



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

*“ANÁLISIS GEOELÉCTRICO DE UN MEDIO DE BAJO
CONTRASTE RESISTIVO. CIÉNEGA DE CHAPALA, MICH.”*

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO GEOFÍSICO
P R E S E N T A:
PAUL DANIEL LEÓN SÁNCHEZ

Dirigida por: Dr. Ramiro Rodríguez Castillo.



MÉXICO, D.F.

ABRIL 2002

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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 esta 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.

PAGINACIÓN

DISCONTINUA



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-1538

SR. PAUL DANIEL LEON SANCHEZ
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Ramiro Rodríguez Castillo y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

**ANALISIS GEOELECTRICO DE UN MEDIO DE BAJO CONTRASTE RESISTIVO.
CIENEGA DE CHAPALA, MICH.**

- I INTRODUCCION
- II MARCO GEOLOGICO
- III PROSPECCION ELECTRICA (SEV's)
- IV INTERPRETACION GEOELECTRICA
- V CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFIA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

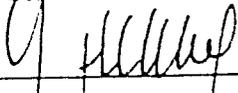
Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria, D. F., a 3 de octubre de 2001

EL DIRECTOR


ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*gtg

ÍNDICE.

Capítulo I	INTRODUCCIÓN.	.....	1
	I.1 Antecedentes.	.....	2
	I.2 Localización.	.....	3
	I.3 Hidrología.	.....	4
Capítulo II	MARCO GEOLÓGICO.	.....	6
	II.1 Geología Regional.	.....	6
	II.2 Tectónica Regional.	.....	11
	II.3 Geología Local.	.....	12
	II.4 Sistema Acuífero.	.....	13
	II.4.1 Aproximaciones de Kosinski.	.....	13
	II.4.2 Conductividad Hidráulica.	.....	21
Capítulo III	PROSPECCIÓN ELÉCTRICA (SEV's).	.....	22
	III.1 Marco Teórico.	.....	22
	III.2 Resistividad Aparente.	.....	30
Capítulo IV	INTERPRETACIÓN GEOELÉCTRICA.	.....	33
	IV.1 Pseudosecciones de Isorresistividad Aparente.	.....	43
	IV.2 Mapas de Isorresistividad Aparente.	.....	49
	IV.3 Secciones Geoelectricas.	.....	54
	IV.4 Secciones Geológicas.	.....	63
Capítulo V	CONCLUSIONES.	.....	69
	BIBLIOGRAFÍA.	.....	72

RELACIÓN DE FIGURAS.

Figura I-1	Localización del área de estudio.	...	3
Cuadro I-1	Principales Características Morfológicas e Hidrológicas.	...	5
Figura II-1	Columna Geológica de la región de Chapala.	...	9
Figura II-2	Mapa geológico y perfiles geoelectricos.	...	10
Figura II-3	Localización de pozos en el área de estudio.	...	17
Tabla II-1	Parámetros Hidrogeofisicos.	...	19
Figura II-4	Relación Lineal T vs R_c.	...	20
Figura IV-1a	Curvas de Resistividad Aparente Línea 1, del sondeo C1 al sondeo C6	...	36
Figura IV-1b	Curvas de Resistividad Aparente Línea 1, del sondeo C7 al sondeo C12	...	37
Figura IV-2a	Curvas de Resistividad Aparente Línea 2, del sondeo Barajas al sondeo El Fortin.	...	38
Figura IV-2b	Curvas de Resistividad Aparente Línea 2, del sondeo Aeropuerto al sondeo Retiro 1.	...	39
Figura IV-3a	Curvas de Resistividad Aparente Línea 3, del sondeo C13 al sondeo C17	...	40
Figura IV-3b	Curvas de Resistividad Aparente Línea 3, del sondeo C18 al sondeo C22	...	41
Figura IV-4	Líneas resultantes en el área de estudio.	...	42
Figura IV-5	Pseudosección de Isorresistividad Aparente, Línea 1.	...	46
Figura IV-6	Pseudosección de Isorresistividad Aparente, Línea 2.	...	47
Figura IV-7	Pseudosección de Isorresistividad Aparente, Línea 3.	...	48
Figura IV-8	Mapa de Isorresistividad Aparente, para una abertura en $AB/2$ igual a 68 m.	...	50
Figura IV-9	Mapa de Isorresistividad Aparente, para una abertura en $AB/2$ igual a 100 m.	...	50
Figura IV-10	Mapa de Isorresistividad Aparente, para una abertura en $AB/2$ igual a 147 m.	...	51
Figura IV-11	Mapa de Isorresistividad Aparente, para una abertura en $AB/2$ igual a 215 m.	...	51
Figura IV-12	Mapa de Isorresistividad Aparente, para una abertura en $AB/2$ igual a 316 m.	...	52
Figura IV-13	Mapas de Isorresistividad Aparente en perspectiva.	...	53
Figura IV-14	Sección Geoelectrica, Línea 1.	...	60

Figura IV-15	Sección Geoeléctrica, Línea 2.	...	61
Figura IV-16	Sección Geoeléctrica, Línea 3.	...	62
Figura IV-17	Sección Geológica, Línea 1.	...	65
Figura IV-18	Sección Geológica, Línea 2.	...	66
Figura IV-19	Sección Geológica, Línea 3.	...	67
Figura IV-20	Límites de la capa de Arena.	...	68

I. INTRODUCCIÓN.

La aplicación de los métodos geofísicos, particularmente los métodos eléctricos en la investigación hidrogeológica siempre se ha visto justificada por la facilidad de su implementación y los bajos costos que se requieren para su desarrollo.

La primicia en el desarrollo de este trabajo ha sido muy simple, los estratos saturados de agua presentan bajos resistivos. Pero cuando se tienen sistemas acuíferos en donde predominan medios arcillosos y particularmente mezclas de éstos con materiales de grano fino, como las arenas, no siempre se tienen contrastes resistivos adecuados para que la aplicación de los métodos eléctricos se considere exitosa.

Por lo demás una adecuada aplicación de cualquier variante geoelectrica e inclusive de cualquier método geofísico requiere necesariamente de información geológica validada para facilitar, reducir e inclusive eliminar la ambigüedad de la interpretación y producir modelos lo más cercano posible a la realidad.

En México y en muchos países en vías de desarrollo no se cuenta con archivos; bases de datos; sistemas de información geográficas, etc. en donde se pueda obtener de manera eficiente información referente a cortes geológicos de pozos en ciertas zonas, esto complica la situación del Ingeniero Geofísico ya que ve limitado los elementos con que pudiera contar para llevar a cabo una buena calibración e interpretación de los datos recopilados en estas zonas.

Esta es la situación que prevalece en la Ciénega de Chapala. En esta zona se han realizado incontables estudios geoelectricos, los resultados de la interpretación de los sondeos han cumplido con el objetivo inicial de determinar en donde se encuentra el agua sin precisar la profundidad de la misma. El aparente éxito de estos trabajos se debe más al conocimiento y experiencia en hidrogeología de los ejecutantes. En este estudio se replantea una metodología de trabajo para procesar datos geoelectricos en medios de bajo contraste

resistivo de tal manera que se pueda contribuir al conocimiento de un sistema acuífero, particularmente de su geometría.

La zona de estudio es un medio de bajos contrastes resistivos sin información estratigráfica en donde el agua subterránea es la única fuente de abastecimiento para uso público-urbano además del extenso uso que se le da a ésta en la agricultura.

1.1 ANTECEDENTES.

En la zona de estudio se han desarrollado varios trabajos sobre Geología Tectónica, Regional, sobresale uno en hidrogeología realizado por Silva (2001), la mayoría de los trabajos de Geología y el de Silva son citados en el Capítulo II.

La CNA y el organismo operador local (CNA, 1997 y COMAPA, 1996) se han limitado a realizar censos en los pozos de la ciénega en donde los datos corresponden a una caracterización del sistema de bombeo que opera en cada pozo más que a las características geológicas que en ellos predomina, también Silva et al. (2001) han realizado estudios sobre la comunicación que existe entre el Lago de Chapala y la ciénega.

Desafortunadamente para la hidrogeología, el Lago de Chapala representa un mayor atractivo desde el punto de vista de investigación que la Ciénega de Chapala. Esto se ve reflejado en la diversidad de trabajos científicos que existen al respecto.

Mucho del trabajo realizado en la ciénega lo ha llevado a cabo el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) Michoacán, del Instituto Politécnico Nacional (IPN) El CIIDIR no edita reportes formales de los trabajos realizados, por lo que se revisaron los archivos del mismo con el apoyo del M. C. Teodoro Silva García, de esos archivos fue de donde se tomaron los SEV's que se interpretan en este estudio.

1.2 LOCALIZACIÓN.

La región de estudio se localiza al NW del estado de Michoacán entre los 19° 53' y los 20° 14' de latitud Norte y los 102° 29' y los 102° 45' de longitud Oeste, a esta zona se le conoce como la Ciénega de Chapala, La región era originalmente un humedal o ciénega , pero fue desecada por el bordo de Malatrafña. La denominación de ciénega permaneció. Se encuentra a una altura sobre el nivel del mar de 1520 m. Cuenta con una superficie de 460 Km² y con 139,483 habitantes dispersos en los municipios de Jiquilpan, Pajacuarán, Sahuayo y Venustiano Carranza, según el censo de 2000 realizado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEGI). Las principales vías de comunicación son la carretera Estatal No. 5 en su tramo Sahuayo-La Barca y la carretera Federal No. 15 México-Guadalajara, además existen un sin número de caminos y brechas transitables todo el año que entroncan a las principales vías de comunicación, la localización del área de estudio se muestra en la Figura I-1.

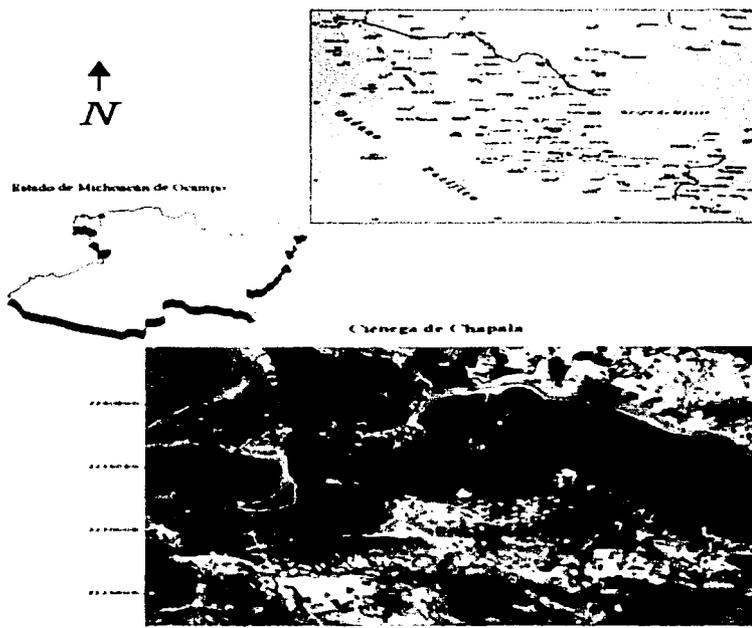


Figura I-1. Localización del área de estudio.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.3 HIDROLOGÍA.

Con base en las cartas hidrológicas de aguas superficiales Colima y Morelia Escala: 1:100,000 editadas por INEGI (1981), la zona de estudio queda ubicada dentro de la Región Hidrológica No.12 del río Lerma, en la cuenca Lago de Chapala, específicamente en la subcuenca del río Sahuayo .

Destacan como corrientes superficiales más importantes los ríos Jiquilpan y Sahuayo, hacia la porción SW de la región con dirección de escurrimiento hacia el Este y cuyas aguas de tipo intermitente confluyen en la parte media de la ciénega en el canal de riego Guaracha, que trae aguas de la presa del mismo nombre, desembocando en la estación de La Palma donde sus aguas son bombeadas al Lago de Chapala

También se cuentan con numerosos arroyos originados en las prominencias volcánicas que delimitan a la ciénega como lo son la sierra de Pajacuarán, los volcanes San Francisco y C. Grande, que originan en términos generales drenajes de tipo radial divergente típico de estas estructuras, destacan los arroyos Guayabo, El Salitre, Hondo, El Cometa y Sahuayo.

De especial importancia hidrológica lo es el Lago de Chapala, cuyas principales características morfológicas e hidrológicas se muestran en el Cuadro I-1 (Silva, 2001).

Área.	1,100 Km ²	
Área de drenaje total.	130,000 Km ²	
Área de drenaje del lago.	8660 Km ²	
Localización.	Latitud 20° 15' W Longitud media 103° W	
Elevación.	1521 msnm	
Profundidad media.	7 m	
Temperatura anual promedio	20°C	
Precipitación anual promedio	770 mm	
Evaporación anual promedio	2,000 mm	
Largo máximo	78 Km	
Ancho máximo.	22 Km	
Vientos.	Variables en velocidad y dirección	
Volumen.	6,800 * 10 ⁶ m ³	
Aportaciones.	Rio Lerma	49.11 * 10 ⁶ m ³
	Lluvia	25.81 * 10 ⁶ m ³
	Otras	21.98 * 10 ⁶ m ³
Extracciones.	Rio Santiago	39.78 * 10 ⁶ m ³
	Evaporación	45.03 * 10 ⁶ m ³
	Otras	10.60 * 10 ⁶ m ³

Cuadro I-1 Principales Características Morfológicas e Hidrológicas.

II. MARCO GEOLÓGICO.

II.1 GEOLOGÍA REGIONAL.

La Ciénega de Chapala se encuentra ubicada en los límites de los estados de Jalisco y Michoacán, en el sector Occidental de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM) y en una región colindante con la provincia de la Sierra Madre Occidental. Es en esta zona donde la FVTM se bifurca hacia el estado de Nayarit al Noroeste y hacia Colima al Suroeste, (Delgado y Urrutia, 1986). Un rasgo notable de esta porción de la FVTM, es la presencia de un sistema de tres rifts que se interceptan en una unión triple continental, localizada a 50 Km al SW de la Ciudad de Guadalajara, Jalisco. Este sistema lo conforman los grábenes de Tepic-Zacoalco, con orientación NW-SE, el graben de Colima con orientación N-S y el graben Chapala con orientación E-W (Garduño et al., 1993), encontrándose en el extremo Oriente de este último la zona en estudio conocida como la Ciénega de Chapala.

Según Delgado y Urrutia (1986) la estratificación del área abarca las edades desde el Mioceno Tardío al Reciente, donde cada grupo representa los diferentes eventos ocurridos en esta región. Las rocas más antiguas que afloran son rocas extrusivas de composición andesítica, las cuales se encuentran expuestas en las sierras que circundan al Lago de Chapala. Estas rocas están fracturadas, falladas, alteradas y mineralizadas. Estratigráficamente por encima de ellas se encuentran ignimbritas y tobas vitreas. Estas rocas están cubiertas por derrames, brechas, tobas andesíticas y derrames basálticos que se observan fracturados y fallados. Sobre la secuencia mencionada se encuentran descansando sedimentos lacustres de la formación Chapala, consistentes en limolitas, areniscas, conglomerados con intercalaciones de tobas, vidrio y pómez. El espesor de los sedimentos es según Reyes (1985, en Delgado y Urrutia 1986) de 400 a 600 m. Arroyo(1986, en Delgado et al., 1994) estima que el espesor es de 800 m.

Delgado et al. (1994) determina que la secuencia volcano-sedimentaria tiene de 800 a 1000 m de espesor y define diez grupos estratigráficos en la región, con etapas de vulcanismo cuyas edades son: periodo Tizapán de 10.1~4.4 Ma; periodo Chapala de 6.7~4.2 Ma; periodo Travesaño ~4.2 Ma; periodo Grande de 2.7~1.4 Ma; periodo Santa Cruz 1.7~0.61 Ma y periodo Acatlán 1.1~menos de 0.65 Ma. Se observa un hiato en la actividad volcánica entre 4.2 y 2.7 Ma.

Las Vulcanitas Indiferenciadas del Mioceno Plioceno (VIMP) incluyen andesitas y basaltos de edad Mio-Plioceno (6.3 Ma – 4.5 Ma). El Grupo Tizapán está compuesto por andesitas y basaltos. Las rocas volcánicas de las VIMP y el Grupo Tizapán fueron extraídas a través de volcanes monogenéticos como escudos, conos cineríticos, conos de lava, domos de lava y derrames fisurales. Las VIMP están distribuidas principalmente al Sur y al Este del Lago de Chapala, la Sierra de Pajacuarán es parte de este Grupo. El grupo Tizapán aflora en las cercanías del poblado la Palma; Sahuayo de Morelos y en los Cerros La Caja y El Camaleón.

El grupo Chapala comprende rocas volcánicas silíceas y los depósitos de caída de flujo, asociados con edades entre 6.7 a 4.2 Ma, mezclados con sedimentos lacustres. La base del grupo cubre concordantemente a las rocas de Grupo Tizapán y de las VIMP. Estos eventos tuvieron lugar durante el Mioceno Tardío - Plioceno Temprano y fueron también contemporáneos con la actividad volcánica del Grupo Tizapán. El vulcanismo bimodal caracterizó esta época y es la razón por la cual se observa una sobreposición de ambas actividades volcánicas y la sedimentación. Rosas (1991) define para la porción Oriente de Chapala la unidad 2a, la cual está constituida por ignimbrita, tobas, basalto y brechas. Las intercalaciones de rocas volcánicas y de depósitos lacustres, sugieren que la actividad volcánica fue contemporánea con la subsidencia de la cuenca, también sugiere que la Sierra de Pajacuarán está formada por aglomerados y basaltos que subyacen a andesitas Plio-Cuatemarias.

El Grupo Travesaño consiste de basaltos y andesitas con edades entre 4.0 a 4.3 Ma, con una composición similar a las rocas del Grupo Tizapán. Las rocas del Grupo Travesaño cubren e intrusionan a las unidades del Grupo Chapala. Algunas lavas del Grupo Travesaño

muestran estructuras almohadilladas, las cuales fluyeron en condiciones subacuáticas dentro de las cuencas sedimentarias donde se encuentran los sedimentos del Grupo Chapala. En el área de estudio este Grupo aflora en los alrededores de los Poblados la Barca y Ocotlán.

El Grupo Grande, el Grupo Palo Verde y el Grupo Zacoalco, están formados por varias unidades de andesitas y basalto que constituyen volcanes, domos y conos de lava. Estas rocas cubren a los Grupos Tizapán, Chapala y Travesaño. La actividad volcánica de estos grupos abarcó de 2.7 a 1.4 Ma.

Los Grupos La Zapotera, Santa Cruz y Sahuayo consisten de basaltos y andesitas extraídas a través de volcanes escudo, domos y conos de lava. La actividad volcánica del Grupo Santa Cruz abarca desde el Pleistoceno Temprano Pleistoceno Medio de 1.4 a 0.65 Ma. Los volcanes que dieron lugar a las rocas de esta unidad están asociados con el desarrollo de una caldera entre grandes fallas normales. El grupo La Zapotera es correlecionable con los Grupos Santa Cruz y Acatlán de la región de Chapala y con las rocas volcánicas de la cadena volcánica del sur de Guadalajara con edades entre 1.4 y 1.8 Ma. Esta unidad aflora en el Cerro El Pelón, el cual se encuentra entre los Poblados de Sahuayo de Morelos y Jiquilpan de Juárez y en el Cerro El Copito circundante al Poblado La Palma.

La edad del Grupo Sahuayo está entre 1.3 y 1.9 Ma. El Grupo Acatlán consiste principalmente de lavas dacíticas y riolíticas expulsadas a partir de domos de lava y conos asociados con fisuras tectónicas. El volcanismo de este grupo fue contemporáneo al Grupo Santa Cruz de 1.1 Ma a menos de 0.65 Ma. En la Figura II-1 se muestra la Columna Geológica de la región de Chapala y en la Figura II-2 se presenta el Mapa Geológico, (Delgado et al., op. cit.).

