

29
2

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



INVESTIGACION GEOELECTRICA DEL SISTEMA
ACUIFERO DEL SUR DEL VALLE DEL RIO
TURBIO GTO.

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO GEOFISICO
P R E S E N T A :
DAVID REY ALATRISTE VILCHIS



MEXICO, D.F.

1989



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

CONTENIDO

1. INTRODUCCION
2. GENERALIDADES
 - 2.1 Antecedentes
 - 2.2 Localización
 - 2.3 Vías de Comunicación
 - 2.4 Clima y Vegetación
 - 2.5 Hidrología
 - 2.6 Actividad Económica
3. MARCO GEOLOGICO
 - 3.1 Fisiografía
 - 3.2 Estratigrafía
 - 3.3 Geología Estructural
 - 3.4 Geología Histórica
 - 3.5 Geología Económica
4. METODOS ELECTRICOS
 - PARTE A. FUNDAMENTOS FISICOS
 - 4.1 Ecuaciones Fundamentales
 - 4.2 Dispositivo Electrodo
 - 4.3 Medio Estratificado
 - PARTE B. CONDUCTIVIDAD ELECTROLITICA
5. PROCESO DE INTERPRETACION GEOELECTRICA
 - 5.1 Interpretación de la Curva de Resistividad Aparente
 - 5.2 Análisis de los Mapas de Isorresistividad
 - 5.3 Perfiles Geoelectricos
6. MODELO FUNCIONAL
 - 6.1 Introducción
 - 6.2 Secciones isométricas
 - 6.3 Correlación Hidrogeoquímica
7. DISCUSION DE RESULTADOS
8. BIBLIOGRAFIA

LISTA DE FIGURAS

- 2.1 Ubicación del Estado de Guanajuato
- 2.2 Mapa de Localización

- 3.1 Mapa Geológico
- 3.2 Cortes Litológicos de Pozos
- 3.3 Cortes Litológicos de Pozos

- 4.1 Dispositivo Electrónico Schlumberger
- 4.2 Medio Estratificado
- 4.3 Variación de la Resistividad con el contenido de NaCl
- 4.4 Variación de la Conductividad con el contenido de STD
- 4.5 Muestra Esquemática de una Baza Porosa

- 5.1a Mapa de Isorresistividad Aparente $AB/2=50$
- 5.1b Mapa de Isorresistividad Aparente $AB/2=100$
- 5.1c Mapa de Isorresistividad Aparente $AB/2=200$
- 5.1d Mapa de Isorresistividad Aparente $AB/2=400$
- 5.2 Perfil de Isorresistividad Aparente 1
- 5.3 Perfil Geoelectrico 1
- 5.4 Perfil de Isorresistividad Aparente 2
- 5.5 Perfil Geoelectrico 2
- 5.6 Perfil de Isorresistividad Aparente 3
- 5.7 Perfil Geoelectrico 3
- 5.8 Perfil de Isorresistividad Aparente 4
- 5.9 Perfil Geoelectrico 4
- 5.10 Perfil de Isorresistividad Aparente 5
- 5.11 Perfil Geoelectrico 5
- 5.12 Perfil de Isorresistividad Aparente 6
- 5.13 Perfil Geoelectrico 6

- 6.1 Sección Isométrica 2-3-6
- 6.2 Sección Isométrica 4-5-3-6
- 6.3 Zona de mayor concentración de STD, Cl y Cr
- 6.4 Distribución de lixiviado por flujo regional
- 6.5 Distribución de lixiviado por flujo vertical

1. INTRODUCCION

El presente estudio tiene la finalidad de describir el comportamiento geoelectrico del sistema acuífero del sur del valle del río Turbio en León, Guanajuato. Esto se hace dada las condiciones y características de esta región ya que es de este sistema de donde se abastece de agua a las ciudades de León y San Francisco del Rincón. Lo anterior es importante debido a las condiciones geohidrológicas de la región y los ritmos de explotación que se presentan en toda la zona.

Para efectuar lo anterior se procedió a realizar una revisión de la información disponible sobre la zona, incluyendo informes, cortes litológicos de pozos y reportes técnicos de la SARH y del Instituto de Geofísica de la UNAM (IGF). De ahí se propuso la reinterpretación de una serie de sondeos eléctricos verticales realizados entre 1981 y 1988, además de una correlación geológica e hidrogeoquímica de la zona de estudio.

Con base en esa integración se propone una serie de resultados que nos indican el posible comportamiento del sistema acuífero.

