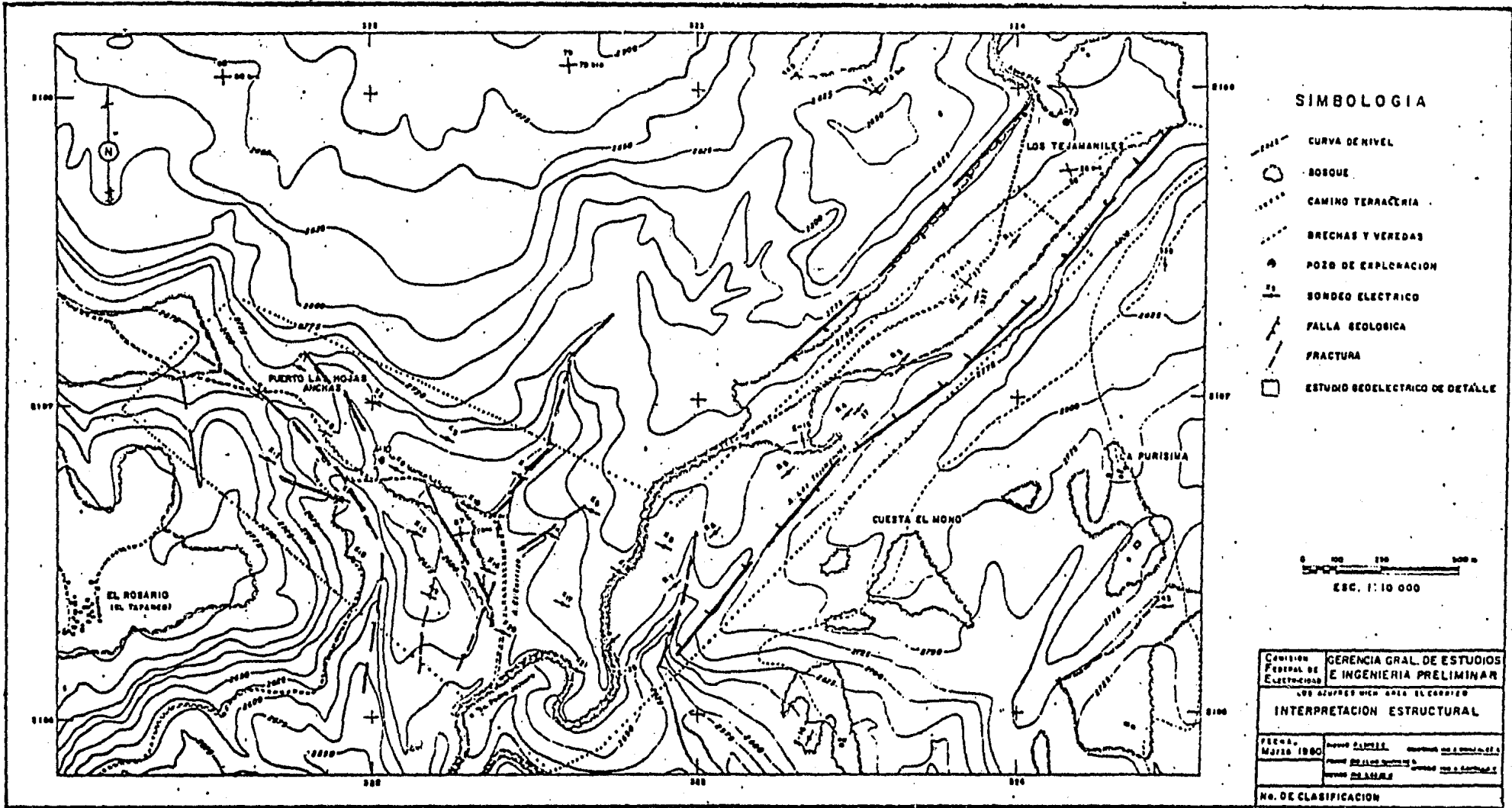


Figura III-11

ploración y estudios anteriores.

De la integración final, se toman las configuraciones de -- las separaciones semielectródicas AB/2 más representativas y se forma el plano de agrupación de anomalías.

La interpretación de los planos y secciones es un proceso -- que mezcla el análisis cualitativo y cuantitativo. Para este es -- tudio las configuraciones cualitativas son las que han proporci -- nado mejor información de las condiciones geotérmicas del subsue -- lo.

El procedimiento usado para la interpretación de los estu -- dios geoeléctricos comienza con las configuraciones de las iso -- resistividades aparentes medidas a cada separación electródica -- de AB/2. Como los efectos superficiales NO son considerados pa -- ra los objetivos geotérmicos, las configuraciones importantes -- son desde 500 a 3,000 m de AB/2. Como existen pocos datos de -- 3,500 y 4,000 m de AB/2, no se realizaron configuraciones para -- estas separaciones.

Dadas las características geológicas y geotérmicas de la zo -- na, se infiere que la penetración de la corriente es proporcio -- nal a la separación de los electrodos AB/2, en otras palabras es -- la parte del subsuelo que influye en la información recibida por -- los electrodos de potencial MN. Esta deducción está basada en -- correlaciones empíricas con los pozos de exploración donde se -- han encontrado correspondencias entre las isotermas y las isorre -- sistividades a cierta separación de AB/2 correspondiente a la --

profundidad de medición de la isoterma. No existiendo otra posibilidad de valuar con mayor precisión el fenómeno de penetración, se consideró tomar a la separación de $AB/2$ como la profundidad de penetración.

ANÁLISIS CUALITATIVO DE LA INFORMACIÓN GEOELÉCTRICA

El siguiente análisis es estrictamente geoeléctrico de tipo cualitativo infiriéndose los efectos de las fallas en la configuración iso-resistiva, así como las unidades volcánicas que manifiestan un efecto geoeléctrico que las distingue.

Plano de Iso-resistividades Aparentes $AB/2= 500$ m (Figura -- III-12)..- En esta configuración se observan alineamientos E-W, N-S, NE-SW y NW-SE que corresponden al sistema de fallas y fracturas predominantes de la zona. Las dos zonas de bajos resistivos corresponden a las manifestaciones superficiales y a la de alteración hidrotermal que contrastan con las altas resistividades de los domos riolíticos y rocas sanas.

Las resistividades menores de 20 ohm-m se asocian a los fenómenos de hidrotermalismo y alteración geotérmica con la presencia de un fluido salino de baja temperatura (200°C).

Un modelo apropiado para esta configuración considerando su separación semielectródica, indicaría un sistema abierto a la superficie con una alimentación del fondo, propiciándose la formación de casquete de vapor.



FIGURA III-12

El Plano de Iso-resistividades Aparentes AB/2 = 1 000 m (Figura III-13).- Manifiesta el mismo sistema de alineamientos. - Este plano por sí solo se considera como el más representativo del yacimiento para definir su extensión y propiedades geoeléctricas de forma conservadora. Si se aplicara el criterio mostrado en la Tabla III-7 para diferentes modelos podría establecerse que los límites serían la configuración de la curva de 30 ohm-m y la curva de 10 ohm-m se consideraría como la ideal para realizar localizaciones de pozos exploratorios.

El Plano de Iso-resistividades Aparentes AB/2 = 1 500 m (Figura III-14).- Muestra un área de menor extensión que conserva los alineamientos iniciales disminuyendo el valor de resistividad de los domos riolíticos. Si los objetivos de las localizaciones fueran mayores de 1,500 m, se recomiendan en las anomalías de 10 ohm-m que se asocien a las estructuras con traza superficial E-W.

El Plano de Iso-resistividades Aparentes AB/2 = 2 000 m (Figura III-15).- Marca una clara separación entre las dos anomalías y sólo los efectos profundos del Cerro San Andrés se manifiesta con altas resistividades (mayores de 100 ohms-m). La extensión de la anomalía crece notablemente hacia el W y S del Campamento Agua Fría.

Las estructuras E-W conservan su tendencia, las zonas actualmente importantes de producción están localizadas dentro de la curva de 10 Ohms-m. Faltando por comprobar cuatro anomalías separadas de las zonas importantes.

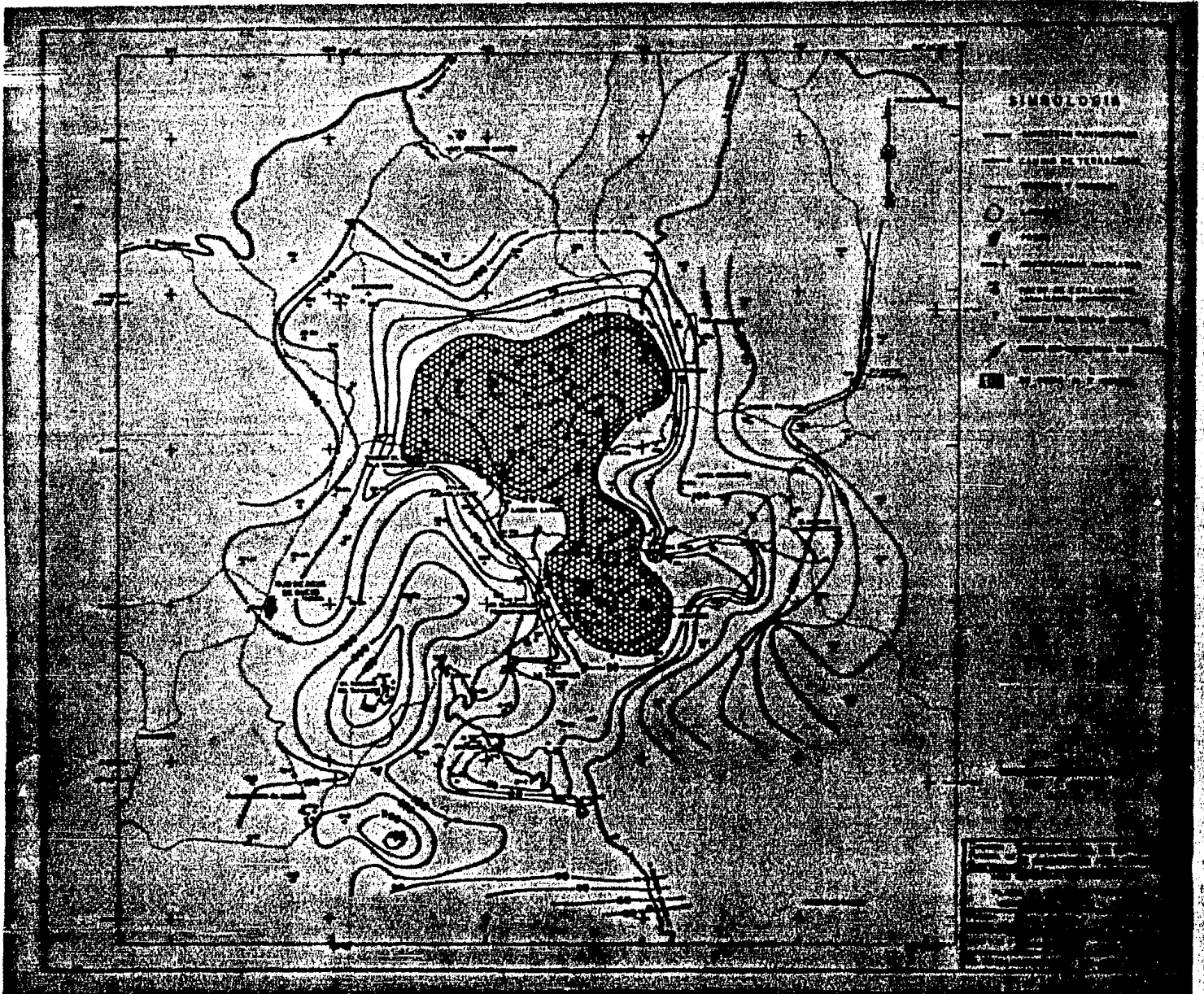


FIGURA III-13

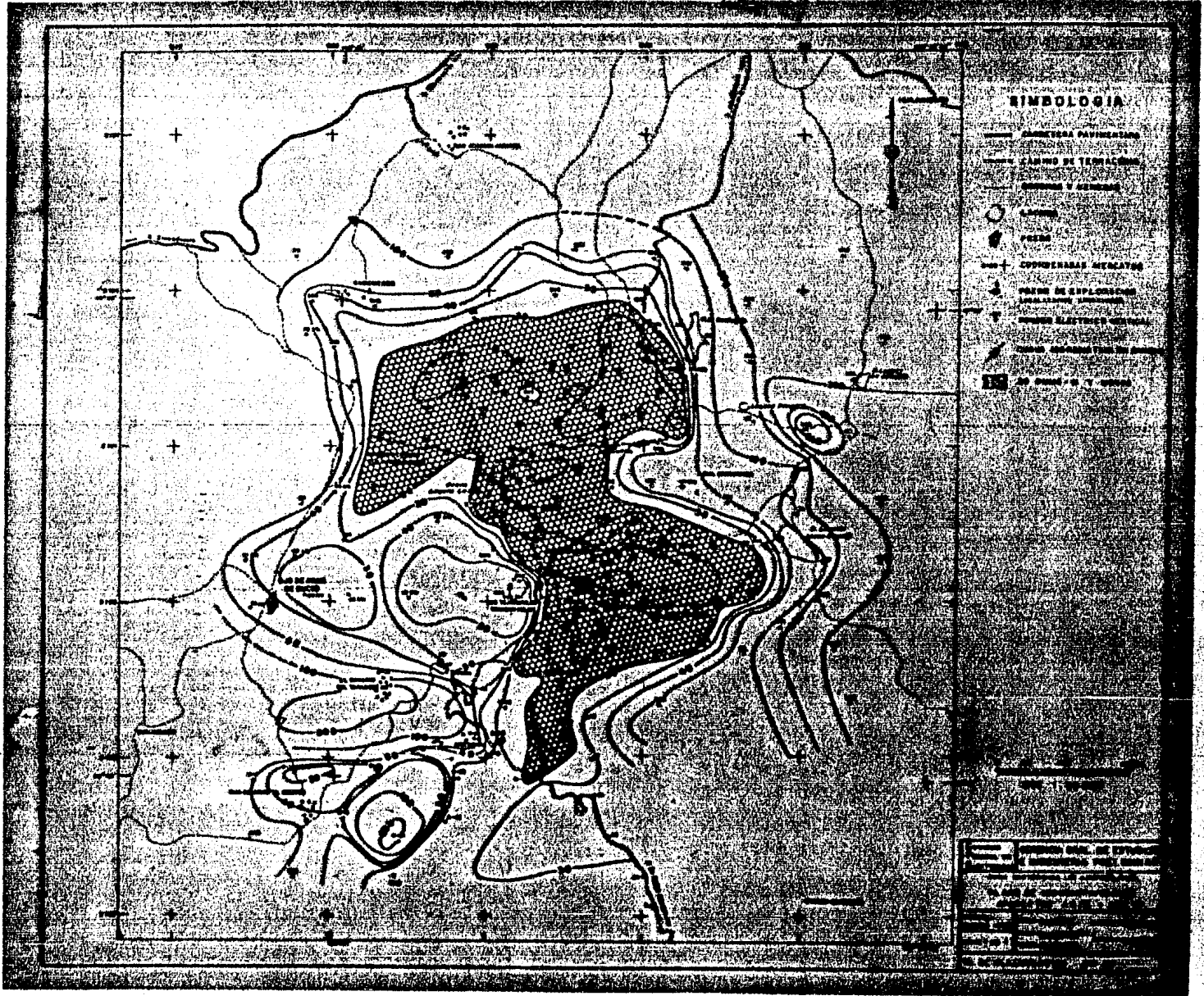


FIGURA III-14

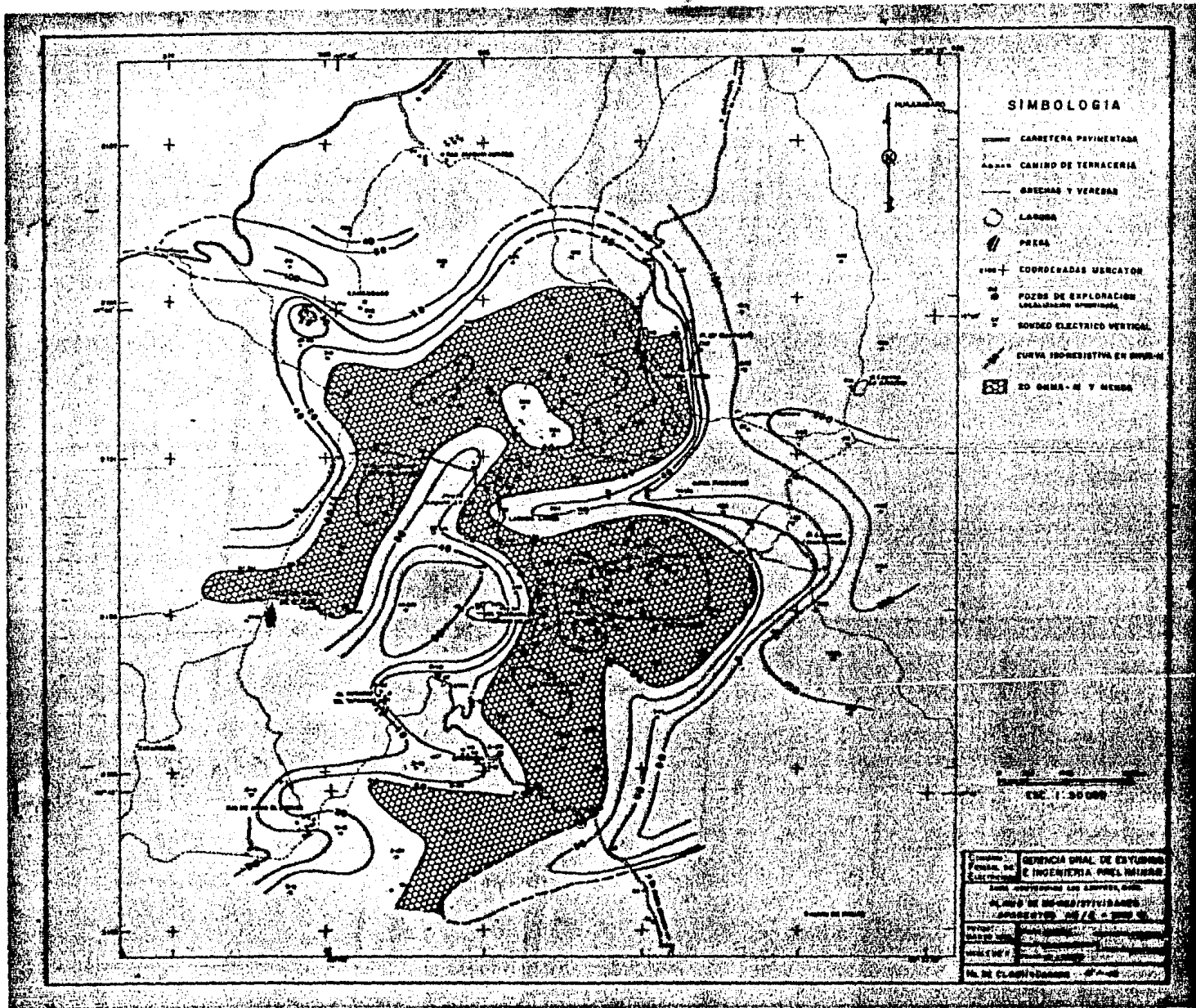


FIGURA III-15

El Plano de Iso-resistividades Aparentes AB/2 = 2 500 m (Figura III-16).- Presenta un alineamiento de curvas con dirección NW-SE que se asocia al reflejo de una estructura basal con poco o nulo efecto superficial, debido a ésto y al grado de intercomunicación que existe entre las anomalías N y S (vistas en la Figura III-12), se interpreta que provienen de una misma fuente geotérmica.

La configuración del Plano de Iso-resistividades Aparentes AB/2 = 3 000 m (Figura III-17).- Tiene un menor número de datos sin embargo las curvas conservan los valores y alineamientos geoelectrónicos que definen a la zona de estudio.

Las configuraciones de 3 500 y 4 000 m de AB/2 no fueron posibles por la poca cantidad de sondeos que se realizaron para esas separaciones electrónicas.

Continuando con la interpretación cualitativa se hicieron catorce perfiles, configurando la resistividad vs separación electrónica AB/2 en el punto central del sondeo. La localización de los perfiles (Figura III-8) se hizo para cubrir toda la zona importante, enfatizando la porción central de las anomalías con secciones cruzadas.

El perfil 1-1' E-W, (Figura III-18) se localiza en el extremo norte del yacimiento y no muestra con claridad los efectos geotérmicos que producen la baja resistividad, sólo define los alineamientos estructurales y los efectos de las unidades litológicas.

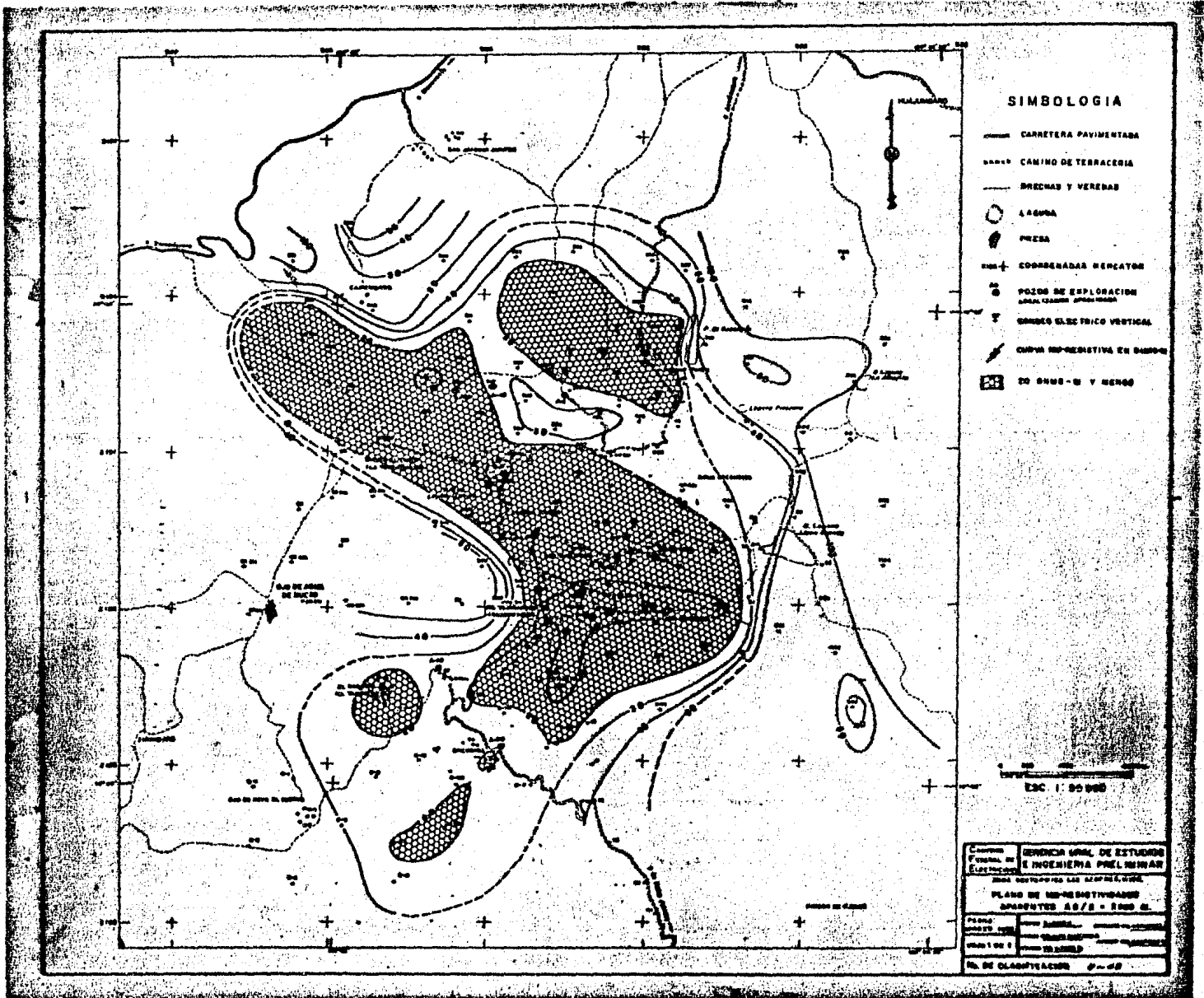


FIGURA III-16

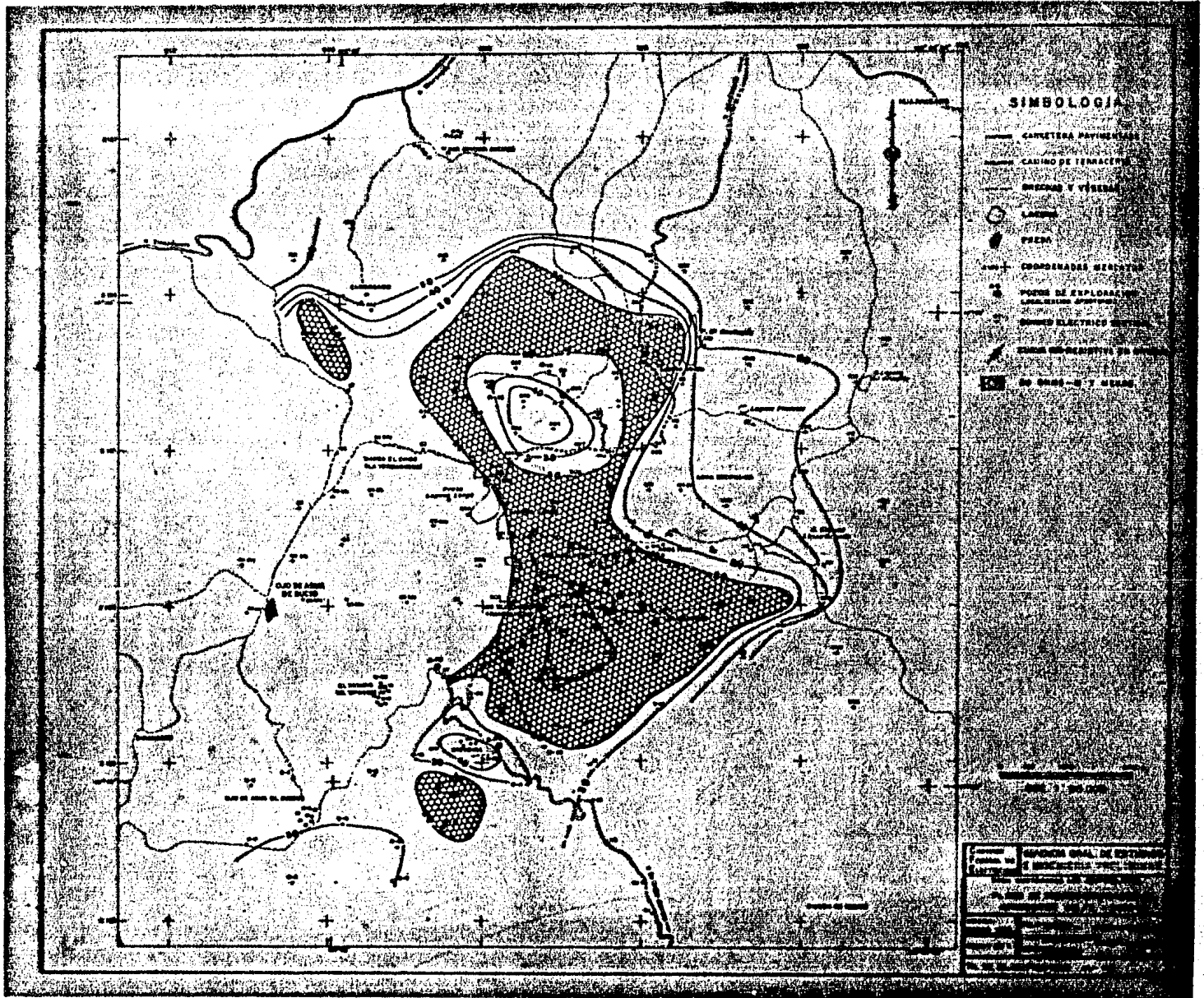


FIGURA III-17

El perfil 2-2' E-W, (Figura III-18) manifiesta los extremos de las anomalías con valores de resistividad entre 30 y 15 Ohms-m, considerados altos pero con probable asociación a los ascensos hidrotermales.

El perfil 3-3' E-W, (Figura III-18) enfatiza los efectos -- más importantes asociados al geotermalismo de la zona norte, con valores de resistividad menores a 10 Ohms-m así como los alineamientos producidos por las estructuras y las unidades volcánicas.

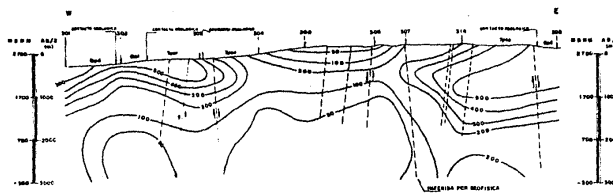
El perfil 4-4' E-W, (Figura III-18) localizado en la anomalía Sur muestra posibilidades hidrotermales en el extremo W y -- porción central, donde se localiza el pozo de exploración A-1, -- los alineamientos estructurales se observan claros, así como los efectos de las unidades volcánicas con poca o nula alteración hidrotermal.

El perfil 5-5' E-W, (Figura III-18) muestra los efectos del geotermalismo mediante las resistividades menores a 30 Ohms-m, -- esta aseveración fue hecha basándose en la experiencia de las -- perforaciones realizadas en este sector.

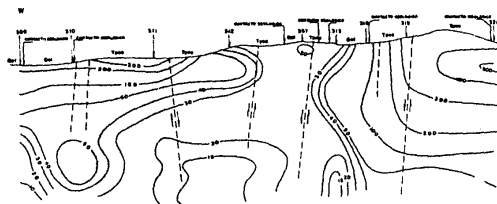
El área más importante es la que se localiza entre la sección 4-4' y 5-5' y es ahí donde se han obtenido las localizaciones más exitosas.

El perfil 6-6' E-W, (Figura III-18) podría ser el marco que limita el yacimiento en la zona sur, teniendo posibilidades productoras o de zonas permeables profundas entre los sondeos E-15,

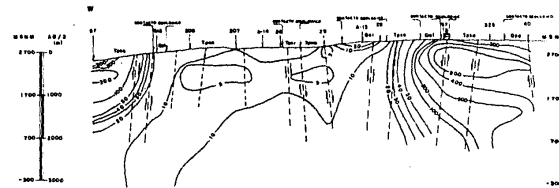
LÍNEA No. 1-1'



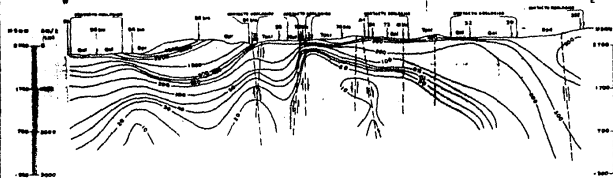
LÍNEA No. 2-2'



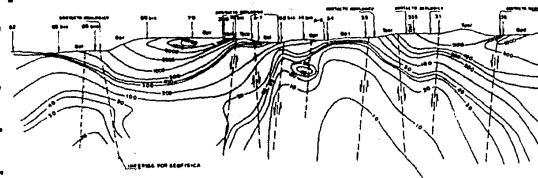
LÍNEA No. 3-3'



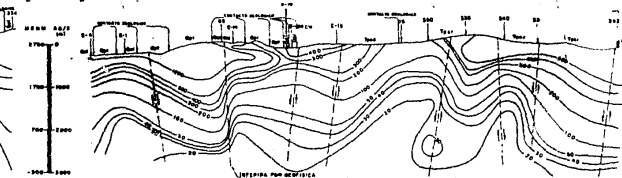
LÍNEA No. 4-4'



LÍNEA No. 5-5'



LÍNEA No. 6-6'



SIMBOLOGIA

- CORTA INMEDIATA EN SURTI 10
- LOCALIZACIÓN DEL SONDEO ELECTRICO
- INTERFICIA POR GEOPHISICA
- FALLA INCLINADA
- FRACTURA
- CONTACTO GEOLÓGICO
- PISO DE EXPANSION
- BUELOS Y ALUVION
- TUBOS Y CANALES SUBTERRANEOS
- POLVOS TERMOCLASTICOS
- GARCILLAS SUBSOPRESAS
- POLVOS "CASA DE PIEDRA"
- ARGENTINA "BRANCO VIEJO"

LOS PERFILES DE ELABORACION CONTIENEN LOS VALORES DE RESISTIVIDAD APARENTE Y LA SEPARACION DE ELECTRODOS EN METROS, DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS EN METROS Y PROFUNDIDAD

0 500 1000 2000
ESCALA GRAFICA

INSTITUCION: GERENCIA GENERAL DE ESTUDIOS E INGENIERIA PRELIMINAR
 TITULO: ESTUDIO DE RESISTIVIDAD APARENTE Y PERFILES ELECTROGEOLOGICOS
 PERFILES DE RESISTIVIDAD APARENTE DE LAS LINEAS Nos. 1-1', 2-2', 3-3', 4-4', 5-5' Y 6-6' DE RUMBO W-E
 FECHA DE ELABORACION: 20 de Julio de 1951
 PLAZA DE ELABORACION: Oficina de Estudios y Proyectos de la Gerencia General de Estudios e Ingeniería Preliminar
 No. CLASIFICACION: 2-1-1

FIGURA III-18

15 y 350. Esta porción se podría recomendar para la perforación de pozos reinyectores para desalojo de las aguas de desecho y recarga del yacimiento. Si consideramos una red de flujo eléctrico simple, donde nuestro principal conducto sea el fluido hidrotermal, tendríamos una dirección de flujo hacia el NW asociado al sistema basal NW-SE. Esta consideración nos daría la base para un estudio posterior de redes de flujo eléctrico que nos definan con mayor precisión las direcciones hidráulicas de flujo y la asociación de éstas con las estructuras y unidades litológicas.