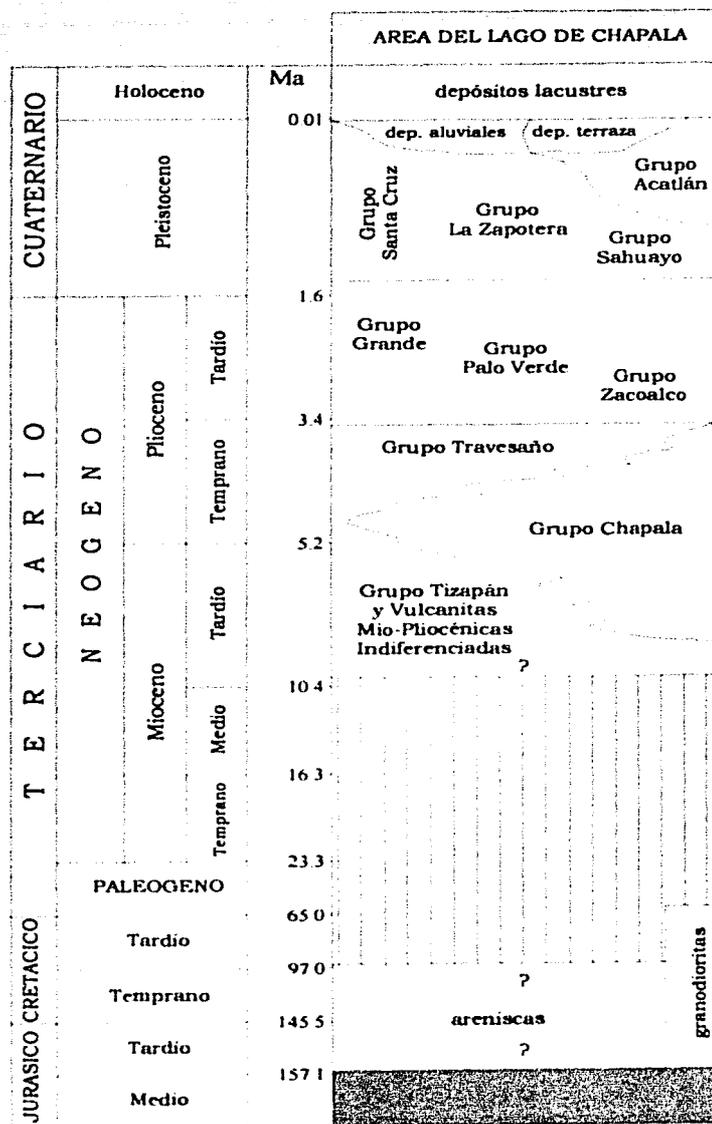


Figura II-1. Columna Geológica de la región de Chapala (Delgado, 1994).

Mapa Geológico

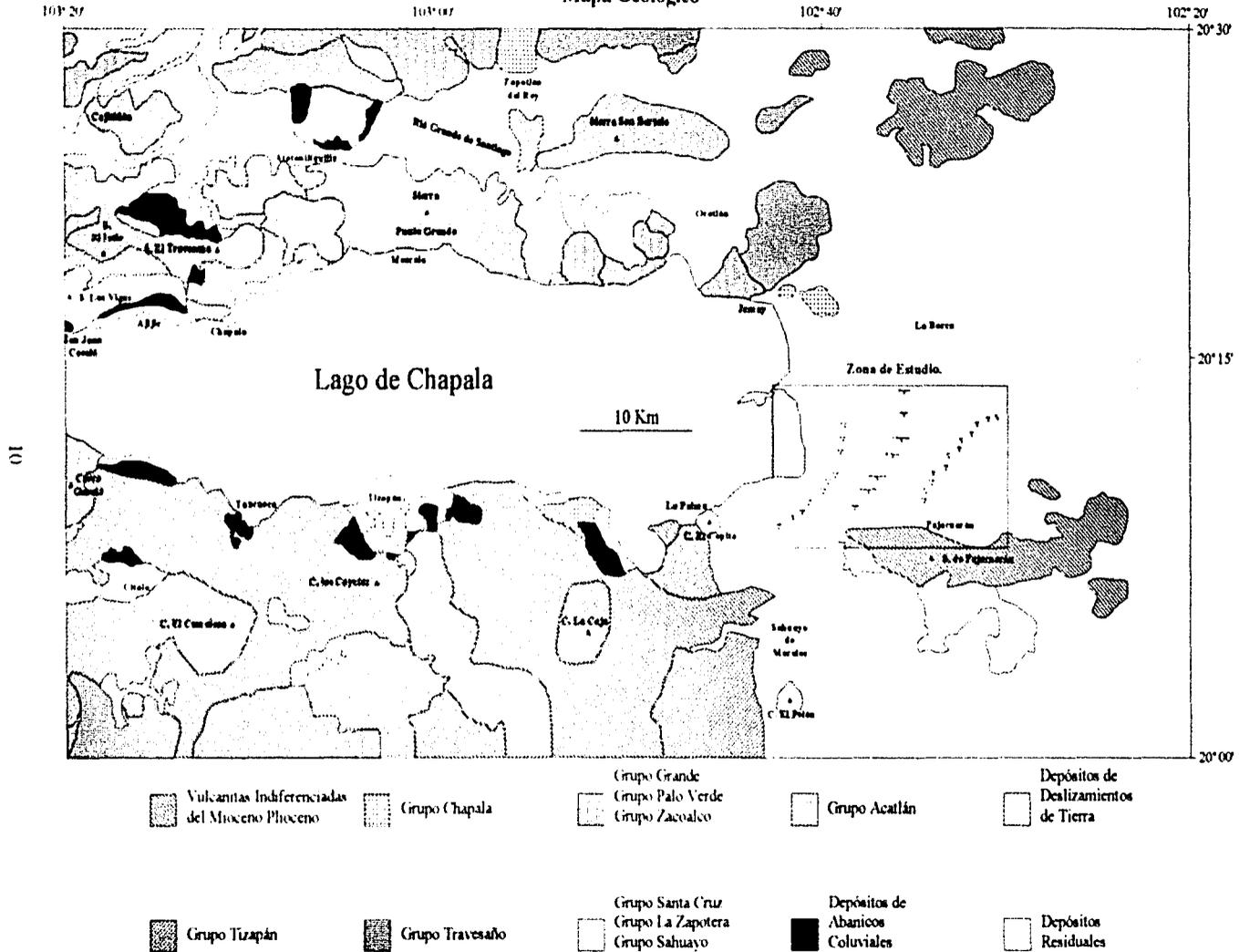


Figura II-2. Mapa geológico y perfiles geoelectrónicos (Modificado de Delgado, 1994 y Garduño et al., 1993).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II.2 TECTONICA REGIONAL.

Demant (1978, en Garduño et al., 1993) sugirió que la porción Occidental de la FVTM estaba formada por dos grábenes, el de Tepic-Chapala y el de Colima. Sin embargo Garduño et al. (1993) sugiere que está formado por tres grábenes; el graben Tepic-Zacoalco; el graben de Colima y el graben de Chapala. Las características volcánicas de las regiones de Guadalajara y Tepic son diferentes a las de Chapala, ya que en las dos primeras zonas se presentan grandes aparatos volcánicos dentro de la fosa tectónica mientras que el graben de Chapala carece de ellos (Rosas, 1991).

El Lago de Chapala se ubica en una de las dos estructuras que componen el rift de Chapala (Delgado et al., op. cit.). Palmer (1926, en Delgado et al., 1994) introdujo el nombre de graben de Chapala.

Según Delgado et al. (1994) este graben es una depresión alargada y angosta, cuyo origen es tectónico, de 90 Km de longitud, que se extiende 140 Km hacia el Oriente, los rasgos de esta estructura se desvanecen hacia el Este de manera gradual, pero parece continuar 400 Km hacia el Este (Johnson, 1987, en Delgado et al., 1994). El graben de Chapala tiene 10 Km de ancho en su parte más estrecha y de 25 Km a 30 Km en su porción más amplia. Esta limitado por los sistemas de fallas Ajijic NE 80° - 85°, Cosalá NE 50° - 60° y La Angostura NE 86°. En el extremo Occidental del graben está marcado por el flanco hemigraben de Zacoalco. El límite Oriental del graben está representado por una serie de volcanes Plio-Cuaternarios dispuestos a lo largo de fallas con tendencia NW-SE. El desplazamiento vertical total de las fallas del flanco Norte se estima en 900 m, mientras que en el Sur se estima un salto de 700 m (Delgado et al., op. cit.).

El graben de Citala fue definido por Delgado y Urrutia (1986) como una estructura de 30 Km de largo y de 7 Km en el Este a 18 Km en el Oeste de ancho. Al Norte este graben está limitado por el sistema de fallas de Citala NW 80°. Entre los graben de Chapala y Citala existe un pilar tectónico. El límite Occidental del graben de Citala es una planicie en donde coinciden el hemigraben de Zacoalco y el graben de Sayula (Delgado y Urrutia, 1986). El

límite Oriental está marcado por el volcán El Camaleón y las fallas curvas de un sistema de fallas Las Cebollas, el graben de Citala se une con el graben de Chapala al Oriente en la vecindad de Tizapán. El salto del flanco norte es de aproximadamente 400 m. La penetración de las fallas es muy somera. Esta estructura se desarrollo durante el Mioceno Tardío y su actividad abarcó hasta el Pleistoceno (Delgado et al., op. cit.).

II.3 GEOLOGÍA LOCAL.

La geología del área de estudio está compuesta por rocas volcánicas del Mioceno Tardío, depósitos lacustres, material volcánico y sedimentos del Reciente. Las Vulcanitas Indiferenciadas del Mioceno Plioceno (VIMP), (Delgado et al., op. cit.) dieron origen a la Sierra de Pajacuarán. Esta unidad tiene una composición andesítico-basáltica, se encuentra fracturada, fallada y su coloración es gris oscuro. La actividad del Reciente dio origen al formación de los cerros El Copito y El Pelón, los cuales corresponden a volcanes de escudo, domos y conos de lava, cuya composición es de basalto y andesitas.

Sobre las VIMP se encuentra distribuido en la Ciénega de Chapala el Grupo del mismo nombre, que está compuesto principalmente por arena, arcilla e intercalaciones arenos-arcillosas y arcillo-arenosas, de origen lacustre que forman cuerpos lenticulares con una gran extensión en el área de estudio. Con una gran variación en su grado de compactación y en sus espesores, que varían de metros a decenas de metros. Estos se interdigitan entre ellos y con el material volcánico hacia las Sierras circundantes. El Grupo Chapala está cubierto por depósitos lacustres Recientes y suelo residual.

Delgado et al (1994) reconoce seis sistemas de fallas en la región, el sistema Ajijic; Cosalá; La Lima; Citala; Cebollas y La Angostura. Para esta porción del graben de Chapala, el sistema de fallas La Angostura presenta lineamientos estructurales E-W que corresponden a fallas normales. En el caso particular de esta zona la ciénega se encuentra delimitada en su parte Sur por la falla de Pajacuarán. Dicha falla tiene un plano inclinado

de 70° N, con un escarpe en su ladera que puede alcanzar hasta los 400 m en su desnivel, su longitud es de 18 Km.

II.4 SISTEMA ACUÍFERO.

La zona de estudio anteriormente perteneció a un sistema lacustre, el cual dio origen a la formación de la cuenca conocida como la Ciénega de Chapala, que se considera como una planicie. El acuífero en la Ciénega de Chapala se encuentra formado por materiales de origen fluvio-lacustres y por la alternancia gradual que de ellos resulta y cuyo tamaño de grano es de mediano a fino, correspondientes con arcillas, arenas y material arcillo-arenoso y areno-arcilloso. El espesor de la capa de arena con mayor permeabilidad, que es el acuífero de la ciénega en explotación varía de 20 a 55 m, aunque no se conocen reportes deben existir acuíferos "colgados". El principal mecanismo de recarga del acuífero en estudio se debe a la recarga local y a la infiltración de las aguas superficiales del Lago de Chapala y el río Duero. Se encuentra confinado por capas arcillo-arenosas y areno-arcillosas en la mayor parte de la ciénega. Hacia los márgenes debe cambiar a libre. A mayor profundidad puede existir un acuífero regional profundo como lo evidencia el termalismo de los pozos cercanos a la falla de Pajacuarán (Silva et al., 2001). No se descartan aportaciones de flujo regional a través de la misma falla.

II.4.1 APROXIMACIONES DE KOSINSKI.

En las últimas tres décadas, diversos investigadores han trabajado para establecer relaciones empíricas y semiempíricas entre diferentes parámetros hidrodinámicos y parámetros geoelectrónicos bajo diferentes condiciones geológicas, siendo las citas más representativas y actualizadas las siguientes: Kosinski y Kelly (1981), Ponzini et al. (1981), Sir Niwas y Singhal (1981) en la mayoría de los casos, con la convicción de que es factible dar mayor

utilidad a la información obtenida de estudios geoelectrónicos, para apoyar el proceso de evaluación de acuíferos de geometría regular.

Los trabajos pioneros en este campo son los desarrollados por Kosinski y Kelly (1981) y por Ponzini et al. (1981), ellos han sentado las bases teóricas para el desarrollo de métodos que puedan correlacionar parámetros hidrodinámicos con datos geoelectrónicos, de estas ideas han partido nuevos criterios para poder obtener la experiencia en otro tipo de ambientes geológicos más complejos o bien en la búsqueda de nueva interrelaciones como se ha mencionado con anterioridad.

Para nuestro caso, se hará uso del método de Kosinski y Kelly (1981), mismo que está basado fundamentalmente en que las relaciones de transmisividad (T) y resistencia transversal (R_t), tienen un factor común que es el espesor de la capa acuífera (h).

Esto es:

$$T = K \cdot h \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \quad \text{y} \quad R_t = \rho \cdot h \left[\Omega \cdot \text{m}^2 \right].$$

Donde T es la transmisividad, K es la conductividad hidráulica, R_t es la resistencia transversal y ρ es la resistividad eléctrica del terreno.

Obteniéndose así la expresión

$$\frac{T}{K} = \frac{R_t}{\rho},$$

de donde

$$T = K \frac{R_t}{\rho} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right].$$

Esto quiere decir que las ecuaciones que definen el comportamiento del flujo de agua y del flujo de corriente eléctrica tienen una gran similitud en un medio poroso, homogéneo, isótropo y saturado, dando en ambos casos una relación lineal, entonces el agua y la corriente eléctrica deberían de fluir por el mismo camino. Sin embargo, para medios

porosos de baja conductividad hidráulica el flujo de agua y la corriente eléctrica no siguen necesariamente el mismo camino. Ya que estas relaciones no son tan sencillas de obtener es necesario entonces conocer bien el comportamiento de la cuenca, para definir relaciones de la transmisividad que tengan cierta validez.

Por lo que

$$T = f(\rho).$$

Kosinski y Kelly (1981) en sus trabajos de investigación hidrogeológicos realizados en la cuenca del río Pawcatuck, en acuíferos libres, desarrollaron una relación empírica entre la resistencia transversal obtenida de mediciones de resistividad y valores de transmisividad derivados de pruebas de bombeo. La resistencia transversal es normalizada por el efecto de calidad del agua, donde el factor de normalización es $1/\rho_w$ (ρ_w es la resistividad del agua).

En las relaciones obtenidas se aprovecha el hecho de que el espesor del acuífero es común; si se toma en consideración el factor de correlación $1/\rho_w$, entonces

$$R_t = \frac{T \cdot \rho}{K \cdot \rho_w} = CT.$$

donde

$$C = \frac{\rho}{K \cdot \rho_w}$$

Al graficar valores de transmisividad (T) contra valores de resistencia transversal (R_t) en acuíferos lo más homogéneos posibles y con un espesor (h) constante, se pueden obtener ecuaciones que relacionan ambos valores. Kosinski y Kelly obtuvieron para su área de estudio en particular la siguiente expresión:

$$R_t = 0.66 \cdot T^{1.0376}$$

Esta ecuación, concluyen Kosinski y Kelly, es sólo funcional en su ámbito de trabajo, pero agrega que la metodología es posible aplicarla en regiones cuyas características

hidrogeológicas sean similares a las de la cuenca del río Pawcatuck, es decir en zonas donde se presenten acuíferos libres en medios granulares homogéneos.

Finalmente, la relación entre la resistencia transversal como una función de la resistividad del acuífero y la transmisividad como una función de la conductividad hidráulica o permeabilidad, se puede encontrar que los factores que afectan a la resistividad y a la conductividad hidráulica son los mismos, aunque habría que considerar que algunos parámetros pueden afectar notablemente esta relación como: tamaño del grano, porosidad, textura y sobre todo contenido de arcillas.

Dependiendo del tipo de acuífero es factible definir relaciones del tipo:

$$K = f(\rho)$$

$$\log(K) = f(\log \rho).$$

Silva (2001) realizó un análisis Geoeléctrico e Hidrogeológico en la Ciénega de Chapala, en el cual hizo uso de la técnica de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's) para determinar las variaciones en la resistividad eléctrica, también realizó pruebas de bombeo en diferentes pozos con el fin de recopilar la información referente a la conductividad hidráulica del agua subterránea y tomar muestras para realizar análisis fisico-químicos en el laboratorio del CIIDIR.

En este trabajo se retoman seis pruebas de bombeo de corta duración que Silva (2001) realizó a lo largo de la Línea 2. La localización de los pozos se encuentran en la Figura II-3. Los valores de la conductividad hidráulica (K) se tomaron de las seis pruebas de bombeo realizada e interpretadas en el mismo periodo del levantamiento de la información geofísica y con base en el método de Kosinski y Kelly se obtuvo la transmisividad (T) para cada pozo.

De los modelos obtenidos para dicha línea, se obtuvieron los diferentes espesores a lo largo de toda la Sección Geoeléctrica para el quinto paquete resistivo que en ella se detectó, el cual corresponde con el acuífero; ya que la localización de los pozos a los cuales se les

realizó prueba de bombeo fueron muy coincidentes con la ubicación de los sondeos geofísicos, así los valores variaron en los espesores desde 19.85 m en el sondeo Chole hasta alcanzar los 56.49 m en el sondeo El Fortín y las resistividades variaron desde los 30.19 $\Omega\cdot\text{m}$ como mínimo en el sondeo Cienal hasta los 65.93 $\Omega\cdot\text{m}$ como máximo en el sondeo Aeropuerto. Al referirnos a los valores de transmisividad (T), éstos oscilaron desde $0.0415 \times 10^{-2} \text{ m}^2_{\text{s}}$ en el pozo Mw-12 hasta de $1.4761 \times 10^{-2} \text{ m}^2_{\text{s}}$ en el pozo Mw-8.



Figura II-3. Localización de pozos en el área de estudios.

Con la información obtenida fue posible integrar la Tabla II-1 que representa la caracterización hidrogeofísica del sistema acuífero en la porción central de la Ciénega de Chapala (Silva, 2001). Los valores contenidos en la Tabla II-1 han sido calculados de la siguiente manera: el espesor (h_f) y la resistividad de la formación (ρ_f) de la interpretación directa de los sondeos eléctricos verticales; la resistividad del agua (ρ_w) calculando el valor inverso de la conductividad del agua (w) obtenida de los análisis químicos del agua de los pozos seleccionados; el factor de formación (F) es igual al cociente de ρ_f entre ρ_w ; la resistencia transversal unitaria (R_t) es igual al producto de ρ_f y h_f ; la conductancia longitudinal (CL) es obtenida del cociente de h_f entre ρ_f ; la resistencia transversal unitaria corregida (R_c) es igual al cociente de R_t entre ρ_w ; y por último la transmisividad (T), que es el producto de h_f y la conductividad hidráulica (K) obtenida de las pruebas de bombeo de cada pozo.

Pozo	Sev	ρ_f [Ω^*m]	h_f [m]	ρ_w [Ω^*m]	$w \times 10^4$ [S/cm]	F	R_f [Ω^*m^2]	CL [S]	$K \times 10^{-4}$ [m/s]	R_c [m]	$T \times 10^2$ [m ² /s]
Mw7	El fortin	52.79	56.49	6.667	1500	7.92	2982.11	1.070	1.530	447.32	0.864297
Mw8	4 Esquinas	71.60	53.10	7.380	1355	9.70	3801.96	0.742	2.780	515.17	1.476180
Mw9	El fortin	52.79	56.49	6.667	1500	7.92	2982.11	1.070	2.400	447.32	1.355760
Mw10	Chole	45.97	19.85	6.592	1517	6.97	912.50	0.432	2.403	138.43	0.476996
Mw11	Aeropuerto	65.93	34.26	7.610	1314	8.66	2258.76	0.520	1.903	296.80	0.651968
Mw12	Cicnal	30.19	43.69	7.143	1400	4.23	1319.00	1.447	0.095	184.66	0.041506

Tabla II-1 Parámetros Hidrogeofísicos obtenidos de las de las seis pruebas de bombeo y los SEV's de la Línea 2 (modificado de Silva, 2001).

Con los valores antes descritos, se construyó una relación lineal con los parámetros T y R_c , misma que se muestra a continuación en la Figura II-4.