Desde el punto de vista Geofísico, pienso que la hidrogeología representa un campo de acción más, siendo también muy completo dado que requiere de la aplicación de los conocimientos, técnicas y métodos aprendidos durante el transcurso de la carrera, con el objeto de compenetrarlos dentro de un campo sumamente complejo en el cual se presenta una gran

variedad de problemas y opciones para un caso en particular.

El haber realizado el presente estudio, me dió la oportunidad de desarrollar y poner a prueba los conocimientos y capacidades adquiridas durante mi formación profesional como Ingeniero Geofísico. Espero que este trabajo pueda servir, de alguna manera, para que las próximas generaciones de geofísicos encuentren en la hidrogeología una opción más para el desarrollo de la Ingeniería Geofísica.

2. GENERALIDAD.

2.1 Antecedentes.

En la zona de estudio se han realizado estudios previos desde 1969. Apartir de 1969 y 1970 la Subdirección de Geología de la Dirección General de Estudios de la S.A.R.H. realizó, entre otros, estudios fotogeológicos para reconocimientos generales.

En 1982 se realizó una interpretación geohidrológica con reconocimientos de campo.

En 1988 la Dirección General de Administración y Control de Sistemas Hidrológicos de la S.A.R.H. realizó el más reciente estudio Geofísico-Geohidrológico de la zona, apoyado en levantamientos geoelectríficos, geológicos e hidrogeológicos de campo.

2.2 Localización

El estado de Guanajuato se localiza entre los $19^{\circ}55'08''$ y $21^{\circ}52'09''$ de latitud norte y los $99^{\circ}39'06''$ y $102^{\circ}05'07''$ de longitud oeste, como se muestra en la figura 2.1. En tanto que el área de estudio, figura 2.2, se situa entre las coordenadas $20^{\circ}37'$ y $21^{\circ}09'$ de latitud norte y entre los $101^{\circ}37'$ y $101^{\circ}57'$ de longitud oeste. Abarca desde la parte sur de San Francisco del Rincón hasta la parte sur de León, incluyendo las poblaciones de San Roque de Torres, San Cristóbal, Los Ramírez, Plan de Ayala y San Juan de Abajo entre otras.

El estado de Guanajuato limita al norte con Zacatecas y San Luis Potosí; al sur con Michoacán; al este con Querétaro y al oeste con Jalisco. Cuenta con una superficie de 30471.06 Km^2 . El

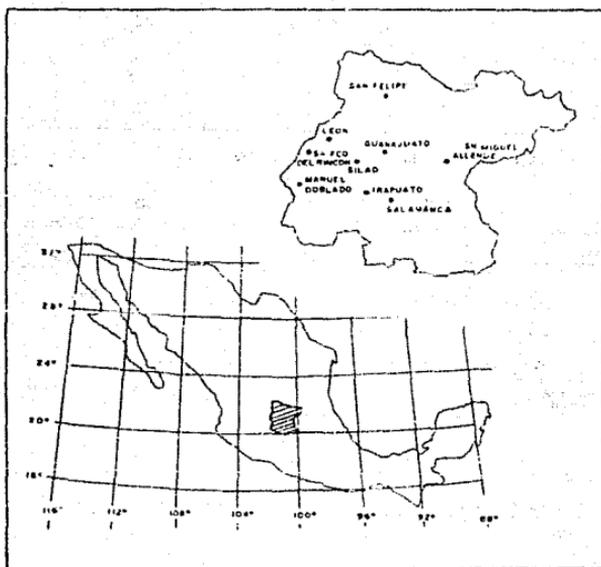
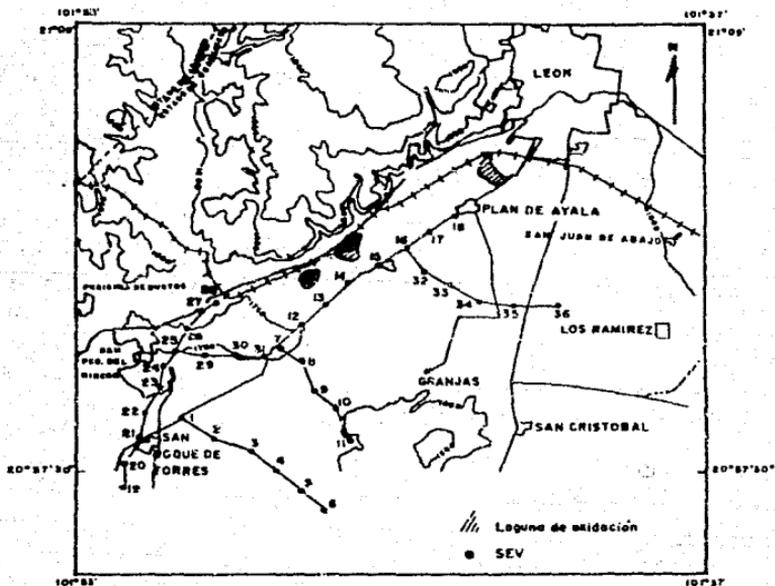