El perfil 7-7' S-N, (Figura III-19) muestra elementos para pensar que es parte del marco que está limitando al yacimiento, en esta configuración se observan los alineamientos que se aso-cian a las fallas.

El perfil 8-8' S-N, (Figura III-19) muestra los extremos de la zona Sur y cruza una parte considerada de importancia del yacimiento Norte, los alineamientos isorresistivos no son muy claros para definir algunas fallas, pero en general se definen las estructuras más importantes.

El perfil 9-9' S-N, (Figura III-19) mantiene abierta una anomalia menor de 10 Ohms-m que está definida por un sondeo, la parte más importante de esta sección inicia en el sondeo 15 en-trando a la zona Sur y sus bajos resistivos que han sido comprobados por los pozos A-16, A-6, A-17, A-37 y A-1. Al pasar por las fallas escalonadas de Agua Escondida y Laguna Larga se obser

va un ascenso en los datos de resistividad que separa y limita a los dos yacimientos. Los pozos A-23 y A-25 han confirmado esta discontinuidad geoelectrica. Se puede pensar que estudios más profundos den la pauta para comprobar la comunicación entre los dos sectores.

El perfil 10-10' S-N (Figura III-19), tiene valores bajos de resistividad a una separación de 1 000 m de AB/2 y se localizan en la porción SE del yacimiento. A esta anomalía se le asocian; dos estructuras geológicas que pueden corresponder a zonas permeables o a mineralizaciones de productos hidrotermales con alta temperatura, propios de un autosellamiento.

Las variaciones hacia el norte del yacimiento muestran altos resistivos superficiales y resistividades bajas a más de 3 000 m de AB/2 que pueden ser originados por una acumulación de calor.

El perfil 11-11' NW-SE (Figura III-20), cruza la zona norte del yacimiento hacia la discontinuidad central que está dividiéndolo. Las estructuras que gobiernan el sistema geotérmico se observan claramente, relacionándose éstas con los gradientes de resistividad. Las anomalías geoelectricas con valores entre 20 y 5 Ohms-m están ligadas a las condiciones óptimas del yacimiento y tienen una extensión lineal de 5.0 Km, confinadas por dos sistemas estructurales N-S muy claros en su definición geoelectrica.

El perfil 12-12' SW-NE (Figura III-20), también cruza la zona norte del yacimiento y se localiza en él una anomalía de 4.5

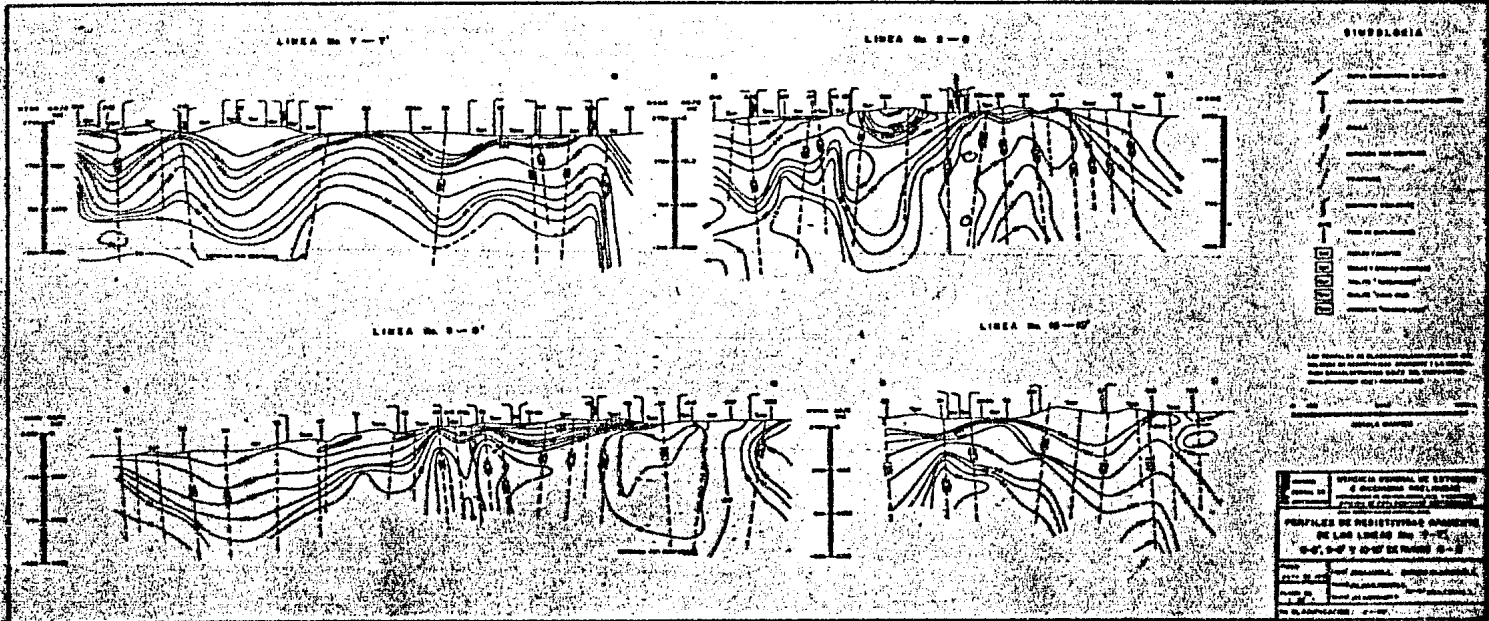


FIGURA III-19

Km de extensión, esta anomalía está conformada por dos estructuras, al SW se localiza una falla local de poca extensión precedida de una serie de escalonamientos y pequeños grabens hasta la falla Laguna Verde de poca definición superficial, pero con gran definición geoelectrica en el subsuelo. Es evidente que el fracturamiento está facilitando el ascenso de fluido hidrotermal y los procesos de autosellamiento, siendo el fracturamiento más reciente el que tiene mayores perspectivas de producción o las fallas que hayan experimentado algún proceso de reactivación actual.

El perfil 13-13' NW-SE (Figura III-20), se localiza en la zona Sur del yacimiento, al cruzarlo, muestra una anomalía con una extensión lineal de 2.8 Km, ésta se encuentra conformada por altos resistivos asociados a las fallas de Agua Fría y del China po. Los valores de resistividad más representativos son los menores de 20 Ohms-m, que coinciden con las condiciones termodinámicas de la zona de producción.

El perfil 14-14' SW-NE (Figura III-20), se localiza en la porción Sur del yacimiento y muestra una anomalía de 3 Km de extensión lineal, desde el sondeo 338 hasta el 41; está limitada al SW por la falla El Viejón y al NE por un gradiente transicional asociado con una estructura de rumbo N-S. La configuración de 20 Ohms-m define los ascensos hidrotermales propiciados por el fracturamiento y sólo en el caso del sondeo 338 el valor de 10 Ohms-m se tendría que verificar por medio de la perforación para conocer el tipo de actividad y condiciones de subsuelo se definen con ese valor aislado.

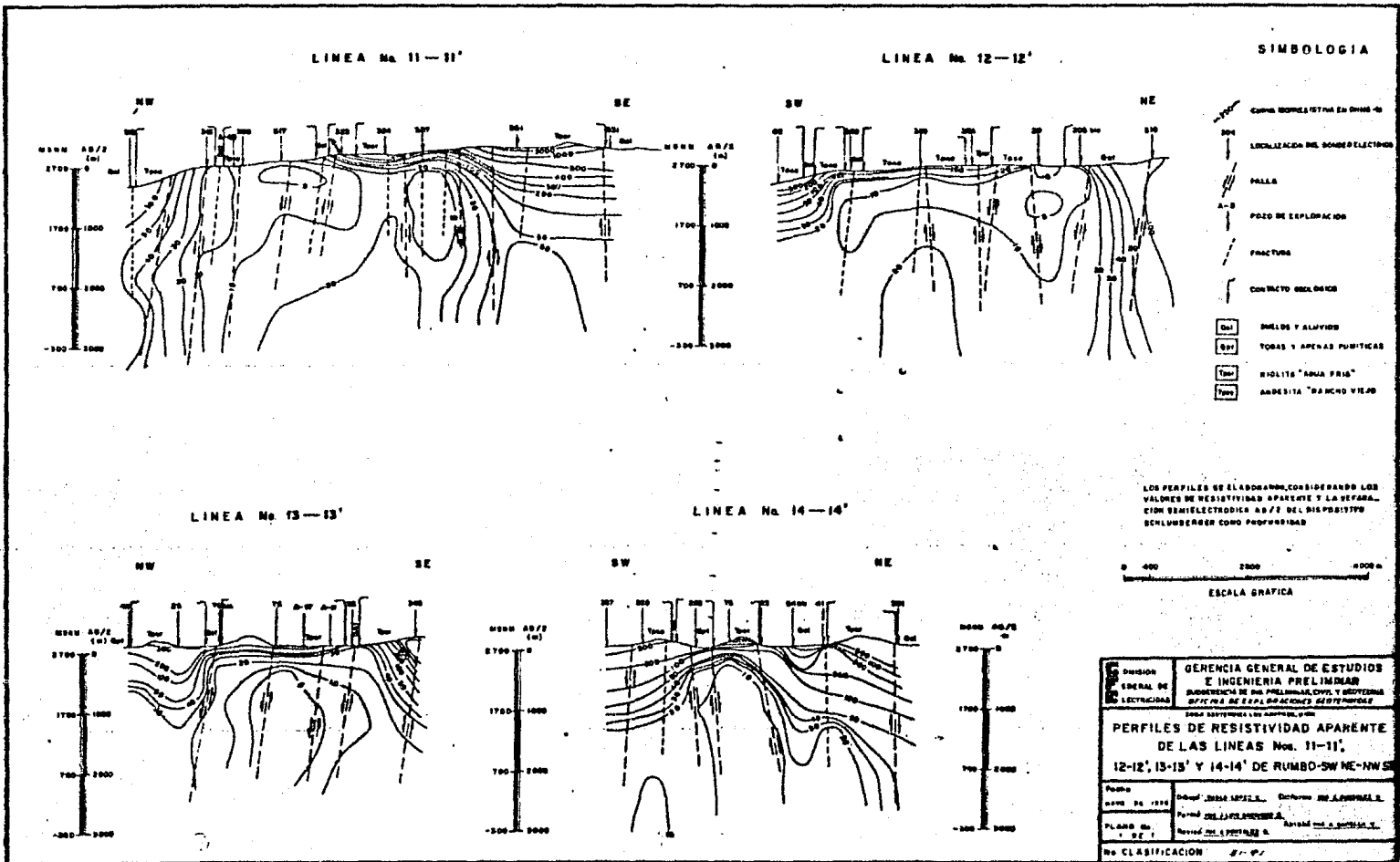


FIGURA III-20

AGRUPACIÓN DE ANOMALÍAS GEOELÉCTRICAS.

La Agrupación de Anomalías Geoeléctricas se realiza sobreponiendo los planos de configuración isorresistiva de las separaciones semielectródicas de $AB/2 = 500, 1\ 000, 1\ 500, 2\ 000, \dots, 2\ 500$ y $3\ 000$ m y los planos cuantitativos. Los valores de resistividad seleccionados como anomalías son de 10 y 20 Ohms-m, considerados como representativos de las condiciones geotérmicas del sistema roca-fluido.

La agrupación de 10 Ohms-m y menos (Figura III-21), muestra la extensión máxima que podría tener un medio de baja porosidad fracturado, saturado de salmuera a condiciones de equilibrio (270°C y 55 bars). Los pozos localizados en esas anomalías han comprobado la existencia de esas condiciones pero, es posible que este valor de resistividad se asocie a un medio donde han actuado procesos de alteración hidrotermal acumulándose arcillas y minerales que limitan la permeabilidad. Para comprobar estas dos condiciones geológicas, se proponen 10 pozos localizados 6 en la zona Norte y 4 en la zona Sur, pensándose que con estos pozos se podrá cubrir la etapa de exploración.

La agrupación de 20 Ohms-m y menos (Figura III-22), muestra una extensión muy conservadora de los valores anómalos para reducir el riesgo de pozos fríos impermeables. Al valor de 20 Ohms-m se le podrían asignar condiciones de un medio de baja porosidad y permeabilidad con grandes posibilidades de un fracturamiento que incremente sus propiedades petrofísicas, conteniendo un fluido a condiciones de equilibrio (200°C y 16 bars). Sólo en



FIGURA III-21

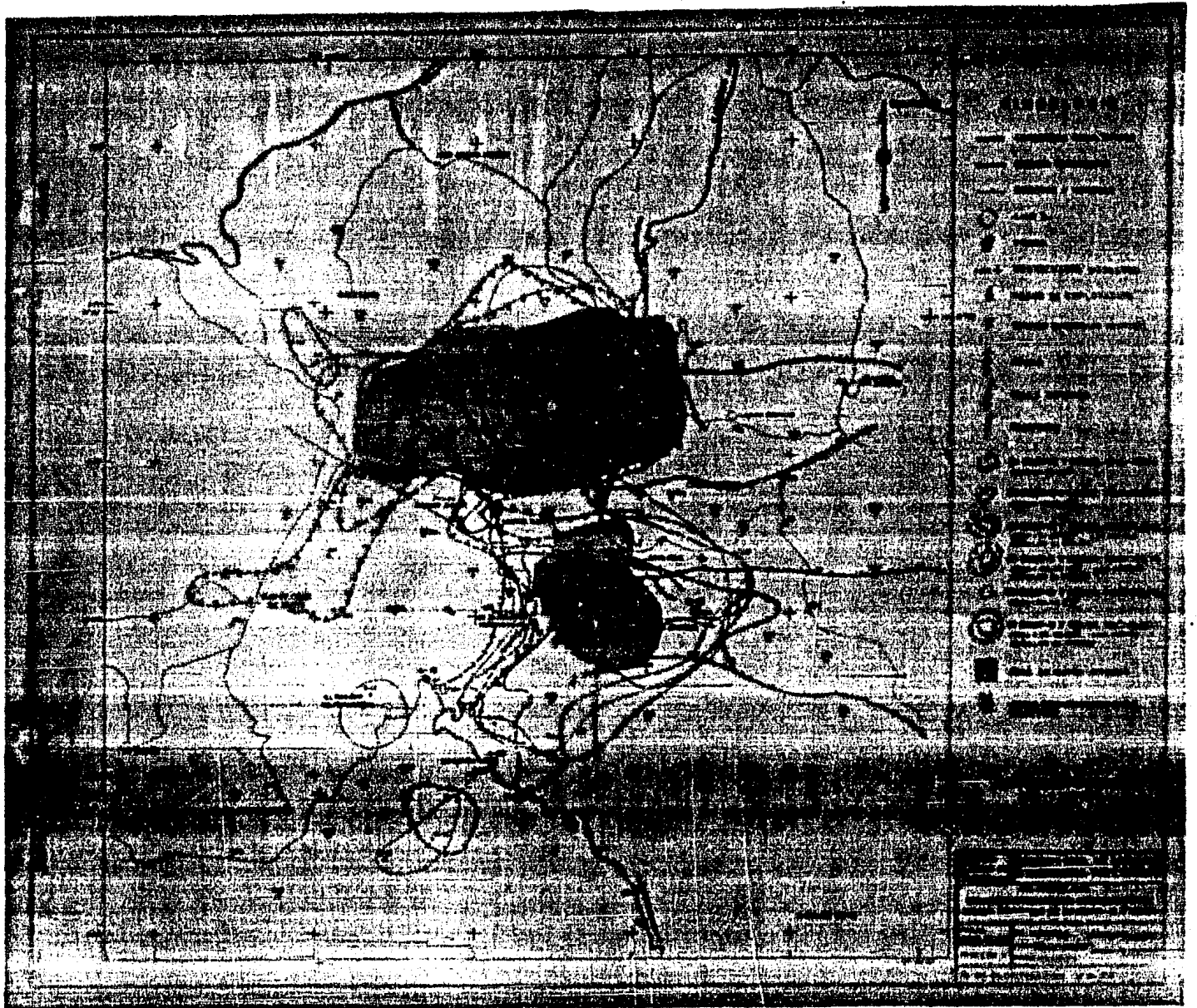


FIGURA III-22

el caso de fractura y bloques fracturados que han experimentado un recalentamiento, esta configuración podría representar a una roca seca caliente a una temperatura superior a los 270°C. Para realizar una comprobación de lo expuesto, se proponen otros 5 pozos localizados 3 en la zona Norte y 2 en la zona Sur, cubriendo la etapa de exploración.

Concluyendo; estas configuraciones son el marco que permite interpolar y extrapolar las condiciones geotérmicas del yacimiento para facilitar los cálculos y estimaciones del potencial geotérmico; otro aspecto relevante, es que en base a estas configuraciones y datos termodinámicos se puede crear: Un modelo matemático que facilite el estudio del comportamiento del yacimiento bajo diferentes esquemas de explotación y un modelo para estimar la entrada de agua al yacimiento (Capítulo V).

ANÁLISIS CUANTITATIVO

La interpretación cuantitativa de los sondeos (SEV'S), se realizó por medio de la superposición de curvas tipo, generadas a partir de modelos geoelectricos idealizados. Para su interpretación se utilizó el método de punto auxiliar, descrito con detalle en el manual de interpretación de Orellana y Mooney, 1976. En la mayoría de los casos, las curvas de campo admiten varias soluciones, por tal motivo, se simplificaron los modelos geológicos para lograr una mayor aproximación geoelectrica.

Para verificar los modelos geoelectricos se utilizó el programa de computadora realizado por Argello, S.M. en 1967, adapta

do al FORTRAN. El procedimiento de verificación consiste en alimentar el programa con los datos de la interpretación cuantitativa de la curva de campo (espesores y resistividades) y generar - una nueva curva que es comparada con la original si las curvas - son semejantes el proceso termina, sino, se reinterpretará la curva de campo y se repetirá el procedimiento hasta obtener el - resultado deseado.

Para la interpretación cuantitativa los datos de los son---deos interpretados (Tablas III-9, III-10 y III-11), se vacían en planos y perfiles que facilitan la interpretación global.

Los planos analizados son: "Conductividad Longitudinal"; - "Resistividades del Conductivo" y "Profundidad a la Cima del Conductivo" (Figuras III-23, III-24 y III-25). En ellos se observa la distribución de resistividades superficiales asociadas con la influencia de los ascensos hidrotermales y a las zonas de alteración hidrotermal. Los alineamientos de la conductancia longitudinal definen cuatro estructuras: La de Laguna Verde N-S y su continuación desplazada 800 m, el graben de Rancho El Viejón, La falla de Laguna Larga y la del Chinapo.

Las secciones electroestratigráficas (Figuras III-26, ----- III-27 y III-28), simplifican la interpretación estructural, obteniéndose bloques con diferente comportamiento geoeléctrico. - Se definieron las discontinuidades laterales de los bloques para enfatizar el modelo general que simplifica la interpretación de los eventos volcánicos.

Los modelos de la zona productora muestran una secuencia de cuatro a cinco capas; iniciando con una capa altamente resistiva; otra de conductividad media asociada a los acuíferos superficiales, la capa de baja resistividad vinculada con los ascensos hidrotermales y al fracturamiento; finalmente, la capa base que es tá definida por resistividades de intermedias a altas.

SONDEO	ℓ_1	ℓ_2	ℓ_3	ℓ_4	ℓ_5	E1	E2	E3	E4	*PROF.CIMA COND	*RESIST. DEL COND.
R-1	155	240	46	9		8	240	300		548	9
R-2	3000	200	600	430	19	5	55	24	110	194	19
R-3	320	110	1250	11		4	32	80		117	12
R-4	400	130	900	36		6	52	90		149	36
R-5	11000	420	10			9	360			369	10
R-6	5200	207	1205	318	9	8	8	52	158	227	9
R-7	3600	145	950	26		4	27	135		167	26
R-8	5750	230	1420	60		4	52	104		160	60
X-1	600	900	1325	21.5		9	28	36		74	22
X-2	600	39	760	12		3	3	105		112	13
X-3	2300	390	97			6	166			173	97
X-4	995	320	995	32		3	93	261		358	32
X-5	450	89	600	200		5	30	86		121	200
X-6	490	160	79			11	161			172	79
X-7	5000	1690	4000	190		7	21	52		81	190
X-8	26000	8500	850	85		4	55	257		317	85
X-9	465	1400	255	690	57	8	7	31	106	153	57
X-91	520	780	148	49		12	104	240		356	49
X-10	900	300	148			13	520			533	148
X-11	2000	130	400			3	85			88	400
X-12	480	48	2200	22		10	10	31		53	22
X-13	7100	1170	970	495		10	32	240		282	495
X-14	2600	1700	115	1000		7	109	220		117	115
X-15	13000	1300	450	240	24	4	24	15	480	523	24
X-16	130	85	1400	24		10	45	55		111	24
X-17	1900	75	1300	85		5	30	68		103	85
X-18	5200	1700	1120	370		9	8	60		78	370
X-19	6000	2000	190	49		4	38	164		207	49
X-20	44	29	1300	34		6	13	54		74	34
X-21	98	500	82	2400	80	8	10	14	49	82	80

ℓ_1 = Resistividad calculada en ohms-m del estrato 1

E1 = Profundidad a la base del estrato 1 en metros

* Conductancia a la cima del conductivo en mhos

* Profundidad a la cima del conductivo en metros.

SONDEO	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	E 1	E 2	E 3	E 4	E 5	E 6	(1)	(2)	(3)
301	500	1500	400	1750	570	24	2550	12	10	22	70	446	486	560	24	19
302	200	100	318	17				9	51	348				408	17	X
303	114	340	125	1900	625	30		10	34	30	15	266		356	30	X
304	74	450	52	1700	18	4		8	6	78	34	5060		5187	4	X
305	380	24	700	10	750			10	63	86	1403			160	10	140
306	10	21	420	16				13	24	132				160	16	X
307	75	14	64	33	110			8	8	176	1800			192	33	54
308	66	1700	205	67				8	157	644				810	67	X
309	2825	280	180	90	7	20		12	84	18	504	2240		618	9	320
310	300	58	620	145	31	1600		6	5	22	195	1000		230	31	32
311	110	1650	42	21				12	32	250				295	21	X
312	20	10	285	34	6			3	19	44	690			107	6	X
313	220	22	72	4	16			3	30	578	800			612	4	181
314	650	43	1290	48				3	17	252				272	48	X
315	175	1750	170	36	7			7	21	447	470			945	7	X
316	47	4	32	3	20			7	42	230	920			280	3	235
317	12	4	6	2	70	4	460	4	52	7	131	214	375	410	4	7
318	1000	40	240	85	21			4	54	137	1050			1247	21	X
319	1700	68	440	18				5	40	504				550	18	X
320	130	1800	130					10	262					273	130	X
322	80	16	65	26	2	700		7	16	92	450	240		566	2	120
323	3400	135	5	3600				19	60	528				79	5	96
324-A	2600	510	24	140				21	53	240				75	24	10
324-B1	1450	95	6	97				37	111	336				148	6	51
324-B1	1790	175	13	40				26	53	390				79	13	28
325	550	180	2800	90				3	52	200				256	90	X
326	150	100	1100	650	28			10	20	52	410			492	28	X
327	340	230	8	3	98			10	56	130	480			196	3	150
328	1400	1800	160	17	55			9	35	147	2040			191	17	116
329	590	290	740	170	19			12	22	43	736			814	19	X

- (1) Profundidad a la cima del conductivo.
(2) Resistividades del conductivo.
(3) Conductancia longitudinal.

ρ_1 = Resistividad Calculada en Ohms-m del Estrato 1.

E_1 = Profundidad a la Base del Estrato 1 en Metros.

SONDEO	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	E1	E2	E3	E4	E5	E6	(1)	(2)	(3)
330	180	95	875	90	9	19		9	3	29	346	1580		389	9	166
331-A	460	150	1400	300	220	24		10	9	28	9	354		410	24	X
331-B	1450	283	1000	34	175			4	21	200	2240			225	34	65
332	760	506	1000	167	850			10	105	300	4000			415	167	24
333	3400	5100	1600	63	30	750		5	19	211	44	1000		281	30	33
334	1700	540	1150	1900	160			11	68	64	112			255	160	X
335	1450	480	19	6	190			12	240	820	2135			1072	6	337
336	1500	4500	3800	760	79	19		5	9	55	448	960		1478	19	X
337	220	22	8	870				7	336	1700				343	8	195
338	1650	110	1050	10				3	30	68				33	10	X
339	4000	260	750	26	13			3	36	306	790			1135	13	X
339-B	1500	300	12	24				5	200	2100				205	12	175
340	950	320	1100	95	7	540		3	10	130	374	1100		517	7	157
341	1450	2200	1400	2230	68	140		7	82	150	144	2400		384	68	35
342	1510	500	950	88	22			8	14	414	500			937	22	X
343	1850	73	940	9	180			8	24	93	750			125	9	83
344	2000	395	1320	49	25			14	17	330	585			946	25	X
345	1300	435	950	30	60			11	121	364	1800			496	30	60
350	460	155	75	60				12	150	150				312	60	X
350-B	1300	260	90	6	17			6	34	425	3520			465	6	586
351	2800	900	270	420	18	440		5	21	18	560			294	18	31
354	7000	680	1100	37	18			4	62	100	90			265	18	X
355	225	75	1400	18	2000			11	24	6	2300			42	18	127
357	67	13	210	4	84			6	150	87	275			243	4	65
358	8	1	22	2	12	3	67	4	2	12	11	230	450	260	3	121
359	150	220	7	720				11	13	416				24	7	57
359-B	22	1	28	1	18	3	105	6	6	14	32	102	750	162	3	220
362	85	6	10	2	62			10	120	91	270			221	2	112
363	190	19	510	16	85			4	31	29	2508			60	16	152
365	4400	170	4600	30	90			9	81	21	320			111	30	10
366	260	85	250	24	6000			3	3	140	190			147	24	7