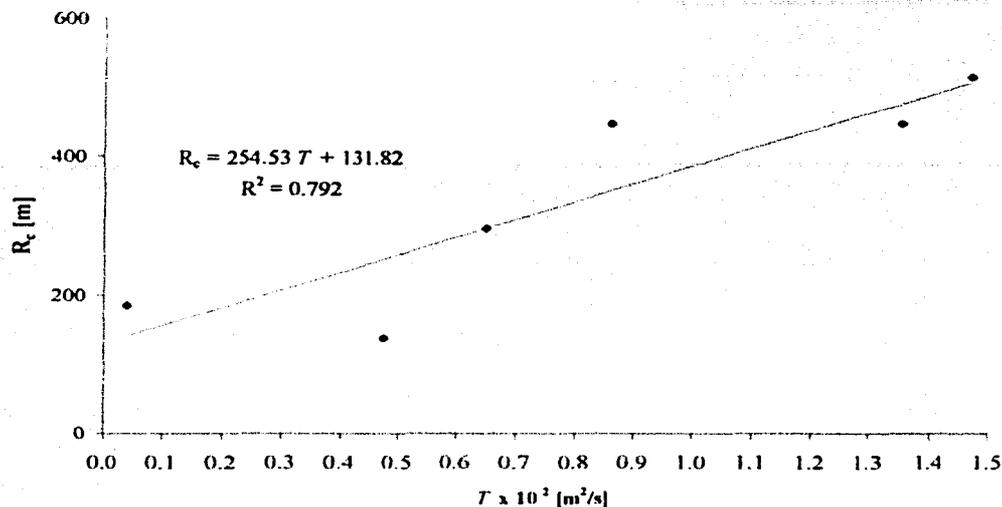


Figura II-4 Relación Lineal T vs R_c .

Mediante una regresión lineal se puede obtener la expresión de la recta, la cual resultó:

$$T = 0.00393 R_c - 0.51790.$$

Es de hacer notar que los valores obtenidos por el factor de formación (F) son del orden de 4.23 a 9.70, lo que hace suponer que la formación acuífera que se está considerando es una unidad principalmente arenosa (Humble y Wyllie, en Astier, 1975).

II.4.2 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.

La conductividad hidráulica o permeabilidad de una roca es la propiedad que permite el paso de fluidos sin modificar su estructura. Este coeficiente se verá afectado por el tamaño del grano, la geometría de los poros, el empaque, la diferencia de presión, la viscosidad del fluido y del tipo de fluido (Kazman, 1972).

La velocidad de flujo está determinada por una relación conocida como la ley de Darcy, la cual expresa que la velocidad de flujo (Q) a través de una sección transversal de área (A) del medio poroso, es directamente proporcional a la diferencia de alturas del agua (h), a esta diferencia se le denomina carga hidráulica ($\Delta h = h_1 - h_2$) y a su vez es inversamente proporcional a la longitud que recorre el flujo (L) (Fetter, 1994)

$$Q \propto h_1 - h_2 \quad \text{y} \quad Q \propto \frac{1}{L}.$$

La expresión de la ley de Darcy se escribe:

$$Q = K \cdot A \cdot \left(\frac{\Delta h}{L} \right)$$

$$Q = K \cdot A \cdot \left(\frac{dh}{dl} \right),$$

donde Q es la velocidad de flujo, K es la conductividad hidráulica, A es el área de la sección transversal, dh es el cambio en la carga hidráulica y dl es la longitud.

La conductividad hidráulica está en función de las propiedades del medio poroso y del fluido que pasa a través de él, la unidad que define a la conductividad hidráulica es:

$$K = \frac{Q}{A \cdot \left(\frac{dh}{dl} \right)} = \frac{\frac{L^3}{T}}{L^2 \cdot \left(\frac{L}{L} \right)} = \frac{L}{T} = \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right].$$

III. PROSPECCIÓN ELÉCTRICA (SEV's).

III.1 MARCO TEORICO.

Para obtener una aproximación simple de la resistividad de la Tierra, el estudio teórico debe considerar un medio conductor lineal, homogéneo e isotrópico en condiciones de conducción en estado estacionario donde la Ley de Ohm está dada por

$$J = \sigma E, \quad \text{III-1}$$

donde

J : Densidad de corriente,

σ : Conductividad Eléctrica,

E : Campo Eléctrico.

Y la ecuación de continuidad es

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot J = 0, \quad \text{III-2}$$

donde

ρ : Densidad de carga.

Ya que se trata del caso estacionario, en dicho medio la densidad de carga se encuentra en su estado de equilibrio, por lo que $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ para cada punto del medio, la ecuación de continuidad se reduce

$$\nabla \cdot J = 0.$$

Combinando la Ley de Ohm con la ecuación de continuidad para medios con corrientes estacionarias se tiene que

$$\nabla \cdot J = \nabla \cdot (\sigma E) = \sigma \nabla \cdot E + E \cdot \nabla \sigma = 0, \quad \text{III-3}$$

y ya que $\nabla \times E = 0$ para un campo estático, el campo eléctrico (E) puede derivarse de un potencial escalar (U) debido a que es un campo conservativo

$$E = -\nabla U. \quad \text{III-4}$$

Sustituyendo la ecuación III-4 en la ecuación III-3 se tiene que

$$\nabla \cdot J = \sigma \nabla \cdot (-\nabla U) + (-\nabla U) \cdot \nabla \sigma = 0$$

$$\sigma \nabla \cdot (\nabla U) + (\nabla U) \cdot \nabla \sigma = 0$$

$$\sigma \nabla^2 U + (\nabla U) \cdot \nabla \sigma = 0,$$

la ecuación anterior rige el comportamiento del potencial eléctrico, especificar J es equivalente a especificar E ya que los dos vectores están relacionados por la Ley de Ohm. Para un medio homogéneo e isótropo donde $\sigma = \text{cte}$, $\nabla \sigma = 0$ entonces

$$\sigma \nabla^2 U + 0 = 0$$

$$\nabla^2 U = 0, \quad \text{III-5}$$

que es la ecuación de Laplace.

Conviene resolver la ecuación de Laplace en coordenadas cilíndricas debido a la simetría con respecto del eje vertical (z), por lo que la ecuación III-5 se escribe en coordenadas cilíndricas (Koefoed, 1979),

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \phi^2} = 0.$$

Como la solución que se busca tiene simetría con respecto del eje vertical (z), la primera y la segunda derivada del potencial con respecto de (ϕ) son igual a cero, entonces la ecuación anterior se simplifica

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \quad \text{III-6}$$

Esta ecuación diferencial parcial se resolverá por la técnica de separación de variables, con una solución de la forma $U(r,z) = R(r)Z(z)$ que se sustituye en la ecuación III-6, lo que produce

$$Z(z) \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \frac{Z(z)}{r} \frac{dR(r)}{dr} + R(r) \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} = 0,$$

las derivadas parciales han sido sustituidas por derivadas totales puesto que $R(r)$ y $Z(z)$ son funciones de una sola variable, ahora si dividimos entre la solución $U(r,z) = R(r)Z(z)$ tenemos

$$\frac{1}{R(r)} \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \frac{1}{rR(r)} \frac{dR(r)}{dr} + \frac{1}{Z(z)} \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} = 0, \quad \text{III-7}$$

la única forma en que una función de r puede ser igual a una función de z para todos los valores de r y z es que ambas funciones sean constantes, por lo que para satisfacer la ecuación III-7 es necesario que

$$\frac{1}{R(r)} \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \frac{1}{rR(r)} \frac{dR(r)}{dr} = -\lambda^2$$

$$\frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR(r)}{dr} + R(r) \lambda^2 = 0 \quad \text{III-8}$$

y a su vez

$$\frac{1}{Z(z)} \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} = \lambda^2$$

$$\frac{d^2 Z(z)}{dz^2} - Z(z) \lambda^2 = 0, \quad \text{III-9}$$

donde lambda (λ) desempeña el papel de una constante real arbitraria. Las soluciones para la ecuación III-9 son (Koefoed, op. cit.),

$$Z(z) = C \cdot e^{\pm \lambda z} \quad \text{III-10}$$

Para el caso de la ecuación III-8 es necesario hacer uso de una función especial para obtener su solución, la cual se denomina función Bessel de orden cero, cuya solución se escribe

$$R(r) = C_1 J_0(\lambda r), \quad \text{III-11}$$

cualquier combinación lineal de la ecuación III-10 y la ecuación III-11 es una solución de la ecuación III-6 por lo que

$$U(r, z) = C_1 J_0(\lambda r) e^{-\lambda z}$$

$$U(r, z) = C_2 J_0(\lambda r) e^{\lambda z}$$

Para las ecuaciones anteriores tanto C como λ son constantes arbitrarias, donde C varía de manera dependiente de λ , y a su vez λ puede tomar cualquier valor de cero a infinito, entonces la solución general de la ecuación III-6 es (Koefoed, op. cit.),

$$U_i(r, z) = \int_0^{\infty} \left\{ A_i'(\lambda) e^{-\lambda z} + B_i'(\lambda) e^{\lambda z} \right\} J_0(\lambda r) d\lambda.$$

La ecuación de Laplace tiene dos soluciones, la anterior es la solución complementaria, para obtener la solución particular se hará uso del potencial generado por una carga puntual en un medio homogéneo e isotrópico y se le sumará a la solución complementaria. El potencial es igual a

$$U = \frac{\rho l}{2\pi r} = \frac{\rho l}{2\pi \sqrt{r^2 + z^2}}$$

haciendo uso de una expresión en la teoría de funciones de Bessel la cual se conoce como identidad de Weber (integral de Lipschitz), la cual es

$$\int_0^{\infty} e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda = \frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2}} \quad \text{III-12}$$

el potencial se expresa como

$$U = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^{\infty} e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda.$$

La solución general para la ecuación de Laplace es

$$U = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left[\int_0^{\infty} \left\{ e^{-\lambda z} + A_1'(\lambda) e^{-\lambda z} + B_1'(\lambda) e^{\lambda z} \right\} J_0(\lambda r) d\lambda \right], \quad \text{III-13}$$

para que la ecuación anterior tenga validez para cualquier capa del medio estratificado será necesario realizar un cambio de variable por lo que

$$A_1' = \frac{\rho_1 I}{2\pi} A_1(\lambda) \quad \text{y} \quad B_1' = \frac{\rho_1 I}{2\pi} B_1(\lambda)$$

al sustituir estos cambios de variable en la ecuación III-13 la expresión para el potencial es

$$U = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left[\int_0^{\infty} \left\{ e^{-\lambda z} + A_1(\lambda) e^{-\lambda z} + B_1(\lambda) e^{\lambda z} \right\} J_0(\lambda r) d\lambda \right]. \quad \text{III-14}$$

Para un medio de n capas las ecuaciones anteriores deben cumplir con las condiciones de frontera (Koefoed, op. cit.), que se mencionan a continuación:

- a) Para los contactos entre capas debe existir continuidad en el potencial.
- b) Para los contactos entre capas debe existir continuidad en la componente normal de la densidad de corriente
- c) En la superficie plana la componente vertical de la densidad de corriente y por lo tanto la intensidad del campo eléctrico, debe ser cero en cualquier parte, excepto alrededor de una vecindad infinitesimal de la fuente, la razón de esto es que en el aire la densidad de corriente es cero y en vista del inciso b) la componente vertical de la densidad de corriente debe también de ser cero en el suelo en $z = 0$.
- d) Cerca de la fuente el potencial debe acercarse a infinito cuando $\rho_1 I / 2\pi \sqrt{r^2 + z^2}$.
- e) A una profundidad infinita el potencial debe aproximarse a cero.

De acuerdo con el inciso *a*), a la profundidad del *i*-ésimo límite plano h_i , la expresión del potencial para el *i*-ésimo contacto y el (*i*-ésimo+1) debe ser continuo, lo que quiere decir que

$$U_i = U_{i+1} ,$$

por lo que la ecuación III-14 se escribe

$$\begin{aligned} & \int_0^{\infty} \left\{ e^{-\lambda h_i} + A_i(\lambda) e^{-\lambda h_i} + B_i(\lambda) e^{\lambda h_i} \right\} J_0(\lambda r) d\lambda \\ &= \int_0^{\infty} \left\{ e^{-\lambda h_i} + A_{i+1}(\lambda) e^{-\lambda h_i} + B_{i+1}(\lambda) e^{\lambda h_i} \right\} J_0(\lambda r) d\lambda . \end{aligned}$$

Esta ecuación sólo se puede satisfacer para valores de r , siempre y cuando, los integrandos en ambos lados de la ecuación sean iguales, obteniendo así la siguiente igualdad

$$A_i(\lambda) e^{-\lambda h_i} + B_i(\lambda) e^{\lambda h_i} = A_{i+1}(\lambda) e^{-\lambda h_i} + B_{i+1}(\lambda) e^{\lambda h_i} . \quad \text{III-15}$$

Tomando en cuenta la condición del inciso *b*), nótese que la componente vertical de la densidad de corriente es igual a la derivada del potencial con respecto de z , dividida por la resistividad de la capa en consideración. Haciendo uso de la ecuación III-14 tenemos

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\rho_i} \left[\int_0^{\infty} \left\{ (1 + A_i(\lambda)) e^{-\lambda h_i} - B_i(\lambda) e^{\lambda h_i} \right\} J_0(\lambda r) \lambda d\lambda \right] \\ &= \frac{1}{\rho_{i+1}} \left[\int_0^{\infty} \left\{ (1 + A_{i+1}(\lambda)) e^{-\lambda h_i} - B_{i+1}(\lambda) e^{\lambda h_i} \right\} J_0(\lambda r) \lambda d\lambda \right] . \end{aligned}$$

Nuevamente esta ecuación sólo se satisface para todo valor de r , si los integrandos de ambos lados de la ecuación son iguales, obteniendo así la siguiente igualdad

$$\frac{1}{\rho_i} \left[(1 + A_i(\lambda)) e^{-\lambda h_i} - B_i(\lambda) e^{\lambda h_i} \right] = \frac{1}{\rho_{i+1}} \left[(1 + A_{i+1}(\lambda)) e^{-\lambda h_i} - B_{i+1}(\lambda) e^{\lambda h_i} \right] . \quad \text{III-16}$$

Para cumplir con la condición del inciso *c)*, diferenciaremos la expresión para el potencial de la ecuación III-14 en la primera capa con respecto de z , para evaluarla en $z = 0$

$$\int_0^{\infty} \{ -1 - A_1(\lambda) + B_1(\lambda) \} J_0(\lambda r) \lambda \, d\lambda = 0,$$

estos términos definen el campo que existe en un medio homogéneo referido al campo primario, el cual satisface automáticamente las condiciones de frontera.

Se debe prestar atención a los dos últimos términos de la integral, ya que juntos definen el campo perturbador. La componente vertical de la intensidad de corriente del campo perturbador debe ser cero en la superficie para todos los valores de r , incluyendo el origen donde se encuentra la fuente, para cumplir esto, los últimos términos de la integral deben ser cero, por lo que

$$A_1(\lambda) = B_1(\lambda). \quad \text{III-17}$$

La condición *d)* se cumple automáticamente por la expresión para el potencial primario. Estas condiciones se satisfacen si ambos términos permanecen finitos en todo el rango de integración y si se aproxima a cero cuando $\lambda \rightarrow \infty$.

La condición *e)* requiere que en la capa n -ésima, la función B sea cero, por que de lo contrario el factor $e^{\lambda z}$ conduce al potencial a tomar un valor infinito a una profundidad infinita. Considerando esto se tiene que

$$B_n(\lambda) = 0. \quad \text{III-18}$$

Con las ecuaciones III-15 a la III-18 se genera un sistema de $2n$ ecuaciones de $2n$ funciones desconocidas $A_1(\lambda)$ y $B_1(\lambda)$. Haciendo las sustituciones pertinentes y realizando ciertos cambios de variables se obtiene el sistema de ecuaciones

$$\begin{aligned} u_i &= e^{-\lambda h} \\ v_i &= e^{+\lambda h} \\ \rho_i &= \rho_i / \rho_{i+1} \end{aligned} ,$$

III.2 RESISTIVIDAD APARENTE.

En el caso teórico de un medio homogéneo e isótropo la expresión del potencial para una fuente puntual sobre la superficie es

$$U = \frac{\rho I}{2\pi r},$$

donde

U : Es el potencial causado por una fuente puntual,

ρ : Es la resistividad del medio homogéneo,

I : Es la intensidad de corriente,

r : Es la distancia entre electrodos.

Dicha ecuación puede ser utilizada para obtener el potencial con cualquier tipo de arreglo electródico, sobre un medio homogéneo e isótropo. De la expresión anterior si se obtiene la resistividad (ρ) algebraicamente, se observa claramente que depende de la diferencia del potencial (ΔU), la corriente (I) y de la distancia entre electrodos.

La resistividad aparente ρ_a , sería el valor resistivo verdadero si el medio en el que interactúan las líneas de corriente fuera un semiespacio homogéneo e isótropo, el valor no corresponde a una media ponderada, ni a un promedio. Este valor se encuentra relacionado con el factor geométrico, por lo que para cada tipo de arreglo el valor calculado será diferente.

El cálculo de la resistividad aparente en observaciones de campo para el arreglo Schlumberger se obtiene

$$\rho_a = \frac{\pi L^2}{a} \frac{\Delta U}{I}, \quad \text{III-21}$$

donde $k = \frac{\pi L^2}{a}$, se conoce como el factor geométrico, por lo que

$$\rho_a = k \frac{\Delta U}{I}$$

Para la interpretación de mediciones de resistividad, es importante conocer la relación entre la función de resistividad aparente y las funciones de transformación de resistividad. Para definir la relación se hará uso de la función kernel de Slichter, y partiendo de la suposición de que la separación infinitesimal entre los electrodos de potencial implica que la intensidad del campo eléctrico en la superficie se considera constante en el área entre los electrodos de potencial. Por lo que el cociente $\frac{\Delta U}{a}$ se puede remplazar por un cociente diferencial, de manera que

$$\frac{\Delta U}{a} = 2 \left(\frac{\partial U}{\partial r} \right)_{r=L}$$

ahora si sustituimos en la ecuación III-21 la resistividad se expresa

$$\rho_a = - \frac{2\pi L^2}{I} \left(\frac{\partial U}{\partial r} \right)_{r=L} \quad \text{III-22}$$

la expresión de la función kernel de Slichter se ve afectada sólo en la función de Bessel de orden cero y de acuerdo con el teorema de la teoría de las funciones de Bessel

$$\frac{\partial}{\partial x} (J_0(x)) = -J_1(x),$$

utilizando las ecuaciones III-22 y III-20 obtenemos

$$\rho_a = \rho_1 L^2 \left[\int_0^{\infty} N(\lambda) J_1(\lambda L) \lambda d\lambda \right]$$

Sin embargo la integración infinita en las componentes de la integral anterior no convergen. Por lo que conviene utilizar la función kernel de Stefanescu, ya que esta función se aproxima a cero cuando $\lambda \rightarrow \infty$. Por lo tanto la integral que contiene la función kernel de Stefanescu si converge.

Sustituyendo la expresión del potencial en la ecuación III-22 de acuerdo con la ecuación III-19 y utilizando la integral de Lipschitz, la ecuación III-19 se escribe

$$U = \frac{\rho_1 I}{2\pi r} + \frac{\rho_1 I}{2\pi} 2 \int_0^{\infty} A_1(\lambda) J_0(\lambda r) \lambda d\lambda .$$

la ecuación anterior se sustituye en la ecuación III-22 y se desarrolla la diferenciación, para obtener la resistividad aparente para el arreglo Schlumberger

$$\rho_a = \rho_1 + 2\rho_1 L^2 \int_0^{\infty} A_1(\lambda) J_1(\lambda L) \lambda d\lambda .$$

Conviene escribir la expresión anterior, utilizando las siguientes ecuaciones; la función de transformación de resistividad, que es definida por la ecuación $T_i = \rho_i N_i$ y la siguiente igualdad $N(\lambda) = 1 + 2A_1(\lambda)$, por lo que la ecuación para la resistividad aparente toma la forma

$$\rho_a = \rho_1 + L^2 \int_0^{\infty} [T(\lambda) - \rho_1] J_1(\lambda L) \lambda d\lambda .$$

IV. INTERPRETACIÓN GEOELÉCTRICA.

En la Ciénega de Chapala se efectuaron un total de 58 Sondeos Eléctricos Verticales (Sev's), dispersos en el área de estudio. De los cuales 30 sondeos son los que se ocupan para la interpretación de este estudio. Se llevó a cabo una selección de los sondeos más representativos, ya que muchos de ellos están muy próximos unos con otros y también se debió a la gran similitud de las curvas de resistividad aparente y de los modelos que para cada uno de ellos se definieron. Dichos sondeos tienen en los electrodos de corriente AB_2 una abertura de 316 m como máximo y para los electrodos de potencial MN_2 la máxima abertura alcanzó los 40 m, el dispositivo utilizado se conoce como arreglo Schlumberger.

Con la información adquirida en los Sev's se pretende determinar la distribución espacial de la resistividad así como la relación de espesores para los distintos materiales que se detecten. Es por eso que se necesita realizar un proceso previo, para llegar a una interpretación que permita estructurar un modelo Geoelectrico y posteriormente uno Geológico.