Figura 2.1 Localización de la Zona de Estudio.

estado se divide en 46 municipios de los cuales León es uno de los más importantes.

La ciudad de León cuenta con 634718 habitantes, según estimaciones hechas por el INEGI, siendo la más poblada de todo el estado y donde se encuentran la mayoría de las industrias más importantes de la entidad, entre las que destaca la industria del cuero que es la base de la industria del calzado.



2.3 Vías de Comunicación

El estado de Guanajuato cuenta con una importante red de carreteras que tiene una longitud de 5130 Km, entre carreteras estatales y federales.

La red interna estatal de carreteras tiene una conexión muy importante con las carreteras nacionales que cruzan el estado, como son las de México-Piedras Negras, México-Guadalajara y México-Ciudad Juárez.

La ciudad de León se comunica por carretera con San Francisco del Rincón, Silao, San Felipe, Gto. y con Lagos de Moreno, Jalisco.

El estado de Guanajuato cuenta también con 7 aeropuertos. El aeropuerto de San Carlos, cerca de León, pertenece al sistema aeroportuario nacional ya que tiene capacidad para la operación de aeronaves de mediano alcance. Los otros 6 están clasificados como aeropiistas.

2.4. Clima y Vegetación

En el estado se presentan tres tipos principales de clima según la clasificación de climas de Koppen:

a) Clima Escabeco (Bs): se le denomina también seco estepario y se caracteriza porque la evaporación es mayor que la precipitación; está asociado a vegetación de tipo matorral desértico. Ocupa el 40% de la superficie del estado.

b) Clima Templado (C): en general este clima es de temperaturas intermedias. La vegetación es del tipo bosque de encino y/o pino, chaparral y pastos. Cubre un 20% de la superficie.

c) Clima Semicálido (A): es el más cálido de los tres tipos, sus rangos de temperatura oscilan entre los 18° y 22°C y se encuentra vegetación de matorrales subtropicales, chaparral y pastos. Ocupa el 40% de la superficie de la entidad.

En la región de León y zonas circundantes el clima es semiseco a semicálido con lluvia media anual entre 600 y 700 mm. La temperatura media anual está entre 18° y 20°C. La precipitación tiene su máxima incidencia en el mes de agosto con un rango de 150 a 160 mm., la mínima se da en marzo y es menor a 10 mm. La temperatura máxima se registra en mayo con valor de 23° a 24°C y las temperaturas mínimas ocurren en diciembre y enero con 15° y 16°C.

2.5 Hidrología

2.5.1 Aguas Superficiales

La zona de estudio se localiza dentro de la región hidrológica "Lerma - Chapala - Santiago", en especial dentro de la cuenca Río Lerma - Salamanca conocida como región hidrológica No. 12-B.

En esta cuenca drena una superficie de 10,391.6 Km². Tiene su origen en la presa Solís y forma la bifurcación del Lerma. También comprende los afluentes del centro del estado como el Salamanca - Río Angulo, Arroyo Temascatio y el río Guanajuato-Silao. Se encuentran las presas de La Purísima con capacidad de 195,700,000 m³ y la presa La Gavia con capacidad de 150,500,00 m³ que se usa para el control de las avenidas.

Además recibe las aguas del Río Turbio-Presa Palote, Río

Turbio - Manuel Doblado, donde se origina el cauce del Rio Turbio y Rio Turbio - Corralejo.

En esa área, el rio Lerma recibe la corriente del Arroyo Feo que conduce aguas residuales e industriales de la zona urbana de Salamanca y de la refinería de PEMEX.

En las cercanías de Irapuato, el rio Lerma recibe aguas residuales del rio Guanajuato provenientes de la ciudad con un grado de contaminación mayor que las provenientes de las minas de la localidad.

Finalmente se tiene la afluencia del rio Turbio que lleva un gran porcentaje de contaminación proveniente del rio Los Gómez. Este rio tiene el mayor índice de contaminación del estado y lleva los residuos de las industrias químicas y de tenería de la ciudad de León, además de las aguas residuales de la misma.