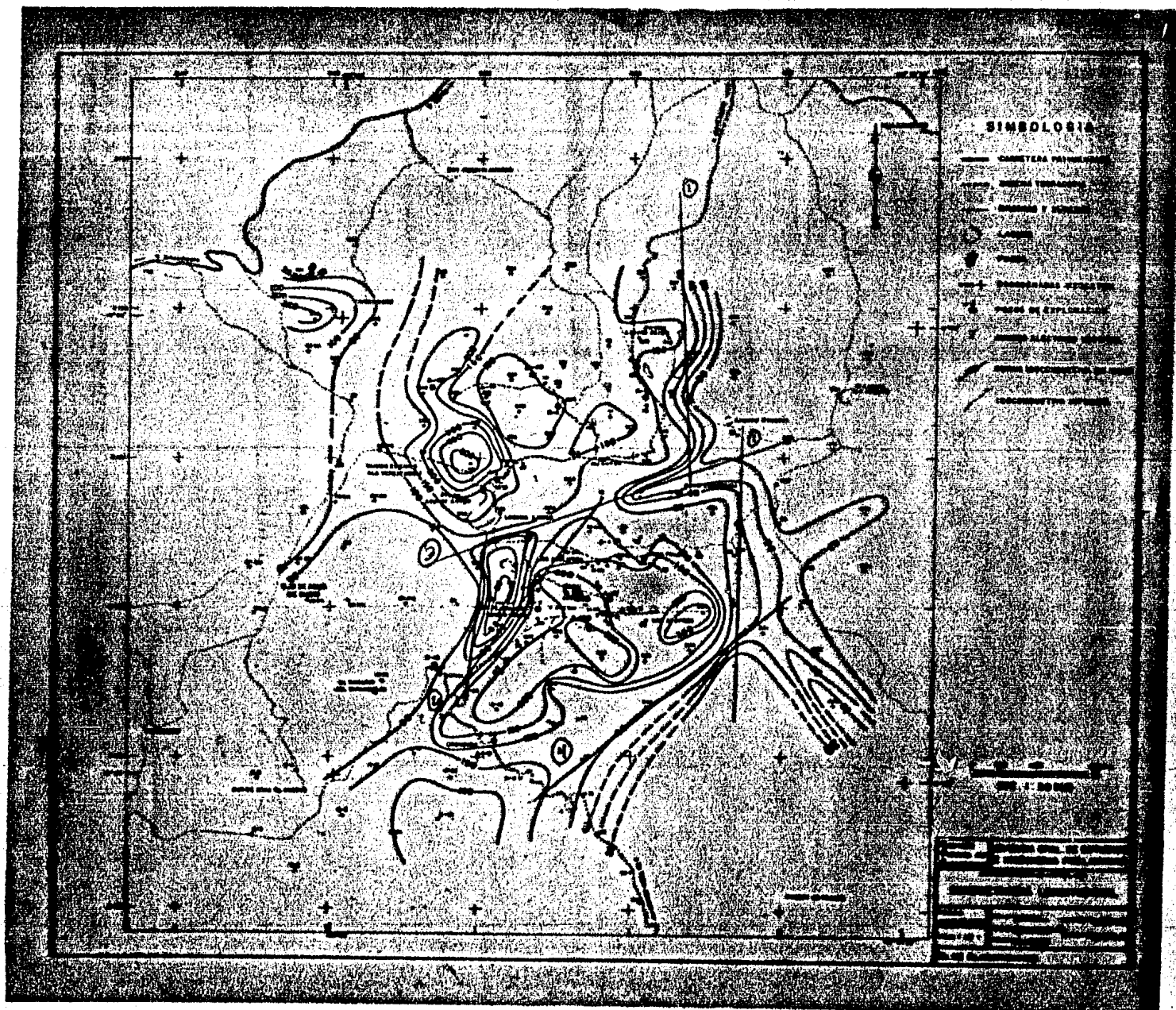


FIGURA III-23

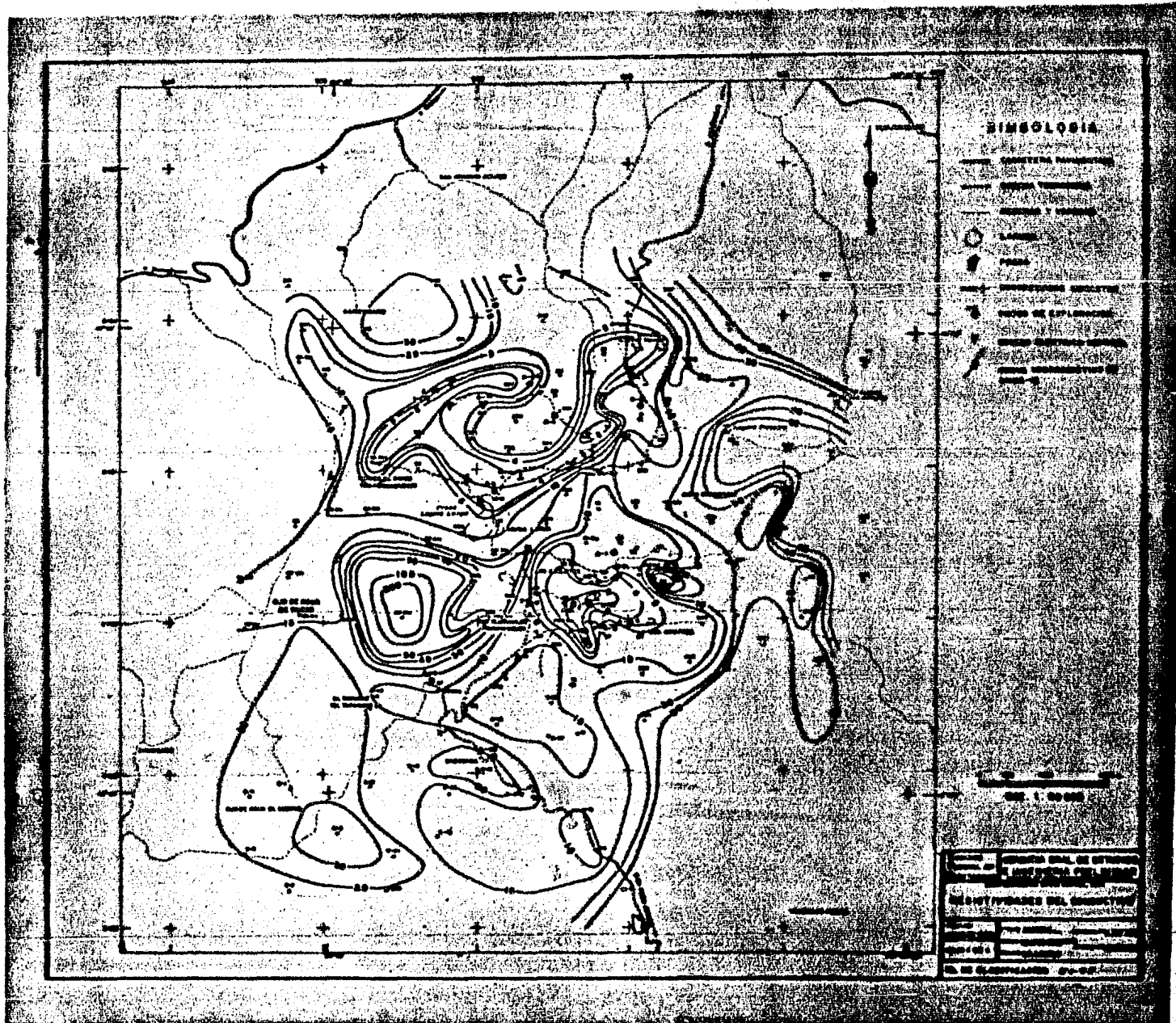


FIGURA III-24

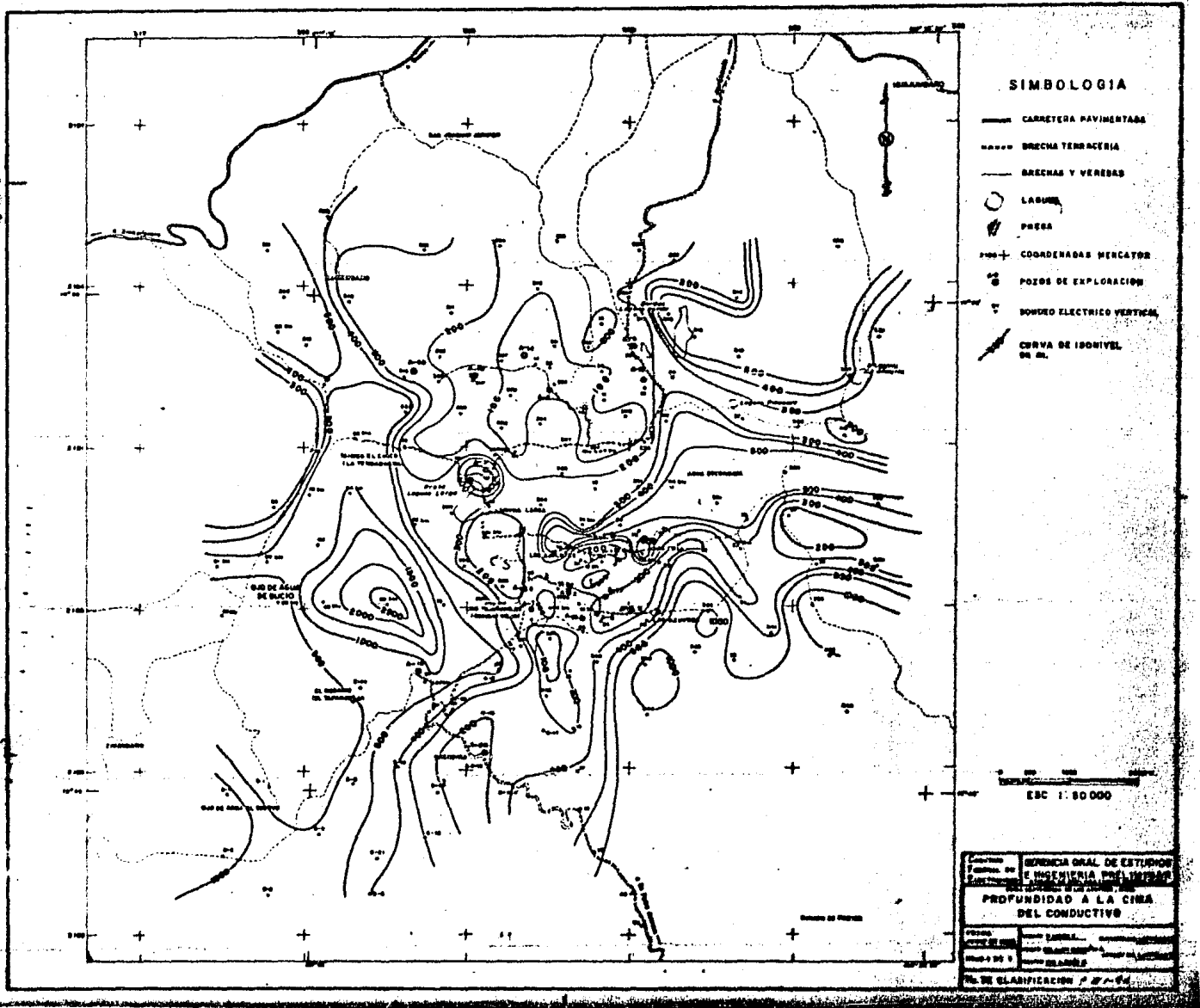


FIGURA III-25

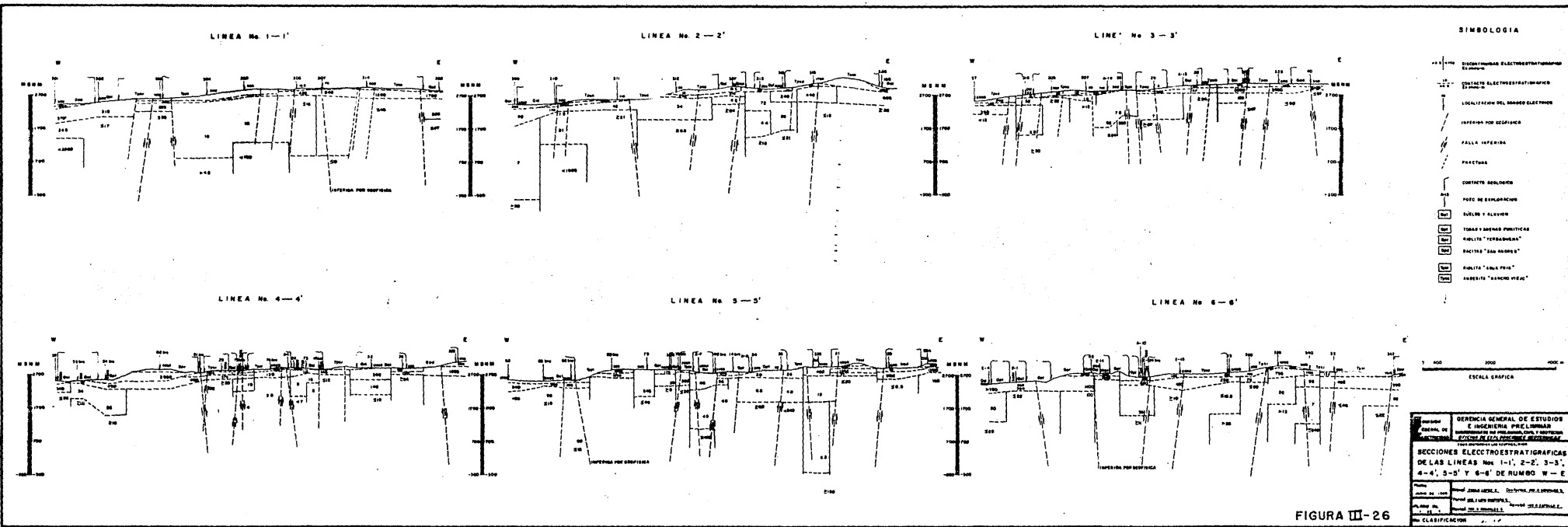


FIGURA III-26

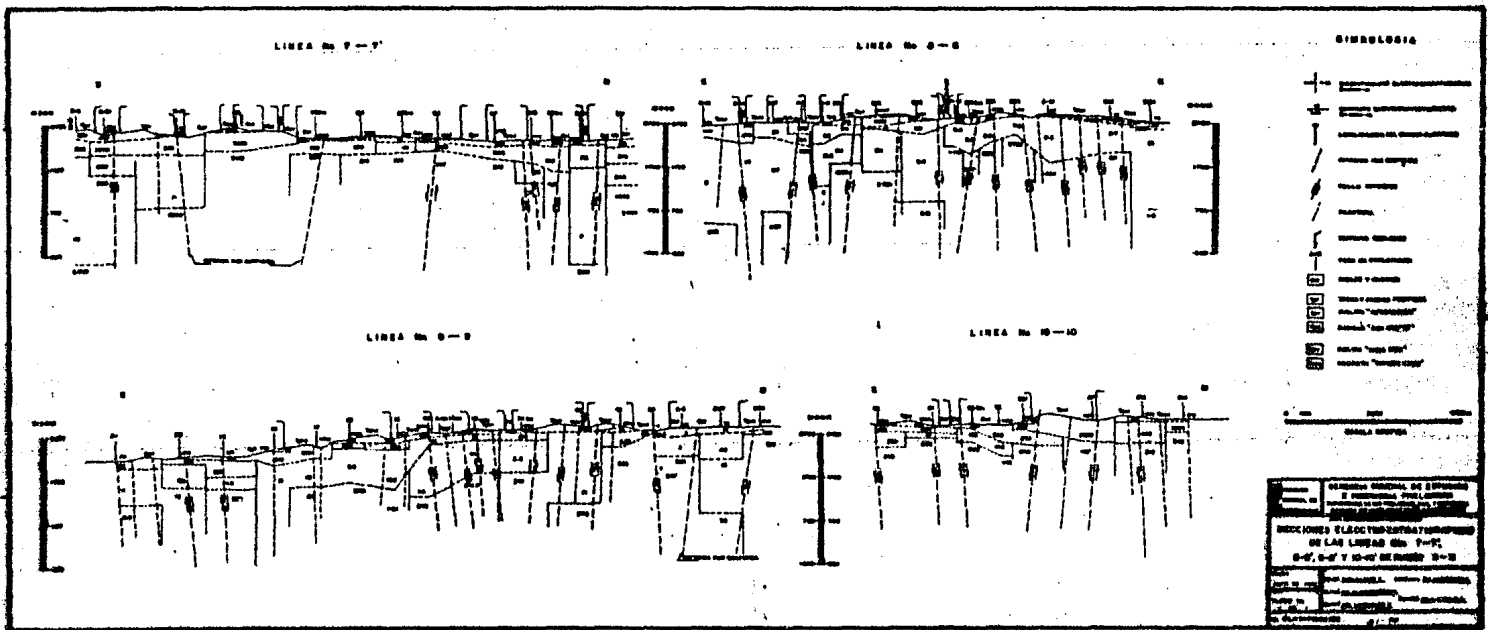


FIGURA III-27

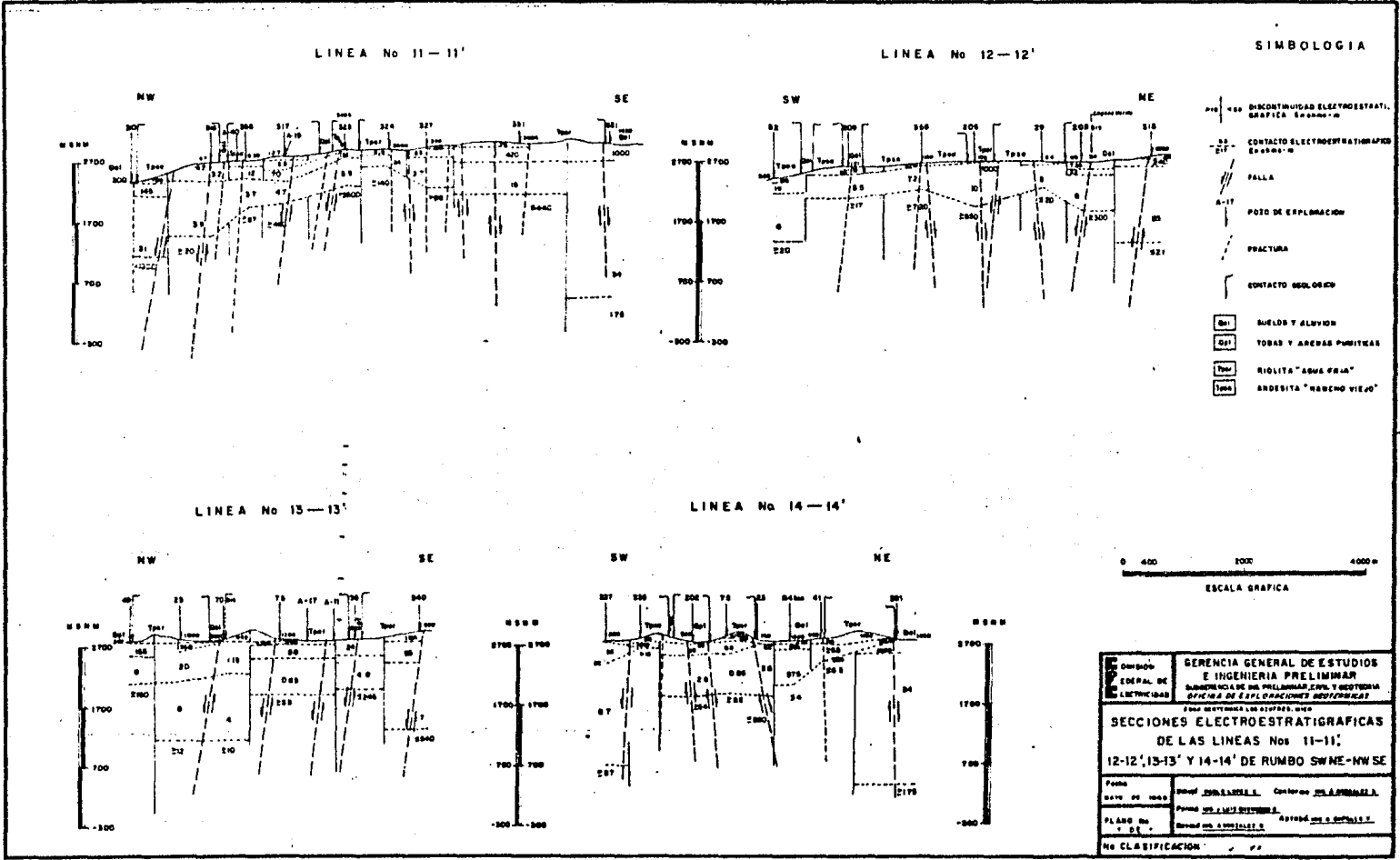


FIGURA III-28

CAPITULO IV

CAPITULO IV

- IV PROSPECCION MAGNETICA
- IV.1 IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICH. ESTUDIO REALIZADO
- IV.2 PLANOS DE RECOPIACIÓN MAGNÉTICA
- IV.2.1 INTERPRETACIÓN CUALITATIVA
- IV.2.2 INTERPRETACIÓN CUANTITATIVA

LISTA DE FIGURAS

- IV-1 COMPONENTES DE LA INTENSIDAD Y DIRECCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO :
- IV-2 VARIACIÓN DE LA COMPONENTE TOTAL DEL CAMPO -- MAGNÉTICO TERRESTRE
- IV-3 CORTE LITOLÓGICO DEL BARRENO No. 3
- IV-4 CORTE LITOLÓGICO DEL BARRENO No. 4
- IV-5 CORTE LITOLÓGICO DEL BARRENO No. 5
- IV-6 CORTE LITOLÓGICO DEL BARRENO No. 6
- IV-7 CORTE LITOLÓGICO DEL BARRENO No. 7
- IV-8 SECCIÓN GEOLÓGICA APOYADA EN LOS BARRENOS 4, - 3 Y 7
- IV-9 SECCIÓN GEOLÓGICA APOYADA EN LOS BARRENOS 6 Y 3
- IV-10 EJEMPLO DEL MÉTODO DE LOOPS Y GRÁFICA DE VALORES

- IV-11 LOCALIZACIÓN DE LÍNEAS MAGNETOMÉTRICAS
- IV-12 INTERPRETACIÓN CUALITATIVA DE PERFILES MAGNETOMÉTRICOS 1, 2, 3 Y 4
- IV-13 INTERPRETACIÓN CUALITATIVA DE PERFILES MAGNETOMÉTRICOS 5, 6, 7 Y 8
- IV-14 INTERPRETACIÓN CUALITATIVA DE PERFILES MAGNETOMÉTRICOS 9, 10, 11 Y 14
- IV-15 INTERPRETACIÓN CUALITATIVA DE PERFILES MAGNETOMÉTRICOS 12 Y 13
- IV-16 INTENSIDAD MAGNÉTICA VERTICAL
- IV-17 CONFIGURACIÓN DEL BASAMENTO MAGNÉTICO

IV PROSPECCION MAGNETICA

La prospección magnética se refiere a la medición del campo magnético terrestre y sus objetivos son los de investigar las variaciones o anomalías causadas por cambios en las propiedades físicas de las rocas.

Como es sabido, la superficie de la corteza terrestre está formada por muy diversas unidades litológicas y cada unidad se caracteriza por su contenido de minerales en diferentes proporciones y combinaciones que la hacen distinguirse de las demás.

Por la naturaleza de los minerales éstos se comportan de forma diferente ante la presencia del campo magnético terrestre, ya sea adquiriendo magnetización inducida, permaneciendo más o menos indiferente a sus efectos o adquiriendo un efecto repelente; teniendo como resultado de ese comportamiento natural, un campo magnético aumentado, disminuido o desviado.

Una característica importante del Campo Magnético Terrestre que afecta al magnetismo original, son los cambios de polarización, relativamente rápidos con respecto a los procesos geológicos de la corteza terrestre, y originan un magnetismo residual que se utiliza para estudios paleomagnéticos.

Se observa que la intensidad y dirección del campo magnético de las unidades litológicas está definido por los componentes del campo inducido y residual, y en el caso de las mineralizaciones de origen magnético, el campo está definido por las componen

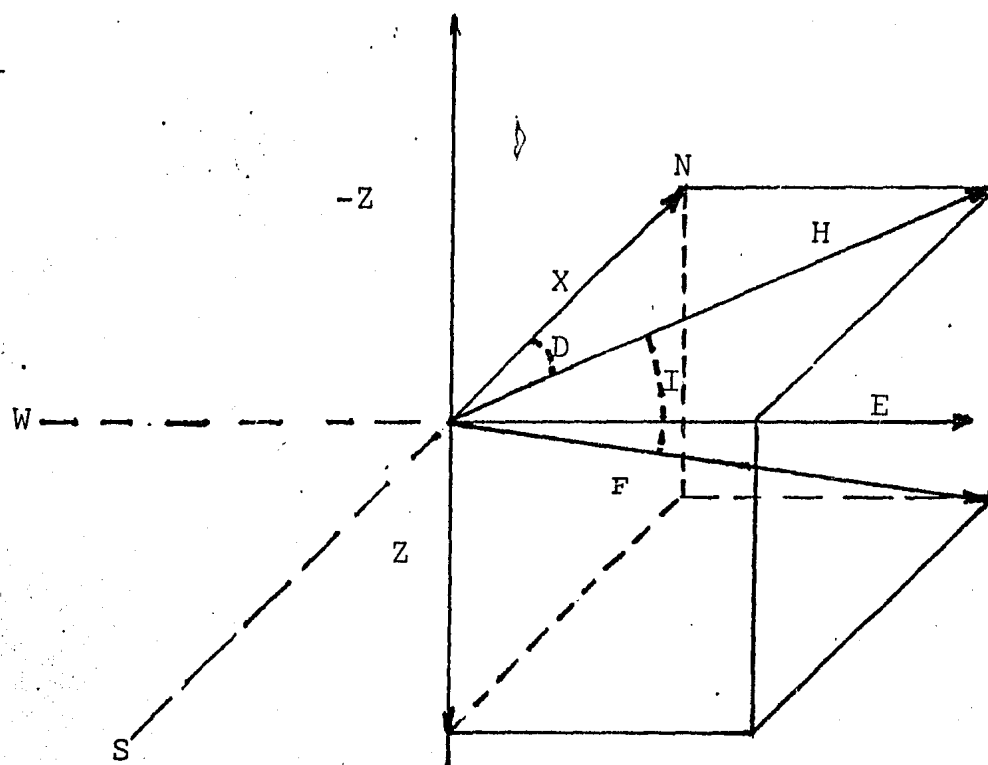
tes de su propio campo.

El gran campo magnético natural, denominado Campo Magnético Terrestre se puede observar y cuantificar fácilmente, la observación se realiza cuando la aguja de una brújula se orienta con respecto a las líneas de fuerza del campo magnético y la cuantificación de su intensidad se realiza mediante agujas de inclinación o por medio de magnetómetros. A los puntos de observación y medición donde la componente total del campo magnético esté verticalmente hacia abajo ($I = -90^\circ$) o hacia arriba ($I = 90^\circ$) se denominan polos magnéticos y si al punto de observación lo trasladamos pausadamente hacia el ecuador, la componente horizontal aumenta y la vertical decrece hasta tener sólo componente horizontal en el --- ecuador magnético (Figuras IV-1 y IV-2).

Las siguientes ecuaciones IV-1 y IV-2 relacionan los componentes y la inclinación del campo magnético. Para la dirección, es necesario conocer la declinación que tiene el norte magnético del geográfico.

$$F = \sqrt{H^2 + Z^2} \quad \text{--- IV-1}$$

$$I = \text{Arc tg} \left(\frac{Z}{H} \right) \quad \text{--- IV-2}$$



H = Componente Horizontal

Z = Componente Vertical

F = Componente Total

D = Declinación Magnética

I = Angulo de Inclinación

FIGURA IV-1.- COMPONENTES DE LA INTENSIDAD Y DIRECCIÓN
DEL CAMPO MAGNÉTICO

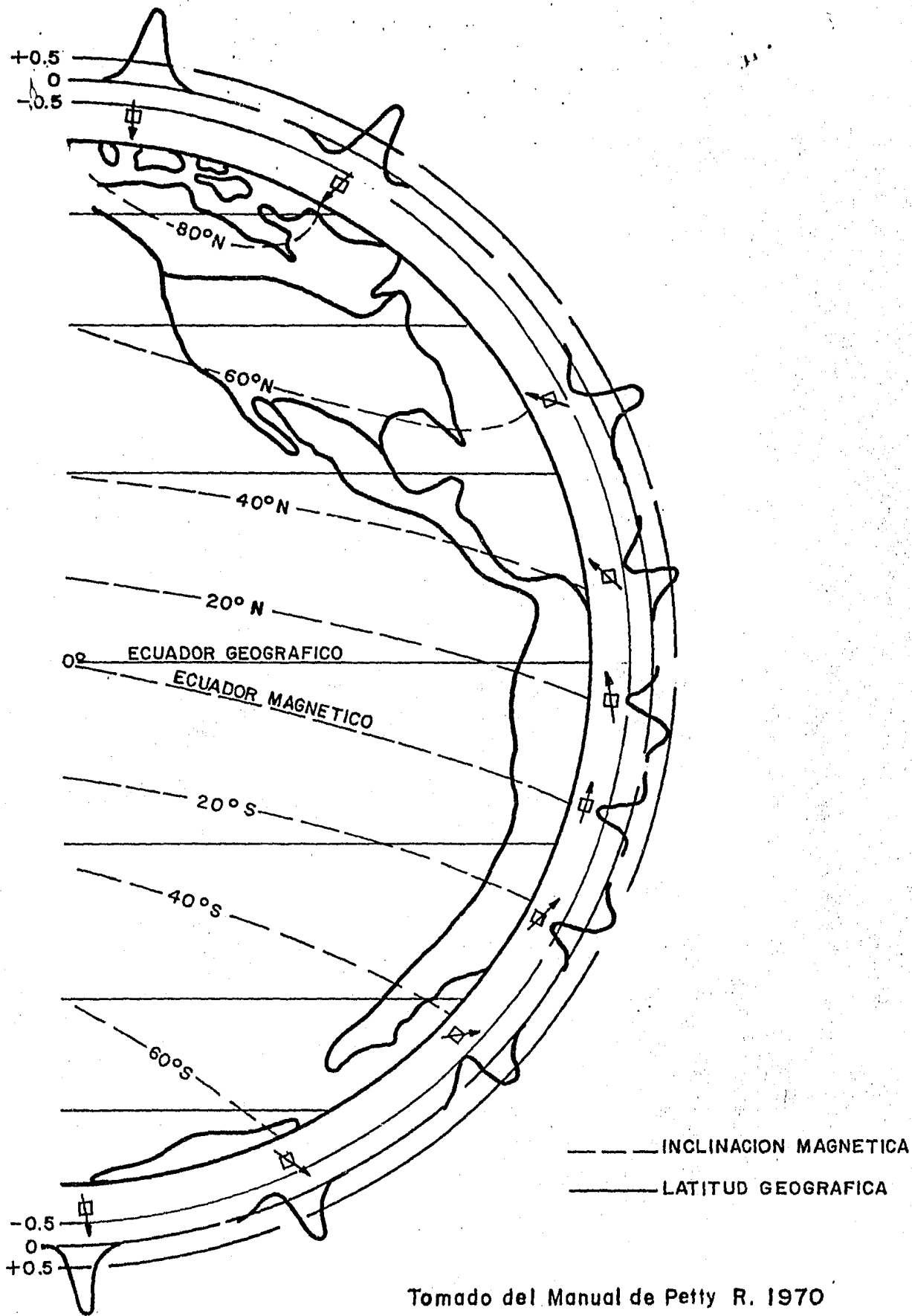


Fig. IV-2 Variaciones de la componente total del campo magnético

IV.1 IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICH., ESTUDIO REALIZADO.

Los objetivos de la prospección magnética en zonas geotérmicas, son para definir las variaciones en las propiedades magnéticas de las rocas, que están asociadas a zonas de alteración, cuerpos intrusivos, extrusivos y estructuras geológicas.

Como resultados de este método de exploración en la zona geotérmica de Ixtlán de Los Hervores, se definieron las estructuras geológicas, la diferenciación de los eventos magnéticos, la configuración de los mínimos magnéticos asociados a la mayor actividad hidrotermal, la profundidad a la cima del basamento magnético local y el cartografiado de las unidades litológicas.

Generalmente, el campo magnético observado es una combinación de las condiciones geológicas superficiales y del subsuelo, así como de las variaciones diurna y secular, todo esto, producen un efecto que se debe cuantificar y eliminar de la información y tener los datos a una misma referencia. Realizado lo anterior se prosigue con una remoción de los efectos magnéticos no deseados, este proceso se realiza: restando los efectos del campo magnético regional a un suavizamiento o filtrado de datos, logrando enfatizar las anomalías buscadas.