Como primer paso, se graficaron los valores de resistividad aparente vs las aberturas de AB_2 obtenidos para cada sondeo en hojas logarítmicas y se realizó la corrección por el empalme haciéndose esta de izquierda a derecha. Se mantuvo la tendencia de los valores de la resistividad obtenidos para el primer segmento de aberturas en AB_2 . A partir del valor en AB_2 donde se realizó el primer empalme se modificaron los valores posteriores, esto se hace aumentándolos o disminuyéndolos con respecto a un contraste en la resistividad, corrigiéndose así los valores hasta que se encuentre el siguiente empalme, para así volver a corregir la tendencia de los puntos de igual manera que el segmento anterior hasta que se tengan todos los valores corregidos. A estos nuevos puntos se les une con una línea curva

que debe ser trazada a mano alzada de manera suave, a este proceso se le conoce como suavizado.

Como segundo paso, con las curvas ya suavizadas se hizo uso de las curvas teóricas definidas por Orellana y Mooney (1966) para medios estratificados con el fin de obtener modelos preliminares pertinentes para cada sondeo, en este caso se usaron las curvas auxiliares de dos capas y se desarrolló el método del punto auxiliar, el cual se describe a continuación:

- a) Se sobrepone la curva obtenida de campo corregida por empalme, en su parte izquierda en el origen de la lamina de curvas ascendentes y descendentes, se desplaza la curva suavizada hasta hacerla coincidir con alguna de las curvas, logrando esto, se marca el punto y se identifica el valor de ρ_2/ρ_1 y el tipo de curva al que corresponde.
- b) Se coloca el punto sobre el origen de la curva patrón correspondiente de manera que se encuentre centrada y se traza una línea punteada equivalente al valor de ρ_2/ρ_1 de la curva patrón en la curva de campo.
- c) Esta línea punteada se desplaza sobre el origen de la lamina de curvas ascendentes y descendentes, manteniendo paralelas durante el desplazamiento las líneas de origen de ambas hojas, hasta que se consiga empalmar la línea suavizada con alguna de las curvas patrón, se marca el punto donde coinciden sobre la línea punteada y se identifica el valor de ρ_2/ρ_1 y el tipo de curva que corresponde a este nuevo punto.
- d) Se coloca el nuevo punto sobre el origen de la curva patrón de manera que se encuentre bien alineada y se traza una línea punteada equivalente al valor de ρ_2/ρ_1 de la curva patrón en la curva de campo.
- e) Se aplican los incisos c) y d) según el número de capas que se hallan interpretado durante el suavizado previo.

- f) Una vez culminada la identificación de las capas se toman directamente de las hojas logarítmicas los valores de espesor y resistividad de los puntos que definen las capas.
- g) Se obtienen los factores de ρ_2/ρ_1 y E_2/E_1 , para conseguirlo, se pone nuevamente la curva suavizada sobre la curva patrón, según el valor de ρ_2/ρ_1 que se define en cada caso y se toman los valores de los espesores E_2/E_1 del punto que define a una capa al punto que define a la siguiente capa sobre la línea punteada, según el tipo de curva.
- h) Con los valores obtenidos capa por capa se obtienen los valores que definen un modelo inicial para cada sondeo.

Previamente se agruparon los SEV's por morfología y así facilitar el proceso de interpretación. En la zona en estudio se encontraron mayoritariamente curvas del tipo HKH y HAK según las curvas maestras. Las curvas del tipo HKH se manifestaron por los incrementos y decrementos de bajo contraste resistivo conforme al aumento en la profundidad, en tanto que las curvas de tipo HAK presentaron un incremento en la resistividad según el aumento en la profundidad, para finalizar también con una disminución de bajo contraste en la resistividad. Los sondeos se agruparon en tres líneas y las curvas de resistividad aparente que conforman cada una de ellas se muestran en las Figura IV-1a y 1b; Figura IV-2a y 2b; Figura IV-3a y 3b. Se les denominan Curvas de Resistividad Aparente Línea 1, Línea 2 y Línea 3 respectivamente.

Curvas de Resistividad Aparente Línea I.

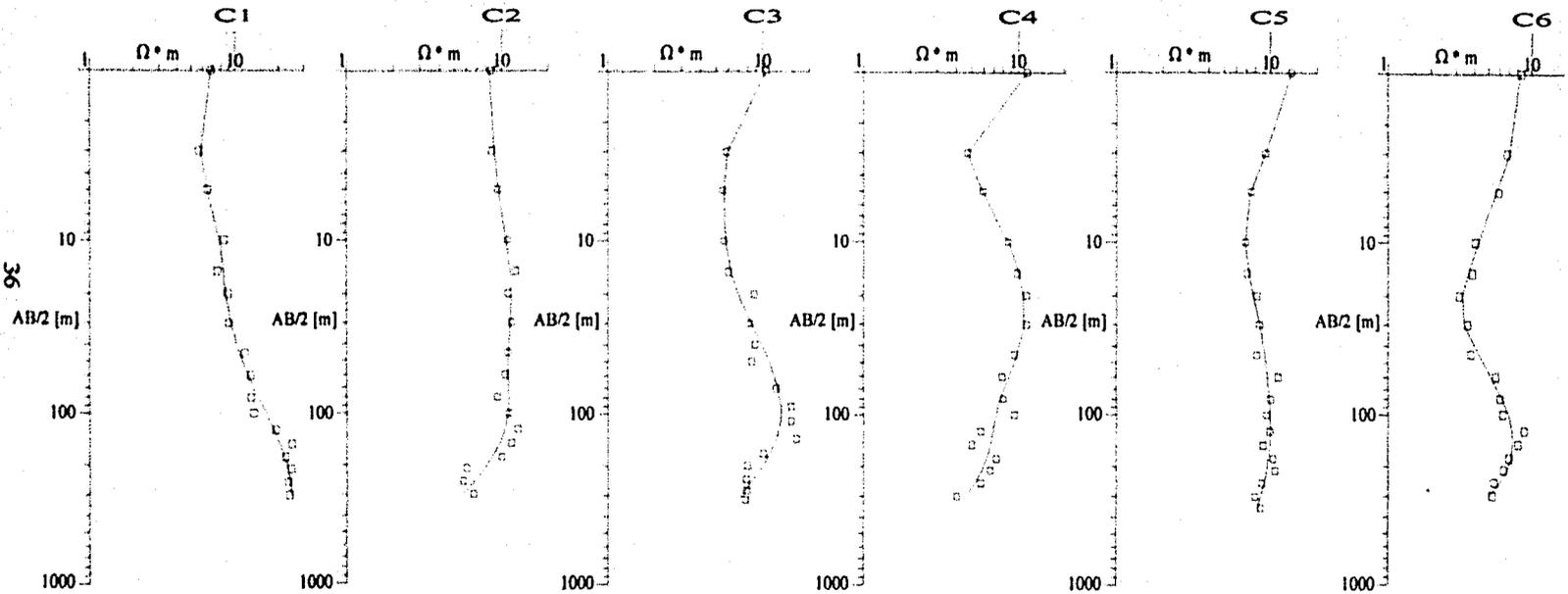


Figura IV-1a. Curvas de Resistividad Aparente Línea I, del sondeo C1 al sondeo C6.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Curvas de Resistividad Aparente Línea 1.

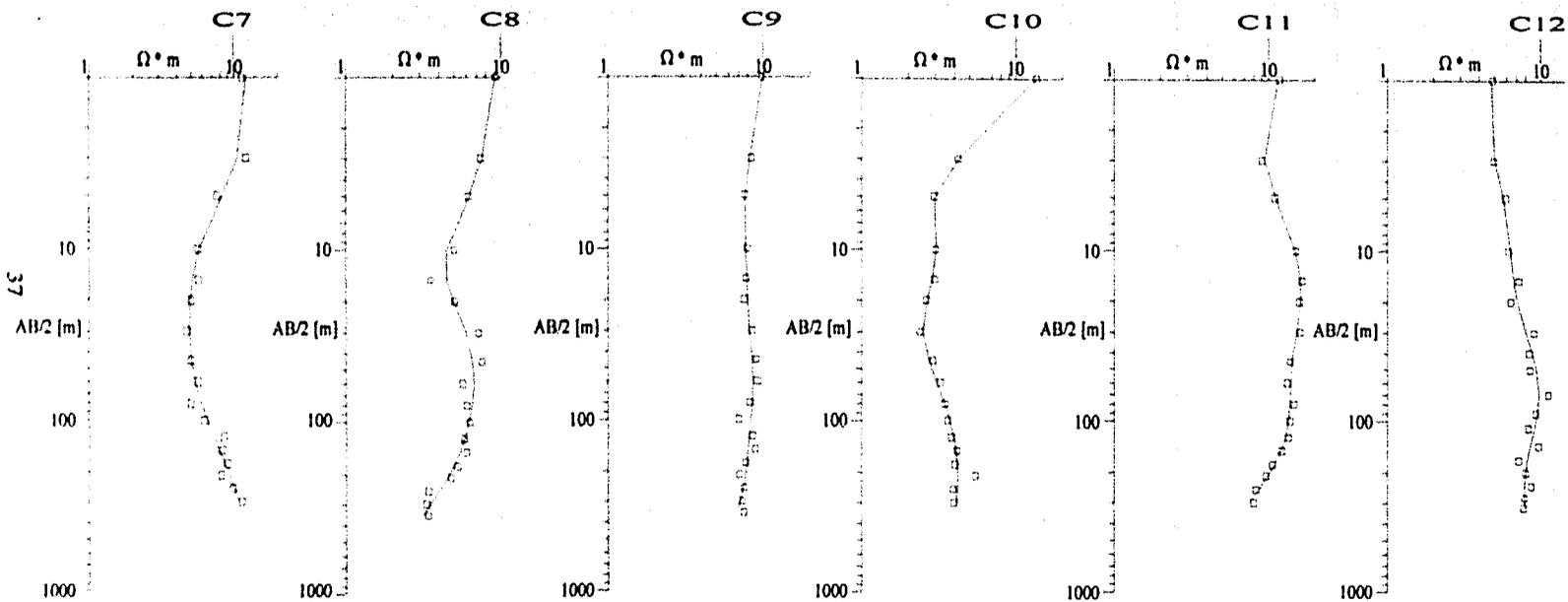


Figura IV-1b. Curvas de Resistividad Aparente Línea 1, del sondeo C7 al sondeo C12.

Curvas de Resistividad Aparente Línea 2.

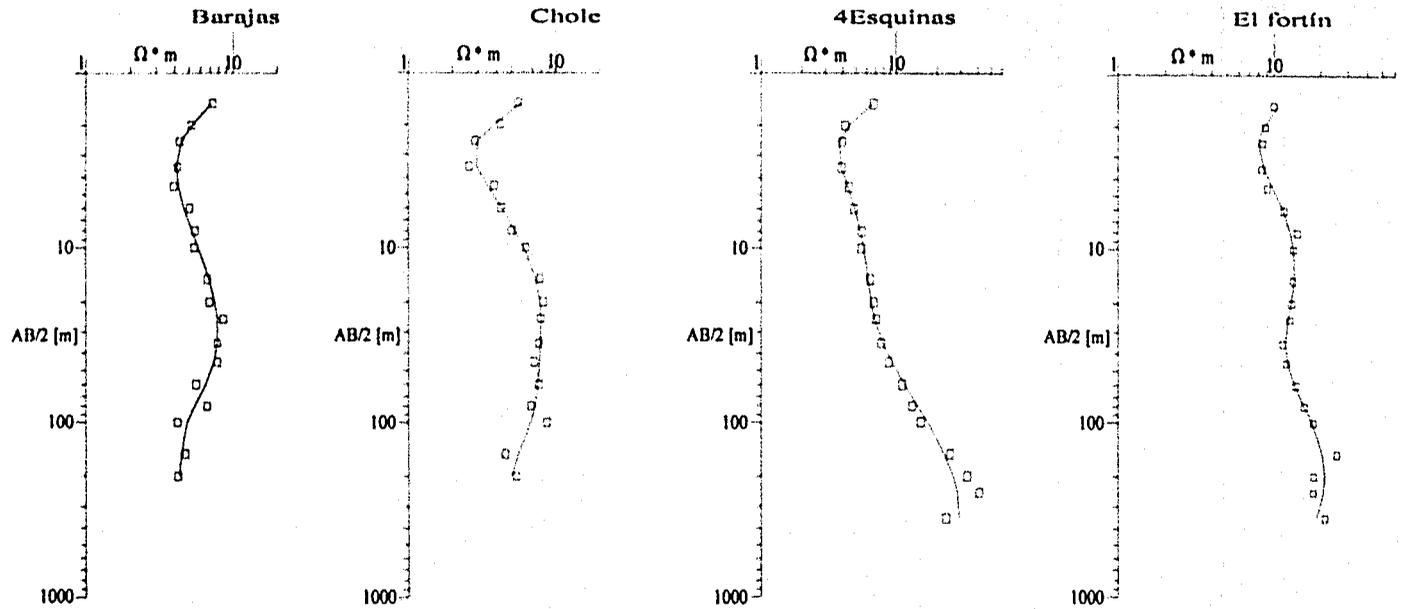


Figura IV-2a. Curvas de Resistividad Aparente Línea 2, del sondeo Barajas al sondeo El Fortín.

Curvas de Resistividad Aparente Línea 2.

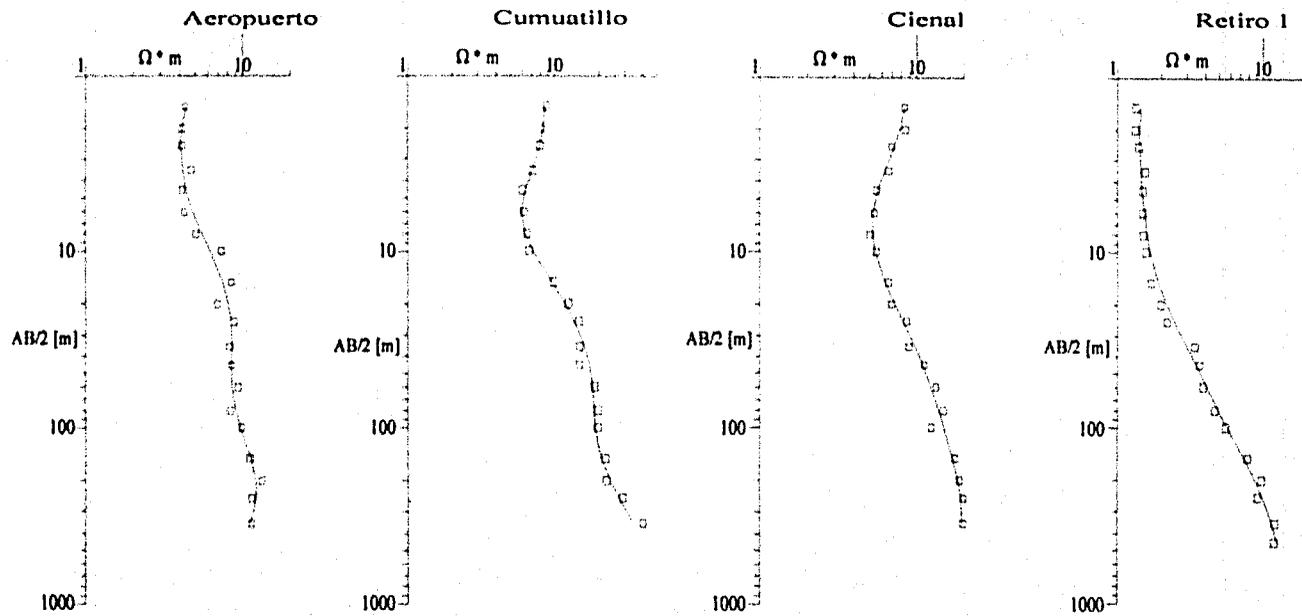


Figura IV-2b. Curvas de Resistividad Aparente Línea 2, del sondeo Aerpuerto al sondeo Retiro 1.

Curvas de Resistividad Aparente Línea 3.

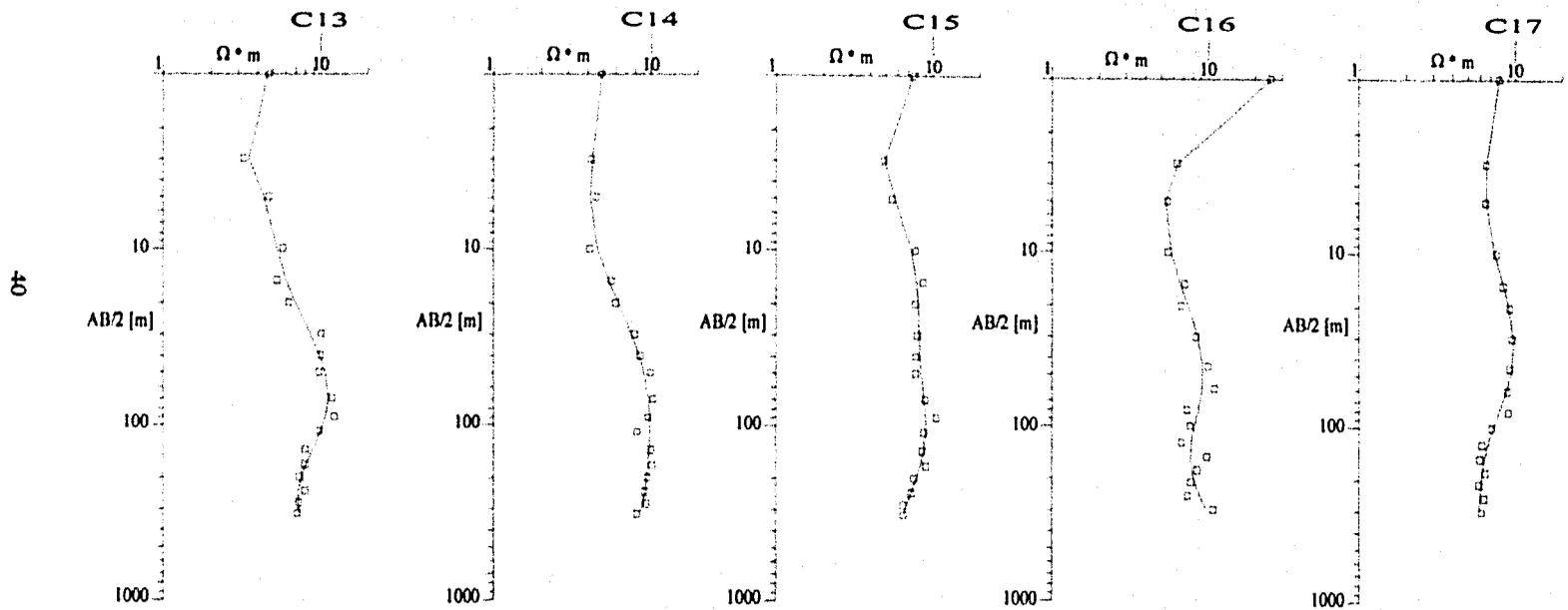


Figura IV-3a. Curvas de Resistividad Aparente Línea 3, del sondeo C13 al sondeo C17.

Curvas de Resistividad Aparente Línea 3.

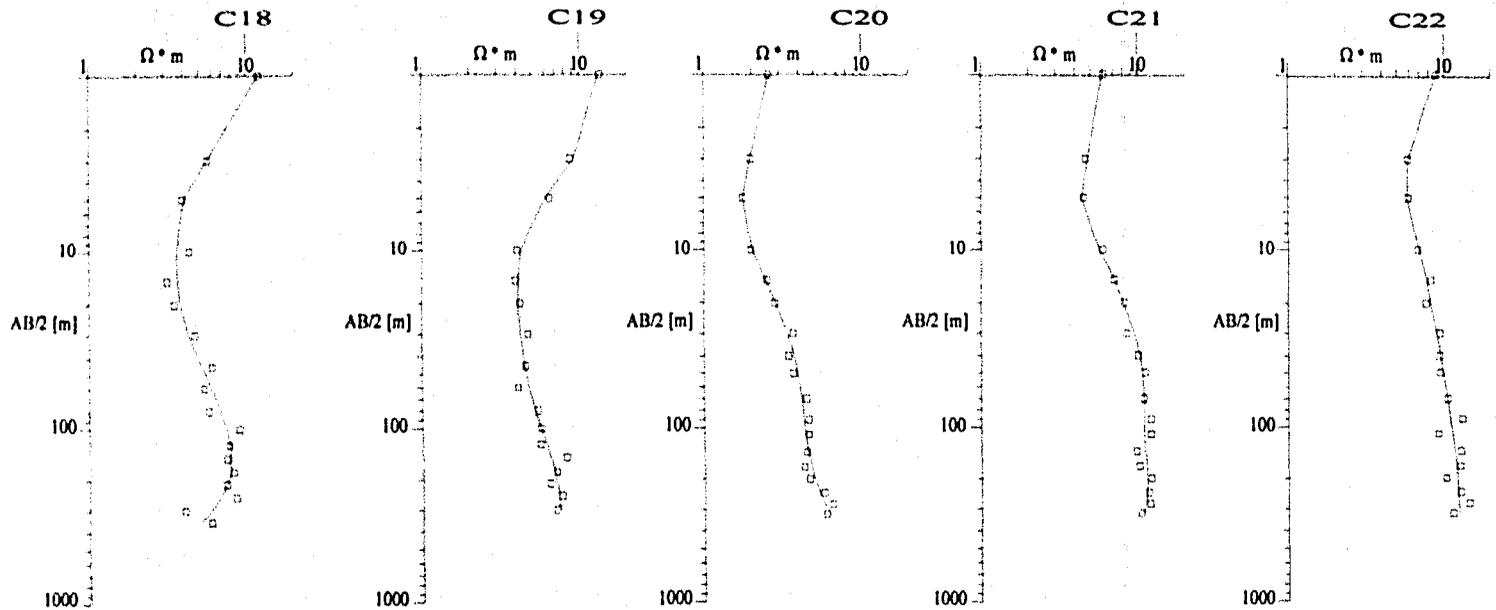


Figura IV-3b. Curvas de Resistividad Aparente Línea 3, del sondeo C18 al sondeo C22.