2.5.2 Aguas Subterráneas

Sus condiciones geohidrológicas son buenas, explotándose acuíferos formados por piroclásticos basálticos y sedimentarios terciarios de gran espesor que reciben recarga de los ríos Lerma y Turbio.

En la porción centro entre León y Silao se encuentran rocas metamórficas, sedimentarias marinas y rocas intrusivas que por su porosidad y permeabilidad secundaria, presentan condiciones favorables para la formación de acuíferos subterráneos.

Se calcula que en todo el estado existen alrededor de 10 mil pozos que proporcionan gastos promedio mínimo de 10 lps, medio de 30 lps y máximo de 125 lps con profundidades variables de 9 a 430

metros.

Las condiciones de explotación que prevalecen en la zona son variadas, presentándose algunas como León, en donde los acuíferos son sometidos a sobreexplotación, que está minando gradualmente el almacenamiento subterráneo.

Desde 1976 la SARH implemento zonas de veda rígida en León y parcialmente en San Francisco del Rincón, en las que se recomienda no incrementar la explotación para ningún fin o uso por sobreexplotación del acuífero. Además una veda intermedia en San Francisco en la que se recomienda no incrementar la explotación con fines agrícolas, reservándose para satisfacer demandas futuras de agua potable en centros de población.

Una idea del exceso de explotación lo dan las siguientes cifras: La recarga anual en el estado de Guanajuato es de 450 millones de m^3 confirmados y 450 millones de m^3 estimados; mientras que la extracción anual es de 1027 millones de m^3 confirmados y 574 millones de m^3 estimados.

2.6 Actividad Económica

Las principales ramas de actividad en el estado son la agricultura, ganadería, minería y la prestación de servicios. Las actividades agropecuarias son la principal fuente de ingresos de la población en la región del Bajío, en donde se conjugan la existencia de suelos óptimos y la presencia de una amplia red de pozos y canales de riego, que proliferan de manera alarmante dada la situación hidrogeológica de la zona con escasas fuentes de recarga. El desarrollo de la ganadería es importante en todas las

especies notandose un buen grado de tecnología en bovinos y porcinos, con ganado de buena calidad genética y un buen manejo sanitario.

Un papel preponderante a nivel industrial lo ocupa la industria del cuero y el zapato. En esta región se encuentran el 90% de los establecimientos de esta naturaleza que existen en Guanajuato. Según datos estadísticos, se ha llegado a estimar que el 50% de las pieles que se corten en el país, se producen en esta región, que es siempre asociada a la industria del calzado, en razón de la fama nacional que ha logrado con la alta calidad de sus productos; su producción se calcula en 129,000 pares de zapatos diarios.

3. MARCO GEOLOGICO

3.1 Fisiografía

La zona de estudio se localiza en la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, en su porción central llamada geográficamente como zona del Bajío.

Sus límites están definidos por el cambio de morfología de mesetas a vertientes montañosas. Se distinguen 2 unidades fisiográficas principales que son planicies y mesetas.

Las planicies se encuentran en la parte central de los valles en donde se aprecia el cauce del río turbio, que corre de norte a sur, al cual se le llama también río León, río Purísima y río Santiago. Su afluente es captado por presas y represas como la de Silva y San Roque. A lo largo de este se encuentran meandros, terrazas y pequeñas lagunas de inundación, además de pequeñas lomas de topografía muy suave. La parte central de la zona de estudio es una planicie que presenta cierta inclinación hacia el norte, lo que provoca que el escurrimiento sea de norte a sur.

Las mesetas se localizan sobre los flancos de las planicies, muestran una topografía ligeramente suave que se vuelve escarpada hacia los valles. La región se caracteriza por la presencia de diversos aparatos volcánicos como conos, coladas y calderas. Existen también gran cantidad de fracturas y fallas asociadas al vulcanismo terciario y cuaternario, que han dado lugar a fosas largas y de cierta profundidad en las que se han formado lagos como el de Yuriria. El drenaje que se ha desarrollado es del tipo

dendritico rectangular de caracter intermitente principalmente en los lomerios.

3.2 Estratigrafia

En la zona de estudio se pueden encontrar diferentes tipos de rocas, que van desde rocas igneas extrusivas a rocas sedimentarias continentales, con edades del Terciario y Cuaternario; en el mapa geológico de la figura 3.1 se muestra la distribución que ocupan en esta zona.