ANTECEDENTES GEOLÓGICOS DE LA ZONA

Los antecedentes geológicos de la zona están referenciados en el capítulo II, sólo se anexan los cortes litológicos de los barrenos y las secciones litológicas apoyadas en ellos (Figuras -

BARRENO No. 3

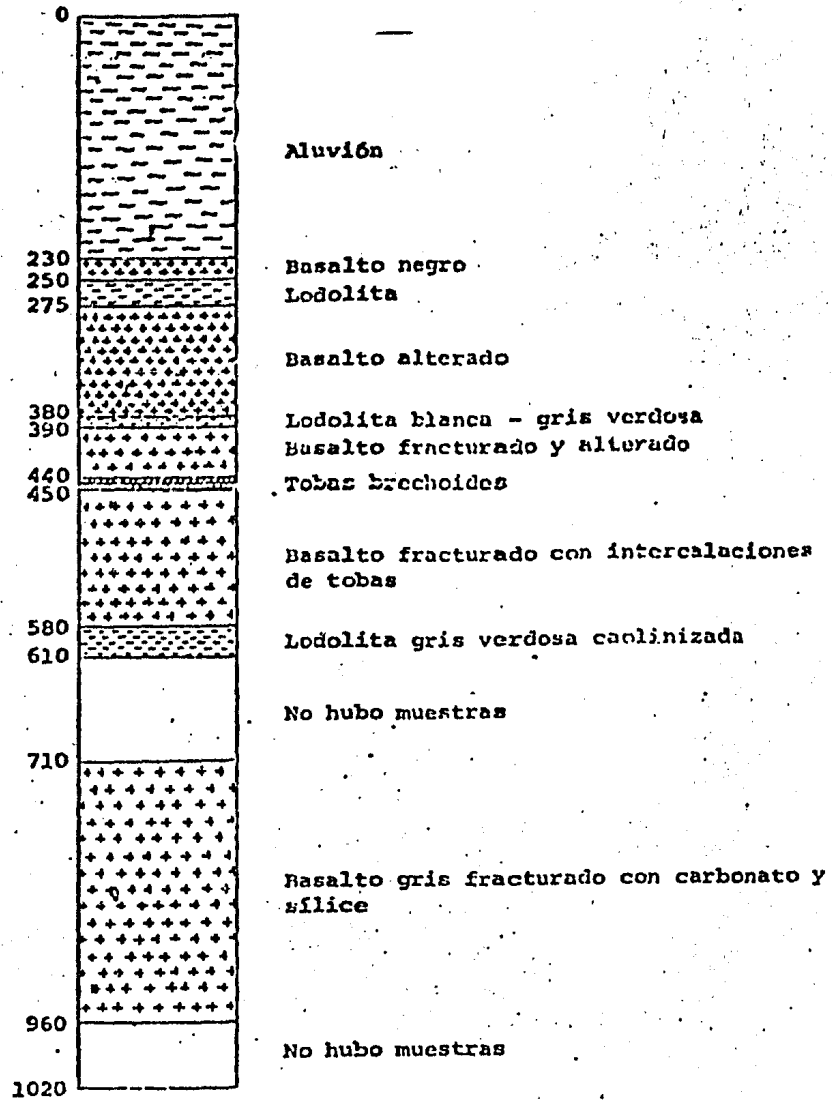


Figura |V- 3 Corte litol6gico del barreno No. 3

BARRENO No. 4

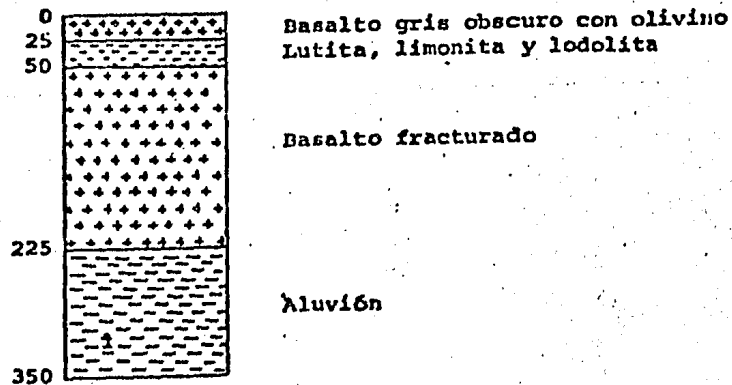


Figura |V- 4 Corte litol6gico del barreno No. 4

BARRENO No. 5

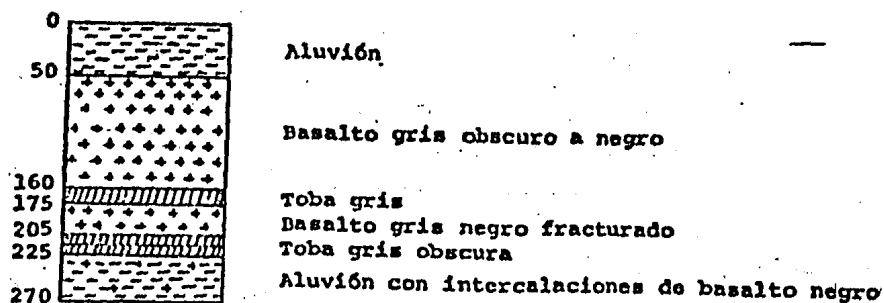


Figura IV- 5 Corte litol6gico del barreno No. 5

BARRENO No. 6

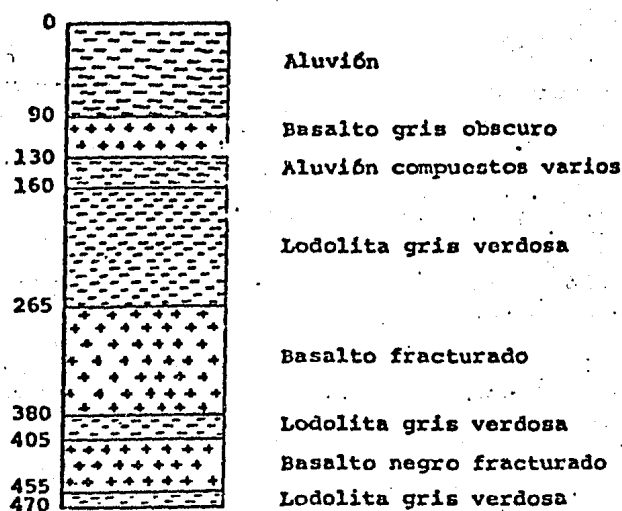


Figura IV- 6 Corte litol6gico del barreno No: 6

BARRENO No. 7

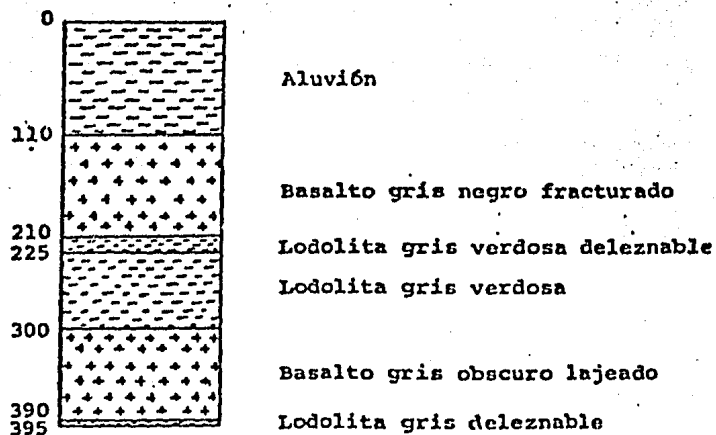


Figura IV - 7 Corte litol6gico del barreno No. 7

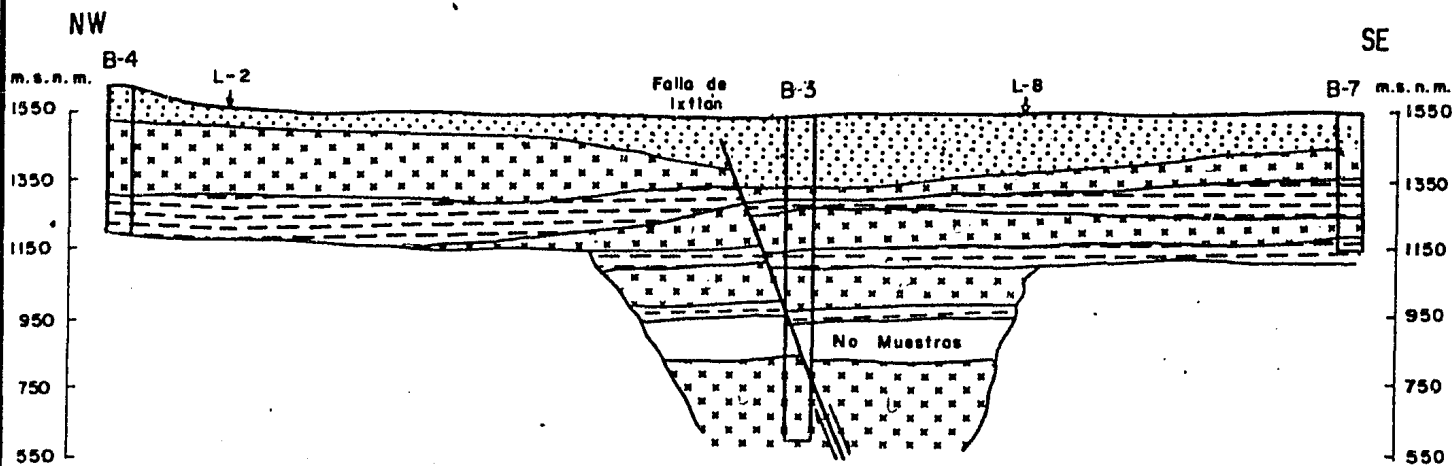


FIGURA IV-8.- SECCION GEOLOGICA APOYADA EN LOS BARRENOS 4-3-7

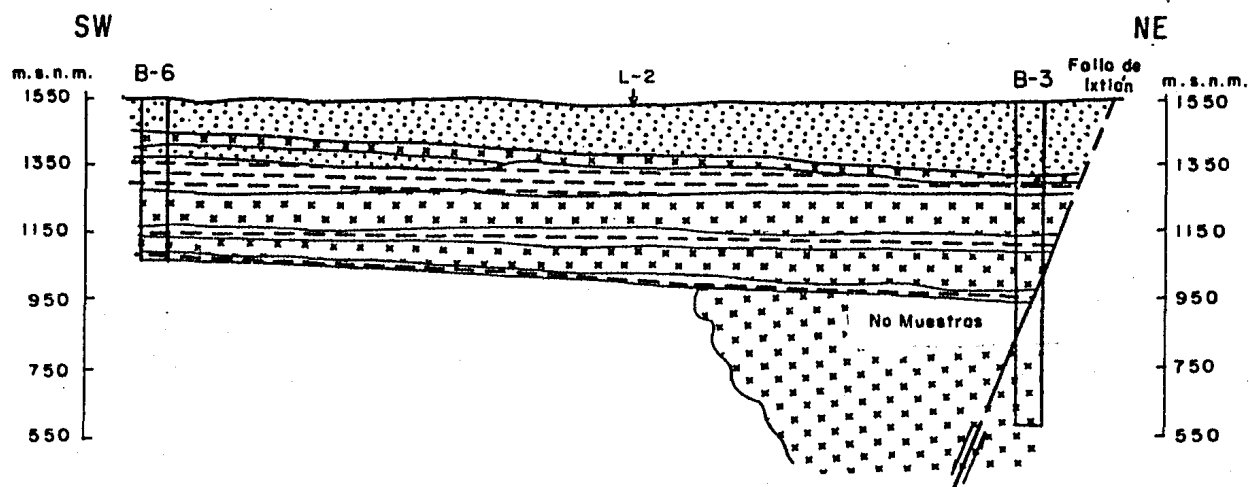








FIGURA IV-9.- SECCION GEOLOGICA APOYADA EN LOS BARRENOS 6-3

- L-2 CRUCE DEL PERFIL MAGNETOMETRICO No. 2
- B-4 BARRENO No. 4
-  FALLA GEOLOGICA
-  CORTE LITOLOGICO DEL BARRENO FUERA DE ESCALA

-  ALUVION
-  BASALTO
-  LODOLITA
-  TOBAS



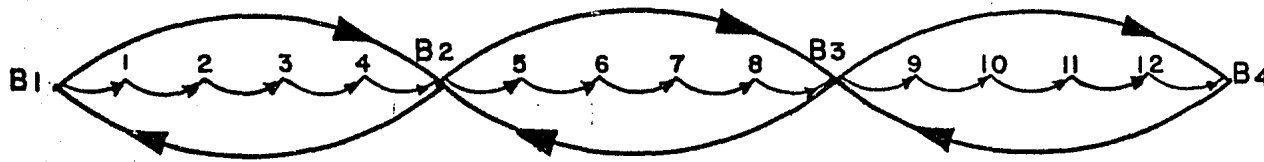
IV-3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9). Los objetivos de esta información son para facilitar la interpretación magnetométrica y la identificación de las unidades litológicas.

GENERALIDADES DE LOS PROCEDIMIENTOS DE CAMPO Y GABINETE

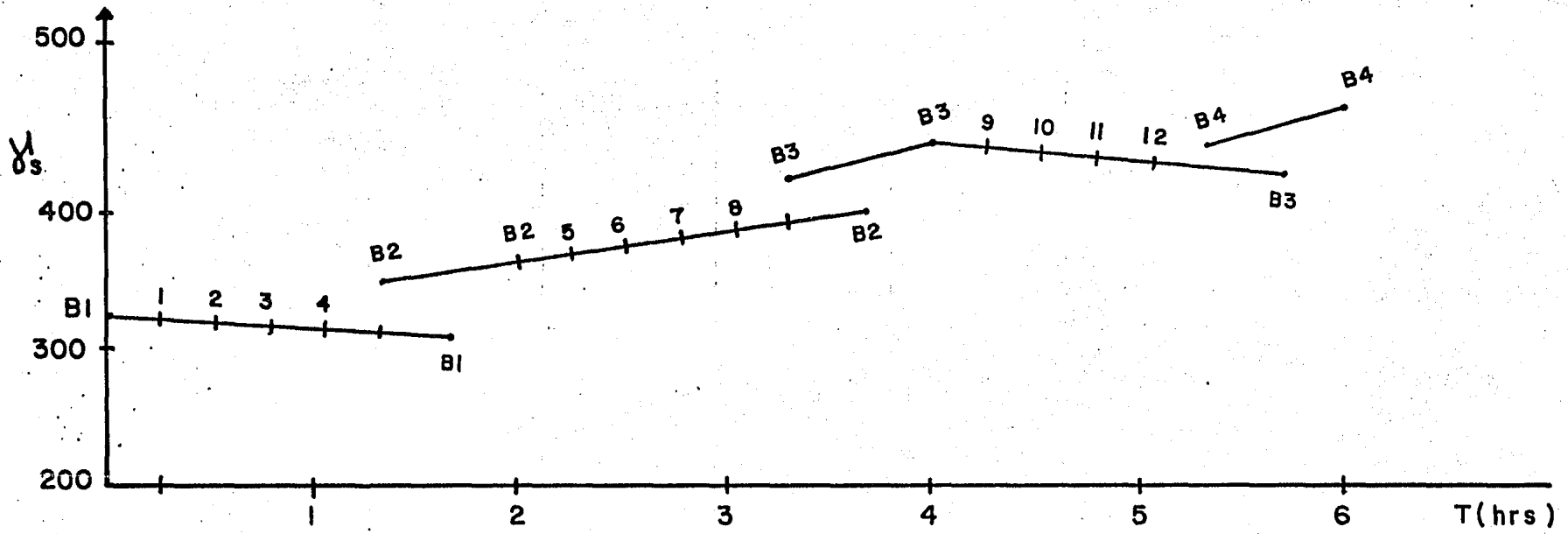
La campaña de prospección magnética, llevada a cabo en la zona geotérmica de Ixtlán de Los Hervores, Mich., consistió de dos períodos de levantamiento de campo y uno de interpretación global. Durante estos períodos de campo, se observaron 831 Km con 1070 estaciones cubriendo una superficie de 100 Km².

El método de campo utilizado está discutido en la literatura como el de loops o salto de rana y consiste en realizar lecturas a lo largo de secciones o polígonos cubriendo un loop en un tiempo de 2 horas, con \pm 30 minutos de tolerancia. Este método, facilita la corrección por variación diurna y por deriva del aparato sin utilizar una estación base fija. La siguiente figura IV-10, muestra el método y un ejemplo con las gráficas de valores para cada base y estación. La corrección que se realiza es de la siguiente forma: Durante el intervalo de tiempo T si la lectura de la base muestra un incremento de valor ΔY cada estación en ese intervalo T será compensado con un valor $\Delta Y \Delta t/T$ donde, Δt es el tiempo donde la lectura inicial en la base hasta el momento de la lectura a corregir y ΔY es $Y_2 - Y_1$ que son los valores leídos en la base.

Para el levantamiento de datos, se utilizó un magnetómetro marca SHARPE, modelo MF-1-100 que mide la componente vertical del



B1, B2, B3 y B4 BASES MAGNETOMETRICAS
 1, 2, 3 ESTACIONES MAGNETOMETRICAS



Y_s y hrs NIVELES RELATIVOS; CORRECCION ΔY $\Delta T/T$

FIGURA IV-10: EJEMPLO DEL METODO DE LOOPS Y GRAFICA DE VALORES

campo magnético con una gamma de precisión.

Con el objeto de evitar las posibles variaciones locales se hicieron cinco lecturas por estación y por base, distribuidas en forma de cruz orientada hacia los puntos cardinales, separadas un metro del centro; de estas cinco lecturas se tomó el promedio como dato magnético.

La corrección final realizada a los datos consistió en restar los efectos del campo magnético vertical. Para la fecha del estudio, este tenía un valor de 31,550 gammas en las coordenadas $20^{\circ}10'$ de latitud norte y $102^{\circ}23'$ de longitud oeste, otra corrección es por variación diurna y deriva realizada implícitamente al reducir las observaciones de campo. Una vez corregidos los datos se procede a vaciarlos en planos y secciones para aplicar el método de Leo J. Peters que permite calcular la profundidad al basamento magnético; este método está íntimamente ligado a la amplitud de la anomalía donde $h = 1.6 S$ y las condiciones de aplicación son 1) que la masa anómala tenga forma tabular, 2) que esté imantada uniformemente en dirección vertical. En el caso de la zona de estudio, se comprobó por medio de los barrenos que se trata de derrames basálticos con alternancias de lutita, las que están formando el basamento magnético, por lo que se pudo aplicar el método.

El trabajo de campo se inició con un levantamiento de líneas magnetométricas regionales con el objeto de definir la respuesta de las unidades litológicas del área, para ello, la separación en

tre estaciones fue de 50 m y loops de 2 horas, realizado lo anteriores, se observó que estaciones a 100 m darían el mismo resultado, sólo en casos especiales para definir la traza de la falla de Ixtlán cubierta de aluvión, se redujo nuevamente el espaciamento. La continuación del estudio se debió a que existió la respuesta esperada del método. Las siguientes 10 líneas del estudio de detalle tuvieron como objetivo formar una malla de información que facilitara la configuración de las curvas isogámicas de la componente vertical, (Figura IV-11).

La orientación de los perfiles y localización de las estaciones magnéticas se realizó con cinta y brújula, tomando como apoyo el plano de DETENAL, escala 1:50 000 ampliado 1:20 000.

IV.2 PLANOS DE RECOPIACIÓN MAGNÉTICA

La información analizada está vaciada en 14 secciones, un plano de intensidad magnética vertical y un plano de la configuración del basamento magnético.

La interpretación se realizó de forma cualitativa y cuantitativa. En los perfiles se muestran los datos y el suavizamiento realizado.

IV.2.1 INTERPRETACIÓN CUALITATIVA

Perfil 1 (Figura IV-12), SW-NE.- El recorrido se inicia en las rocas volcánicas (Qmr) para continuar por la ciénega (Qal) y terminar en la falda del Cerro de Los Nogales (Qmr). La intensidad magnética observada define cada una de las unidades y los

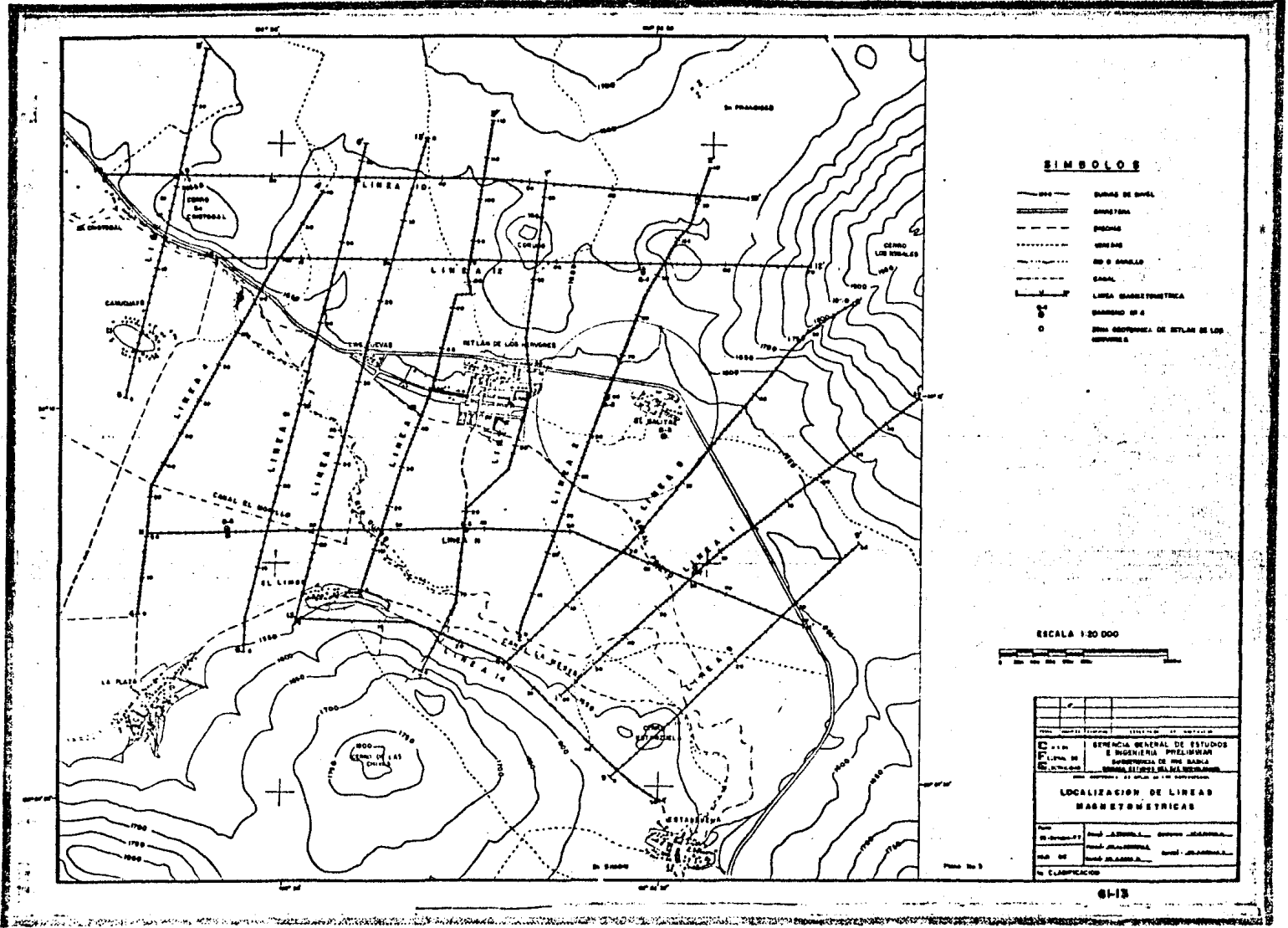


FIGURA IV-11

cambios de frecuencia y polaridad facilitan identificar los trazos de 2 fallas y dos fracturas.

Perfil 2 (Figura IV-12), SSW-NNE.- Este perfil se inicia en el relleno aluvial (Qal) de la ciénega y muestra una anomalía amplia y completa característica de cuerpos tabulares, al llegar a la zona de manifestaciones termales se observa un ligero aumento en los valores de la intensidad magnética y se asociaron a la traza de la falla de Ixtlán, que aún estando cubierta por el relleno lacustre mostró sus efectos; al entrar a la zona de basaltos, la frecuencia y amplitud de las lecturas definen los cambios litológicos de Qsr a Qir a Qsv, también se observan dos fracturas, una por la estación 80 y la otra por la estación 105.

Perfil 3 (Figura IV-12), SSW-NNE.- Este perfil se inicia en los basaltos del Cerro de Las Chivas (Qmv) atraviesa la ciénega (Qal) y entra a las rocas volcánicas (Qsv). Este es uno de los perfiles que permite identificar la traza de la falla de Ixtlán con más facilidad observándose un cambio de frecuencia y polaridad, se identifican dos fracturas y las rocas de Qsv y Qmv.

Perfil 4 (Figura IV-12), SW-NE.- Este perfil se programó para determinar el basamento en esta porción de la ciénega y verificar la continuación de la traza de la falla de Ixtlán, cumpliéndose los objetivos a la perfección.

Perfil 5 (Figura IV-13), SSW-NNE.- En este perfil se observan los efectos del Cerro Camucuat, identificado como la unidad litológica más antigua de la zona (Tpv), se encuentra totalmente

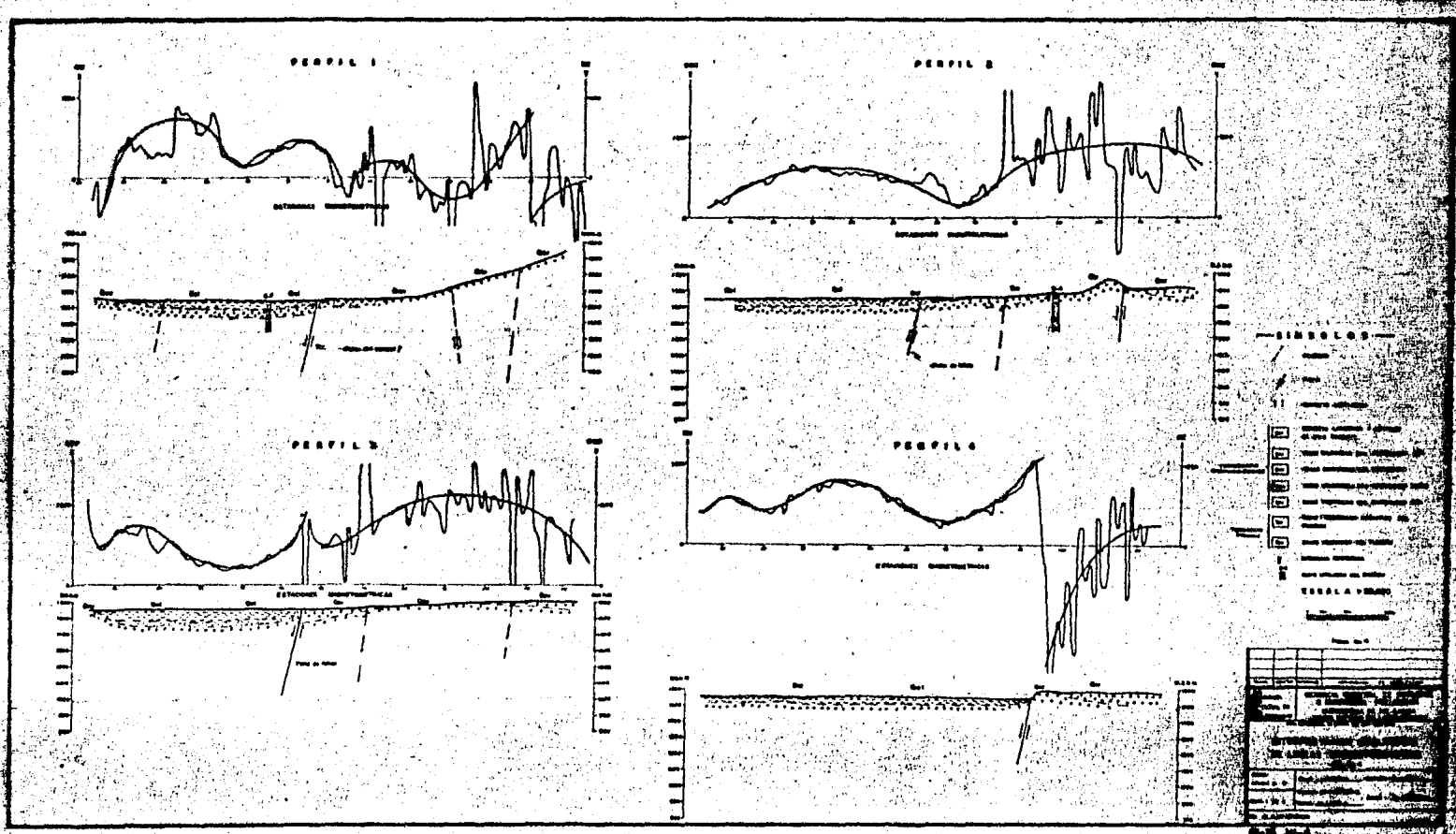


FIGURA IV-12

fracturado e intemperizado, su respuesta magnética es un cambio de polaridad pero por ser tan local no se observó su origen, interpretándose como un dique vertical. La anomalía por la presencia de la falla está muy bien definida y la roca volcánica (Qmv) del Cerro San Cristóbal se presenta como un gran mínimo local.

Los perfiles 6, 7 y 8 (Figura IV-13), SSW-NNE.- Están localizados de tal forma que facilitan la identificación de las estructuras, el aluvión y de las unidades volcánicas. Cumplen satisfactoriamente sus objetivos.

Perfil 9 (Figura IV-14), SW-NE.- Se localiza en el extremo oriental del área de estudio y muestra los efectos del cono cinerítico del Cerro de La Estanzuela (Qvc), cruza la porción de relleno aluvial de la ciénega (Qal), identifica plenamente a la falla de Ixtlán y termina en la falda del Cerro de Los Nogales (Qmv).

Perfil 10 (Figura IV-14), W-E.- Este perfil se localiza al norte de la zona de estudio, se inicia con las lecturas del Cerro San Cristóbal (Qmv) y continúa por las rocas volcánicas más recientes (Qsv). La señal magnética muestra una frecuencia en valores característica de las rocas expuestas en el área, sólo se distingue un cambio sustancial en el gradiente, cambiando la anomalía de negativa a positiva.

Perfil 11 (Figura IV-14), W-E-SE.- Este perfil se localiza en la zona de rellenos aluviales y lacustres (Qal) de la ciénega de Chapala, muestra un comportamiento suave, característico de zonas de relleno, sólo a la altura de la estación 20 se observan --

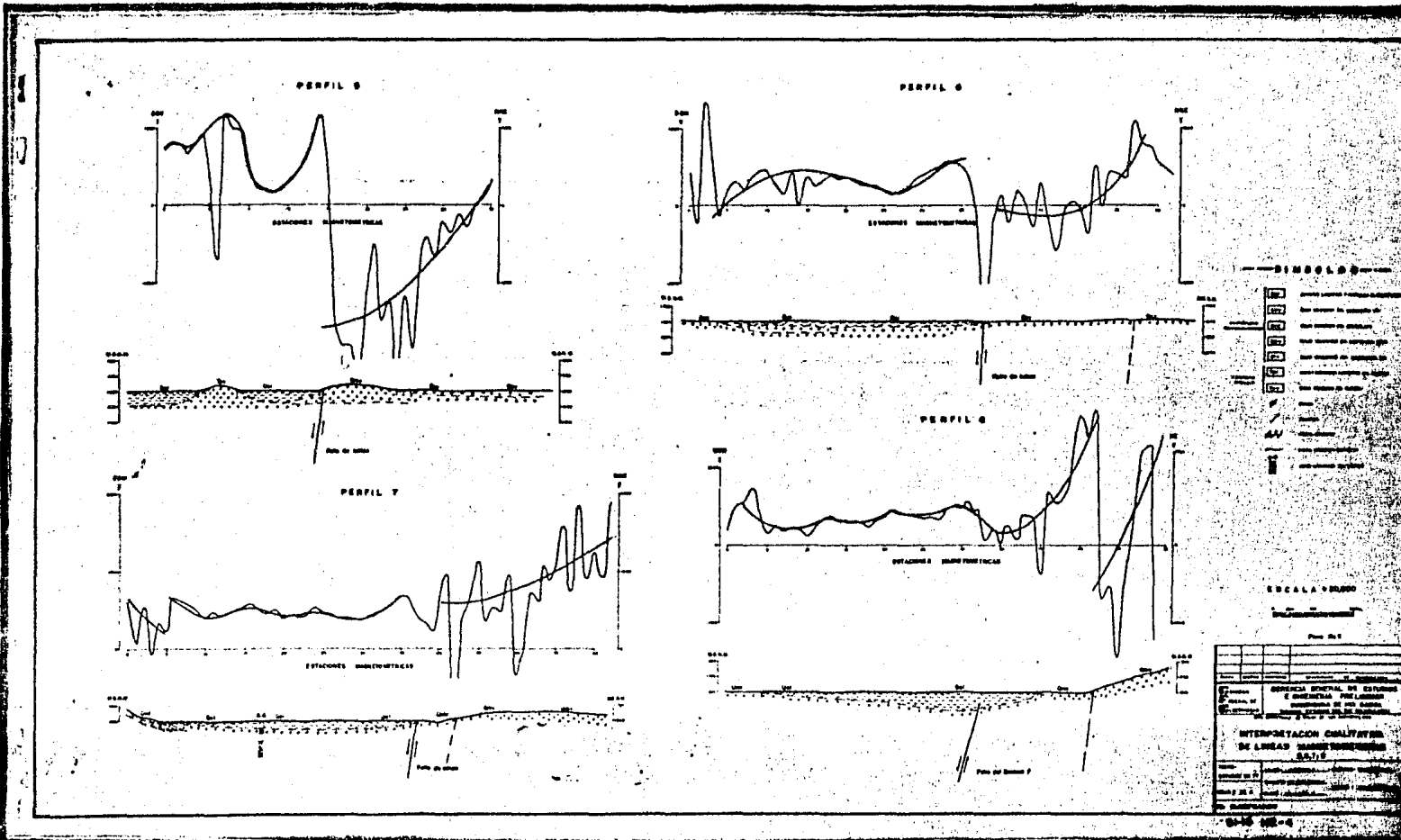


FIGURA IV-13

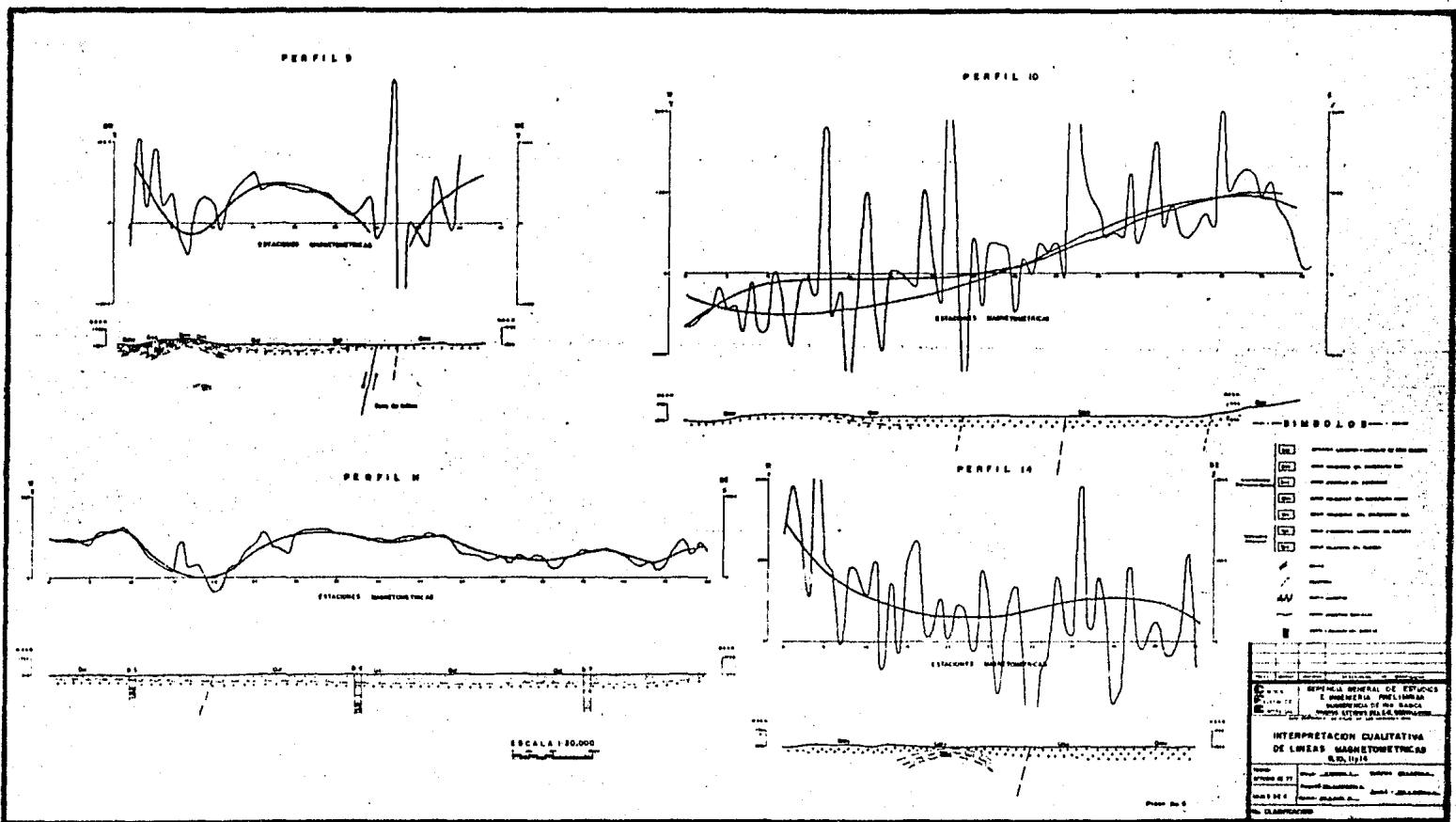


FIGURA IV-14

los efectos de una estructura.