En la Figura IV-4 se presentan las tres líneas ubicadas en el área de estudio. De derecha a izquierda de la Figura IV-4 se presenta la Línea 1, Línea 2 y Línea 3, todas ellas con una orientación NE-SW.



Figura IV-4. Líneas resultantes en el área de estudio.

IV.1 Pseudosecciones de Isorresistividad Aparente.

Se generaron las pseudosecciones de resistividad aparente para los tres perfiles que permitieron establecer un análisis cualitativo sobre cómo se encuentra distribuido el material, según los valores de resistividad recopilados para las diferentes aberturas de AB_2 , todo esto se logró con la ayuda de un programa de interpolación (el criterio usado fue kriging) y de los algoritmos en los que se basa para la creación de los diversos esquemas en los que se muestran los rangos resistivos del material que compone el terreno. El Software utilizado para lograr este fin fue, Golden Software, Surfer versión 7.

La Línea 1 se localiza en la parte Este de la Ciénega de Chapala abarcando los Ejidos Lázaro Cárdenas; El Capulín; San Gregorio y Pajacuarán, el total de sondeos que la integran son doce y se les dio el nombre secuencial C1 hasta C12, con una distancia máxima de apertura en AB_2 de 316 m, su longitud es de 12.1 Km, se levantó en las brechas y caminos internos que unen las parcelas de la ciénega.

La Línea 2 se ubica en la parte Central de la Ciénega de Chapala cruzando los Ejidos Cumuato; El Fortín; Pajacuarán y Venustiano Carranza y son un total de ocho los sondeos que la conforman, esta línea se levantó a lo largo de la carretera Estatal No. 5 cerca de varios poblados por eso los sondeos adoptan dichos nombres, su longitud es de 16.6 Km, para los sondeos Barajas y Chole se tiene la apertura menor en AB_2 de 215 m y para todos los demás la apertura máxima en los electrodos de corriente fue de 316 m.

La Línea 3 se encuentra localizada en la porción Oeste de la Ciénega de Chapala y se levantó a través de los Ejidos De Ibarra, Cumuatillo, La Arena, Venustiano Carranza y Sahuayo con diez sondeos en total, la longitud de esta línea es de 12.7 Km los nombres asignados son también de manera secuencial C13 hasta C22 y al igual que la Línea 1 se levantó en las brechas y caminos internos de la ciénega.

Línea 1.

Esta línea presentó valores de resistividad aparente de entre los 2.64 Ω -m como mínimo, el cual se registró en el sondeo C10 y de 24.4 Ω -m como máximo en el sondeo C1. A lo largo de toda la línea se nota el bajo contraste resistivo que manifiestan los materiales. El sondeo C10 resultó tener los valores más bajos de resistividad aparente, mientras que en el sondeo C11 se obtuvieron valores de entre los 9 Ω -m y los 15.9 Ω -m, dando una configuración lateral a profundidad de bajo contraste desde C9 hasta C12. La parte final del perfil difícilmente responde a la de un medio estratificado, en la parte central del perfil, para las aberturas de AB_2 menores de 22 m si se podría hablar de un medio estratificado, como se muestra en la Figura IV-5.

Línea 2.

En esta línea el valor más bajo se registro en el sondeo Chole con un valor de 2.95 Ω -m mientras que en el Retiro1 se detectó la mayor resistividad aparente con un valor de 38.9 Ω -m, cabe mencionar que el sondeo anterior se levantó en la cercanías del cerro el Sombrerete cuya composición se sabe es andesítica. En general los valores menores aparecen en los sondeos Barajas, Chole y 4 Esquinas para un AB_2 igual a 3 m a partir del sondeo denominado Aeropuerto y hasta el denominado Retiro1, para las aberturas en AB_2 de 10 m y 15 m los rangos en las resistividades son de 5 Ω -m a 9.98 Ω -m. Los mayores valores de la resistividad se presentan en la abertura de 316 m para AB_2 , en los sondeos 4 Esquinas y Cumuatillo con valores de 31.5 Ω -m y de 33.8 Ω -m respectivamente. Este perfil presentó en general un esquema estratificado a lo largo de todo el perfil, como se observa en la Figura IV-6.

Línea 3.

En esta línea los valores de resistividad aparente se presentaron entre los 1.8 Ω -m registrado en el sondeo C20 hasta alcanzar los 25.4 Ω -m obtenido en el sondeo C16. Presentando para las aberturas en AB_2 menores de 5 m una secuencia de capas estratificadas a partir del sondeo C15 y hasta el sondeo C19, existiendo también un contraste lateral de bajos resistivos muy marcado a partir del sondeo C18 para las aberturas de AB_2 en los electrodos de corriente igual con 10 m. Presentado en general un bajo contraste resistivo en los materiales detectados a lo largo de toda la línea, dificultando así la comparación que de este se haga con la de un medio estratificado. Esto es más evidente en la Figura IV-7.

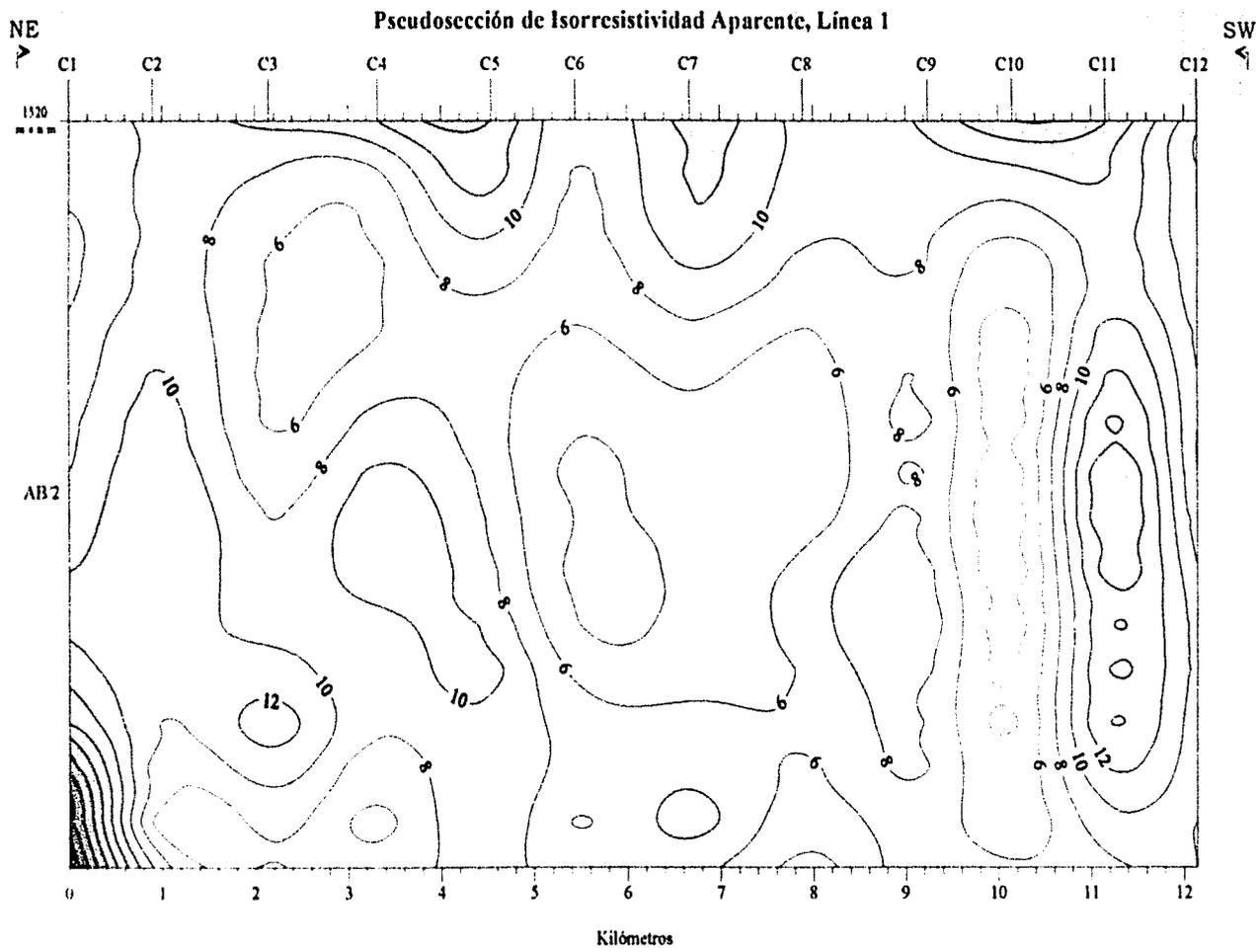


Figura IV-5. Pseudosección de Isorresistividad Aparente, Línea 1.

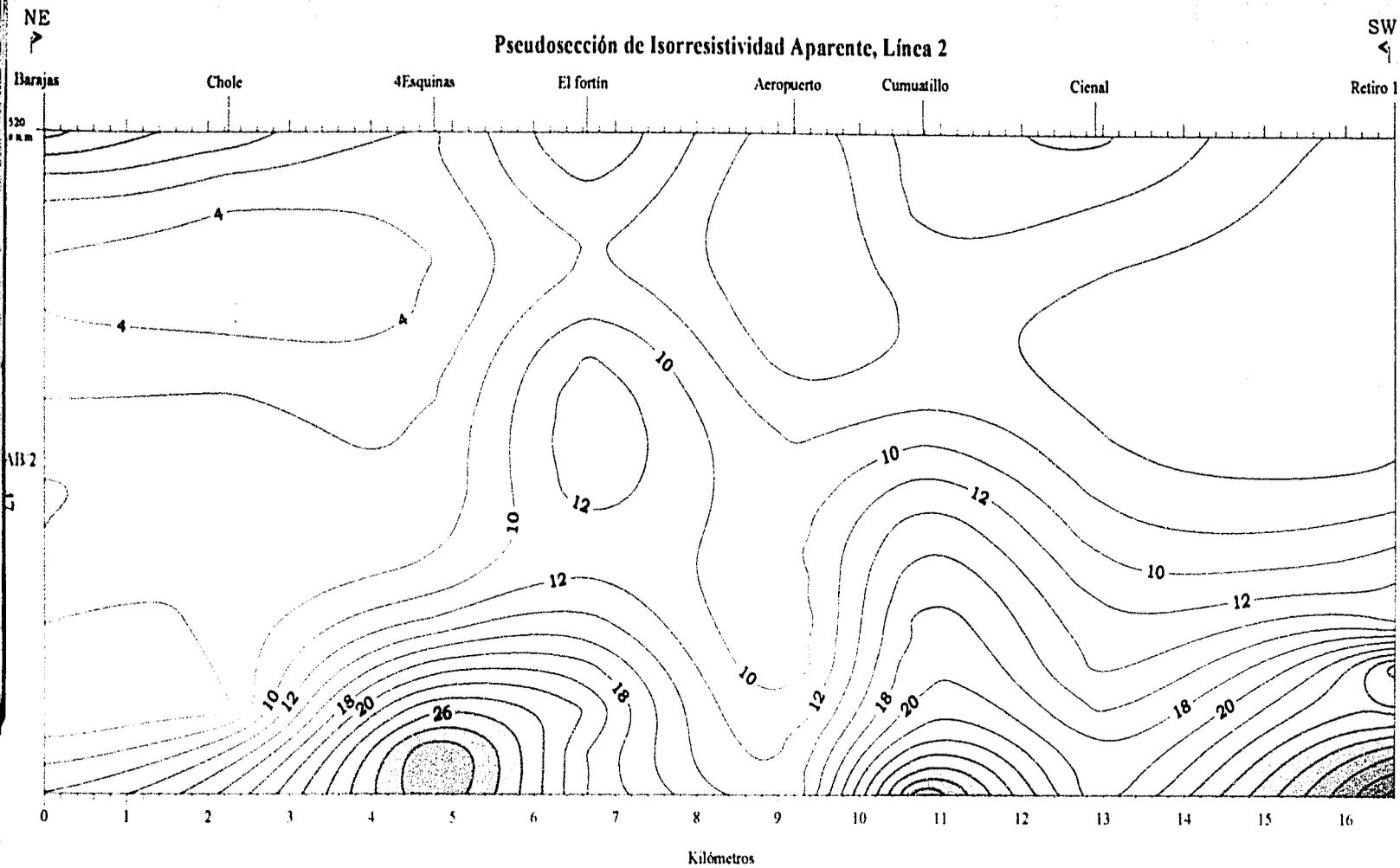


Figura IV-6. Pseudosección de Isorresistividad Aparente, Línea 2.

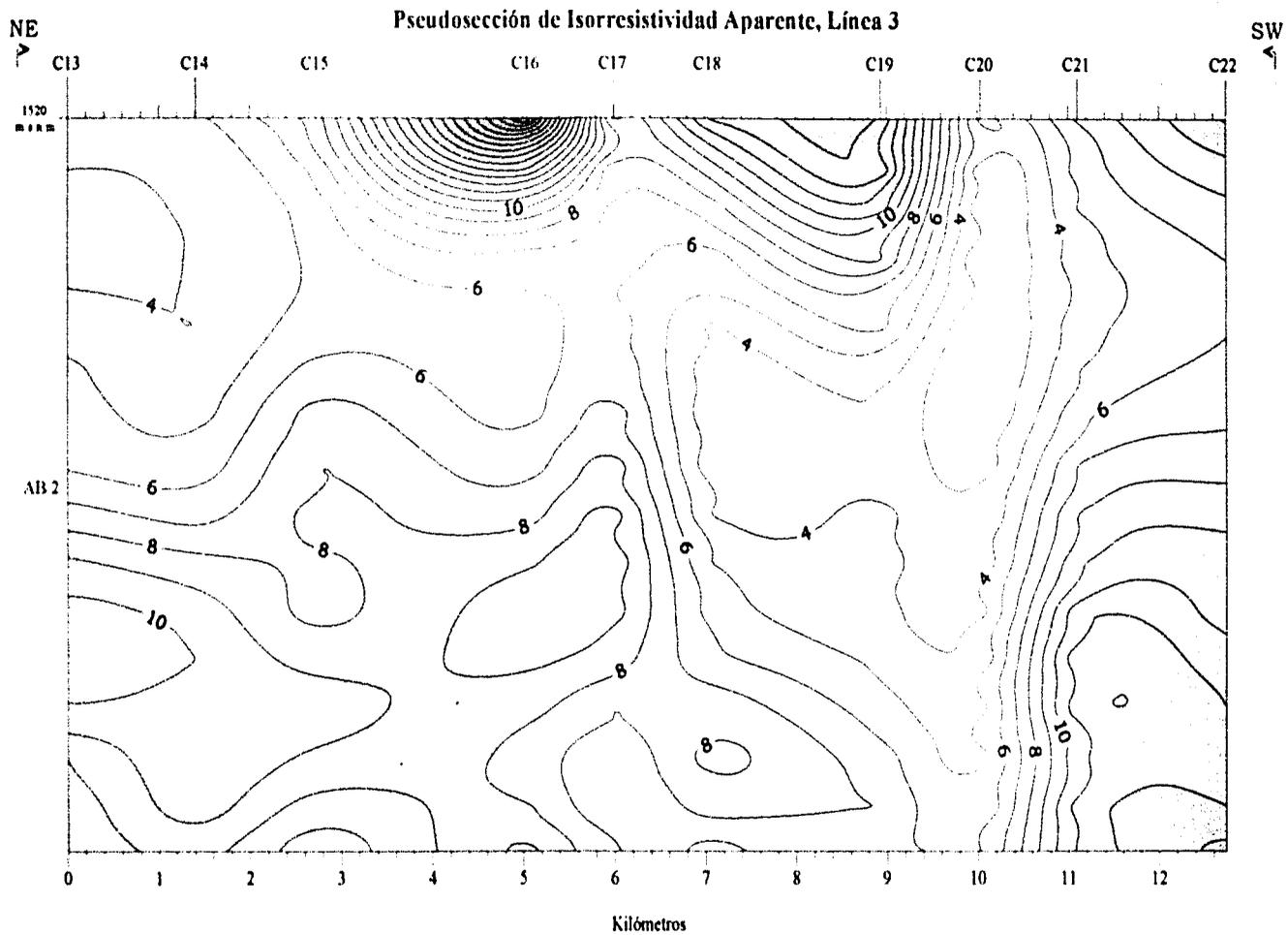


Figura IV-7. Pseudo sección de Isorresistividad Aparente, Línea 3.

IV.2 Mapas de Isorresistividad Aparente.

Con los valores de resistividad de los 30 sondeos agrupados para las tres líneas se generaron mapas de isorresistividad aparente, para las aberturas de $AB/2$ iguales con 68 m; 100 m; 147 m; 215 m y 316 m, en los se cuales se muestra de manera general como se encuentra distribuida la resistividad aparente en el área de estudio. Estas aberturas en $AB/2$ se seleccionaron en función de los principales cambios de pendiente de los SEV's. Tratando de rastrear continuidad en paquetes "críticos" en resistividad aparente. Los mapas correspondientes a cada abertura se muestran en las Figuras IV-8; 9; 10; 11 y 12 respectivamente.

Para las aberturas de $AB/2$ iguales a 68 m; 100 m; 147 m existe un contraste resistivo muy marcado entre las coordenadas UTM 741,000 - 743,000 m de longitud y los 2'227,000 - 2'230,000 m de latitud. Esto se observa claramente en las Figuras IV-8; 9 y 10. Mientras que en la Figura IV-13 se muestran en perspectiva de manera conjunta los mapas para las tres aberturas antes mencionadas.

En todos los mapas generados para las aberturas escogidas, entre las coordenadas UTM 745,000 m - 755,000 m de longitud y los 2'225,000 m - 2'235,000 m de latitud, se detectan perfectamente valores altos en la resistividad, con una orientación NE-SW. En la perspectiva que presenta la Figura IV-13 se hace más evidente, aunque, en dicha figura sólo se muestren los mapas para las aberturas de $AB/2$ iguales a 68 m; 100 m; 147 m. Esta distribución en la resistividad del terreno hace suponer que difícilmente se trata de un medio estratificado.

Mapa de Isorresistividad Aparente, para una abertura en AB/2 igual a 68 m.

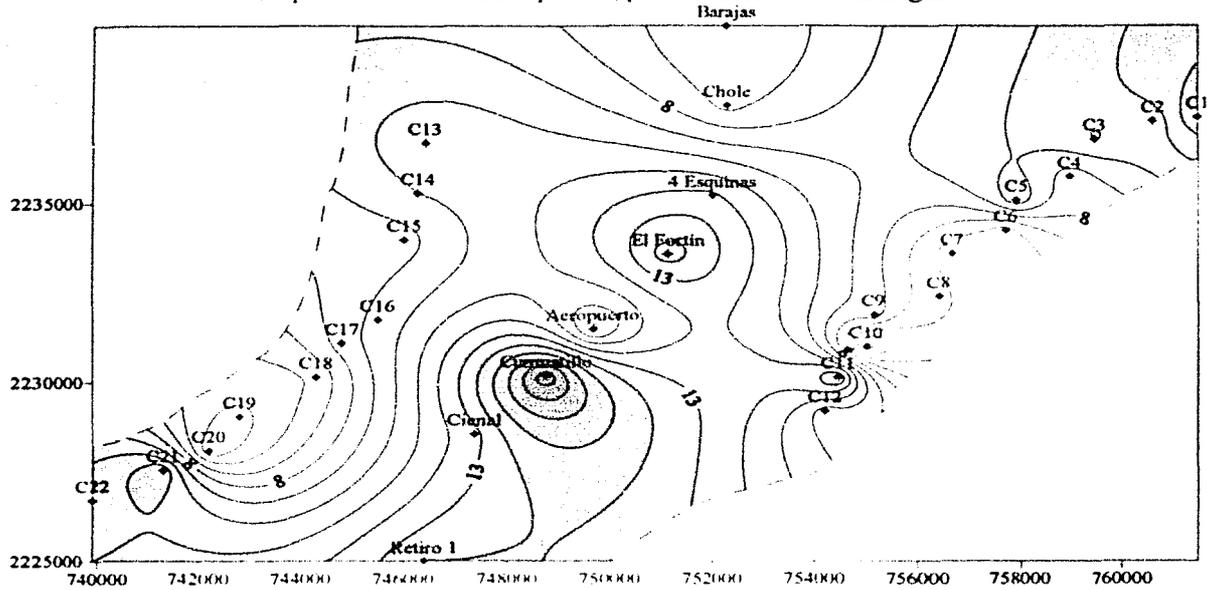


Figura IV-8. Mapa de Isorresistividad Aparente, para una abertura en AB/2 igual a 68 m.