De acuerdo con sus edades geológicas, las unidades litológicas que se encuentran en esta zona son las que se describen a continuación.

- Conglomerado(Tc): Esta unidad formada entre el Eoceno y el Oligoceno se encuentra hacia el NE de la zona, en los límites con la Sierra de Guanajuato. Está compuesta de fragmentos de rocas volcánicas ácidas dentro de una matriz arcillosa de color rojo a pardo, de ahí el nombre de conglomerado rojo.
- Andesita(Ta): Consiste de una serie de derrames de andesitas masivas del Terciario que se encuentran al W de la ciudad de León y San Francisco del Rincón, en pequeños afloramientos.
- Ignimbrita(Ti): Se compone de ignimbritas y algunas tobas y riolitas de color rosado con algunos fragmentos de roca. Se encuentra aflorando cerca de la ciudad de León y al norte de San Francisco del Rincón. Sobreyace a las andesitas de la unidad anterior y también es del Terciario Medio.
- Calizas y Margas(Tcz): Esta unidad la integra un alternancia de calizas continentales y una marga de color verdoso que no se

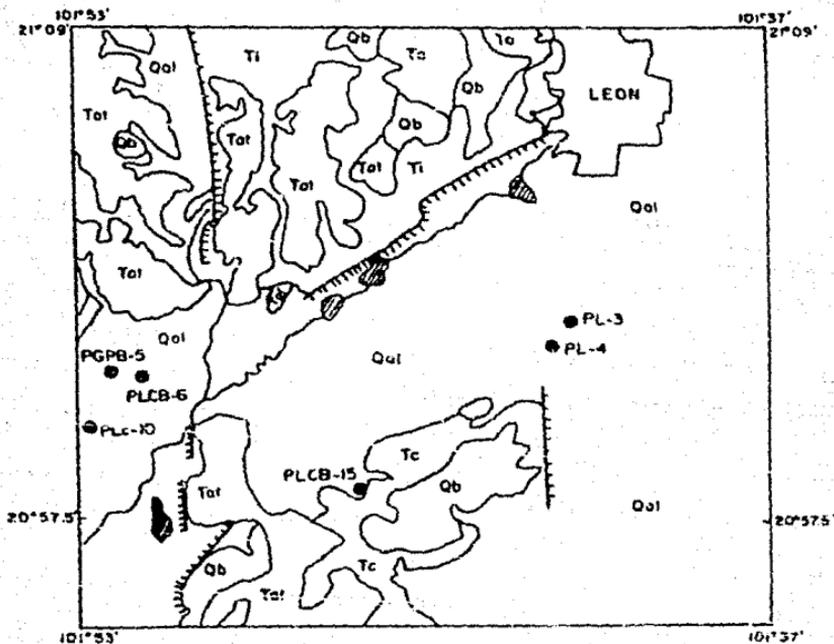


Fig. 3.1 Mapa Geológica

-  Contacto Geológico
-  Falla Normal
-  Pozo con Corte Litológico

encuentran bien compactas. Afloran hacia el centro y sur de la zona de estudio y por su posición se le asocia con el Terciario Superior.