Perfil 12 (Figura IV-15), W-E.- Localizado en las rocas volcánicas de la zona, muestra que en esta parte existe una diferenciación de las respuestas manifiestas, en la tendencia y en la intensidad. De las estaciones 0 a 5 el Qmv delimitada por un posible fracturamiento de contacto, hasta la estación 12, de ahí hasta la estación 29 (Qsv) se observa un gradiente continuo para cambiar al entrar a la roca del Qmv y llega hasta la estación 45 de ahí en adelante se observan cambios de amplitud de las lecturas, correspondientes al Qsv y al Qiy para llegar a la falda del Cerro de Los Nogales Qmv.

Perfil 13 (Figura IV-15), SSW-NNE.- Se localiza en el centro del área de estudio, en él se observa una estructura cubierta por el aluvión en la estación 51, la traza de la falla de Ixtlán se observa en la estación 28 y de la 27 a la 0 los efectos de la roca Qsv.

Perfil 14 (Figura IV-14), W-E-SE.- Es uno de los más ruidosos, igual que el 10, sólo se identifican las diferentes rocas mediante el gradiente. Pasa por los flancos N de los conos cineríticos de la zona sin identificarse su respuesta magnética.

El plano de intensidad magnética vertical (Figura IV-16), -- muestra las frecuencias y amplitudes de los eventos magnéticos registrados y permite identificar las principales estructuras, las diferentes unidades litológicas; algunas actividades cubiertas -- por el paquete de aluvión.

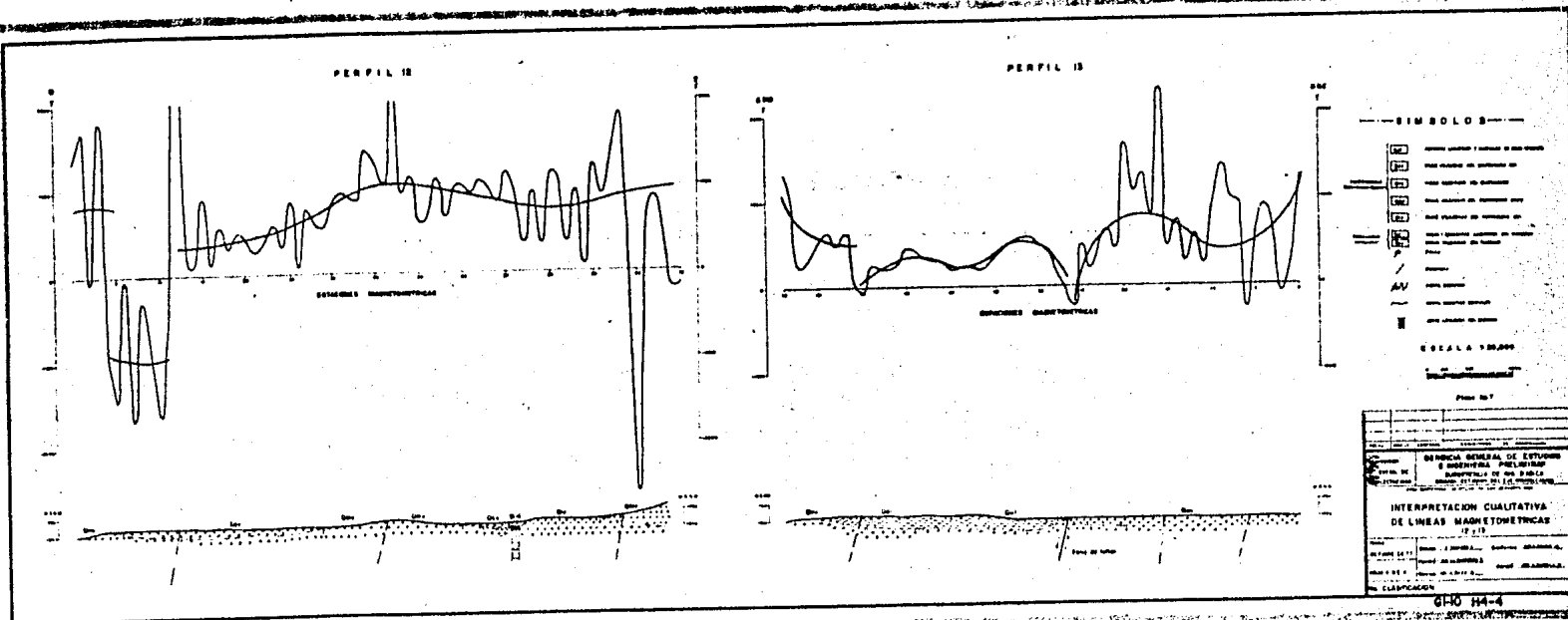


FIGURA IV-15

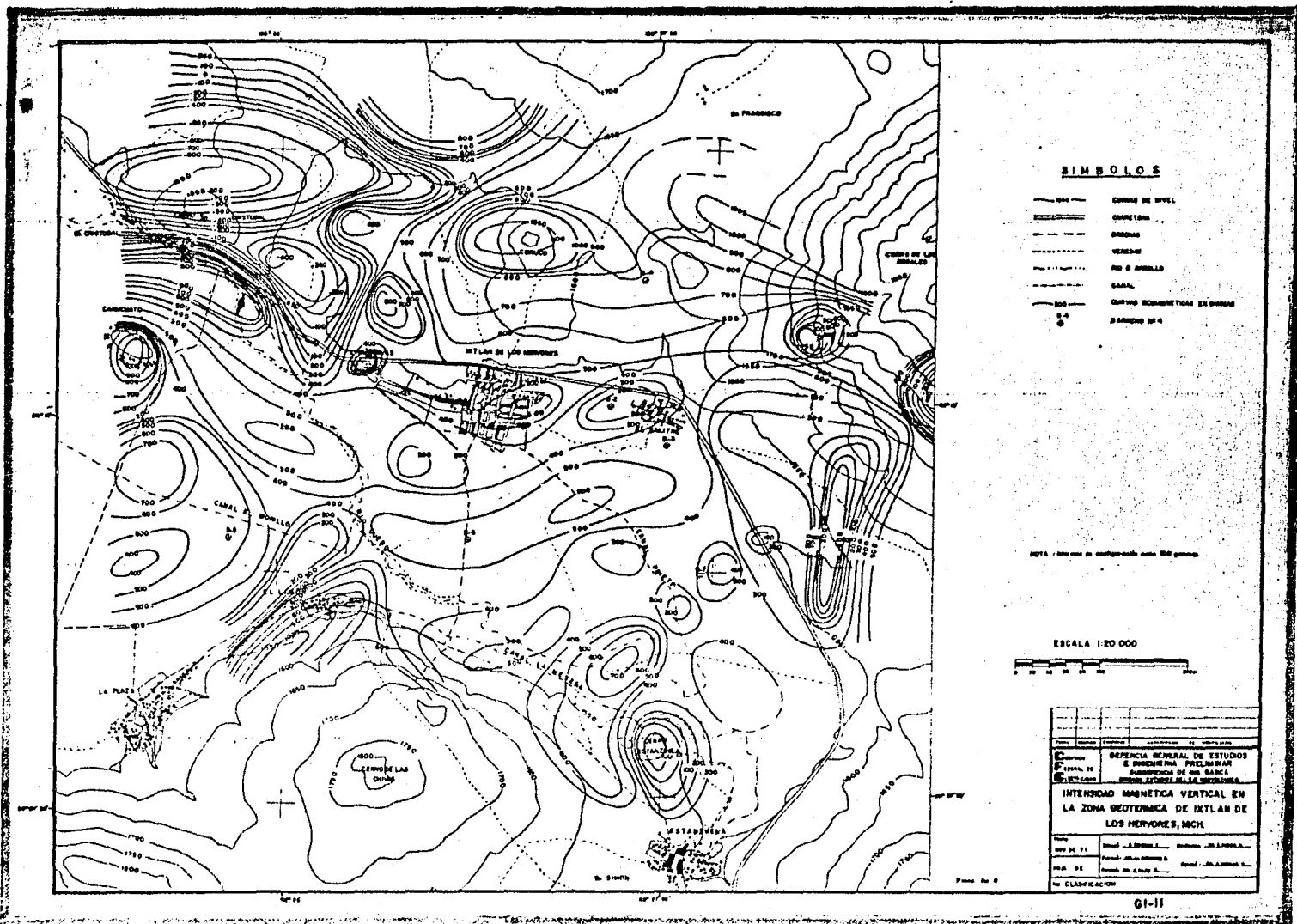


FIGURA IV-16

En la parte central las anomalías presentan un alineamiento general E-W que se correlaciona con la falla de Ixtlán; si se continúa el alineamiento general de las anomalías, se puede notar -- que éstas tienden a cambiar de rumbo siguiendo la traza de la falla del Encinal, por lo que se podría concluir que la falla de Ixtlán-El Encinal es continua, aunque la traza de ésta se interrumpa en el tramo donde se localizan las manifestaciones termales.

En la parte superior se observan amplitudes y frecuencias -- altas que pertenecen a los basaltos, estas anomalías tienen un -- rumbo general E-W y muestra una variación en la configuración isogámica de -800 a 1100 gammas. En este cambio tan radical de polaridad es donde se interpreta la mayor anomalía magnética que podría ser el reflejo de algún cambio estructural o bien que limita ra actividades volcánicas con diferentes polarizaciones.

En el poblado de El Limón se observa un alineamiento de las curvas isogámicas con rumbo NE-SW que se puede correlacionar con la traza de una falla no identificada en el levantamiento geológico, pero sí inferida en un plano fotogeológico realizado en el -- año de 1967 por el Ingeniero Arturo González S.

La correspondencia magnética que existe con la zona de manifestaciones termales no es muy marcada pero se puede observar una área de baja frecuencia y susceptibilidad que se localiza al E de Ixtlán y que forma parte del alineamiento general que se correlaciona con la falla de Ixtlán.

IV.2.2 INTERPRETACIÓN CUANTITATIVA

Una vez obtenidos los perfiles y la configuración de la componente vertical del campo magnético, se procedió a identificar las anomalías a las que se le pudiera aplicar el método gráfico de Peters, que permitió calcular la profundidad del cuerpo que provoca la anomalía. De este procedimiento se configuró el plano del basamento magnético (Figura IV-17), con curvas cada 25 metros, tomando como nivel de referencia el topográfico.

El basamento magnético obtenido tiene dos diferentes interpretaciones geológicas; la primera podría ser la suma de los efectos de diferentes derrames basálticos magnetizados en la misma dirección y la segunda que la profundidad calculada pertenezca a una roca con las características de basamento magnético local. Por la litología de los barrenos se observa que existe alternancia de basalto y lodolitas. En el barreno No. 3 localizado a 50 metros de la falla de Ixtlán, se observa que existió una zona donde no hubo muestras debido a las pérdidas de circulación y lo deleznable de la roca, por lo que se podría asociar a la traza de la falla con una inclinación de 5° , el paquete más grande de basalto es de 250 m y se observa desde los 710 m hasta los 960 m, los siguientes 60 m de perforación no recuperó muestras quizá por estar cortando una estructura no observada en superficie pero asociada a los alineamientos isogámicos de la falla de El Limón.

Los otros barrenos 4, 5, 6 y 7, continuaron mostrando las alternancias de lodolita y basaltos fracturados y lajeados, capacitados para el almacenamiento y transmisión de aguas subterráneas.

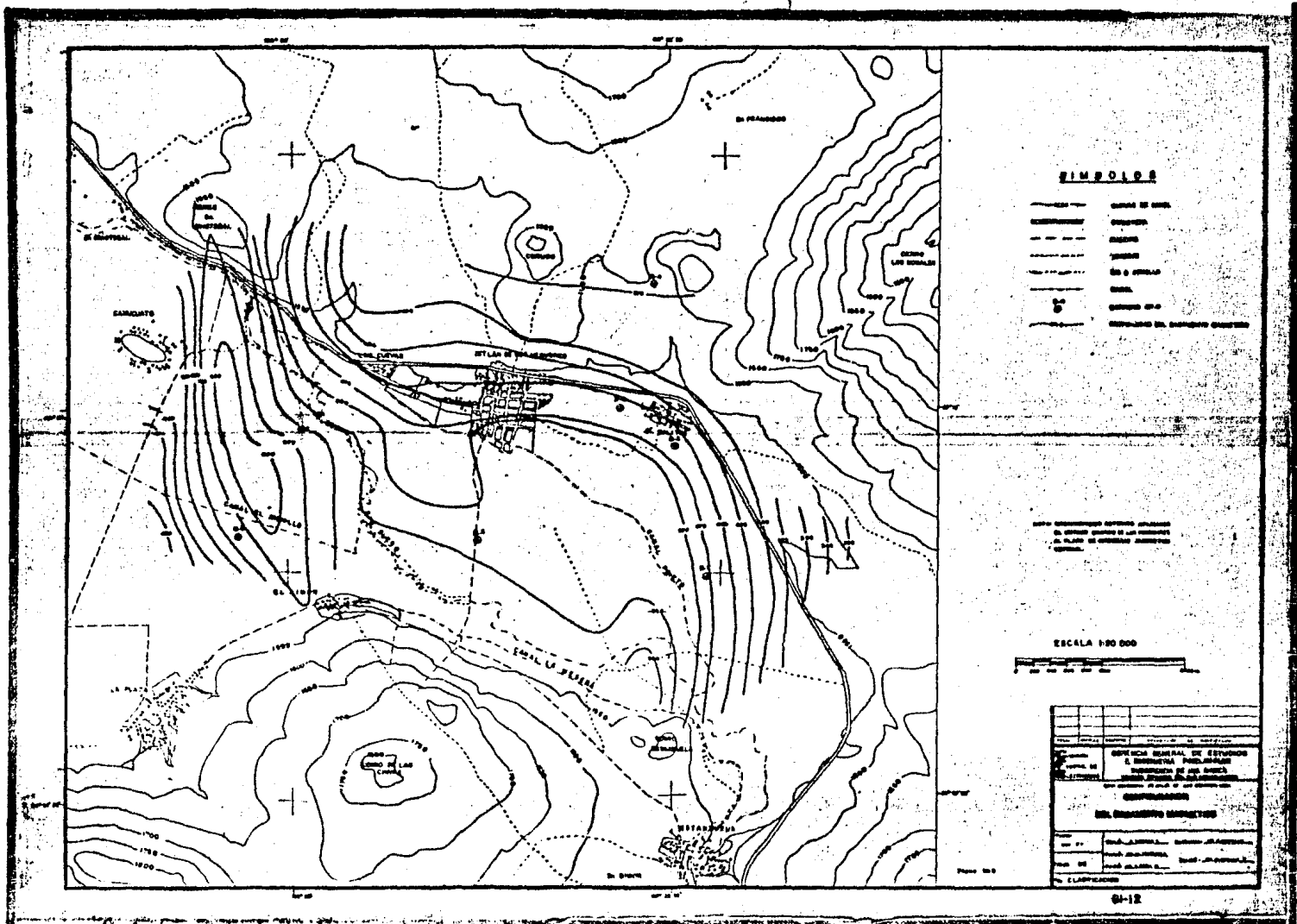


FIGURA IV-17

C A P I T U L O V

CAPITULO V

CORRELACIONES Y CONCLUSIONES

- V.1 CORRELACIONES
 - V.1.1 CORRELACIONES GEOELÉCTRICAS EN LOS AZUFRES, MICH.
 - V.1.2 CORRELACIONES DE LA MAGNETOMETRÍA
- V.2 DEL PREMODELADO A LA SIMULACION DE YACIMIENTOS
SUGERENCIAS
- V.3 ESTIMACION DE LA ENTRADA DE AGUA AL YACIMIENTO --
GEOTERMICO DE LOS AZUFRES, MICH.
 - V.3.1 ESTIMACIÓN DE LA COMPRESIBILIDAD TOTAL PARA LOS -
AZUFRES, MICH.
 - V.3.2 PROCEDIMIENTOS Y CÁLCULOS DE W_e
 - V.3.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS
 - V.3.4 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CON OTROS MODELOS
- V.4 CONCLUSIONES

LISTA DE FIGURAS

- V-1 DISTRIBUCIÓN NORMAL DE TEMPERATURAS PLANTA
- V-2 DISTRIBUCIÓN NORMAL DE TEMPERATURAS ISOMÉTRICO-W
- V-3 DISTRIBUCIÓN NORMAL DE TEMPERATURAS ISOMÉTRICO-E
- V-4 PLANO DE AGRUPACIÓN DE ANOMALÍAS GEOELÉCTRICAS -
DICIEMBRE, 1984.

- V-5 REDES DE FLUJO ELÉCTRICO
- V-6 PALEORELIEVE Y AGUA SUBTERRÁNEA
- V-7 MODELO DE LA ZONA SUR DEL YACIMIENTO GEOTÉRMICO DE LOS AZUFRES, MICH.
- V-8 MODELO DE LA ZONA NORTE DEL YACIMIENTO GEOTÉRMICO DE LOS AZUFRES, MICH.
- V-9 GRÁFICA DE PRESIÓN MEDIA VS TIEMPO PARA EL YACIMIENTO DE LOS AZUFRES, MICH.
- V-10 GRÁFICA SEMILOGARÍTMICA DE PRESIÓN VS TIEMPO PARA EL YACIMIENTO DE LOS AZUFRES, MICH.

V. CORRELACIONES Y CONCLUSIONES

V.1 CORRELACIONES

Revisando la literatura para conocer lo que se ha publicado sobre las correlaciones entre la geofísica superficial aplicada a la geotermia y las condiciones físicas del subsuelo, se seleccionaron los trabajos publicados por Tsiv Meidav, A. Archie, Sirri Kavla Koglu, Memeth Saltuklaroglu, S. Onodera y E. Rivera.

Los postulados de la Ley de A. Archie son incrementados y afinados para un sistema roca fracturada saturada de fluido salino por Tsiv Meidav. Estos estudios muestran la aplicabilidad de las correlaciones sugeridas, en zonas geotérmicas, donde los incrementos de temperatura son muy altos. La aplicación de los monogramas y ecuaciones se combina con los conceptos de otros autores como Nechai y Keller, obteniéndose la aplicación de modelos fracturados saturados de fluido salino a una temperatura elevada. (Ejemplos del Capítulo III).

Sirri Kavla Koglu en su artículo "Un Método para Determinar la Temperatura y Porosidad de un Yacimiento Geotérmico" sugiere un método basado en la prospección geoelectrica auxiliada con los datos de resistividad del fluido geotérmico a ciertas temperaturas; suponiendo que de un pozo se obtuvo la muestra del fluido y sirve para relacionar los parámetros de porosidad, resistividad del fluido y la resistividad aparente obtenida del estudio geoelectrico.

La ecuación propuesta (V-1) se debe aplicar primeramente a un punto de muestreo (pozo) para determinar el grado de correlación y la profundidad de asignación del dato. Cuantos más datos de pozos se tengan, la correlación será más válida. El dato de porosidad será el medido o estimado en el pozo, Y si se cuenta con el dato T, se podrá estimar la porosidad y así configurar -- los resultados, haciendo extensiva la correlación para la anomalía geoelectrica obtenida por la geofísica superficial.

$$T = 0.81 \rho_t \frac{(t + 21.54)}{\phi^2 \rho_a} - 21.54 \quad \text{----- V-1}$$

donde:

T = Temperaturas del yacimiento.

ϕ = Porosidad.

ρ_t = Resistividad a la temperatura t del fluido.

ρ_a = Resistividad aparente.

t = Temperatura de medición de ρ_t .

Para yacimientos fracturados se recomienda utilizar los modelos de Nechai y obtener la porosidad del sistema roca-fracturas.

El trabajo del Dr. Memeth Saltuklaroglu lo desarrolló en base a un modelo fracturado correspondiente a la zona geotérmica de Los Azufres, probando una dependencia con un alto grado de -- confiabilidad (0.97) y se basa en calcular la correlación entre isorresistividades aparentes del arreglo Schlumberger y las temperaturas estabilizadas medidas en los pozos.

La fórmula obtenida (Ecuación V-2) se ajustaba para los datos de temperatura que se tenían pero, actualmente la correlación fue modificada con los nuevos datos del yacimiento (Ecuación V-3).

Fórmula anterior

$$T [^{\circ}\text{C}] = 291.98 e^{-0.12\rho} \text{ ----- V-2}$$

Fórmula propuesta

$$T [^{\circ}\text{C}] = 322 e^{-0.013\rho} \text{ ----- V-3}$$

Anteriormente, la temperatura máxima obtenida en el yacimiento fue de 291.98°C y se localizaba dentro de la anomalía de 5 Ohms-m, el exponente sería de -0.060 ó menor, lo que equivale a un valor cercano a cero, por lo tanto, la temperatura máxima sería de 291.98. Actualmente se han obtenido temperaturas de 310°C y el exponente de aproximación es de -0.013, con un coeficiente de correlación $r = 0.93$ para resistividades comprendidas entre 3 y 150 Ohms-m. La profundidad a la que se hace referencia el dato de temperatura calculada es la separación semielectrónica del arreglo Schlumberger de donde se obtuvo el dato de resistividad.

Seibe Onodera, ha publicado dos trabajos, uno para hacer la evaluación del potencial geotérmico de un yacimiento utilizando curvas de sondeos de resistividad y propone la siguiente ecuación (V-4).

$$O_p = O_o \sum_i^i W_i \rho_i A_i \text{ ----- V-4}$$

donde:

O_o = Es la historia de generación en Kw/Km² de la zona conocida del campo.

W_i = El factor de peso para los datos de resistividad.

ρ_i = Es la probabilidad de distribución de curvas de resistividad que satisfacen los requisitos de la zona geotérmica productora.

A_i = Es el área determinada por los estudios de resistividad como probable en Km².

O_p = Capacidad máxima explotable.

El segundo estudio lo enfoca para relacionar las temperaturas subterráneas en base a la interpretación de las curvas del sondeo de resistividad del arreglo Schlumberger en campos geotérmicos.

La fórmula empírica obtenida es la siguiente:

$$t = 50.15 \ln F + \frac{\partial e}{\partial h} h - 28.5^\circ\text{C} \quad \text{----- V.5.}$$

donde:

$1/F$ Es el cociente de valores de resistividad de los medios que contrastan entre el mínimo resistivo y su interfase inferior.

h Es la profundidad a la interfase donde se calculó F

$\frac{\partial e}{\partial h}$ Es el gradiente geotérmico normal (3°C/100 m)

El dato de gradiente geotérmico puede ser cambiado por el calculado en la zona de estudio y así mejorar la interpretación.

Los resultados de estos dos trabajos muestran un alto grado de certidumbre según el autor.

Es importante señalar que si se desea aplicar estos criterios y correlaciones, se deben realizar experimentos y pruebas para obtener los coeficientes que se ajusten al yacimiento en estudio.

La siguiente correlación está basada en la consideración de que existe una distribución normal de las propiedades del yacimiento entre puntos de muestreo y fue desarrollada por el M. en C. Edmundo Rivera.

Los valores de isorresistividad son considerados para la extrapolación de los datos de temperaturas estabilizadas a 1 000 m.b.n.t. y con sólo 8 datos de pozos se obtuvo la configuración del plano de Distribución Normal de Temperaturas (Figura V-1), así mismo las figuras tridimensionales (Figuras V-2 y V-3).

La explicación al plano para calcular la temperatura consiste en, aplicar al valor leído del intervalo de configuración a la ecuación:

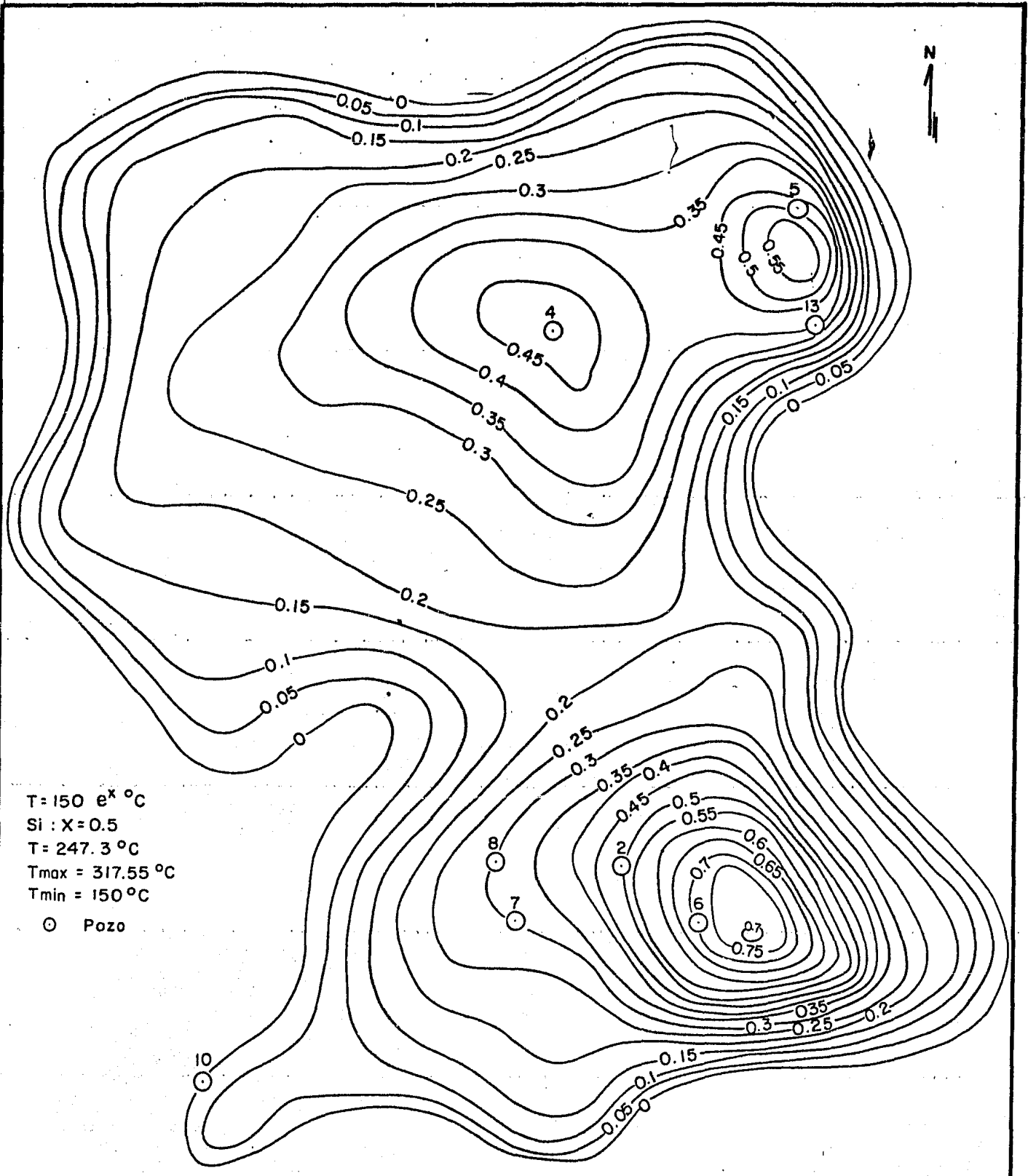
$$T = 150 e^x$$

----- V-6

donde:

X = Dato de la configuración.

T = Temperatura en °C.