Mapa de Isorresistividad Aparente, para una abertura en AB/2 igual a 100 m.

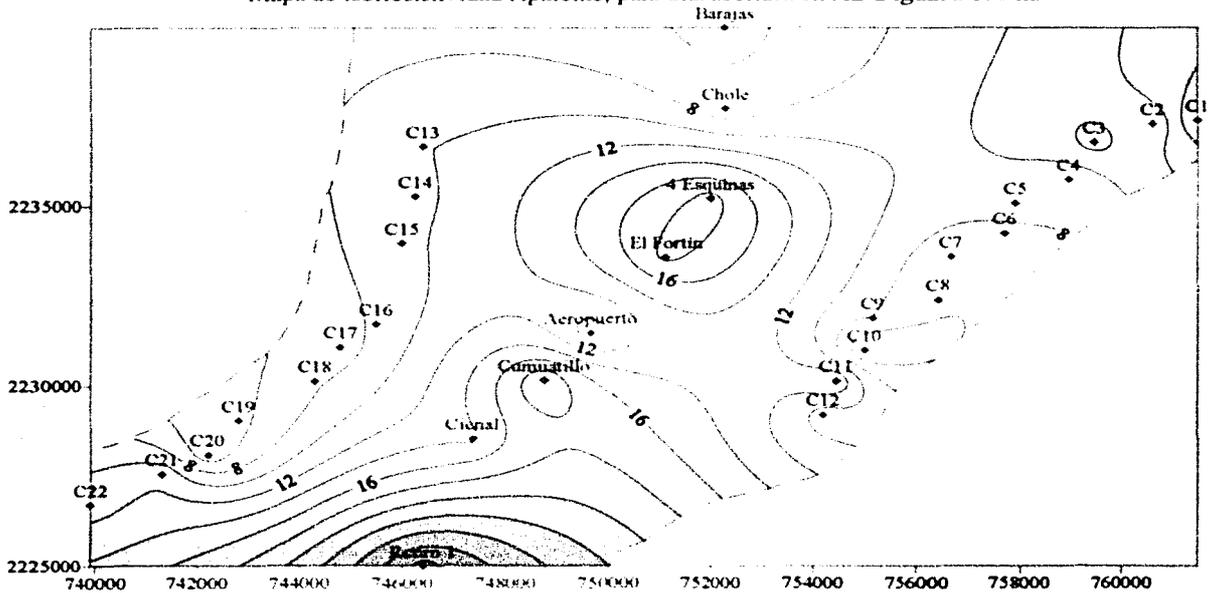


Figura IV-9. Mapa de Isorresistividad Aparente, para una abertura en AB/2 igual a 100 m.

Mapa de Isorresistividad Aparente, para una abertura en AB/2 igual a 147 m.

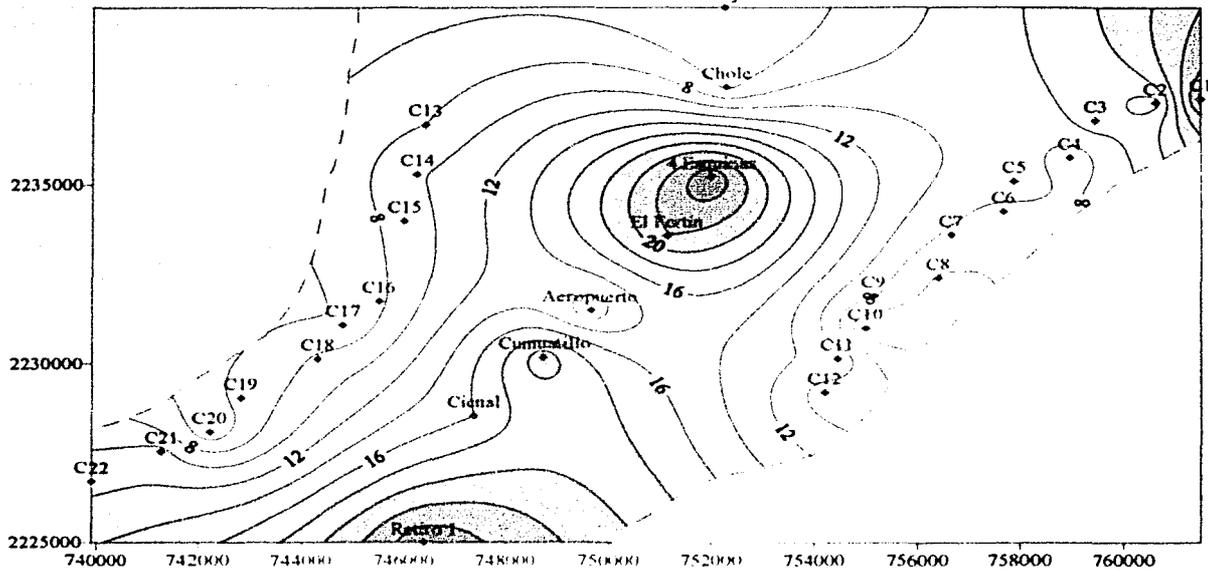


Figura IV-10. Mapa de Isorresistividad Aparente, para una abertura en AB/2 igual a 147 m.

Mapa de Isorresistividad Aparente, para una abertura en AB/2 igual a 215 m.

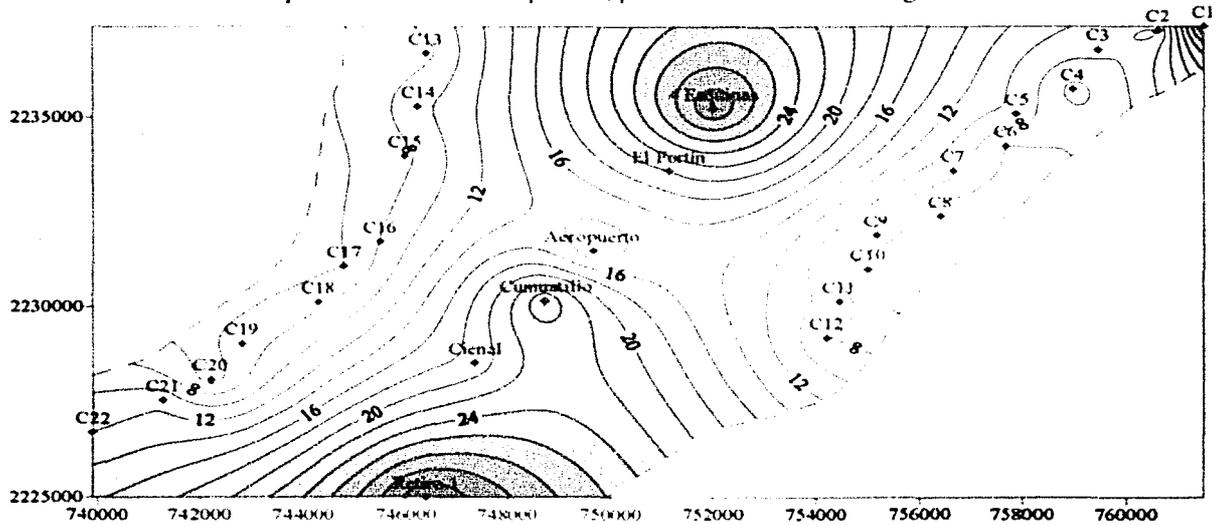


Figura IV-11. Mapa de Isorresistividad Aparente, para una abertura en AB/2 igual a 215 m.

Mapa de Isorresistividad Aparente, para una abertura en AB/2 igual a 316 m.

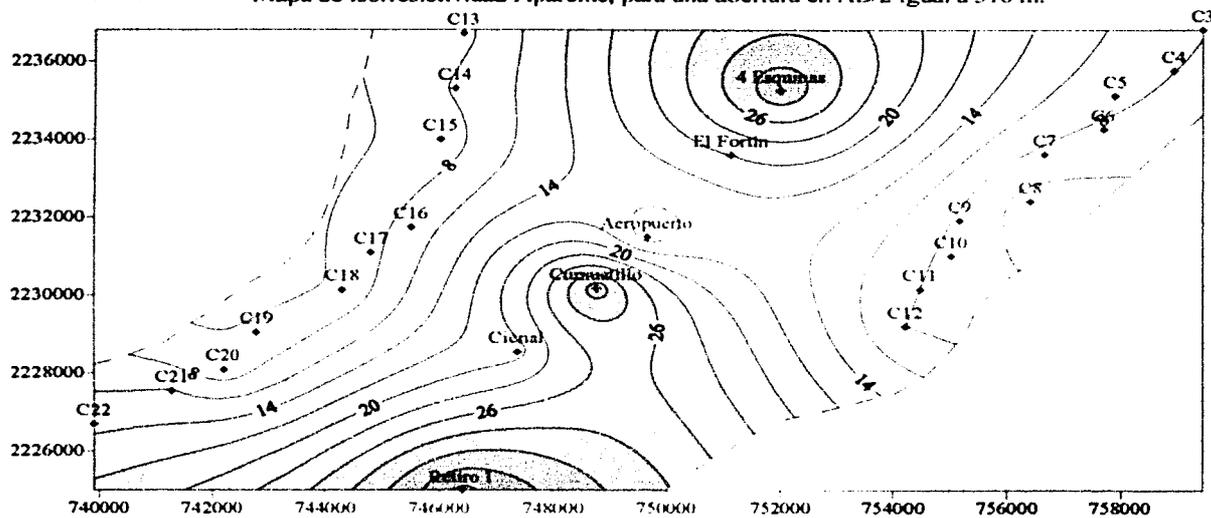


Figura IV-12. Mapa de Isorresistividad Aparente, para una abertura en AB/2 igual a 316 m.

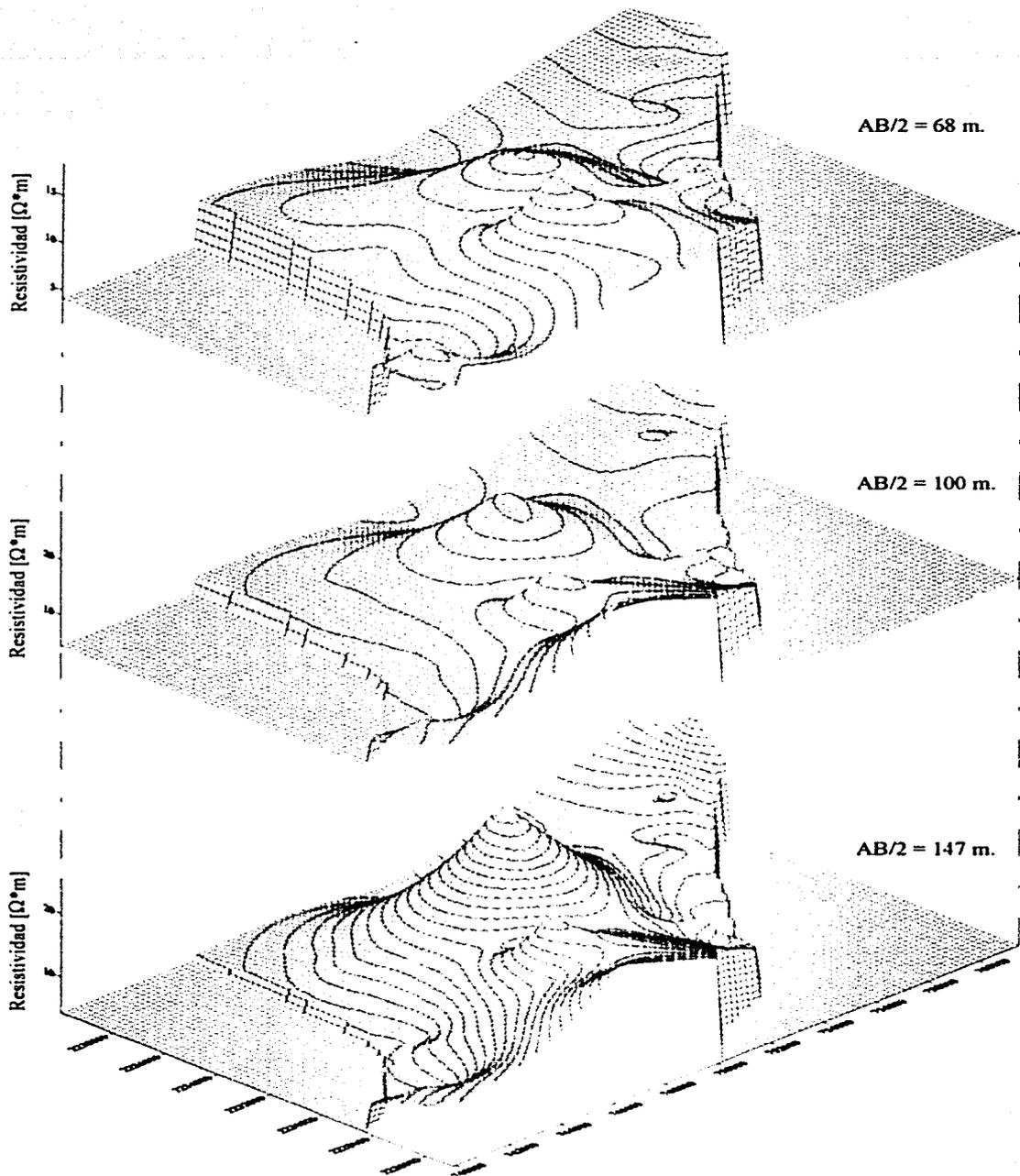


Figura IV-13. Mapas de Isorresistividad Aparente en perspectiva, para las aberturas en $AB/2$ igual a 68 m.; 100 m. y 147 m.

IV.3 Secciones Geoeléctricas.

Con los modelos obtenidos bajo el método del punto auxiliar, se utilizó el programa RESIXP Plus el cual hace uso del filtro de Anderson para la inversión de los modelos. Con la inversión se pretende maximizar la correlación que existe entre el modelo propuesto inicialmente y el modelo real que le corresponde a cada sondeo, además el Software permite realizar correcciones de manera manual en los valores obtenidos para obtener entonces un mejor ajuste. El error mínimo seleccionado para el ajuste de cada modelo obtenido fue menor de 10%. Para la creación de las Secciones Geoeléctricas se necesitó tener bien definidos los modelos de todos los sondeos que conformaron cada una de los perfiles en estudio, para así poder correlacionar las unidades que se definen en ellos, basándonos en las resistividades y en los espesores para establecer unidades Geoeléctricas similares. Las curvas obtenidas bajo el método de punto auxiliar presentaron incrementos y decrementos conforme al aumento en la profundidad para casi todos los sondeos, lo que originaba errores fuera del rango establecido en la primera aproximación según el programa, por lo que se tuvo que reinterpretar la parte final de las curvas y corregir de manera manual con nuevos valores estas últimas capas. Esto se llevó a cabo de la siguiente manera. Para tener un mejor ajuste se rastrearon los valores mínimos y máximos relativos que se presentaban al final de la curva, determinando de manera secuencial la posible correlación entre un sondeo determinado y el siguiente más próximo, siempre y cuando pertenecieran al mismo grupo de curvas, de manera tal que al final sólo se escogieron los que presentaban el ajuste al error y un modelo similar, para integrar así los perfiles correspondientes. Siete de los sondeos no cumplieron con la condición del error, debido a que los valores de las últimas capas presentaron contrastes resistivos que no se podían corregir, todos ellos eran del mismo grupo de curvas por lo que si se hizo uso de ellos para la interpretación e integración de las Secciones Geoeléctricas. Las discontinuidades en la resistividad aparente puede también asociarse al manejo del último empalme de la curva. En el Cuadro IV-1 se presenta el porcentaje de error para cada uno de los sondeos que integran las líneas.

LINEA 1	
Sondeos	% error
C1	9.07
C2	12.95
C3	12.11
C4	11.18
C5	7.19
C6	8.28
C7	8.80
C8	10.35
C9	6.95
C10	7.50
C11	3.78
C12	8.25

LINEA 2	
Sondeos	% error
Barajas	8.82
Chole	9.65
4 Esquinas	11.40
El fortin	8.82
Aeropuerto	8.83
Cumuatillo	6.35
Cienal	8.34
Retiro 1	7.55

LINEA 3	
Sondeos	% error
C13	8.63
C14	7.11
C15	6.20
C16	11.06
C17	4.99
C18	12.19
C19	8.93
C20	6.34
C21	5.81
C22	9.03

Cuadro VI-1 Porcentaje de error de los sondeos que integran cada una de las líneas.

La Línea 2 presentó el mejor ajuste en su interpretación y una gran similitud en todos los modelos que la conforman, fue ésta la que sirvió de patrón para la obtención de las otras líneas.

Para la integración de las Secciones Geoeléctricas se omitieron: Para la Línea 1 los sondeos C4; C5 y C7, de igual manera para la Línea 3 el sondeo C21 no se incluyó. Estos sondeos quizás tuvieron problemas durante su levantamiento ya que los modelos obtenidos no se relacionan con las tendencias de los obtenidos para la Línea 1 y 3. Las Secciones Geoeléctricas para las Líneas 1; 2 y 3 se pueden observar en las Figuras IV-14; IV-15 y IV-16 respectivamente.

La interpretación de las Secciones Geoeléctricas se llevó a cabo rastreando las inflexiones de los SEV's. Los valores obtenidos para cada capa pueden presentar valores que parecen no corresponder con esa misma capa en el sondeo contiguo. Por ejemplo, en el paquete número 7 de la Secciones Geoeléctrica para la Línea 1 (Figura IV-14), el modelo para el sondeo C1 presentó un valor de resistividad mayor a los $110 \Omega\text{-m}$, el cual parece no corresponder a dicho paquete, por lo que fue necesario localizar la capa en cuestión en la curva de resistividad aparente correspondiente al sondeo C1 (Figura IV-1a y IV-1b) y rastrearla según la morfología que esta presentó en los sondeos que conforman la línea, para establecer finalmente que la capa del modelo para el sondeo C1 si pertenece al paquete número 7. El valor de $110 \Omega\text{-m}$ se debe a que en el último empalme los valores de resistividad presenta un brusco incremento, esto refleja un ángulo mayor a 45° en la curva de resistividad aparente, por lo que este incremento solo puede ser modelado con un valor alto en la resistividad.

Línea 1.

En esta sección se detectaron doce paquetes; el primero de ellos es muy delgado y sólo se detectó en el sondeo C1 con un valor de $7.4 \Omega\text{-m}$ cuyo espesor fue de 0.7 m, el segundo paquete se detectó en los sondeos C1 y C9 con rangos resistivos de entre los $4.5 \Omega\text{-m}$ y los $10.2 \Omega\text{-m}$ con un espesor promedio de 1.34 m, el tercer paquete definido por los modelos se

hizo presente hasta el sondeo C10 con un espesor no mayor de 4.2 m y con resistividades del orden de los 6.8 $\Omega\cdot\text{m}$ y los 14.8 $\Omega\cdot\text{m}$. El cuarto paquete presenta un bajo contraste a lo largo de toda la línea con valores establecidos entre los 4.3 $\Omega\cdot\text{m}$, esto en el sondeo C6 y de 12.4 $\Omega\cdot\text{m}$ en el sondeo C11 y con espesores de 0.6 m y de 14.8 m obtenidos en los sondeo C1 y C12 respectivamente; para el quinto paquete resistivo los valores en la resistividad aparente son del rango de los 6.9 $\Omega\cdot\text{m}$ como máximo y de 1.6 $\Omega\cdot\text{m}$ como mínimo con espesores para éste de 0.67 m y de 11.8 m, cabe mencionar que este paquete se presentó a partir del sondeo C4, el sexto se presentó del sondeo C1 hasta el sondeo C8 donde se acuña con valores de 17.8 $\Omega\cdot\text{m}$ y de 15 $\Omega\cdot\text{m}$ con una variación en los espesores desde los 7.5 m hasta alcanzar los 42.3 m, el séptimo paquete presentó el valor de resistividad aparente más alto registrado en el modelo del sondeo C1 con una resistividad de 115 $\Omega\cdot\text{m}$ y de 10.3 m como mínimo, el contraste en espesores es muy marcado ya que se obtuvieron desde los 0.97 m hasta los 35.1 m, a partir del sondeo C3 se detectó el octavo paquete resistivo, el cual se acuña hacia el sondeo C2 con una variación en la resistividad desde los 2 $\Omega\cdot\text{m}$ hasta alcanzar 11.7 $\Omega\cdot\text{m}$ con un espesor mayor 28.7 m, esto en el sondeo C3, el noveno paquete se presentó como un lente y su valor fue de 0.54 $\Omega\cdot\text{m}$, para el décimo paquete se tuvieron valores de entre los 5.3 $\Omega\cdot\text{m}$ y los 24.9 $\Omega\cdot\text{m}$ con un espesor máximo de 106 m, los últimos dos paquetes se detectaron a partir del sondeo C8 con valores de entre 2.1 $\Omega\cdot\text{m}$ y los 5.5 $\Omega\cdot\text{m}$ y un espesor de 57.1 m como máximo para el paquete decimoprimeros; el sondeo C12 detectó el decimosegundo paquete con un valor de 8.6 $\Omega\cdot\text{m}$ y un espesor infinito según el modelo.