$T = 150 \text{ e}^x \text{ } ^\circ\text{C}$
 $Si : X = 0.5$
 $T = 247.3 \text{ } ^\circ\text{C}$
 $T_{\text{max}} = 317.55 \text{ } ^\circ\text{C}$
 $T_{\text{min}} = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$
 ○ Pozo

Tomado de E. Rivera, 1982
 Modificado por J.L. Guerrero, 1985

FIGURA V-1 DISTRIBUCION NORMAL DE TEMPERATURA

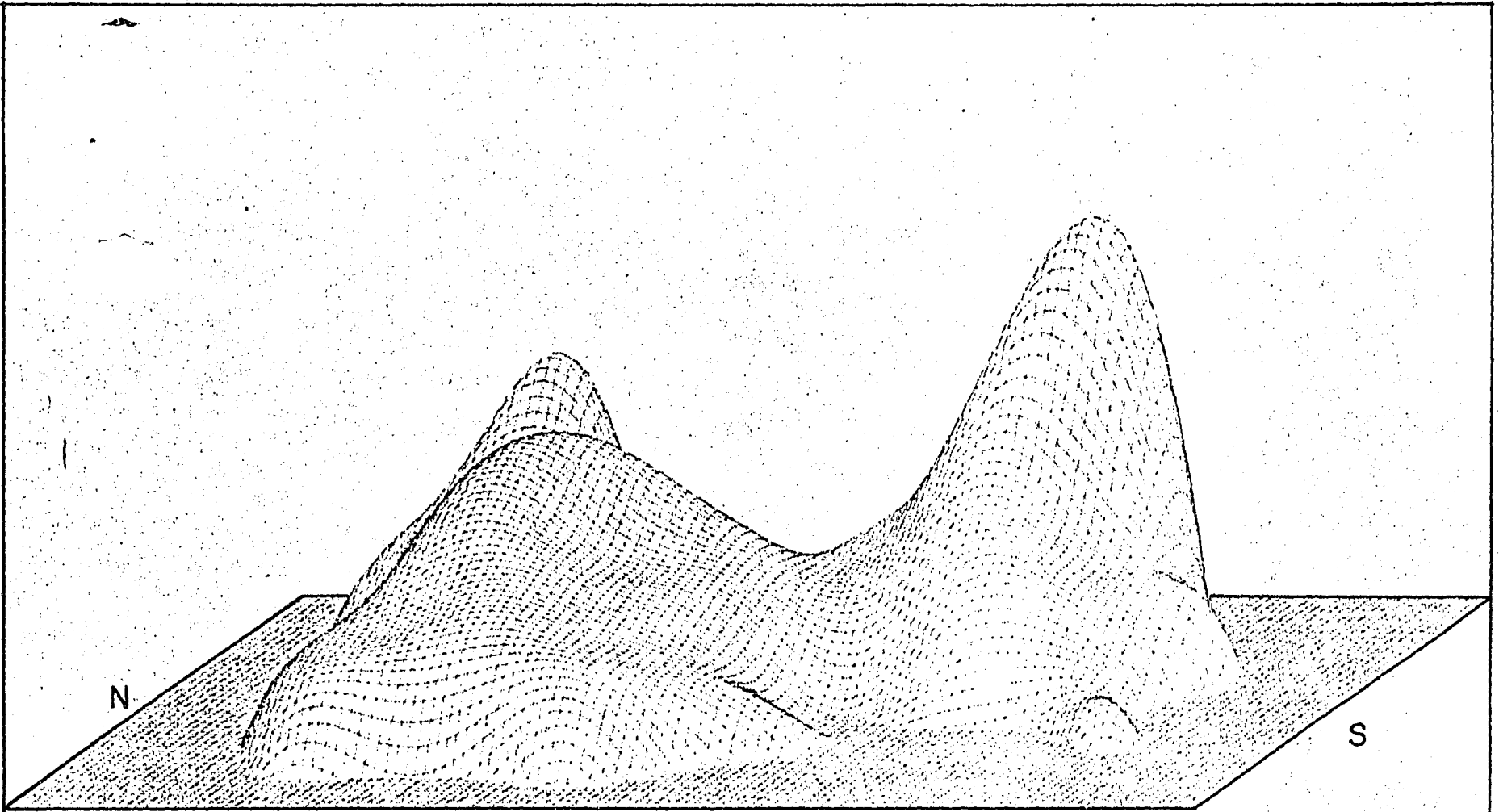
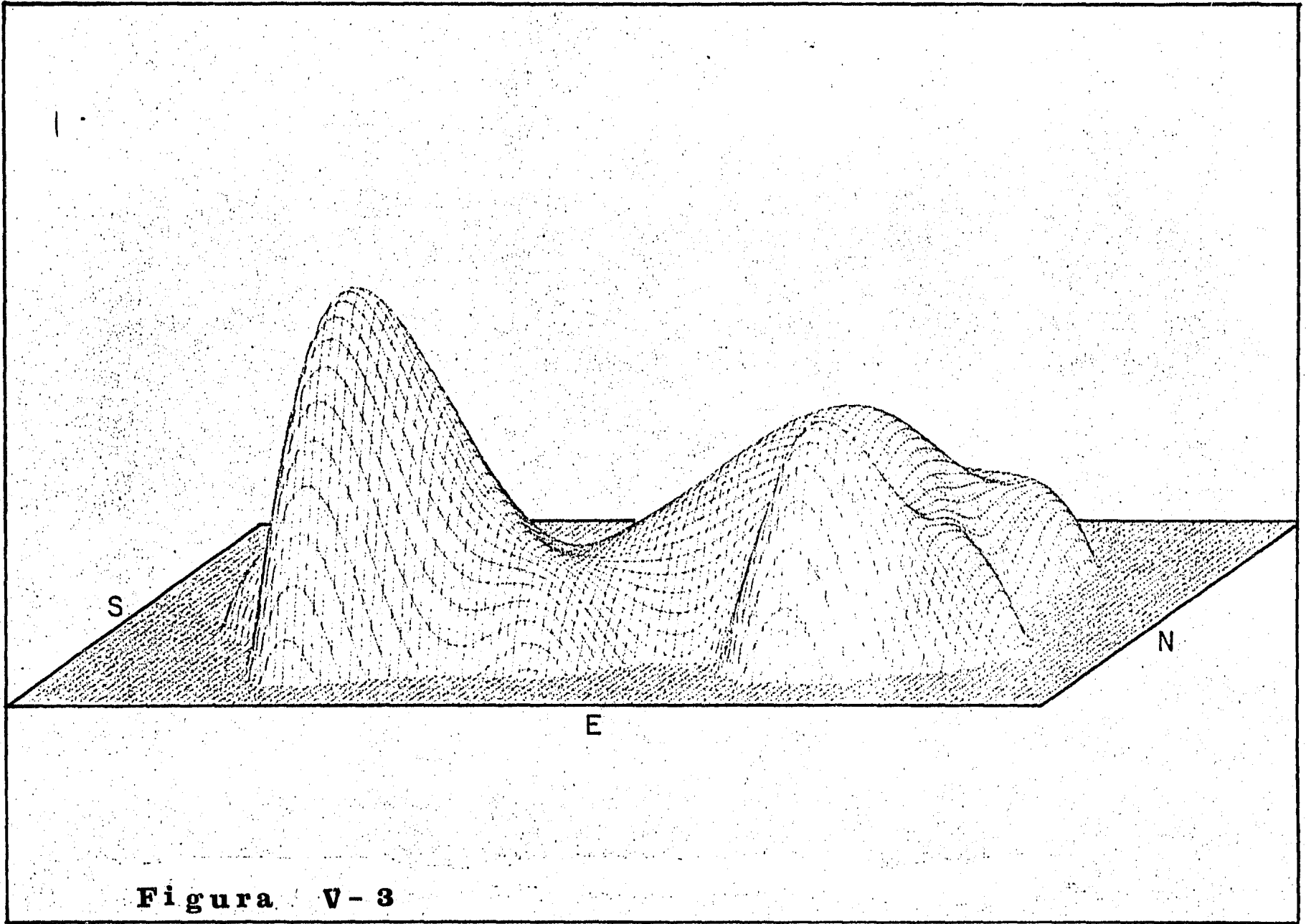


Figura V-2



Ejemplificando lo anterior:

Para el sitio donde se localiza el pozo A-5 se tiene el valor del intervalo $X = 0.5$.

$$T = 150 e^{0.5} \quad \therefore \quad T = 247.3^{\circ}\text{C}$$

De esta correlación se dan las bases para estimar el límite del yacimiento, considerando las respuestas del subsuelo al reconocimiento geoelectrico superficial.

Los valores de isorresistividad considerados fueron los de 30 y 20 Ohms-m a la separación semielectrónica $AB/2 = 1\ 000\ \text{m}$ -- del arreglo Schlumberger, tomándose como los límites de la extensión del yacimiento.

Sería muy difícil hacer cualquier correlación sin la testificación de pozos dado que, las propiedades físicas son variables y están vinculadas con la influencia termodinámica y química del fluido geotérmico.

La importancia de tener un parámetro que nos indique la extensión del yacimiento, estriba en la influencia de los resultados que se obtendrán de las etapas de MODELADO, PRESIMULACION Y SIMULACION DE YACIMIENTOS.

Cada una de estas etapas son importantes durante la vida -- económica de un yacimiento y no se deben confundir sus objetivos y limitaciones. Más adelante se hará referencia a ellas y se sugerirán formas de llevarlas a cabo.

V.2 CORRELACIONES GEOELÉCTRICAS EN LOS AZUFRES, MICH.

Con respecto a la geoelectricidad de Los Azufres se han podido realizar varias correlaciones como son:

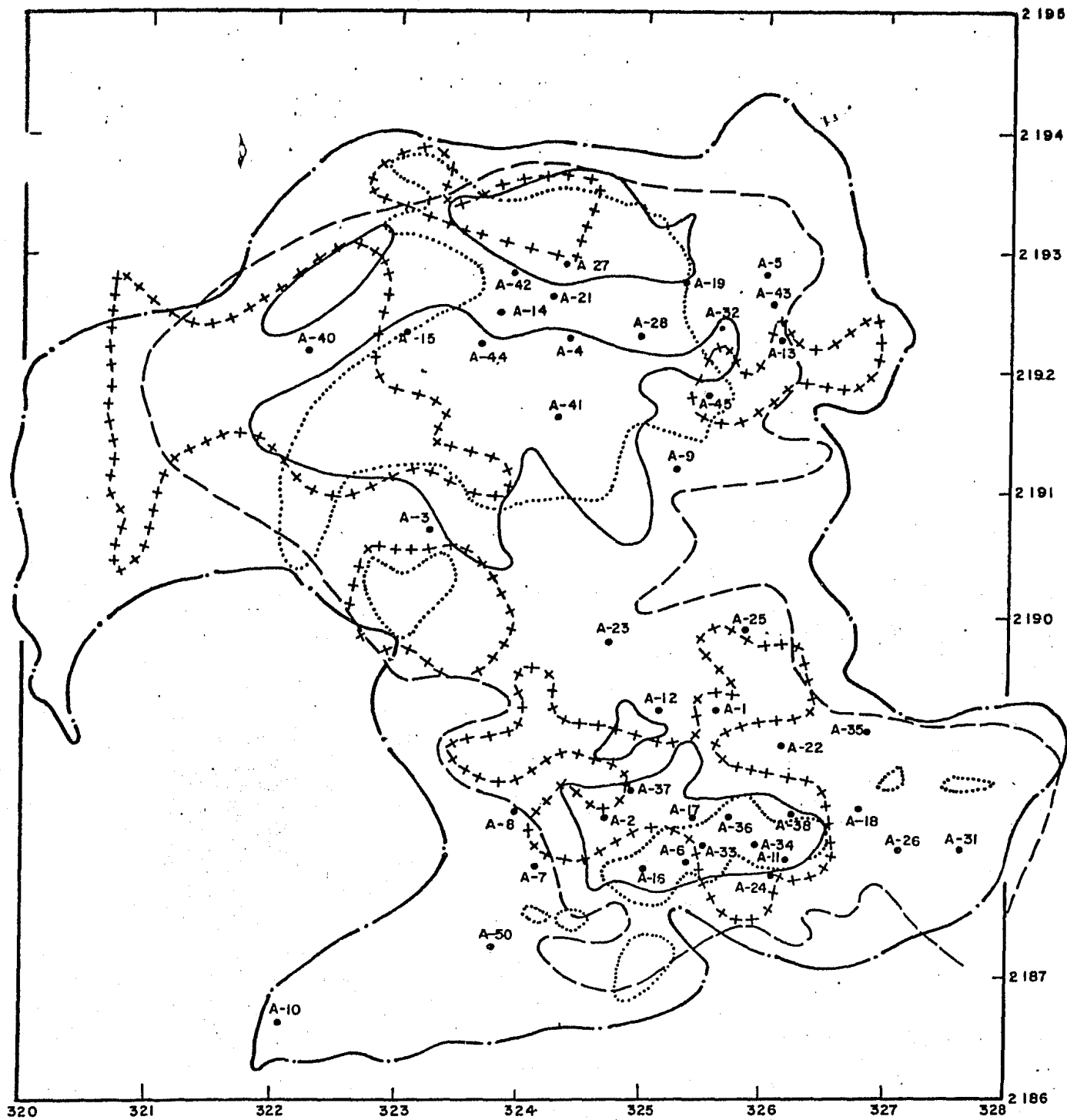
- La agrupación de anomalías geoelectricas.

Como se cuenta con una serie de planos y cada uno de ellos enfatiza la presencia del yacimiento mediante mínimos resistivos, se procede a formar un plano de agrupación de anomalías resaltando la amplitud e importancia de las configuraciones. Si se sobrepone este plano al geológico, se identifican las fallas que están funcionando como conductoras, las fracturas y fallas como almacenadoras y las rocas y estructuras parcialmente sanas como encajonantes, esta correlación es de tipo cualitativo. Con respecto a la posible forma y extensión del yacimiento la correlación es de tipo cuantitativo, tal como lo muestra la Figura V-4 que integra la información geoelectrica hasta la fecha.

- La red de flujo eléctrico.

Para su elaboración se procedió a obtener parámetros medios de resistividad entre bloques que tienen similar respuesta geoelectrica y la comparación entre los mismos nos indica qué bloque es más conductivo, y por lo tanto el que manifiesta mayor influencia hidrotermal.

Por lo que se concluye que los bajos resistivos se asocian a la mayor saturación de fluidos y estas resistividades se ordenan en bloques siguiendo la geometría de las fallas (Figura V-5).



$\frac{A \ B}{2}$	ρ	Ohm-m.	Line Style
1000	< 10	Ohm-m.	—————
1500	< 20	Ohm-m.	- - - - -
2500	< 30	Ohm-m.	- · - · -
2500	< 15	Ohm-m.	+ + + + +
Res del Cond.	< 5	Ohm-m.

Plano de agrupación de anomalías geoelectricas
Dic. - 1984.

Figura V - 4 Esc. 1:50,000

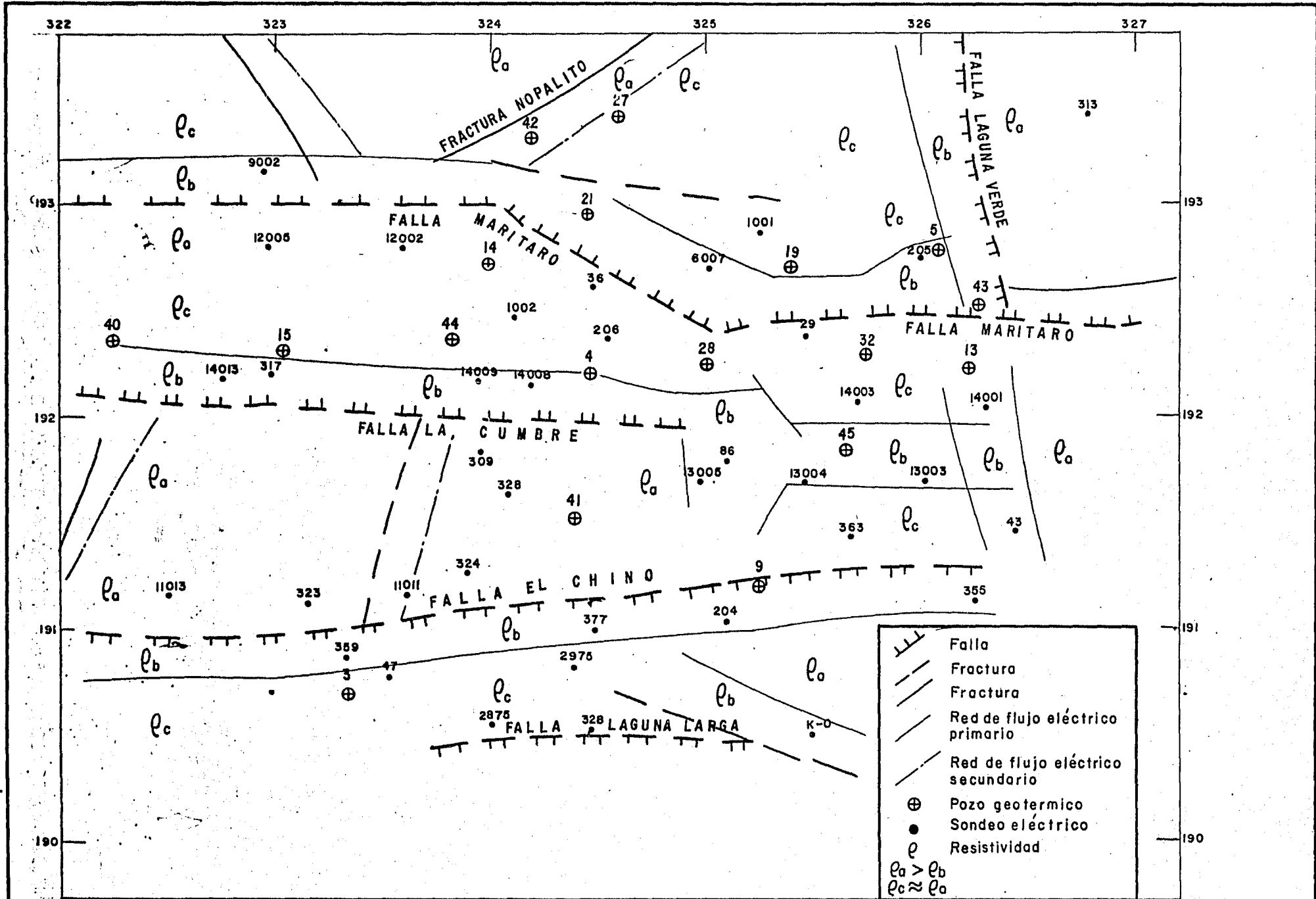


FIGURA V-5.- REDES DE FLUJO ELECTRICO

Formo: Ing. J. Luis Guerrero G.

Adicionalmente, para la construcción de este plano (Figura V-5) se considera la forma de la curva del sondeo, los valores de resistividad entre las separaciones semielectrónicas AB/2 = 1 000, 1 500 y 2 000 m, la geología estructural, la cronología de los eventos estructurales, la hidrología regional de los Valles de Maravatío y Cuitzeo-Araró; obteniéndose la distribución de resistividades para formar una red de flujo eléctrica y la dirección probable de gradiente hidráulico de la zona Norte de Los Azufres, comprobándose que las fallas son el medio propicio para la conducción de los fluidos, existiendo la gran posibilidad de que algunas fallas se hayan sellado y sea la mineralización la que nos está sugiriendo la red eléctrica.

Para comprobar esta correlación será necesario realizar pruebas de inyección de trazadores radiactivos al yacimiento donde se involucren tres o más pozos para cada prueba, esto, permitirá cuantificar el gradiente hidráulico, el volumen de recarga al yacimiento, la dirección de recarga y la red hidráulica local. Con esta comprobación, este procedimiento será extensivo para cualquier área y servirá para los cálculos del potencial geotérmico.

- Paleorelieve y el agua subterránea

Es la correlación empírica que se obtuvo al medir los espesores de las capas resistivas superficiales y la dirección de los derrames basálticos, marcando las barreras, fuentes de emi-

sión y los canales de conducción.

La asociación es la siguiente; los canales de conducción a cañadas, las barreras a eventos volcánicos anteriores y los centros de emisión a la creación de nuevas elevaciones (Figura V-6).

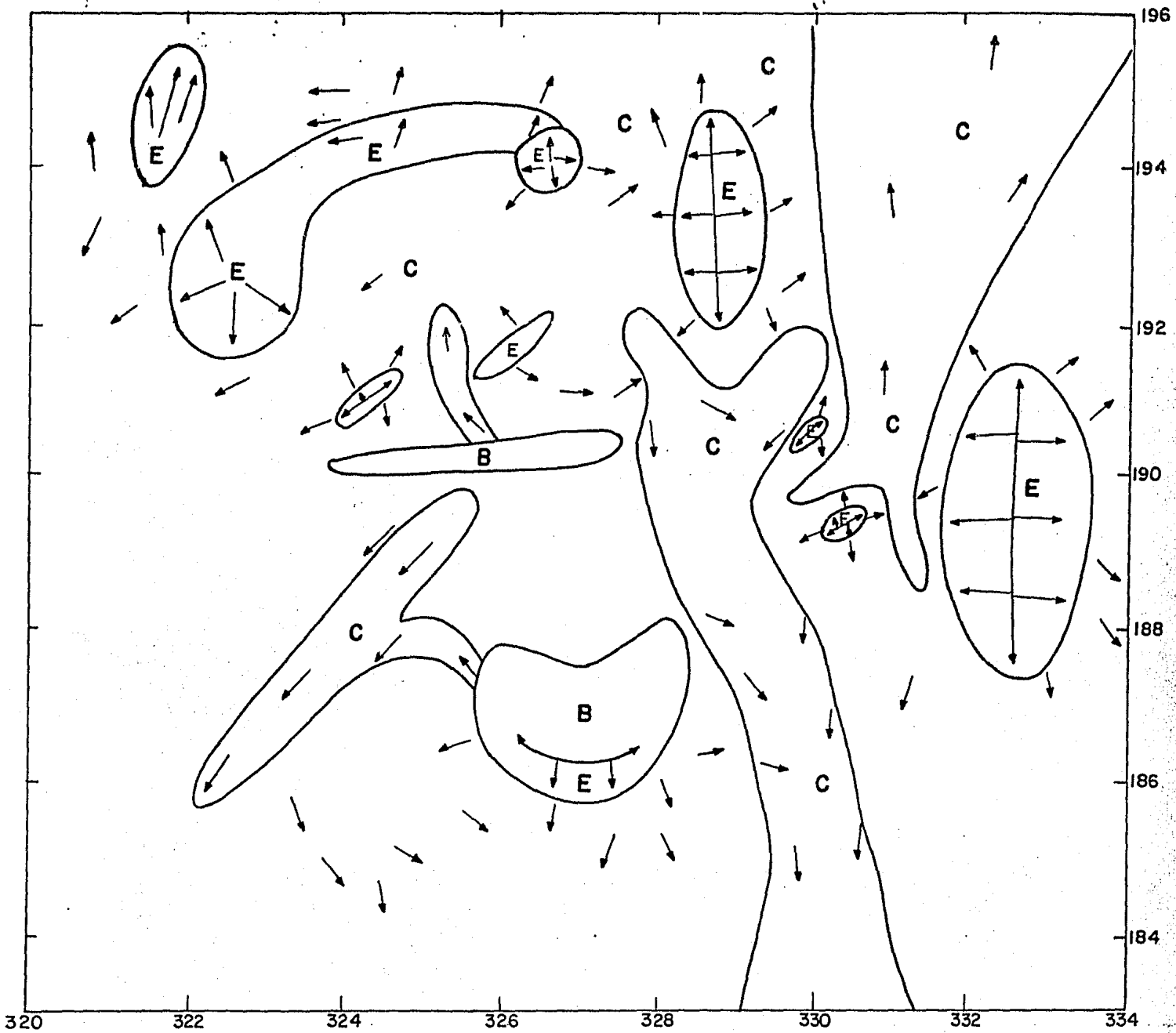
La interpretación de este plano muestra dos aspectos:

El aspecto hidrológico sugiere un acuífero potente contenido en material efusivo y se localiza en las zonas marcadas como canales de conducción.

En el aspecto estructural los relieves abruptos y cañadas - sugieren frentes de lavas o fallas, lo que en Los Azufres podría ser el reflejo del sistema estructural N-S no muy claro en superficie.

V.1.2 CORRELACIÓN DE LA MAGNETOMETRÍA

Algunas anomalías magnéticas negativas podrían ser correlacionadas con las isothermas de Curie someras, sobre todo, si se pueden asociar a mínimos resistivos y a las anomalías gravimétricas negativas. Las anomalías obtenidas en la zona geotérmica de Ixtlán de Los Hervores son de tipo lineal y son debidas a cuerpos tabulares bidimensionales someros. Como resultado se propone la perforación de un pozo localizado: Entre dos anomalías magnéticas negativas, las evidencias magnéticas de la falla de -



- E CENTRO DE EMISION
- C CONDUCCION
- B BARRERAS A LA CONDUCCION



Paleo relieve y agua subterranea

Figura V-6

Ixtlán y sus manifestaciones superficiales.

V.2 DEL PREMODELADO A LA SIMULACIÓN DE YACIMIENTOS

SUGERENCIAS

En este subtema se proponen las bases para llegar hasta la simulación de yacimientos y de qué forma deben intervenir los datos geológicos y geofísicos.

La etapa de exploración geológica es dinámica y continua ya que se realimenta con nuevos datos que aporta la perforación de pozos, por lo tanto es el aporte técnico para las reinterpretaciones de los estudios preliminares regionales y de detalle. La geofísica es la que proporciona los elementos para realizar mediciones y observaciones de los parámetros que se asocian a la presencia del yacimiento, actualmente los estudios geofísicos iniciales se están reinterpretando y ajustando con la información geológica de los campos geotérmicos en desarrollo. Por lo tanto corresponde a la etapa de perforación y desarrollo:

- i) Confirmar y enriquecer las exploraciones mediante las muestras y análisis continuos de las rocas y fluidos.
- ii) Obtener las propiedades del yacimiento mediante registros eléctricos, presión y temperatura, y pruebas de presión.

- iii) Cuantificar la productividad del yacimiento mediante desarrollos y mediciones de los pozos.

Corresponde entonces a las etapas del premodelado a la simulación cuantificar el potencial geotérmico del yacimiento y determinar condiciones de producción-inyección para lograr la máxima recuperación, así como, las condiciones óptimas de producción inyección, para una máxima producción.

Para llegar a la simulación de yacimientos se recomiendan - cuatro niveles de análisis, cada uno se puede manejar independientemente pero no se debe prescindir de ninguno porque se carecería de la experiencia del anterior y se reflejaría en interpretaciones ambiguas o falsas.

- 1° Premodelado.
- 2° Modelado.
- 3° Presimulación.
- 4° Simulación.

En el primer nivel se considera que la información de pozos es pobre y sólo se cuenta con los datos de la etapa de exploración, parcialmente comprobados con las perforaciones.

Con la información disponible se podría obtener un premodelo basado en la geometría de las anomalías geofísicas y las condi

ciones del pozo. Con este premodelado pueden establecerse analogías y ecuaciones que permitan estudiar el comportamiento dinámico del pozo al desarrollarlo y plantear las ecuaciones que rijan las condiciones de flujo desde el yacimiento hasta la superficie. También se podrá predecir el comportamiento del pozo mediante modelos sencillos calculando su productividad y el decaimiento de sus condiciones con el tiempo.

Como referencia se dan los trabajos hechos por el Fis. Candelario Pérez en dinámica de yacimientos publicados por el I.M.P. en 1982.

El segundo nivel se debe basar en los resultados de las predicciones anteriores y en una historia de producción breve, ajustando los estudios de presión, datos petrofísicos, condiciones termodinámicas y datos de producción para obtener bloques con similares parámetros y un modelo geométrico que pueda utilizarse para plantear las ecuaciones básicas de un modelo matemático que represente las condiciones del yacimiento y finalmente la elaboración de un modelo físico para ser sometidos a diferentes condiciones de producción inyección. En este nivel intervendrán uno o varios pozos dentro de la misma anomalía geofísica o zona modelada.

Como referencia se dan los trabajos hechos por C. Faust, J. Mercer; S. Gorg, J. Pritchett; T. Lasset, P. Witherspoon; M. ---

Lippman; M. Natherson P. Kruger, A. Hunsbedt; H. Henry, F. Kahout, Farug Ali, etc.

En el tercer nivel, sólo es aplicable cuando se dispone de suficiente información de pozos para predecir el comportamiento del yacimiento por tiempos cortos. La historia de producción es breve, lo que impide realizar un ajuste confiable con las salidas de los modelos reflejándose en la incertidumbre para simular tiempos largos.

Se denomina "tiempos largos" aquellos en los que la simulación puede alcanzar a predecir confiablemente el comportamiento del yacimiento durante la vida económica del proyecto y sus instalaciones. Autores como T. Lasset y Farug Ali recomiendan que el tiempo máximo de extrapolación para predecir el comportamiento de un yacimiento, sea de tres veces la historia del mismo. Actualmente la vida media de las instalaciones geotérmicas son de 30 años, por lo cual se requeriría de una historia de cuando menos 10 años.

Las propiedades del yacimiento podrán extrapolarse hacia -- puntos confirmados como similares por la geofísica y la geología y así programar más pozos para obtener un mayor potencial geotérmico del yacimiento en estudio.

La mayor importancia de una presimulación estriba en la confirmación de la red o malla propuesta para agrupar toda la infor

mación acumulada, dicha malla será rediseñada cuando se tenga -- nueva información y los modelos podrán ser tan complicados o pre cisos como se requieran.

Las etapas de presimulación y simulación son para seleccionar el mejor esquema de explotación del yacimiento (Producción-Inyección) y obtener un mejor aprovechamiento, así como simular los efectos que producirán los pozos programados o probables; de nuevas áreas.

En el cuarto nivel, la habilidad y experiencia del Ingeniero de simulación es básica, dependiendo de él el manejo y la --- creación del modelo matemático, método de solución, selección de los datos, afinación de la malla, ajuste de la historia y la pre dicción del yacimiento.

Se recomienda estudiar los alcances y el uso de simuladores numéricos por medio de un análisis de sensibilidad y no abusar - de los modelos de simulación utilizándolos inadecuadamente. El trabajo de (K.H. Coats, 1980) está enfocado a sugerir ideas para una simulación apropiada y cómo evitar el abuso de los simuladores.

La historia de producción debe ser amplia y confiable para ajustarse con las salidas del modelo, realizado lo anterior, -- se procede a simular las variantes de los esquemas de explota--

ción y a estimar la contribución y comportamiento de las celdas contiguas para simular pozos no perforados.

En este nivel la confirmación de los estudios geofísicos -- permitirá extrapolar las condiciones de producción a parámetros geofísicos similares y las alternativas de ampliación se contemplaron con los datos superficiales de la exploración.

Finalmente, la vida económica del yacimiento y el sistema de producción podrán ser estimados mediante índices de recuperación geotérmica, así como con los tiempos de amortización y monto de la ganancia neta. Corresponde también estudiar la aceleración y ampliación de los proyectos geotermoeléctricos.

V.3. ESTIMACIÓN DE LA ENTRADA DE AGUA AL YACIMIENTO GEOTÉRMICO DE LOS AZUFRES, MICH.

Para realizar la estimación de la entrada de agua al yacimiento geotérmico de Los Azufres, Mich., se inicia con la formación de un modelo que representa las condiciones del subsuelo lo mejor posible. Esto se realizó utilizando la información geofísica para su extensión, la de pozos para sus condiciones termodinámicas, la geohidrológica para determinar la amplitud del acuífero y la petrofísica de comparación para las propiedades de porosidad y permeabilidad.

De los planos de agrupación de anomalías geoeléctricas se tiene:

- a) Para la zona Sur una anomalía de menos de 15 Ohms-m igual a 8.35 Km² con un radio equivalente de 1.63 Km y una anomalía igual o menor a 20 Ohms-m de 21.35 Km², con un radio equivalente de 2.607 Km (Figura V-7).

Las medidas de los datos de temperatura de fondo están dadas para la anomalía central 300°C y la siguiente 215°C. Para determinar las propiedades de la salmuera, se obtiene una equivalencia de la misma en NaCl y se calcula la viscosidad, densidad y presión de equilibrio a las temperaturas conocidas (ver Tabla V-1).

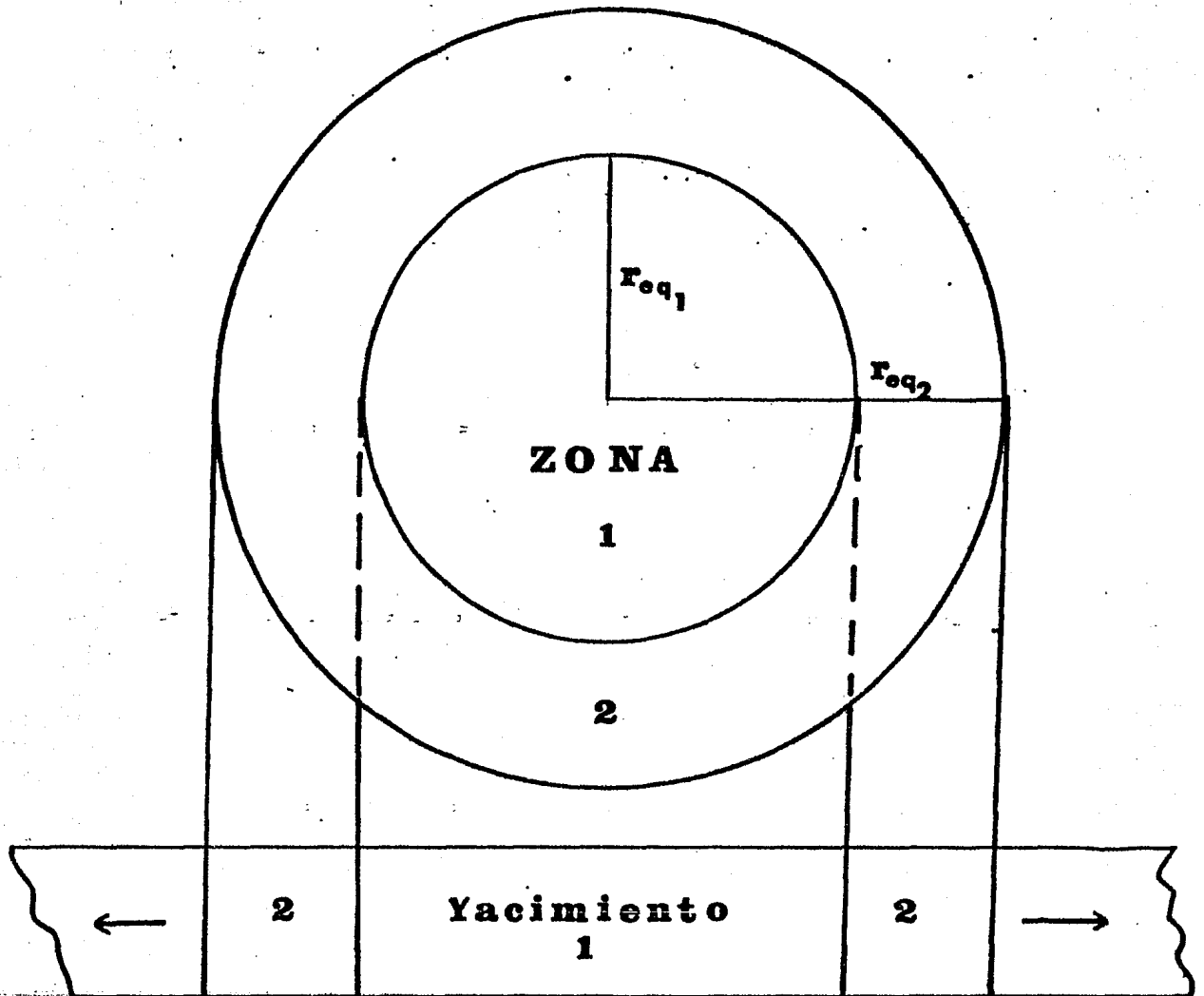
El modelo geohidrológico regional nos da la pauta para poder asignar condiciones infinitas al acuífero que circunda al yacimiento.

Los parámetros petrofísicos fueron tomados de otros campos geotérmicos que manifiestan características similares, esto se debió a que no existe un análisis completo en las pruebas de presión y de los núcleos.