Línea 2.

La primera de capa se presentó a lo largo de la línea con valores muy uniformes siendo en Cumuatillo y Cienal donde se registraron los valores en la resistividad con un valor de 9 $\Omega\cdot\text{m}$ como mínimo y de 20 $\Omega\cdot\text{m}$ como máximo, con espesores de 0.25 m a 1.9 m, el segundo paquete manifestó valores entre 0.8 $\Omega\cdot\text{m}$ y 6.5 $\Omega\cdot\text{m}$ con un espesor máximo de 6.6 m y uno mínimo de 0.8 m, la subyace el tercer paquete con un rango en la resistividad de 7

$\Omega\cdot m$ hasta 173.4 $\Omega\cdot m$ con un espesor de 24.3 m y de 2.4 m obtenidos en los sondeos Barajas y Aeropuerto respectivamente. En el cuarto paquete se obtuvo un espesor de hasta 79.2 m y los valores de resistividad se presentaron del orden de los 0.9 $\Omega\cdot m$ y alcanzó un valor de 55.3 $\Omega\cdot m$, la variación de la resistividad del quinto paquete se manifestó entre los 17 $\Omega\cdot m$ y los 71.6 $\Omega\cdot m$ y los espesores variaron de los 19.8 m a los 56.4 m, el sexto paquete se presentó como una lente que apareció únicamente en los sondeos Barajas, Chole y 4 Esquinas con un valor no mayor de 0.87 $\Omega\cdot m$ y un espesor de 34.1 m, el séptimo paquete sólo se manifestó en el sondeo 4 Esquinas con un valor de 261.1 $\Omega\cdot m$ y un espesor de 25.7 m, la octava capa arrojó valores en la resistividad de 3 $\Omega\cdot m$ a 13.6 $\Omega\cdot m$ con espesores infinitos según los modelos que se obtuvieron para dicha línea. En el sondeo el Retiro1 se registraron el noveno y décimo paquetes con valores de 290 $\Omega\cdot m$ y 137.8 $\Omega\cdot m$ con espesores de 71.5 m e infinito respectivamente, el paquete decimoprimer sólo se detectó en los sondeos Aeropuerto y Cumuatillo, con un espesor máximo de 3.5 metros y con valores en la resistividad del orden de los 36.3 $\Omega\cdot m$ y los 173.4 $\Omega\cdot m$.

Línea 3.

Esta sección Geoeléctrica presentó un total de once paquetes resistivos el primero y segundo fueron detectados en el modelo del sondeo C13 con resistividades de 6.3 $\Omega\cdot m$ y de 1.5 $\Omega\cdot m$ con espesores de 0.5 m y 0.9 m para cada paquete respectivamente, el tercer paquete tuvo presencia a lo largo de toda la línea con una resistividad máxima y mínima del orden de los 38.7 $\Omega\cdot m$ y los 5 $\Omega\cdot m$ y con promedio de 0.95 m en su espesor, el bajo contraste resistivo del cuarto paquete manifestó valores en la resistividad desde los 3 $\Omega\cdot m$ a los 4.9 $\Omega\cdot m$, teniendo este mismo paquete una variación en espesores de 20.3 m a 1.1 m, para el quinto paquete se presentaron valores de 6.1 $\Omega\cdot m$ hasta alcanzar una resistividad de 29.4 $\Omega\cdot m$ los espesores obtenidos de los modelos presentaron para este paquete valores de 5 m y de 40.9 m, el sexto se registro a largo de la línea al igual que los dos anteriores presentando, el cual tuvo rangos en la resistividad de 2.8 $\Omega\cdot m$ hasta los 11.2 $\Omega\cdot m$ teniendo

un espesor de 104.7 m y de 15.1 m en los modelos de los sondeos C16 y C19 respectivamente. El séptimo y octavo paquetes se presentaron como lentes, para el séptimo, el cual apareció sólo en los sondeos C13, C14 y C15 tuvo valores de 11.29 y de 16.4 $\Omega\cdot\text{m}$ y un espesor máximo de 31.8 m, en el caso del octavo paquete, éste se manifestó como el último valor del modelo obtenido para el sondeo C15 con una resistividad de 5.2 $\Omega\cdot\text{m}$ y un espesor infinito, el noveno paquete apareció desde el sondeo C16 con 11.1 $\Omega\cdot\text{m}$ como mínimo y 26.2 $\Omega\cdot\text{m}$ como máximo en los valores de resistividad aparente el mayor espesor se registro en el sondeo C21 y fue de 106.4 m, en el décimo se obtuvieron resistividades de 3 $\Omega\cdot\text{m}$ y de 7.3 $\Omega\cdot\text{m}$ los espesores para este fueron infinitos según los modelos de los sondeos que conforman esta línea, el paquete decimoprimeró sólo se detectó en el sondeo C20 con una resistividad de 26.2 $\Omega\cdot\text{m}$.

Sección Geoeléctrica, Línea 1

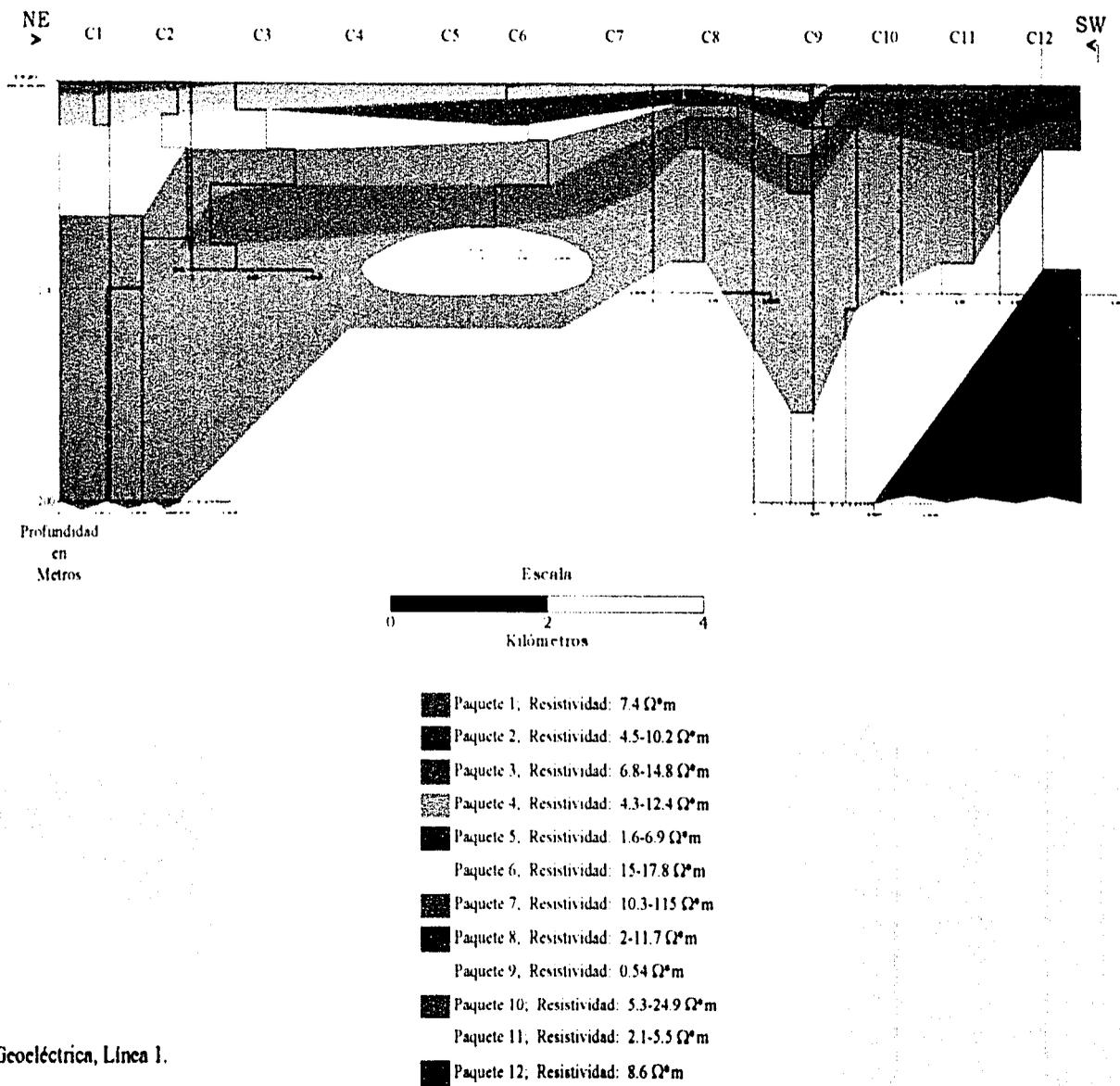


Figura IV-14. Sección Geoeléctrica, Línea 1.

Sección Geoeléctrica, Línea 2

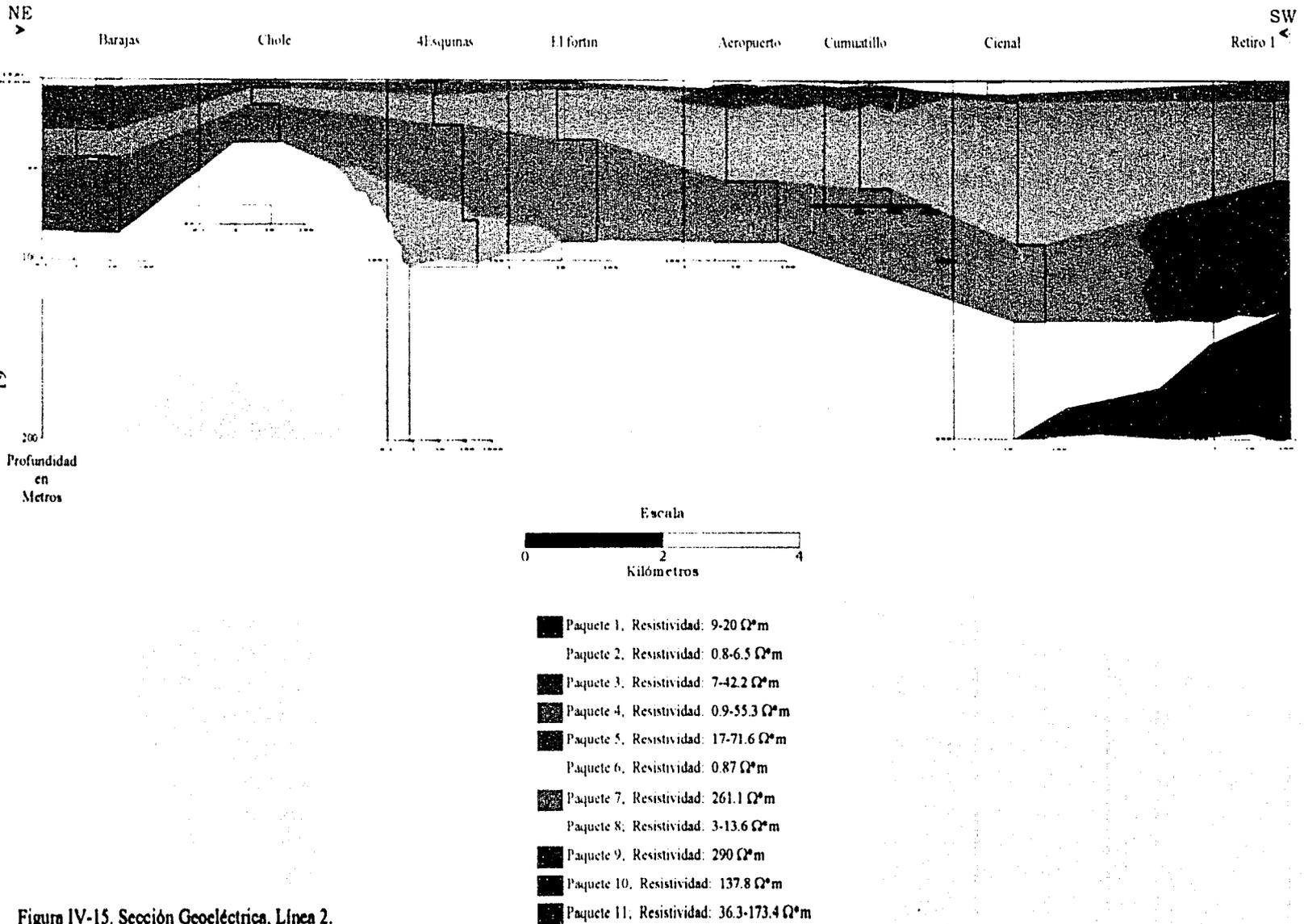
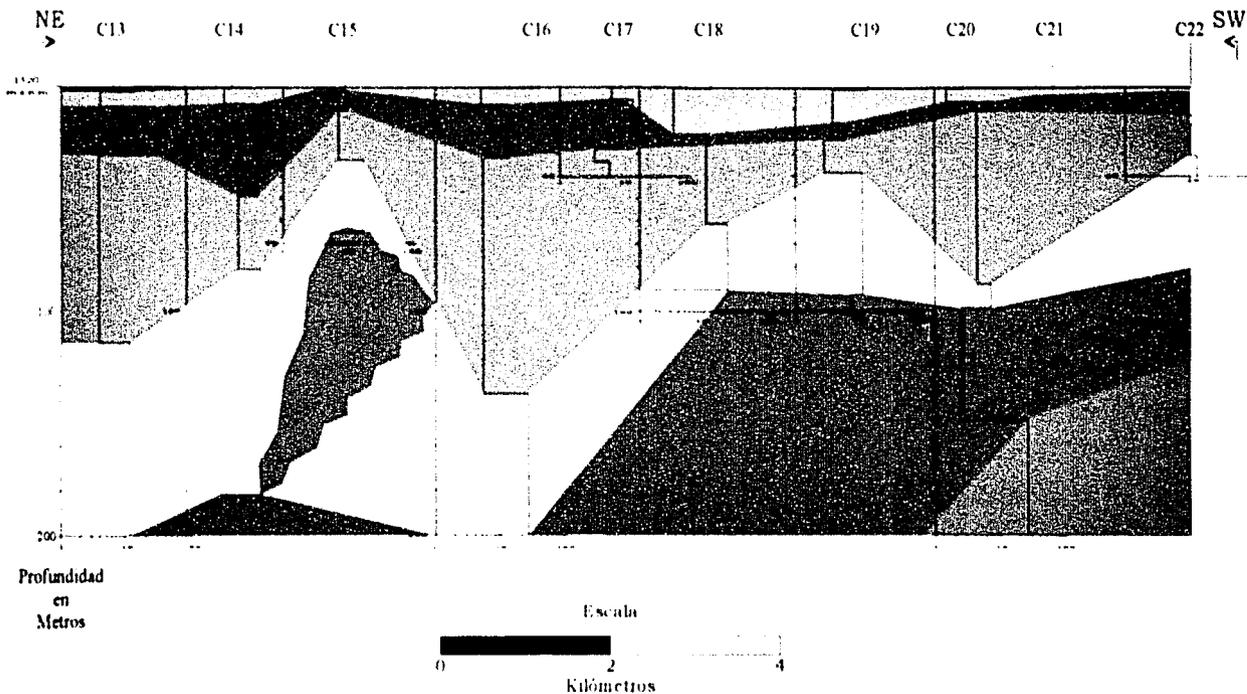


Figura IV-15. Sección Geoeléctrica, Línea 2.

Sección Geoeléctrica, Línea 3



- Paquete 1, Resistividad: $6.3 \Omega^*m$
- Paquete 2, Resistividad: $1.5 \Omega^*m$
- Paquete 3, Resistividad: $5-38.7 \Omega^*m$
- Paquete 4, Resistividad: $3-4.9 \Omega^*m$
- Paquete 5, Resistividad: $6.1-29.4 \Omega^*m$
- Paquete 6, Resistividad: $2.8-11.2 \Omega^*m$
- Paquete 7, Resistividad: $11.29-16.4 \Omega^*m$
- Paquete 8, Resistividad: $5.2 \Omega^*m$
- Paquete 9, Resistividad: $11.1-26.2 \Omega^*m$
- Paquete 10, Resistividad: $3-7.3 \Omega^*m$
- Paquete 11, Resistividad: $26.2 \Omega^*m$

Figura IV-16. Sección Geoeléctrica, Línea 3.

IV.4 Secciones Geológicas.

Para los tres perfiles, se generaron las Secciones Geológicas, partiendo de la correspondencia entre las unidades geoelectricas establecida en las Secciones Geoelectricas y también partiendo de la relación obtenida por el método de Kosinski y Kelly, la cual arroja valores modificados de la resistividad y en los espesores, según el ajuste que se tenga a la recta. Como es bien sabido existe una estrecha relación entre espesores y resistividad en la respuesta geoelectrica de un medio. Mediante el método de Kosinski y Kelly y con la información de campo del pozo Mw12 el cual se encuentra cerca del sondeo denominado Cienal, fue posible mejorar la interpretación para la Línea 2, una vez identificada la capa de arena (quinto paquete geoelectrico), para lograrlo se incorporaron nuevos valores en el espesor del sondeo Cienal en la relación de Kosinski y Kelly. Dicho sondeo arrojó un error de 8.34% en su primera aproximación. En el ajuste a la recta convenia disminuir el espesor de 43.6 a 35.2 m para el sondeo Cienal, esta asignación mejoró la relación lineal y a su vez disminuyó el error a 6.35% para el sondeo, mejorando el ajuste entre el modelo teórico y el de campo. Esto se logró fijando la resistividad en el modelo sintético y dejando variar gradualmente el espesor. Definiéndose un total de siete materiales diferentes que corresponden con arena, arcilla, areno-arcilloso, arcillo-arenoso, andesita fracturada; arena compacta y una formación no identificada pero que se pudiera asociar a las arenas con un mayor grado de compactación

El pozo Mw12 está adorado únicamente en un paquete arenoso (ya que durante su perforación extraia arena). Se le conoce como pozo "arenoso" (Silva, com. per.). Esta capa es la única que se puede identificar geológicamente con seguridad y corresponden al acuífero en explotación.

En la sección Geológica correspondiente a la Línea 1 se presentan cinco de los siete tipos de materiales. Las diferentes capas que conforman esta línea se adelgazan y acúan hacia la Sierra de Pajacuarán (parte SW de la sección Geológica) y se ensanchan hacia el Río Lerma (parte NE de la sección Geológica). La sección correspondiente a la Línea 2 presentó los

siete materiales, en la parte SW de la sección Geológica presenta una ligera disminución en el espesor de las capas superiores, las cuales se acúan hacia el sondeo Retiro 1. En la sección Geológica para la Línea 3 se presentaron los siete materiales establecidos.

Para las secciones de las Líneas 1 y 3 se presentó como el último material detectado, una capa de material arcillo-arenoso, que no aparece en la Línea 2, ya que el último que en ésta se detecta es un material areno-arcilloso, el cual se encuentra presente en las Líneas 1 y 3, por encima del material arcillo-arenoso que se consideró como último en ambas secciones. La arcilla se detectó en las tres líneas, presentándose como en lente delgado en la Línea 1 y en la Línea 3 presentó su mayor espesor, con una dirección NW en su distribución. El *material no identificado (?)* no se detectó en la Línea 1. La arena se presentó como una capa delgada en la secciones de la Línea 1 y en la Línea 3, no así en la Línea 2. Esto se muestra en la Figura IV-17; 18 y 19.

En la Figura IV-20 se presentan en perspectiva los límites superior e inferior de la capa de arena.