- b) En la zona Norte, se aplican los mismos criterios que en la Sur, sólo cambia el área central con una superficie de 8.2 Km² y un radio equivalente a 1.6157 (Figura V-8).

Las figuras V-7 y V-8 muestran los modelos propuestos y las figuras V-9 y V-10, muestran las caídas de presión esperadas durante la etapa de producción, de estas gráficas, se determinan el número de muestras, los intervalos de mues---

ZONA SUR



Acuifero Infinito

$$r_{eq1} = 1.63 \text{ km}$$

$$A_1 = 8.35 \text{ km}^2$$

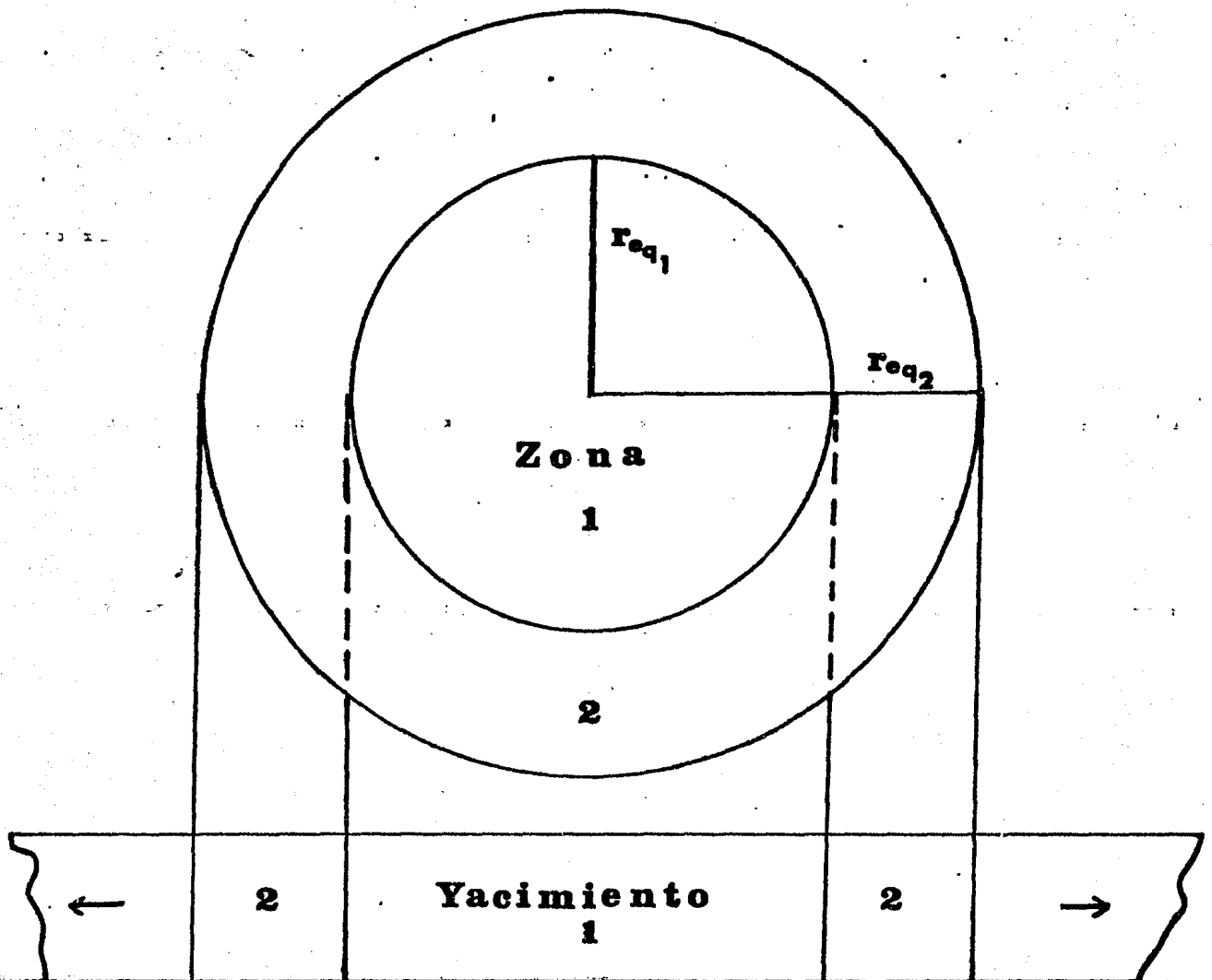
$$r_{eq2} = 2.6 \text{ km}$$

$$A_2 = 21.35 \text{ km}^2$$

Esc 1:50,000

Figura V-7

ZONA NORTE



Acuifero Infinito

$$r_{eq1} = 1.616 \text{ km}$$

$$A_1 = 8.2 \text{ km}^2$$

$$r_{eq2} = 2.61 \text{ km}$$

$$A_2 = 21.35 \text{ km}^2$$

Esc 1:50,000

Figura V-8

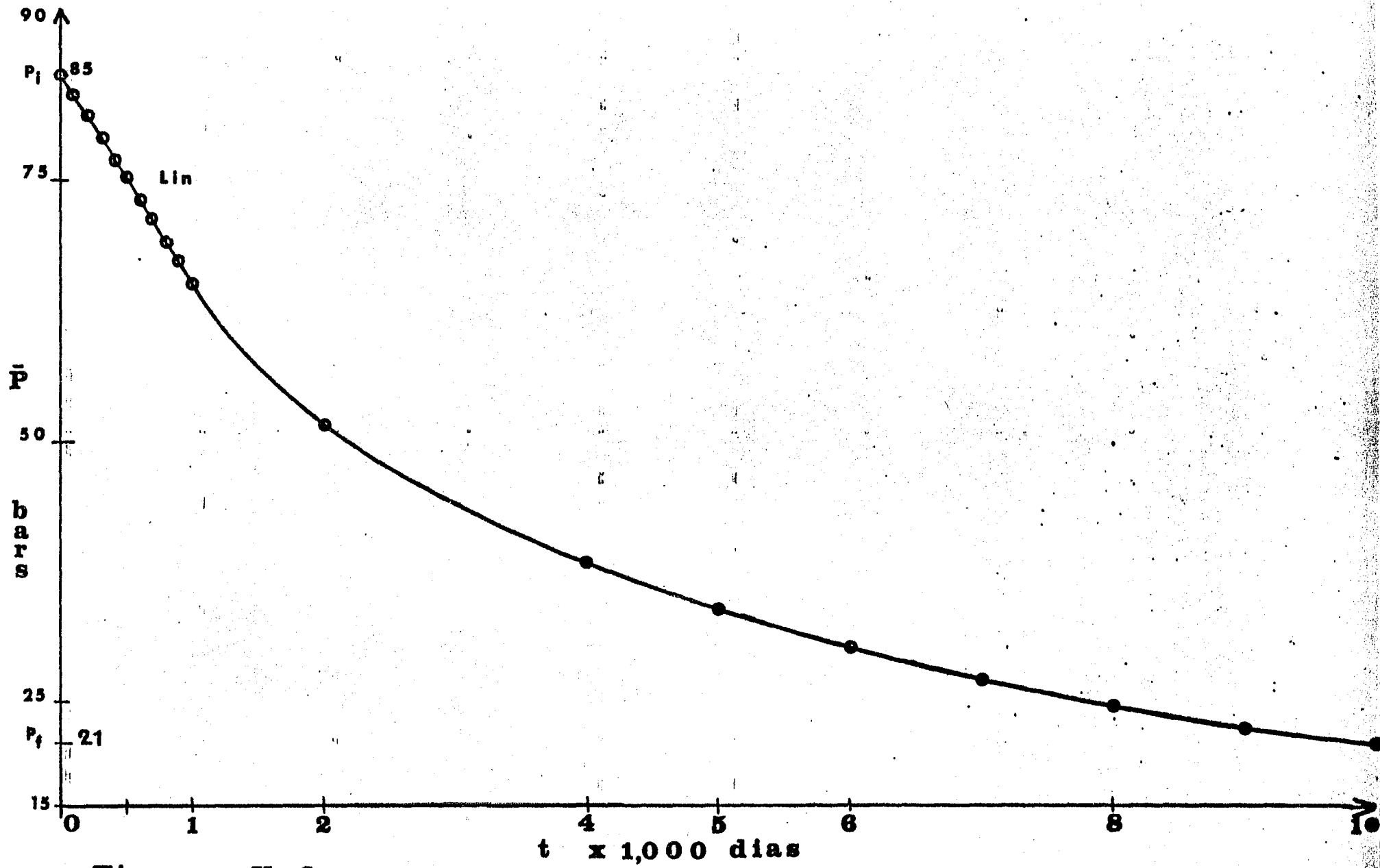
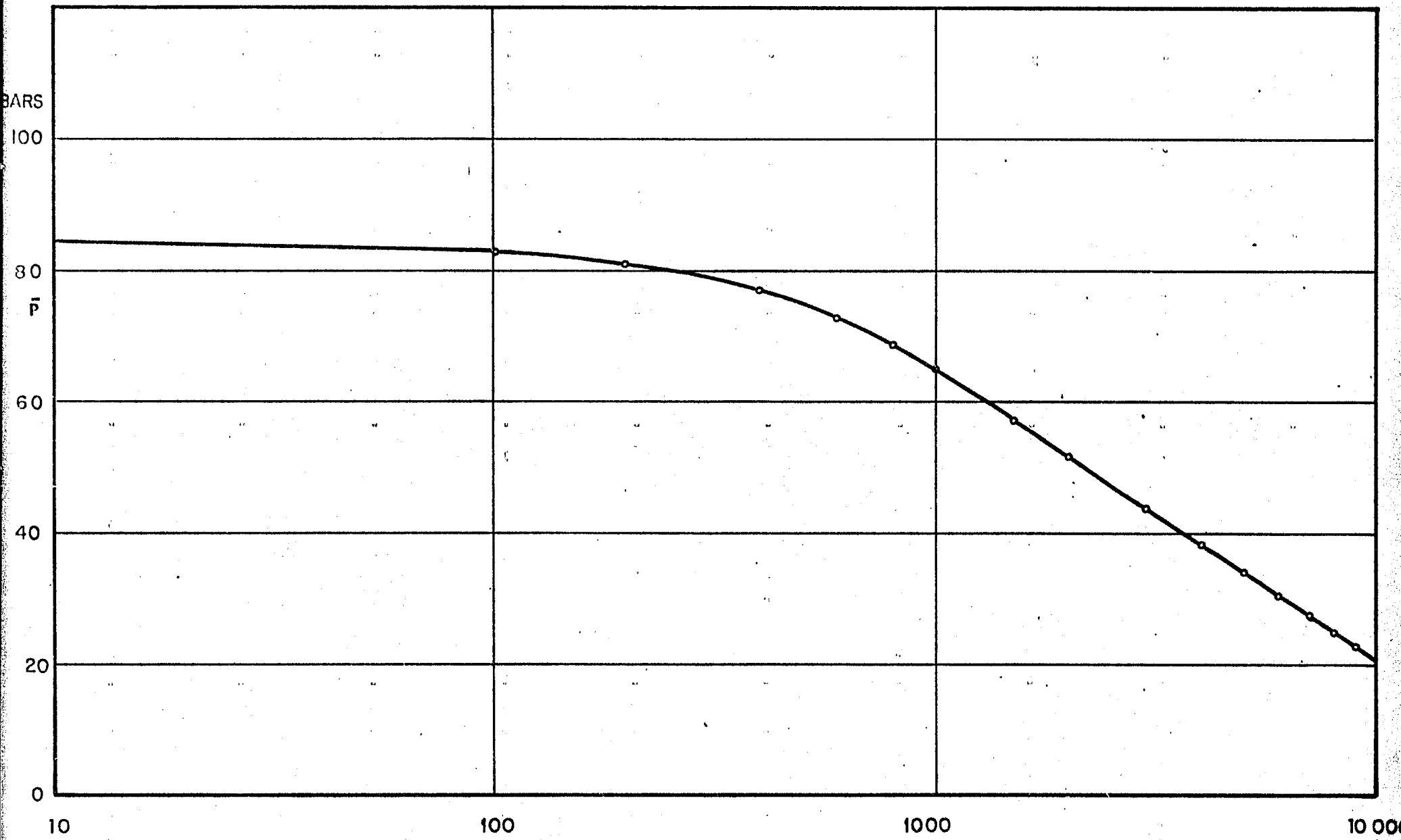


Figura V-9



treo y el valor de la muestra que serán utilizados para calcular la recarga del yacimiento.

V.3.1 ESTIMACIÓN DE LA COMPRESIBILIDAD TOTAL PARA LOS AZUFRES, MICH.

Para esta estimación se consideran las pruebas de presión - realizadas en el pozo A-18 y la prueba de interferencia entre -- los pozos A-18 (observador), A-26 (productor) y A-31 (productor).

Las pruebas de presión, comprenden el intervalo de 1188 a - 1325 m de profundidad y corresponden a la zona productora del pozo. Cada prueba se realizó conforme se profundizaba el pozo, pe ro, no se aislaron los intervalos probados, así que cada nueva - prueba que se realizaba era representativa del intervalo perfora do. Los resultados medios fueron de 7 (D-m)/cp para la transmi sividad y no se definió un valor para el coeficiente de almacena je $\emptyset h C_e m / (Kg/cm^2)$.

De la prueba de interferencia se identificó el arribo de una onda de presión 24 horas después de iniciada la prueba.

El dato de porosidad no es para una roca porosa homogénea, - es para un sistema fracturado con una porosidad en el relleno de la fractura y otra para la roca sana.

La ecuación utilizada es la referenciada por Van Poollen, - H.K., et al, 1981 "Individual Well Pressures in Reservoir Mode-- ling". The Petroleum Publishing Company.

$$\emptyset = \frac{\phi \mu C_t r_b^2}{15.822 \times 10^{-4} K} \quad \text{--- V-7}$$

donde:

θ = tiempo en el cual se alcanzan las condiciones estáticas (hrs)

r_b = radio equivalente del block (ft)

ϕ = porosidad (%)

μ = viscosidad (cp)

C_t = compresibilidad (Psi^{-1})

K = permeabilidad (md)

Despejando C_t :

$$C_t = 15.822 \times 10^{-4} \frac{K \theta}{\phi \mu r_b^2} \text{----- V-8}$$

Valuando C_t con respecto a kh/μ

$$C_t = 15.822 \times 10^{-4} \frac{\left(\frac{kh}{\mu}\right) \theta}{\phi h r_b^2} \text{----- V-9}$$

dato de las pruebas de presión

$$\frac{kh}{\mu} = 7 \frac{D-m}{cp} = 22801.11 \frac{mD-ft}{cp}$$

θ estimado de la prueba de interferencia.

$$\theta = 24 \text{ hrs, } \phi = 0.2, \quad r_b = 725 \text{ ft}$$

de la Ec. V-9

$$C_t = 15.822 \times 10^{-4} \times \frac{22801.11 \times 24}{0.2 \times 1033.2 \times (725)^2}$$

$$C_t = 7.9715 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$$

Dato que se presenta en la Tabla V-1 de datos.

*Permeabilidad	Optimista	Pesimista
Khs Kvs	500 md 10 md	100 md 1 md
*Porosidad	Optimista	Pesimista
ϕ_r ϕ_f ϕ_s	25% 30% 27%	5% 8% 10%
Viscosidad	300°C	215°C
μ μ NaCl 1% W	0.0885 cp 0.0904 cp	0.1309 cp 0.1338 cp
Densidad	300°C	215°C
ρ ρ NaCl 1% W	0.7122 gr/cc 0.772 gr/cc	0.8667 gr/cc 0.8846 gr/cc
Compresibilidad	$\phi = 20\%$	$\phi = 10\%$
^{++}C $\cdot C$ $\cdot\cdot C$	$3.5 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$ $7.97 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$	$4.8 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$ $\cdot\cdot 3.99 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$
<p>* Brown, P.R.L., 1982 "Permeability in Geothermal Fields". Geothermal Institute, University of Auckland N.Z.</p> <p>+ Ellis, A.J. Mahow, W.A., 1977 "Chemistry and Geothermal Systems". Academic Press. USA.</p> <p>++Hall, H.N., 1953 "Compresibility of Reservoir -- Rocks" TRANS AIME.</p> <p>\cdot Calculado.</p> <p>$\cdot\cdot$ Estimado.</p>		

TABLA V-1.- DATOS Y REFERENCIAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA ENTRADA DE AGUA AL YACIMIENTO FRACTURADO DE LOS -- AZUFRES, MICH.

En el análisis de la entrada de agua el yacimiento de Los Azufres, Mich. se discutirán dos posibilidades, la OPTIMISTA y PESIMISTA, en ellas, se utilizan los datos de la Tabla V-1 y los datos de producción de cada zona.

Los cálculos se iniciaron identificando los períodos (i), los intervalos de muestrero (t_i) y las caídas de presión (Δp), de los datos graficados (Figuras V-9 y V-10). Realizado lo anterior se calcula t_D por zona y por posibilidad para calcular la diferencia ($t_D - t_{Di}$), con este dato se obtiene $Q_D(t_D - t_{Di})$ que al multiplicarlo por el decremento de presión se obtendrá el factor $\Delta p Q_D(t_D - t_{Di})$ para el período (i) y la suma de los factores de $i = 1$ hasta $n-1$, finalmente esta sumatoria se sustituye en la ecuación V-15.

Los cálculos descritos se aplican para dos etapas de la vida del yacimiento, la etapa inicial de 0 a 1000 días, donde se presentan decrementos lineales y la etapa final de 1000 a 10000 días con decrementos exponenciales (Figuras V-9 y V-10).

Cálculos de t_D :

ZONA SUR

OPTIMISTA

PESIMISTA

$K = 500$ md	100 md
$\phi = 27.5\%$	10%
$\mu = 0.0904$ cp	0.1338 cp
$C_t = 7.97 \times 10^{-6}$ psi ⁻¹	3.99×10^{-6} psi ⁻¹
$r_e = 5347.8$ ft	5347.8 ft

$$t_{D_1} = 5.5943 \times 10^{-1} t$$

$$t_{D_2} = 4.1525 \times 10^{-1} t$$

ZONA NORTE

OPTIMISTA

PESIMISTA

K = 500 md

100 md

ϕ = 25%

10%

μ = 0.0904 cp

0.1338 cp

C_t = 7.97×10^{-6} psi⁻¹

3.99×10^{-6} psi⁻¹

r_e = 5300.2 ft

5300.2 ft

$$t_{D_3} = 6.2648 \times 10^{-1} t$$

$$t_{D_4} = 4.2277 \times 10^{-1} t$$

Para el cálculo de la entrada de agua a un yacimiento se --
 utiliza la solución de la ecuación de difusividad para un siste-
 ma acuífero-yacimiento de tipo radial.

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial \rho_D}{\partial r_D} \right) = \frac{\partial \rho_D}{\partial t_D} \quad \text{--- V-10}$$

donde

$$r_D = \frac{r}{r_e} \quad \text{--- V-11}$$

$$t_D = \frac{A k t}{\phi \mu C_t r_e^2} \text{ unidades de campo} \quad \text{--- V-12}$$

Unidades Darcy A = 0.000264 (t-hrs)

A = 1 = 0.00634 (t-días)

 = 2.309 (t-años)

Para este caso

$$t_D = \frac{0.00634 kt}{\phi \mu C_t r_e^2} \quad \text{--- V-13}$$

$$W = 2\pi \phi h C_t r_o^2 \Delta P W_D(t_D) \quad \text{---} \quad \text{V-14}$$

Para los incrementos continuos.

$$W = 2\pi \phi h C_t r_w^2 \sum_{i=1}^n \Delta P_i Q_D(t_D - t_{Di}) \quad \text{---} \quad \text{V-15}$$

Para aplicarse esta ecuación se recurre a tabular los datos obtenidos para cada decremento de presión.

ZONA SUR LINEAL

OPTIMISTA

i	t _i	t-t _i	t _D -t _{Di}	Q _D (t _D -t _{Di})	ΔP	ΔP Q _D (t _D -t _{Di})
0	0	1000	559.43	197	14.5	2595.50
1	100	900	503.48	163.5	29.0	4741.5
2	200	800	447.54	148.2	29.0	4297.8
3	300	700	391.6	132	29.0	3828.0
4	400	600	335.66	116.2	29.0	3369.8
5	500	500	279.72	100	29.9	2900.0
6	600	400	223.77	82.5	29.0	2392.5
7	700	300	167.83	65.2	29.0	1812.5
8	800	200	111.88	47.1	29.0	1365.9
9	900	100	55.94	27.15	29.0	787.4
10	1000	0	0.0	0.0	14.5	0.0
						28,090.9

9
Σ
i=1

PESIMISTA

$t_D - t_{Di}$	$Q_D(t_D - t_{Di})$	$\Delta P Q_D(t_D - t_{Di})$
415.25	139.06	2,016.37
373.73	127.0	3,683.00
332.2	115.0	3,335.0
290.7	103.1	2,989.9
249.2	91	2,639.0
207.6	78	2,262.0
166.1	65	1,885.0
124.6	51.5	1,493.5
83.1	37.1	1,075.9
41.5	21.5	614.8
		21,994.5

$\sum_{i=1}^9$

TABLAS V-2 Y V-3.- DATOS Y CÁLCULOS DE $\sum_{i=1}^9 \Delta P Q_D(T_D - T_{Di})$

ZONA NORTE LINEAL

OPTIMISTA

i	t_i	$t-t_i$	t_D-t_{Di}	$Q_D(t_D-t_{Di})$	ΔP	$\Delta PQ_D(t_D-t_{Di})$
0	0	1000	626.5	197	14.5	2,856.5
1	100	900	563.8	180	29.0	5,220.0
2	200	800	501.2	163	29.0	4,727.0
3	300	700	438.5	145.2	29.0	4,210.8
4	400	600	375.8	127.7	29.0	3,688.8
5	500	500	313.2	109.5	29.0	3,175.5
6	600	400	250.6	91.1	29.0	2,641.9
7	700	300	187.9	72.1	29.0	2,088.0
8	800	200	125.3	51.7	29.0	1,499.3
9	900	100	62.6	29.6	29.0	858.4
10	1000	0	0.0	0.0	14.5	0.0
						30,966.2

9
 Σ
i=1

PESIMISTA

t_D-t_{Di}	$Q_D(t_D-t_{Di})$	$\Delta PQ_D(t_D-t_{Di})$
422.8	141.1	2,045.95
380.5	129.2	3,746.8
338.2	117.1	3,395.9
295.9	105	3,045.0
253.6	92	2,668.0
211.4	79	2,291.0
169.1	66.1	1,916.9
126.8	52.2	1,513.8
84.5	37.5	1,087.5
42.27	21.75	630.8
		22,341.65

9
 Σ
i=1

$$W_e = 2 \pi \phi h C_t r_w^2 \sum_{i=1}^g \Delta P_i Q_D (t_D - t_{Di}) \text{ --- --- --- --- --- V-15}$$

Zona Sur de 0-1000 días lineal

OPTIMISTA $h = 1640.4 f_t$

$$W_e = 2 \pi \times 0.275 \times 1640.4 \times 7.97 \times 10^{-6} \times (5347.8)^2 \times 28090.9$$

$$W_e = 1.81483 \times 10^{10} f_t^3$$

PESIMISTA $h = 820.2 f_t$

$$W_e = 2 \pi \times 0.10 \times 820.2 \times 3.99 \times 10^{-6} \times (5347.8)^2 \times 21994.5$$

$$W_e = 1.2934 \times 10^9 f_t^3$$

Zona Norte de 0-1000 días lineal

OPTIMISTA $h = 1640.4 f_t$

$$W_e = 2 \pi \times 0.25 \times 1640.4 \times 7.97 \times 10^{-6} \times (5300.2)^2 \times 30,966.2$$

$$W_e = 1.7859 \times 10^{10} f_t^3$$

PESIMISTA $h = 820.2 f_t$

$$W_e = 2 \pi \times 0.10 \times 820.2 \times 3.99 \times 10^{-6} \times (5300.2)^2 \times 22,341.65$$

$$W_e = 1.291 \times 10^9 f_t^3$$

ZONA SUR EXPONENCIAL

OPTIMISTA

i	t_i	$t-t_i$	t_D-t_{Di}	$Q_D(t_D-t_{Di})$	ΔP	$\Delta P Q_D(t_D-t_{Di})$
0	1000	9000	5034.9	1199.5	93.11	111,688.7
1	2000	8000	4475.4	1081.15	147.5	159,469.9
2	3000	7000	3916.0	961.23	93.04	89,432.5
3	4000	6000	3356.6	839.5	68.58	57,573.9
4	5000	5000	2797.2	715.7	54.45	38,967.3
5	6000	4000	2237.6	611.8	45.18	27,643.0
6	7000	3000	1678.3	458.7	38.65	17,729.8
7	8000	2000	1118.9	323.2	33.8	10,925.6
8	9000	1000	559.4	178.9	29.93	5,354.2
9	10000	0	0.0	0.0	14.12	
						518,784.9

9
 Σ
i=0

PESIMISTA

t_D-t_{Di}	$Q_D(t_D-t_{Di})$	$\Delta P Q_D(t_D-t_{Di})$
3737.3	922.48	85,892.9
3322.0	831.92	122,708.0
2906.8	740.11	68,859.9
2491.5	646.85	44,361.0
2076.3	552.0	30,056.4
1661.0	454.6	20,539.9
1245.8	354.4	13,696.4
830.5	250.5	8,466.9
415.3	139.2	4,166.3
0.0	0.0	
		398,747.7

9
 Σ
i=0

TABLAS V-6 Y V-7.- DATOS Y CÁLCULOS DE $\sum_{i=1}^9 \Delta P Q_D T_D - T_{Di}$

OPTIMISTA

i	t_i	$t-t_i$	t_D-t_{Di}	$Q_D(t_D-t_{Di})$	ΔP	$\Delta P Q_D(t_D-t_{Di})$
0	1000	9000	5638.3	1325.7	93.11	123,435.9
1	2000	8000	5011.8	1194.7	147.5	176,218.3
2	3000	7000	4385.4	1062.0	93.04	98,808.5
3	4000	6000	3758.9	927.2	68.58	63,587.4
4	5000	5000	3132.4	790.2	54.45	43,026.4
5	6000	4000	2505.9	650.1	45.18	29,372.2
6	7000	3000	1879.4	519.3	38.65	19,800.4
7	8000	2000	1253.0	356.3	33.8	12,042.9
8	9000	1000	626.5	196.9	29.93	5,894.5
9	10000	0			14.12	
						572,186.5

9
Σ
i=0

PESIMISTA

t_D-t_{Di}	$Q_D(t_D-t_{Di})$	$\Delta P Q_D(t_D-t_{Di})$
3804.9	937.2	87,262.7
3382.2	845.1	124,652.3
2959.4	751.8	69,948.7
2536.6	657.1	45,061.3
2113.9	560.5	30,519.6
1691.0	461.7	20,861.1
1268.3	360.1	13,917.1
845.5	254.2	8,592.0
422.8	141.2	4,227.3
		405,042.1

9
Σ
i=0

TABLAS V-8 Y V-9.- DATOS Y CÁLCULOS DE $\sum_{i=1}^9 \Delta P Q_D T_D - T_{Di}$

$$W_e = 2 \pi \phi h C_t r_w^2 \sum_{i=0}^g \Delta P_i Q_D (t_D - t_{Di}) \text{ - - - - - V-15}$$

ZONA SUR de 1000 a 10000 días exponencial

OPTIMISTA $h = 1640.4 \text{ ft}$

$$W_e = 2 \pi \times 0.275 \times 1640.4 \times 7.97 \times 10^{-6} \times (5347.8)^2 \times 518784.9$$

$$W_e = 3.35164 \times 10^{11} \text{ ft}^3$$

PESIMISTA $h = 820.2 \text{ ft}$

$$W_e = 2 \pi \times 0.10 \times 820.2 \times 3.99 \times 10^{-6} \times (5347.8)^2 \times 398747.7$$

$$W_e = 2.34486 \times 10^{10} \text{ ft}^3$$

ZONA NORTE de 1000 a 10000 días exponencial

OPTIMISTA $h = 1640.4 \text{ ft}$

$$W_e = 2 \pi \times 0.25 \times 1640.4 \times 7.97 \times 10^{-6} \times (5300.2)^2 \times 572186.5$$

$$W_e = 3.29995 \times 10^{11} \text{ ft}^3$$

PESIMISTA $h = 820.2 \text{ ft}$

$$W_e = 2 \pi \times 0.10 \times 820.2 \times 3.99 \times 10^{-6} \times (5300.2)^2 \times 405042.1$$

$$W_e = 2.34051 \times 10^{10} \text{ ft}^3$$

V.3.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La generación de un Megawatt geotermoeléctrico requiere de 10 toneladas de vapor con un mínimo de presión de 10 bars a la admisión del turbogenerador, como existen condiciones de pérdidas en el transporte y la mayoría de los pozos producen mezcla, se propone el siguiente análisis para 1000 y 10 000 días.

JULIO DE 1983

*ZONA SUR

$Q_V = 879 \text{ ton/h} \text{ ——— } 64\%$

$Q_A = 500 \text{ ton/h} \text{ ——— } 36\%$

*ZONA NORTE

$Q_V = 450 \text{ ton/h} \text{ ——— } 67\%$

$Q_A = 225 \text{ ton/h} \text{ ——— } 33\%$

Para los cálculos optimistas se considerará

ZONA SUR 60% vapor 40% agua

ZONA NORTE 65% vapor 35% agua

Para los cálculos pesimistas

ZONA SUR 50% vapor 50% agua

ZONA NORTE 50% vapor 50% agua

* Información Oficial del Departamento de Evaluación y Yacimientos.

Mezcla requerida para generar 1MW a 1000 y 10 000 días:

ZONA SUR	OPTIMISTA	
	1 000 días	10 000 días
10 ton/h vapor	240 000	2 400 000
<u>6.7 ton/h agua</u>	<u>160 000</u>	<u>1'600 000</u>
16.7	400,000	4'000,000

	PESIMISTA	
10 ton/h vapor	240,000	2'400,000
<u>10 ton/h agua</u>	<u>240,000</u>	<u>2'400,000</u>
20	480,000	4'800,000

ZONA NORTE	OPTIMISTA	
10 ton/h vapor	240,000	2'400,000
<u>5.4 ton/h vapor</u>	<u>129,231</u>	<u>1'292,310</u>
15.4	369,231	3'692,310

	PESIMISTA	
10 ton/h	240,000	2'400,000
<u>10 ton/h</u>	<u>240,000</u>	<u>2'400,000</u>
20	480,000	4'800,000

De este cálculo observamos las diferentes cantidades masi--
cas para cada estimación. En los cálculos de la entrada de agua
al yacimiento (W_e) se están obteniendo los volúmenes de agua ca--
paces de entrar al yacimiento bajo las condiciones descritas, --
por lo que, si no se desea abatir rápidamente las propiedades --

del yacimiento se debe dejar actuar a la recarga y optimizar la producción.

ZONA SUR 0-1000 días

OPTIMISTA

$$W_e = 1.81483 \times 10^{10} \text{ [ft}^3\text{]} \left[\frac{\text{m}^3}{35.31 \text{ [ft]}^3} \right]$$

de la tabla de datos

$$\rho_{\text{NaCl 1\%W}} = 772 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right] \left[\frac{\text{Ton}}{1000 \text{ [Kg]}} \right] = 0.772 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3}$$

$$W_e = 396.73 \times 10^6 \text{ Ton/1000 días}$$

El agua utilizará los fracturas como conductos reduciendo la eficiencia al 25%*, por lo tanto

$$W_e = 99.18 \times 10^6 \text{ Ton/1000 días}$$

400,000 Ton

1 MW/1000 días

99.18 x 10⁶ Ton

248 MW/1000 días disponibles

Dependiendo del patrón de distribución de los pozos se podrá recuperar del 30 al 90% del total de la masa disponible

30% ——— 74.4 MW

90% ——— 223.2 MW

* Browne, P.R.L., Julio, 1982.

ZONA SUR 1000-10 000 días

OPTIMISTA

$$W_e = 3.35164 \times 10^{11} \text{ ft}^3$$

$$\rho = 0.772 \text{ Ton/m}^3$$

$$W_e = 7.32 \times 10^9 \text{ Ton (1000-10 000) días}$$

$$W_e = (25\%) = 1.83 \times 10^9 \text{ Ton (1000-10 000) días}$$

Producción	100%	485 MW disponibles
	90%	412 MW Probables
	30%	137 MW Mínimos Probables

ZONA NORTE 0-1000 días

OPTIMISTA

$$W_e = 1.7859 \times 10^{10} \text{ ft}^3$$

$$\rho = 0.772 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3}$$

$$W_e = 390.46 \times 10^6 \text{ Ton/1000 días}$$

$$W_e (25\%) = 97.6 \times 10^6 \text{ Ton/1000 días}$$

Producción	100%	264.3 MW Disponibles
	90%	237.9 MW Probables
	30%	79.3 MW Mínimos Probables

ZONA NORTE 1000-10 000 días

OPTIMISTA

$$W_e = 3.29995 \times 10^{11} \text{ ft}^3$$

$$\rho = 0.772 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3}$$

$$W_e = 7.215 \times 10^9 \text{ Ton (1000-10 000) días}$$

$$W_e (25\%) = 1.8 \times 10^9 \text{ Ton (1000-10 000) días}$$

Producción Disponible	487.5 MW
90%	438.7 MW Probables
30%	146.2 MW Mínimos Probables

ZONA SUR 0-1000 días

PESIMISTA

$$W_e = 1.2934 \times 10^9 \text{ ft}^3$$

$$\rho = 0.88465 \text{ Ton/m}^3$$

$$W_e = 32.404 \times 10^6 \text{ Ton/1000 días}$$

$$W_e (25\%) = 8.1 \times 10^6 \text{ Ton}$$

Producción	100%	16.88 MW	Disponible
	90%	15.2 MW	Probables
	30%	5.0 MW	Mínimos Probables

PESIMISTA 1000-10 000 días

$$W_e = 2.34486 \times 10^{10} \text{ ft}^3$$

$$\rho = 0.88465 \text{ Ton/m}^3$$

$$W_e = 587.47 \times 10^6 \text{ Ton}$$

$$W_e (25\%) = 146.87 \times 10^6 \text{ Ton}$$

Producción	100%	30.6 MW	Disponible
	90%	27.5 MW	Probables
	30%	9.2 MW	Mínimos Probables

ZONA NORTE 0-1000 días

PESIMISTA

$$W_e = 1.291 \times 10^9 \text{ ft}^3$$

$$\rho = 0.88465 \text{ Ton/m}^3$$

$$W_e = 30.34 \times 10^6 \text{ Ton/1000 días}$$

$$W_e (25\%) = 7.59 \times 10^6$$

Producción	100%	15.8	MW	Disponible
		14.2	MW	Probables
		4.75	MW	Mínimos Probables

PESIMISTA 1000-10 000 días

$$W_e = 2.34051 \times 10^{10} \text{ ft}^3$$

$$\rho = 0.88465$$

$$W_e = 586.38 \times 10^6 \text{ ft}^3$$

$$W_e (25\%) = 146.6 \times 10^6$$

Producción	100%	30.54	MW	Disponible
	90%	27.49	MW	Probables
	30%	9.2	MW	Mínimos Probables

El resumen de esta estimación (Tabla V-10) muestra la factibilidad de obtener producción suficiente para garantizar las instalaciones geotérmicas que se requieren para generar cuando menos 75 MW por zona. El principal factor que se involucra en la producción es la recarga o entrada de agua al yacimiento, comprobándose ésto con los cálculos realizados al "Modelo Geotérmico - Conceptual del Campo de Los Azufres, Mich."

La entrada de agua al yacimiento tiene un ritmo lineal hasta los 1000 días, considerando que en ese tiempo, se alcanzará -- la capacidad de instalación para hacer producir al campo cuando menos 125 MW por zona, de ese momento en adelante, cuando supuestamente se esté produciendo lo estimado, las caídas de presión -- tenderán a comportarse exponencialmente facilitando la recarga y aumentando su capacidad de generación.

Si desde un principio se lograra perforar los pozos requeridos para generar los 250 MW y momentaneamente se iniciara la producción, la caída de presión será mucho más rápida y de tipo exponencial provocando una disminución en la producción acumulativa final. No se tiene el cálculo de este dato pero se estima -- que se reduciría en un 60% de lo aprovechable.

Los fenómenos esperados de caídas de presión rápidas serían:

- a) Canalizaciones de fluido frío hacia zonas de mayor deflexión. En su trayecto hacia las zonas deflexionadas estas canalizaciones de agua no alcanzarán las condiciones termodinámicas similares a los de producción media del yacimiento.
- b) Disminución de gasto masico en zonas de menor permeabilidad.

ZONA SUR

ZONA NORTE

	OPTIMISTA		PESIMISTA		OPTIMISTA		PESIMISTA	
	0-1000	1000-10000	0-1000	1000-10000	0-1000	1000-10000	0-1000	1000-10000
Δt días	0-1000	1000-10000	0-1000	1000-10000	0-1000	1000-10000	0-1000	1000-10000
$\Sigma \Delta t_D$	0.559	0.559	0.415	0.415	0.626	0.626	0.422	0.422
$P Q_D(t_D - t_{Di})$	28,091	518,785	21,995	398,748	30,966	572,187	22,342	405,042
W_e (Ton)	99×10^6	1.8×10^9	8.1×10^6	14.7×10^7	97.6×10^6	1.8×10^9	7.6×10^6	14.6×10^7
Prod. (MW)								
100%	248	458	17	31	264	488	16	31
90%	223	412	15	28	238	439	14	27
30%	74	137	5	9	79	146	5	9

TABLA V-10.- RESUMEN DE LOS CÁLCULOS DE PRODUCCIÓN CONSIDERANDO A LA RECARGA COMO LA FUENTE PRINCIPAL DE LA MISMA.

V.3.4 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CON OTROS MODELOS

De la síntesis geológica superficial y del subsuelo se logra obtener el "Modelo Geotérmico Conceptual del Campo de Los Azufres, Mich.", en él se estiman volúmenes de roca caliente de 19 Km³ para el yacimiento y 35 Km³ para la zona que lo circunda. A la roca del yacimiento se le asigna una porosidad del 14.2% -- basados en la alteración hidrotermal y el contenido de arcillas y minerales del mismo origen.

Al resumir los datos geohidrológicos regionales se llegó a la conclusión de que el yacimiento geotérmico está inmerso en un acuífero regional profundo contenido en rocas del Mioceno-Plioceno.

Analizando los datos proporcionados por este modelo se tiene:

$$V_r = 19 \text{ Km}^3$$

$$\phi = 0.142$$

Si la saturación de la roca es del 100% el volumen de fluido contenido en esa roca será:

$$V_f = V_r \phi S_w \quad \text{--- V-16}$$

$$V_f = 19[\text{Km}^3] 0.142 \times 1 = 2.69 \text{ Km}^3$$

Si la densidad del fluido hidrotermal es de 0.772 [$\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$]

$$\rho = 0.772 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right] \left[\frac{\text{Kg}}{1000 \text{ gr}} \right] \left[\frac{10^{10} \text{cm}^3}{\text{m}^3} \right] \left[\frac{\text{Ton}}{1000 \text{ Kg}} \right] \left[\frac{10^9 \text{m}^3}{\text{Km}^3} \right]$$

$$\rho_f = 772 \times 10^6 \frac{\text{Ton}}{\text{Km}^3}$$

cálculo de la masa

$$V_f \rho_f = M_f \text{ ----- V-17}$$

$$2.69 \times 772 \times 10^6 = 2076.68 \times 10^6 \text{ Ton}$$

$$M_f = 2.077 \times 10^9 \text{ Ton}$$

Un factor de recuperación de fluidos hidrotermales para yacimientos fracturados estimado de forma conservadora será de 20%.

$$M_f = 4.15 \times 10^8 \text{ Ton}$$

De la evaluación pesimista para calcular la masa requerida para generar 1 MW durante 10 000 días se tiene:

$$G = 1 \text{ MW} = 4'800,000 \text{ Ton}/10 \text{ 000 días}$$

Por lo tanto la generación con la masa disponible será:

$$G = \frac{4.15 \times 10^8}{4.8 \times 10^6} = 86.5 \text{ MW}$$

Generación probable = 86.5 MW durante 10 000 días

De este análisis numérico se concluye que el yacimiento requiere de una fuente de recarga continua para producir lo que actualmente podría generar al ponerse en explotación.

V.4 CONCLUSIONES

En cada capítulo se exponen las conclusiones referentes al tema tratado, por consiguiente, en este inciso se mencionarán -- aquellas que deducidas a partir de conceptos y datos contenidos en la presente tesis, son de carácter general.

- a) Se concluye que debido a las diferentes características de las zonas en exploración debe establecerse en cada caso, la secuencia de estudios y los métodos de muestreo, para facilitar las correlaciones, interpretaciones y extrapolaciones de los datos adquiridos en las etapas de exploración y desarrollo.
- b) Los rasgos tectónicos y geodinámicos del Eje Neovolcánico no han sido definidos plenamente, por lo tanto, se dificulta la interpretación global de los mecanismos que propician las condiciones de acumulación y conducción de los fluidos hidrotermales.
- c) Los modelos geológicos iniciales de un campo geotérmico deben apoyarse en los parámetros geofísicos para definir sus características y límites.
- d) Los modelos geológicos deben retroalimentar sus conceptos e información con los datos de las perforaciones y la geofísica de detalle para afinar sus características y límites.
- e) El análisis de los factores que determinan el valor de la resistividad de medios porosos o fracturados, saturados de

salmuera; permite calcular la respuesta esperada, que pueda asociarse de forma confiable con las condiciones del yacimiento en estudio, y definir sus propiedades geoelectricas internas y de frontera.

- f) Los estudios geoelectricos realizados en Los Azufres, Mich. muestran que existe una discontinuidad somera entre las propiedades electricas de la zona sur y la zona norte; deduciéndose la posibilidad de que exista una sola fuente profunda de calor para las dos zonas.
- g) Los planos y secciones interpretados cualitativamente se consideran esenciales para una buena comprension de los mecanismos estructurales y litologicos que restringen o facilitan la conduccion del fluido hidrotermal.
- h) La interpretacion cualitativa y la agrupacion de anomalias geoelectricas, muestran la distribucion areal de los efectos geotermicos y el fracturamiento de la zona, por consiguiente, estas configuraciones dan la pauta para la creacion de un modelo mixto integrado con otros parametros.
- i) Del analisis volumetrico de un modelo simplificado se deduce que la zona de Los Azufres, Mich. tiene grandes posibilidades de generar 75 MW durante 10 años sin recarga.
- j) La prospeccion magnetica en Ixtlán de Los Hervores se aplicó con buenos resultados para definir las estructuras y con

diciones del subsuelo que se relacionan con la actividad --
termal.

- k) Las anomalías magnéticas obtenidas son de tipo lineal debido a cuerpos tabulares bidimensionales someros (alternancias de basaltos y lodolitas).
- l) El estudio realizado permite proponer la ubicación de un pozo exploratorio, localizado entre dos anomalías magnéticas, las evidencias magnéticas de la falla de Ixtlán y las manifestaciones termales en superficie.
- m) Se considera conveniente la ejecución de las correlaciones propuestas por diversos autores, basándolas en pruebas específicas para cada zona en estudio.
- n) Las correlaciones aplicadas a la zona geotérmica de Los Azufres, Mich. son de tipo cualitativo y se podrán mejorar --- cuando se realicen pruebas con objetivos específicos de correlación.
- o) Las sugerencias hechas para realizar simulaciones que cumplan rigurosamente con los requisitos considerados como indispensables, tienen como finalidad optimizar los procedimientos y evitar fracasos técnicos al utilizar esta herramienta careciendo de la información adecuada.
- p) Al final del capítulo V se muestran los cálculos de la posible recarga del yacimiento de Los Azufres, Mich. Para las condiciones de fracturamiento se analizaron: datos de yaci

mientos tipo, con gran semejanza con el estudiado y las restricciones de flujo, para modelos radiales fracturados. El análisis de dos posibilidades optimista y pesimista, dan la pauta para calcular la recarga y la influencia de ésta en la producción, concluyéndose que de forma definitiva el yacimiento de Los Azufres, Mich. garantiza una capacidad de generación de 350 MW durante 10,000 días. Esta capacidad se verá reducida si el patrón de distribución de pozos productores-inyectores no es optimizado.

- q) El análisis numérico efectuado al "Modelo Geotérmico Conceptual del Campo de Los Azufres, Mich." definió que la generación probable, con un índice de recuperación del 20%, sería de 86.5 MW durante 10,000 días, capacidad menor de lo que se puede producir actualmente.

BIBLIOGRAFIA

- ADAM, A (EDITOR), 1976. Geoelectric and Geothermal Studies KAPG -- Geophysical Monograph, Akade Iniai Kiado Budapest.
- ADORNI, N. et al. Construction of a Probe for Measuring Temperature and Pressure in Deep Wells 1980 Geotermics, Vol 9 pp. 251 - 259.
- AIKEN, C.L.V. AND ANDER, M.E. 1981. A Regional Strategy for Geothermal Exploration With Emphasis on Gravity and Magnetotellurics. J. Volcanol. Geotherm Res., Vol. 9 pp. 1-27.
- ALVAREZ, R., 1975. Transcontinental Faulting; Evidence for Superimposed Subduction in Mexico. Trans Amer, Geophys. Union, Vol. 56 p. 1066.
- AMYX, J.W., Bass, D.M. Jr., y Whiting, R.L., 1960. Petroleum Reservoir Engineering, McGraw-Hill Book Co., New York.
- ARCHIE, G.E., 1942. The Electrical Resistivity Log as an Aid Determining som Reservoir Characteristics: American Institute of Mining and Metallurgical Engineers Transactions, Vol. 196 pp. 54-62.
- ATWATER, T., 1970. Implications of Plate Tectonics for The Cenozoic Tectonic Evolution of Western North America: Geological Society of America Bulletin. Vol. 81 pp. 3513 - 35-36.
- AUMENTO, F., AUTIERREZ N., L.C.A., 1980. Geocronología de Los Azufres, Mich., Informe 3-80, Departamento Exploraciones C.F.E. - México.

- BANNISTER, P.R., 1968. Determination of The Electrical Conductivity of The sea Beddin Shallow Waters
Geophysics Vol. 33 No. 6.
- BARELLI, A., and PALAMA, A., 1981. A New Method for Evaluating - -
Formation Equilibrium Temperature in Holes During Drilling. -
Geothermics, Vol. 10 No. 2 pp. 95-102.
- BHATTACHARYA, P.K. and PATRA, H.P. Direct Current Geoelectric Sound
ding. Elsevier Scientific Publishing Company.
- BHATTACHARYYA, B.K. and Lev., L., 1975. Analysis of Magnetic Anomal
lies Over Yellowstone National Park: Mapping of Curie Point -
Isothermal Surface for Geothermal Reconnaissance. J. Geophys. -
Res., 80: 4461 - 4465.
- BIEHLER, S., 1980. Structural Methods in Geothermal Exploration -
Technical Training Course No. 2. Geothermal Resources Counl
cil.
- BIRCH, F. and BANCROFT, D., 1938. The Effect of Pressure on The Rig
idity of Rocks, II. Journal of Geofogy, Vol. 46, p.p. 113-141.
- BODMER, R. and WARD, S.H., 1968. Continuous Sounding - Profiling -
With a Dipole-Dipole Resistivity Array.
Geophysics Vol. 33 No. 6.
- BODVARSON, G., 1974. Geothermal Resours Energetic. Geothermics. -
International Journal of Geothermal Reserch Vol. 3 No. 5.
- BOWIN, C., 1976. Caribbean Gravity Field and Plate Tectonics. Geol.
Soc. America, Apecial Paper 169 pp 79-86.
- BLACKWELL D.O., 1980. Thermal Methods in Geothermal Exploration -
Technical Training Course No. 2 Geothermal Resources Council.
- COATS, F.H. 1981. Use and Misuse of Reservoir Simulation Models. -
Spe-Aime, The V. of Texas at Austin.
- COMBARNOUS, M., 1978. Natural Convection in Porous Media and Geol
thermal Systems. Proceedings of The 6 th International Heat -
Transfer Conference Toronto, Canada.

- CRAFT, B.C., y HAWKINS, M.F.: Applied Petroleum Reservoir Engineering, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. (1959).
- CRICHLLOW, H.B.: Modern Reservoir Engineering - A Simulation Approach Prentice-Hall. Inc., Englewood, Cliffs, N.J. (1977).
- DAKE, L.P.: Fundamentals of Reservoir Engineering, Elsevier Amsterdam (1978).
- DEMANT, A., 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus Problemas de Interpretación. Revista del Instituto de Geología UNAM, México. Vol. 2. pp 172-187.
- DEMANT, A., 1979. Vulcanología y Petrografía del Sector Occidental del Eje Neovolcánico. Revista del Instituto de Geología UNAM México. Vol. 3 No. 1 pp. 39-57.
- DEMANT, A., MAUVOIS, R. y SILVA, L., 1976. El Eje Neovolcánico - Transmexicano, III Congreso Latino Americano de Geología, Ex - cursión No. 4.
- DEMANT, A., MAUVOIS, R. y SILVA, L., 1975 a. Estudio Geológico de Las Hojas Morelia-Maravatío Esc. 1:100 000, Estado de Michoacán. Reporte Interno Depto. de Geotermia, C.F.E. México.
- DEMANT, A. y ROBIN C., 1975 c. Las Fases del Vulcanismo en México, Una Síntesis en Relación con La Evolución Geodinámica desde el Cretácico. Revista del Instituto de Geología UNAM., México. - Vol. 75, pp. 70-83.
- DIAZ, E.C. y MOOSER, F., 1972. Formación del Graben de Chapala: Mazatlán, Sociedad Geológica Mexicana Convención Nacional 2 Resúmenes pp. 144-145
- DOBRIN, M.B., 1969. "Introducción a la Prospección Geofísica", Ed. Omega, Barcelona.
- DUPRAT, A., GOLE, F. and RECROI, J.P., 1972. Examples of The Application of Automatic Processing of The Interpretation of Electrical Soundings. Compagnie Generale de Geophysique.
- EARLOUGHER, R.C. Jr. Advances in Well Test Analysis, Monograph Series, Vol. 5, Society of Petroleum Engineers of AIME, Dallas, Texas (1977).

- ELC, ELECTROCONSULT., (1976). Exploración Geotérmica del Area de - Los Azufres, Mich. Investigación Fotogeológica ELC - Electroconsult, Milano, Italia.
- ELC, ELECTROCONSULT., (1976). Exploración Geotérmica del Area de - Los Azufres, Mich. Informe Preliminar de Geoquímica. ELC - - Electroconsult, Milano, Italia.
- ELC, Electroconsult., (1977). Exploración Geotérmica del Area de - Los Azufres, Mich. Informe Final Primera y Segunda Parte ELC- Electroconsult, Milano, Italia.
- ELC, ELECTROCONSULT., (1978). Exploración Geotérmica del Area de - Los Azufres, Mich. Informe del Pozo A-3 e Informe del Pozo - A-2, Los Azufres, Mich. (Copias Preliminares). ELC-Electroconsult, S.p.A. Milano, Italia.
- FITCH, A.A., 1982. Developments in Geophysical Exploration Methods -3 Applied Science Publishers LTD. London Great Britain.
- FLORES L., R., 1978. Las Posibles Relaciones Tectónicas entre la - Faja Volcánica Mexicana y una Porción de la Cuenca Sedimenta - ria de Morelos-Guerrero. Sociedad Geológica Mexicana, Convención Nacional 4 Resúmenes, p. 19.
- FOX, R.C. et al., 1980. Topographic Effects in Resistivity and Induced Polarization Surveys. Geophysics. Vol. 45 No. 1 p. 76, 93.
- FULLER, B.D. y WARD, S.H., 1970. Linear System Description of the Electrical Parameters of Rocks. Vol. GE-8 No. 1, Enero 1970 - pp 7-18.
- GARLAND, G.D., 1975. Correlation Between Electrical Conductivity - and Other Geophysical para Meters. Phys. Earth Plan. Inter., 10: 220-230.
- GHASSEMI, F. and ERSHAGHI, I., 1979. Effect of Gas Solubility on. - Electrical Conductivity of Geothermal Brines. Geothermal Re - sources Council, Transactions, Vol. 3, 1979.

- GHOSH, D.P., 1971 a. The Application of Linear Filter Theory to --
The Direct Interpretation of Geoelectric Resistivity Sounding
Measurements, 1971 b, Inverse Filter Coefficients For The Com-
putation of Apparent Resistivity Standard Curves for a Horizon-
tal Stratified Earth, Geophysical Prospecting Vol. 19 pp. 192-
217, 769-775.
- GIRELLI, M., (1976). Exploración Geotérmica del Area de Los Azu-
fres, Mich. Informe de la Misión del Dr. Mauricio Girelli, -
ELC - Electroconsult de México, S. A. de C. V.
- GONZALEZ, S.A. (1976). Posibilidades Geotérmicas en el Eje Neovol-
cánico Mexicano. Subgerencia de Recursos Energéticos, Departa-
mento de Geotermia. Publicación Interna C.F.E.
- GUERRERO G., J.L., 1978. Prospección Magnetométrica de la Zona Geo-
térmica de Ixtlán de Los Hervores, Mich. Informe 2-78, Depto.
de Exploración C.F.E. México.
- GUERRERO G., J.L., 1979. Segundo Estudio Geoeléctrico Realizado en
la Zona Geotérmica de Los Azufres, Mich. Informe 2-79, Depto.
de Exploración C.F.E. México.
- GUPTASARNA, D., 1983. Effect of Surface Polarization on Resistivity
Modeling. Geophysics, Vol. 48, No. 1 pp. 98-106.
- GUTIERREZ G., R., 1980. Influencia de la Tectónica de Placas en el
Origen de Las Provincias Geotérmicas en la República Mexicana,
C.F.E., Depto. de Geotermia. Reporte Interno.
- GUTIERREZ N., L.C.A. y LOPEZ A., M., 1983. Datación por Trazos de
Fisión de Obsidias de los Campos Geotérmicos de La Primavera,
Jalisco y Los Azufres, Michoacán. Informe 64-82, Depto. Ex-
ploración. C.F.E. México.
- HIRAKAWA, S., WADA, S. and TANAKADATE, T., 1983. Geothermal Reser-
voir Simulation for Water Dominant Fractured Reservoir. Facul-
ty of Engineering, The University of Tokyo. Internal Report.
- HOCHSTEIN, M.P. Ed., 1982. Introduction to Geothermal Prospecting
Published By The Geothermal Institute, University of Auckland.

- JOHANSEN, H.K., 1975. An Interactive Computer/Graphic-display - Terminal System for Interpretation of Resistivity Soundings, - Geophysical Prospecting Vol. 23 pp. 449-458.
- KELLER, G.R., BRAILLE, L.W. and SHINE J.W., 1979. Regional Crustal Structure of The Rio Grande Rift From Surface Wave Dispersion - Measurements. In: R.E. Riecker (Editor), Rio Grande Rift: Tectonics and Magnetism. American Geophysical Union, Washington D.C., pp. 115-127.
- KELLER, G.V., et al., 1975. The Dipole Mapping Method. Geophysics. Vol. 40 No. 3.
- KELLER, G.V. y FRISCHKNECHT, F.C., 1966. "Electrical Methods in Geophysical Prospecting", Pergamon Press, Oxford. Londres.
- KELLER, G.V. and FRISCHKNECHT, F.C., 1970. Electrical Methods in Geophysical Prospecting Pergamon Press LTD. 1970.
- KELLOGG, O.D., 1954. Foundations of Potential Theory Dover Publications, Inc. New York.
- KESTIN, J. (Editor), 1980. Sourcebook on The Production of Electricity From Geothermal Energy U.S. Dept. of Energy pp. 7-77.
- KOEFOED, O., 1979. Geosounding Principles, 1 Resistivity Sounding Measurements. Elsevier Scientific Publishing Company.
- KRUGER, P., 1983. Experimental Studies on Heat Extraction From Fractured Geothermal Reservoirs. Hydraulic Fracturing and Geothermal Energy Martinus Nijhoff Publishers. The Hague, The Netherlands.
- KUNETZ, GEZA, 1972. "Processing and Interpretation of Magnetic Soundings". Geophysics, V. 37, pp. 1005 - 1021.
- LAYUGAN, D.B., 1982. Geoelectrical Sounding and Its Application in The Theistareykir High Temperature Area, NE-Iceland. UNU Geothermal Training Programme 1982..
- LEVI, L.E., 1973. Elementos de Mecánica del Medio Continuo. LIMUSA-WILEY, S.A. México. Flujo Magnetohidrodinámico.

- LOPEZ L., M., 1979. Métodos Geofísicos Aplicados a la Hidrogeología y a la Prospección Minera, Centro de Educación Continua, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- LOPEZ R., A., PALMA P., O., RAZO M., A., 1978. Exploración Geoeléctrica en la Zona Geotérmica de Araró, Mich. Publicación Interna, Gerencia General de Estudios e Ingeniería Preliminar. Departamento de Geotermia. C.F.E.
- MAUVOIS, R., DEMANT, A. y SILVA L., 1976. Estructuras Terciarias en la Base del Eje Neovolcánico; Ejemplo de la Depresión Tzitzio-Huetamo, 3er. Congreso Latinoamericano de Geología, Acapulco México. Resúmenes p 86.
- MCCAIN, W. D. JR. The Properties of Petroleum Fluids, Petroleum Publishing Co., Tulsa, Okla. (1973).
- MEIDAV, T., 1980. Direct Current Resistivity Methods Geothermal Exploration. Technical Training Course No. 2 Geothermal Resources Council.
- MIZUTA, Y., and FAIRHURST, CH., 1983. Rock Mass Behaviour Coupled With Pressurized Water Flowing Through The Fracture. Hydraulic Fracturing and Geothermal Energy Martinus Nijhoff Publishers. The Hague, The Nether Lands.
- MOOSER, F., 1972. The Mexican Volcanic Belt: Estructure and Tectonics. Geofísica Internacional Vol. 12 (2), pp. 55-70.
- MOOSER, F., 1975. The Mexican Volcanic Belt: Interpretation Derived From Fractures and Form: Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 56, pp. 1066.
- MOOSER, F., NAIRN, A.E. y NEGENDANK, J.F., 1974. Paleomagnetic Investigation of The Tertiary and Quaternary Igneous Rocks. Geol. Rundschau Vol. 63 (2), pp. 451-483.
- NELSON, S.A., 1976. Eruptive History of Volcan Ceboruco, Nayarit México. Geological Society of America Abstracts Programs V-8, pp. 1027.
- NETTLETON, L.L., 1976. Gravity and Magnetics in Oil Prospecting. McGraw-Hill, New York, N.Y.

- ORELLANA, S.E., 1960. Algunas Cuestiones de Prospección Geoelectrica. Revista de Geofísica Núm. 73, 1960.
- ORELLANA, S.E., 1961. Criterios Erróneos en la Interpretación de -- Sondeos Eléctricos. Revista de Geofísica Núm. 79, 1961.
- ORELLANA, S.E., 1972. Prospección Geoelectrica en Corriente Continua, Ed. Paraninfo, Madrid.
- ORELLANA, S.E., 1973. Prospección Geoelectrica por Campos Varia--- bles, Ed. Paraninfo, Madrid.
- ORELLANA, S.E. Y MOONEY, L., 1966. Tablas y Curvas Patrón para Sondeos Eléctricos Verticales sobre Terrenos Estratificados. Interciencia, Madrid.
- PALACIOS N., M., CAMACHO A., M., 1976. Informe Geológico de la Zona Geotérmica de Los Azufres, Mich. Publicación Interna, Subgerencia de Recursos Energéticos. Departamento de Geología. - CFE.
- PARASNIS, D.S., 1976. Mining Geophysics. Elsevier Scientific Publishing Company
- PARKHOMENKO, E.I., 1967. Electrical Properties of Rocks. Plenum Press New York, 1967.
- PATRA, H.P. and MALLICK, K. Geosounding Principles, 2. Time-Varying Geoelectric Soundings.
- PITMAN, W.C. y TALWANI, M., 1972. Sea Floor Spreading in the ---- North Atlantic. Geological Society America Bull. V-83, pp. - 619-646.
- RIGBY, F.A., 1980. Fracture Identification in an Igneous Geothermal Reservoir Surprise Valley, California. Spwla Twenty First Annual Logging Symposium, July 8-11-1980.
- RIJKSWATERSTAAT, 1975. Standard Graphs for Resistivity Prospecting. Published by European Association Exploration Geophysicists. - Netherlands.

- RIVERA, R.E., 1981. Aplicaciones del Análisis Normal. División -- de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería UNAM.
- ROBIN, C., 1976. Las Series Volcánicas de la Sierra Madre Oriental Basaltos e Ingnimbritas; Descripciones y Carácteres Químicos.- Boletín del Instituto de Geología UNAM, México 96 p. 59-92.
- ROSAS E., J.C., 1981. Estudio Geológico de las Zonas Geotérmicas - Ixtlán de Los Hervores-Los Negritos, Michoacán. Tesis Profesional I.P.N. México.
- RUSSEL JAMES., 1984. Successful Prediction of Mokai 5 Discharge.- Geothermal Energy Vol. 12 Núm. 2, 1984.
- SCHROEDER, R.C., et al., 1982. Reinyección Studies of Vapor -Dominated Systems. Geothermics, Vol. 11 No. 2 pp. 93-119.
- SLIDER, H.C. Practical Petroleum Reservoir Engineering Methods, -- The Petroleum Publishing Co., Tulsa Okla (1976).
- SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS., 1982. Manual of Geophysical Hand Calculator Programs. H.P. Volume.
- SOTO, M. y MOONEY, H.M., 1960. The Electrochemical Mechanism of -- Sulfite Self-Potentials, Geophysics, V. 25, pp. 226-249.
- STEELE, J.L., SPAFFORD, R.E. and BLACKWELL, D.D., 1981. Collection, Reduction and Analysis of Heat Flow and Geothermal Gradient Exploration. Data Geothermal Resources Council, Transactions Vol. 5, October 1981.
- SUGA, S. and ITOH, T., 1983. Hydraulic Fracturing and Fracture Mapping at Yakedake Field. Hydraulic Fracturing and Geothermal Energy Martinus Nijhoff Publishers. The Hague, The Netherlands.
- SUMNER, J.S. et al., 1981. Advances in Induced Polarization and -- Complex Resistivity. University of Arizona, Tucson 85721.
- THORPE, R.S., 1977. Tectonic Significance of Alkaline Volcanism in Eastern México. Tectonophysics, Vol. 40, pp. 19-26.

- URRUTIA F., J.H., 1975. Estudio Tectonofísico Sobre la Placa de Cocos. Tesis Profesional de Geofísica, Facultad de Ingeniería - UNAM.
- URRUTIA F., J.H. y DEL CASTILLO G., L., 1977. Un Modelo del Eje -- Neovolcánico Mexicano. Bol. Soc. Geol. Mexicana. Tomo XXXVIII, No. 1 pp. 18-28.
- USHIJIMA, K., 1980. Automatic Interpretation of Schlumberger Sounding. Geothermal Resources Council Transactions Vol. 4, 1980.
- VANDENBERGHE, J., 1982. Geoelectric Investigations of a Fault System in Quaternary Deposits. Geophysical Prospecting, Vol. 30, No. 6 pp. 879-897.
- VAN NOSTRAND, R.G. and COOK, K.L., 1966. Interpretation of Resistivity Data. United States Government Printing Office, Washington: 1966.
- VAN NOSTRAND, R.G. and PARASNIS, D.S., 1976. Geoexploration Monographs. Geopublication Associates.
- VOZOFF, K., 1960. Numerical Resistivity Interpretation: General - Inhomogeneity. Geophysics, Vol. XXV No. 6.
- YAMAGUCHI, S. and HIRAKAWA, S., 1983. Simulation of Transient Pressure Behaviour in a Fractured Geothermal Reservoir Faculty of Engineering, The University of Tokyo Internal Report.
- ZOBACK, M.D., 1983. Measurements of in-situ Strees, Fracture Distribution, Permeability and Zonic Velocity. Hydraulic Fracturing and Geothermal Energy. Martinus Nijhoff. Publishers. -- The Hague, The Netherlands.
- ZOHDY A., A.R., 1968. A Rapid Graphical Method for The Interpretation of A and H Type Electrical Soundings. Geophysics Vol. 33 No. 5.
- ZOHDY A., A.R., et al., 1973. Resistivity, Self Potential and Induced Polarization Surveys of a Vapor Dominanted Geothermal System. Geophysics, Vol. 38 No. 6.