Sección Geológica, Línea I

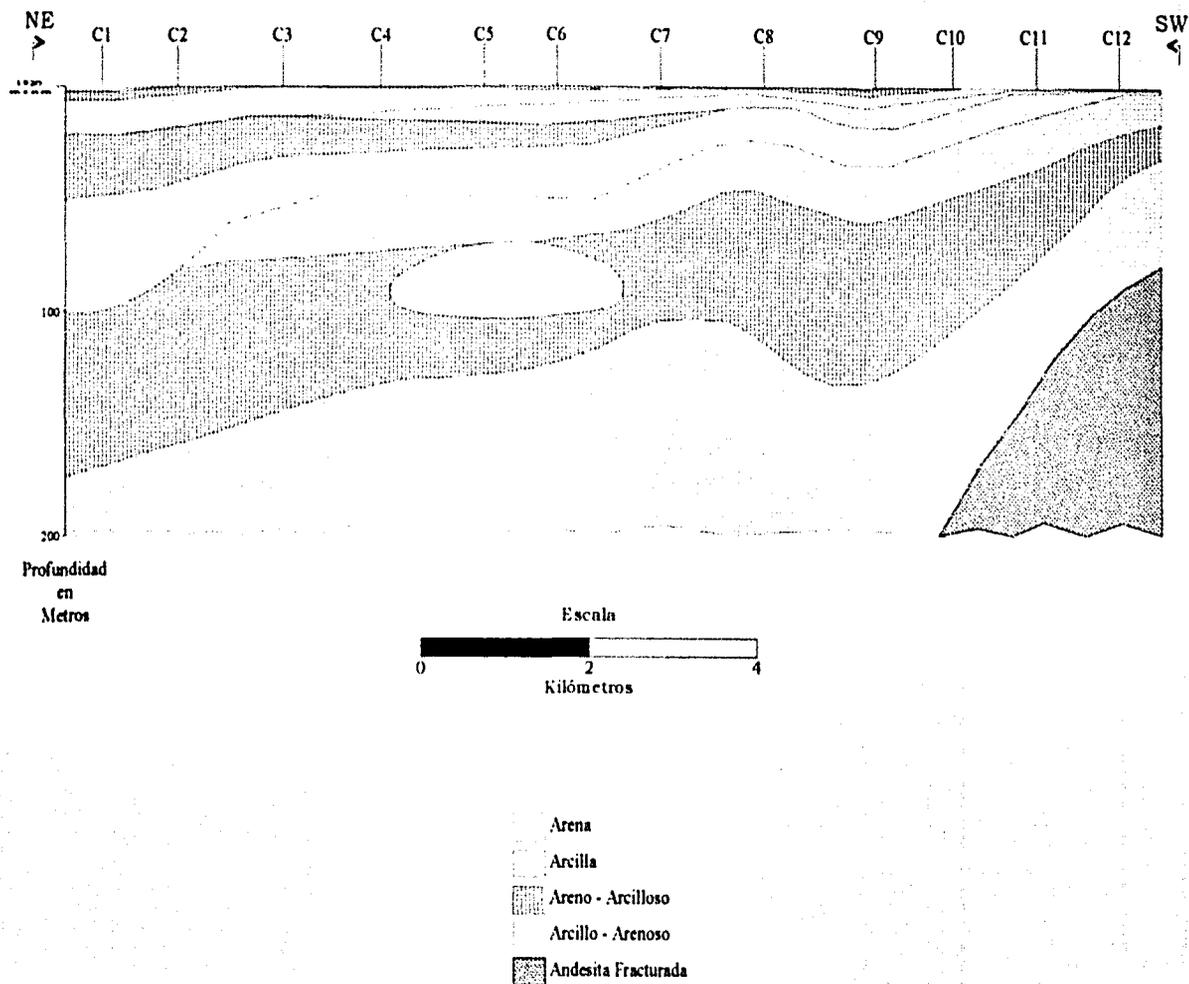
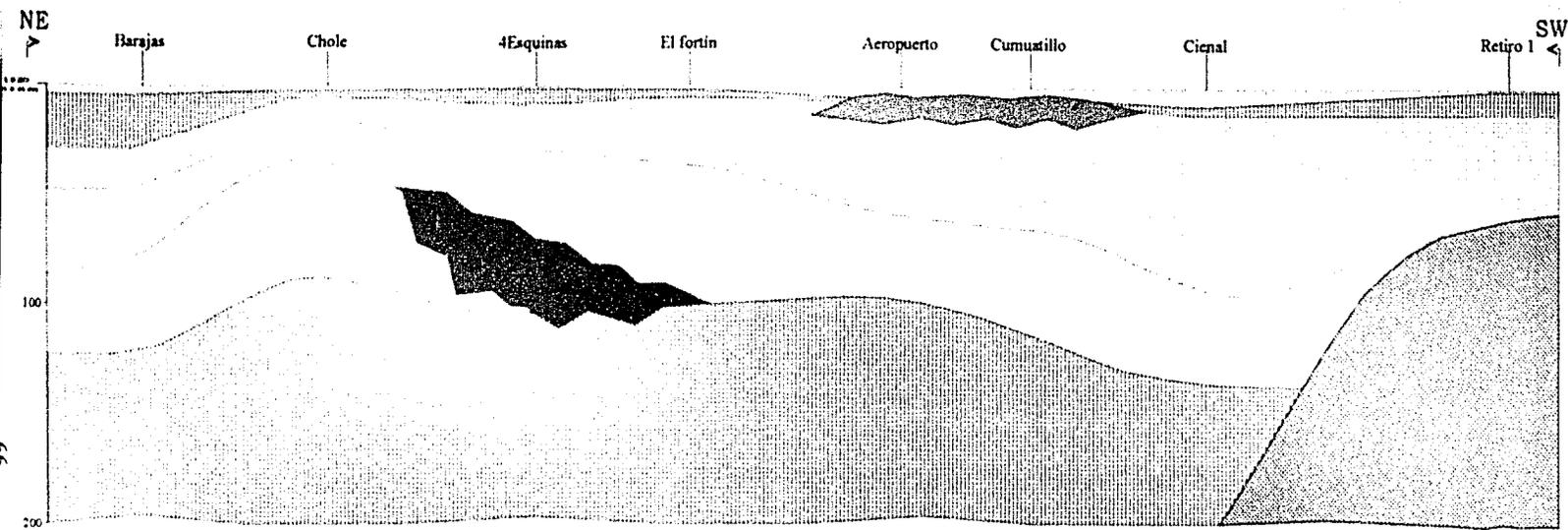
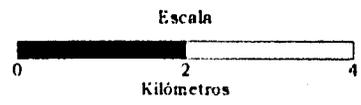


Figura IV-17. Sección Geológica, Línea I.

Sección Geológica, Línea 2



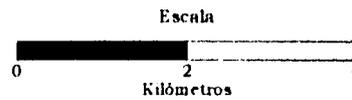
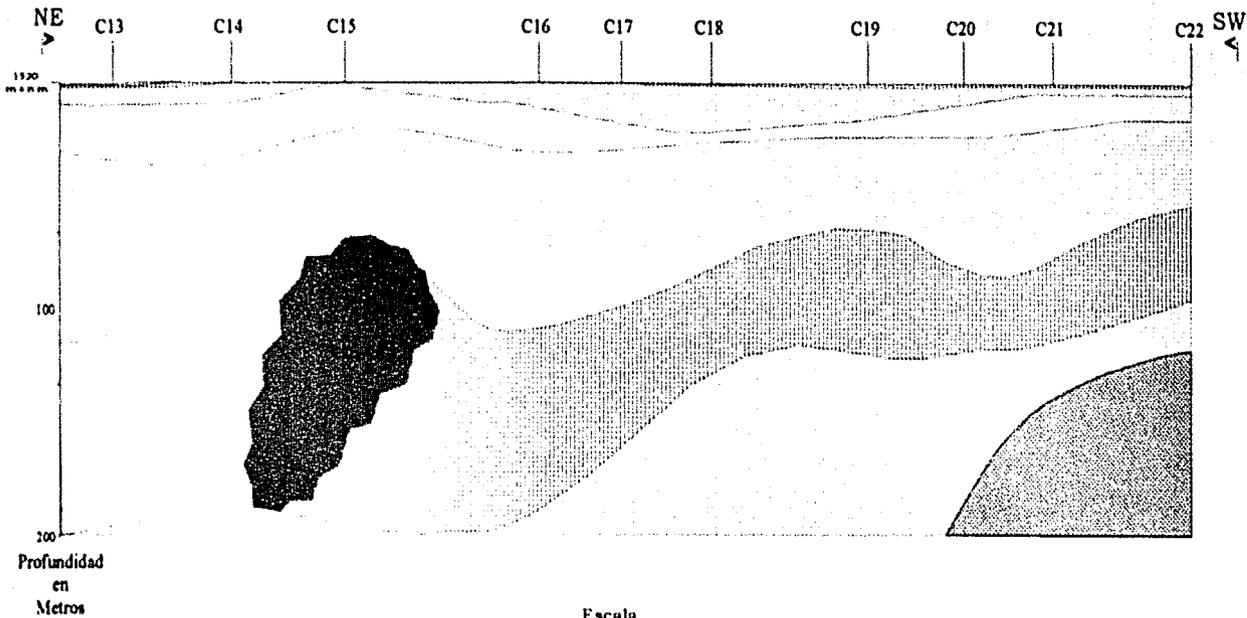
Profundidad en Metros



-  Arena Compacta
-  Arena
-  Arcillo - Arenoso
-  Arcilla
-  *material no identificado (?)*
-  Areno - Arcilloso
-  Andesitas Fracturada

Figura IV-18. Sección Geológica, Línea 2.

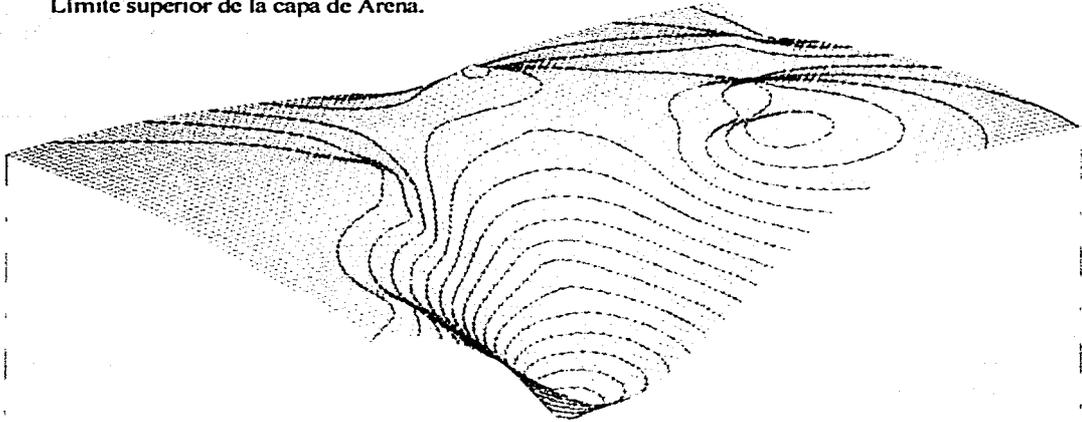
Sección Geológica, Línea 3



- Arena
- Arcillo - Arenoso
- Arcilla
- material no identificado (?)
- Areno - Arcilloso
- Andesitas Fracturada

Figura IV-19. Sección Geológica, Línea 3.

Límite superior de la capa de Arena.



Límite inferior de la capa de Arena.

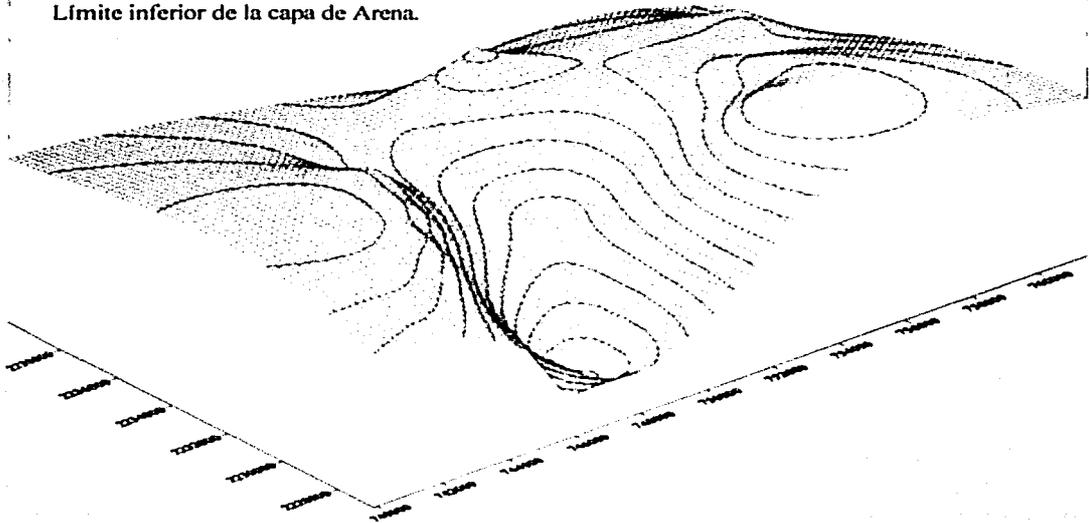


Figura IV-20. Límites de la capa de Arena.

V. CONCLUSIONES.

En la zona de estudio se han realizado, más de 100 SEV's. Todos ellos mediante el dispositivo Schlumberger. Se seleccionaron 58 de ellos para el procesamiento, al final se agruparon sólo 30 SEV's en tres perfiles, debido a que en algunos sitios se tenían sondeos realizados prácticamente en el mismo lugar dando como resultado modelos geoelectricos similares. Otros quedaron fuera del área de estudio.

Como podrá observarse en las curvas de campo la mayoría de los SEV's presentan bajos contrastes resistivos, éstos se fueron rastreando a lo largo de todos los sondeos en las inflexiones comunes en todas las curvas lo cual facilitó el proceso de interpretación.

La integración de pseudosecciones de Isorresistividad Aparente ya indicaba que difícilmente se trataba de un medio estratificado. La distribución en la resistividad se simplifica al analizar de manera conjunta los mapas de Isorresistividad Aparente para las aberturas en AB_2 seleccionadas, en las zonas con anomalías en la distribución de la resistividad, los esquemas tridimensionales 3D de las formaciones detectadas y los modelos geoelectricos las reflejan también. Esta visión de conjunto también permite ir integrando en un sólo perfil geoelectrico los modelos individuales de los SEV's. Esto facilitó el poder identificar depresiones aparentes como la encontrada en el sondeo C9 de la Línea 1, así como "promontorios" como el presentado en el sondeo C18 de la Línea 3.

La diferenciación de cada uno de los 12 paquetes resistivos identificados, en donde algunos de ellos presentan rangos resistivos muy similares, por ejemplo el paquete 2 y el paquete 4 de la Línea 1 cuyos valores se determinaron entre los 4.3 y los 12.4 $\Omega \cdot m$ parecieran no justificarse. Sin embargo, cada uno de ellos se rastreó a lo largo de todos los sondeos integrantes de esta Línea en mínimos o máximos relativos. Como se podrá ver en los modelos geológicos varios de estos paquetes fueron asociados al mismo tipo de material, por ejemplo el paquete 6 y 10 de la sección geoelectrica para la Línea 1 finalmente correspondieron con material areno-arcilloso en la sección geológica de la misma. En las

Secciones Geológicas puede apreciarse que los 12 paquetes resistivos se reducen en un total de 7 paquetes geológicos.

La ausencia de cortes litológicos en la zona se debe a que los perforistas no tienen la preparación para poder diferenciar los estratos en el subsuelo de la ciénega. Sin embargo la información obtenida del pozo "arenero" identificado como Mw12 proporcionó valiosa información en el proceso de interpretación ya que permitió identificar claramente la capa de arena en la Línea 2 (se colocó ademe ranurado únicamente en la zona productora), la cual sirvió como punto de partida para la identificación geológica en las Líneas 1 y 3.

El paso del modelo geoelectrico al geológico fue posible debido a los reajustes en resistividad que se hicieron mediante la relación obtenida por el método de Kosinski, ya que ésta permite obtener valores en la resistividad que mejoran el ajuste entre el modelo teórico y el de campo. Para este estudio con los valores determinados se obtuvo una expresión para Kosinski que difiere de la obtenida por Silva para esta zona. La regresión lineal obtenida resultó tener el mejor factor de correlación para los seis valores. Se intentaron otro tipo de regresiones pero los factores de correlación resultaron menores.

La expresión de Kosinski está siendo verificada con la realización de determinaciones de permeabilidad *in situ* en donde se está obteniendo valores para la conductividad hidráulica (K) muy cercanos a los determinados por Kosinski. Esto permite derivar valores de resistividad para esas mismas formaciones, lo mismo se siguió con los espesores, los cuales permitieron modificar los valores de los modelos obtenidos mediante RESIXP Plus. El factor de correlación permite suponer que la expresión sí corresponde a la formación acuífera definida también por Geofísica.

El sistema de fallas que prevalece en la zona ha facilitado la incorporación de flujos regionales termales, algunos de ellos mineralizados. El origen lacustre de los sedimentos seguramente ha dado lugar a zonas con mayor abundancia en materia orgánica y ésta a su vez también a flujos mineralizados. Se han reportado localmente pozos con sólidos disueltos totales (sdt) mayor a 1000 mg/L. Esta mineralización en el agua se traduce en un incremento en la conductividad eléctrica, lo cual imposibilita obtener una excelente

caracterización de un estrato de baja resistividad. En la ciénega se llegaron a identificar paquetes con $0.54 \Omega\text{-m}$ los cuales fueron asociados con arcilla que seguramente también alberga lentes de agua mineralizada (aguas fósiles?) como fue el caso del paquete 9 de la Línea 1.

El presente trabajo puede ser mejorado de manera considerable si se cuenta con el apoyo de cortes litológicos de pozos, ya que esto permitiría establecer la composición y morfología del subsuelo de manera más sencilla y confiable, correlacionando así la respuesta obtenida por los SEV's y la geología determinada en los cortes.

Ya que los valores para la conductividad hidráulica fueron obtenidos con pruebas de bombeo de corta duración, los valores para la misma se podrían mejorar sustancialmente, si se contarán con prueba de bombeo de larga duración, lo que se traduce en un mejor valor en la conductividad hidráulica y por consiguiente una mejor aproximación en los valores de resistividad y espesores obtenidos por el método de Kosinski. Mejorando a su vez la interpretación de los modelos geoelectrónicos.

BIBLIOGRAFÍA.

Astier, J. L., 1975, *Geofísica aplicada a la hidrogeología*, trad. Angel Río, Paraninfo, Madrid.

CNA, 1997. *Censo de pozos profundos de la Ciénega de Chapala*, Distrito de riego No. 24.

COMAPA, 1996, *Expedientes de pozos profundos: Cotijarán, Tzindio y el Aguate*.

Delgado, H. y Urrutia, F. J., 1986, *Estructura del Graben de Chapala*, Comunicaciones Técnicas del Instituto de Geofísica, UNAM, Serie Investigación, No. 32.

Delgado, H., Suárez, C. y Valdivia, L., 1994, *Análisis Geomorfológico de Tres Estaciones: Región Chapala, Sierra la Primavera y Complejo Volcánico del Tequila*. En el Libro guía para la excursión de la tercera reunión nacional de geomorfología. Guadalajara, Jalisco, Mayo 17-21.

Fetter, C. W., 1994, *Applied Hydrogeology*, 3ª ed., Prentice Hall, United States of America.

Garduño-Monroy, V. H., Spinnler, J., Ceragioli, E., 1993, *Geological and Structural Study of the Chapala Rift*, State of Jalisco, México, *Geofísica Internacional*, Vol. 32, No. 3.

Kazman, R. G., 1972, *Modern Hydrology*, 2ª ed., Haper & Row, United States of America.

Keller, G. V., Frischknecht, F., 1979, *Electrical Methods in Geophysical Prospecting (Internacional Series in Electromagnetic Waves)*, Vol 10, Pergamon Press, Great Britain.

Koefoed, O., 1979, *Geosounding Principles. 1 (Resistivity Sounding Measurements)*, Elsevier Science Publishing Company Inc., Netherlands. *Methods in Geochemistry and Geophysics*, 14A

Kosinski, W., Kelly, W. E., 1981, *Geoelectric Sounding for Predicting Aquifer Properties, Groundwater*, Vol. 19, No. 2.

Orellana, E., 1982, *Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua*, Paraninfo, Madrid.

Orellana, E., Mooney, H. M., 1966, *Master tables and curves for vertical electrical sounding over layered structures*, Interciencia, Madrid.

Ponzini, G., Astraman, A., Miliniari, M., 1981, *Empirical relation between electrical transverse resistance and hydraulic transmissivity*. *Geoexploration* 22.

Rosas, J. G., 1991, *Una Cuenca Tensional. El Graben de Chapala y Paleomagnetismo de su Porción Oriental*. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Silva, T., 2001, *Estudio Hidrológico y Geoeléctrico del Sistema Acuífero de la Ciénega de Chapala Mich enfocado a una Gestión Sustentable*, Tesis Doctoral, Posgrado en Ciencias de la Tierra (Aguas Subterráneas), UNAM, México, (en proceso).

Silva, T., Rodríguez, R., Ochoa, S. y López, S., 2002. *Lago y Ciénega de Chapala Evidencias Químicas de su Comunicación hidráulica*, *Geofísica Internacional*, Vol. 41, No. 1.

Sir Niwas., Singhal, D. C., 1981, *Estimation of aquifer transmissivity from Dar-Zarrouk parameters in porous medium*, *Journal of Hidrology* 50.