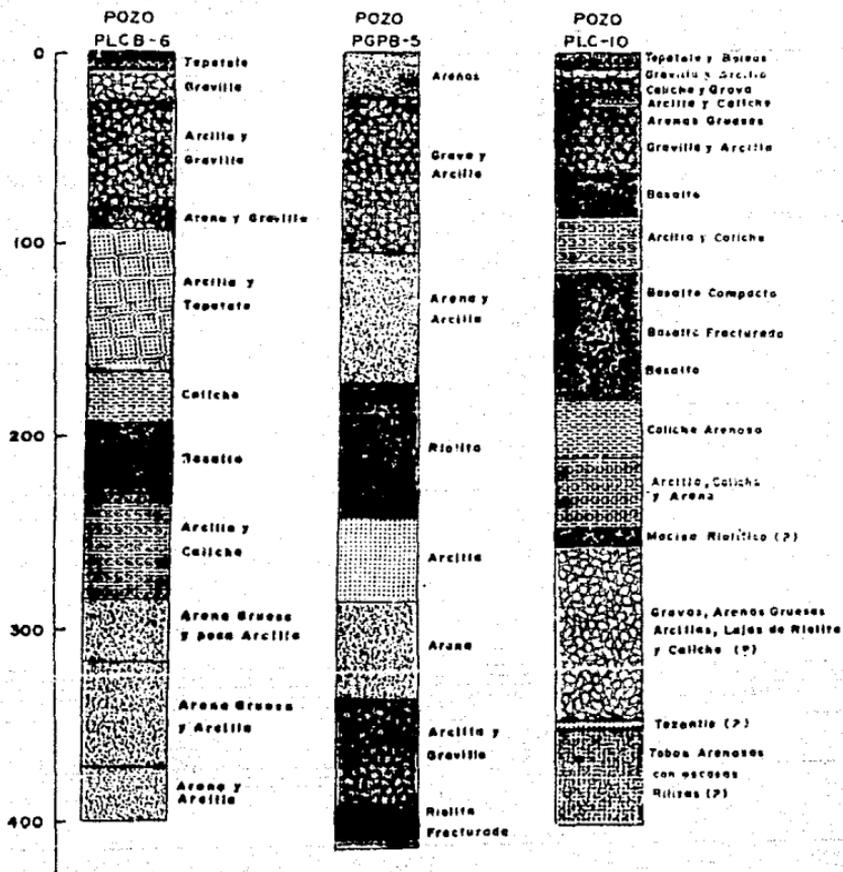
- Arenas Tobáceas(Tat). Esta unidad se compone de una serie de arcillas, arenas y tobas lacustres. Se encuentran aflorando en el norte de la zona, entre la ciudad de León y San Francisco del Rincón, así como al SE de San Francisco del Rincón. Se les asigna edad entre el Terciario Superior y el Cuaternario Inferior.

- Basaltos(Qb): Se trata de una serie de derrames basálticos de color oscuro que se encuentra fracturado. Aflora al NW y S de la ciudad de León y también al SE de San Francisco del Rincón. Se asocia con el principio del Cuaternario y sobreyace a depósitos lacustres de las arenas tobáceas anteriores.

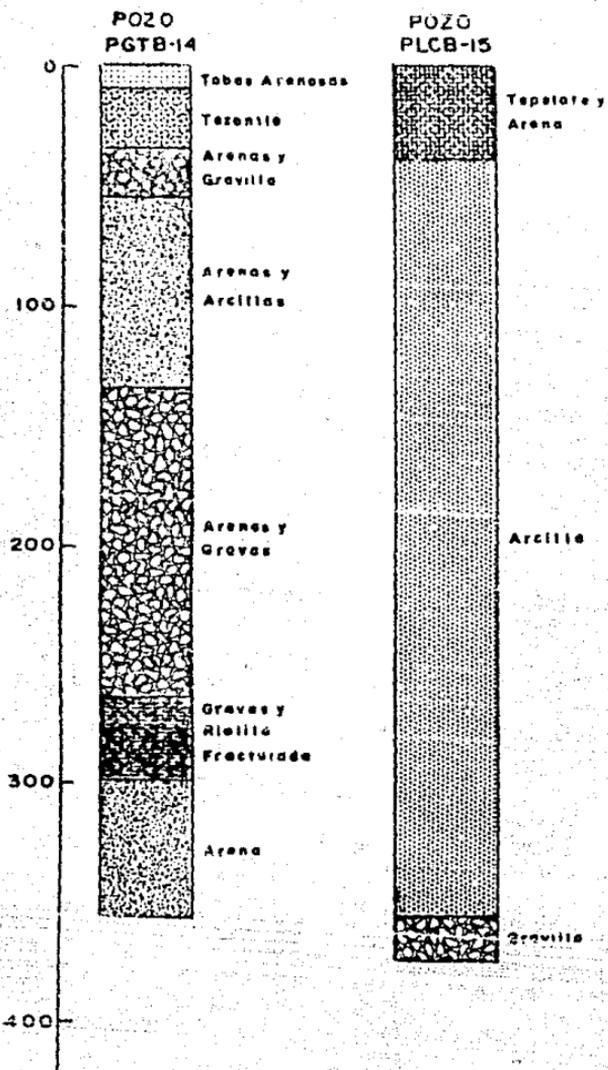
- Depósitos Aluviales(Qal): Son materiales arcillosos y arenosos que se localizan hacia la parte central del valle. Por extensión son los de mayor importancia pues se localizan en toda la zona de estudio. Su edad es del Cuaternario, menor de 1 millón de años.

Además se incluye información de los cortes litológicos de los pozos PLCB-6, PGPB-5, PLC-10, PGTB-14, PLCB-15, PL-3 Y PL-4, los cuales se incluyen en las figuras 3.2 y 3.3 .

En la figura 3.2 se puede observar que existe una buena correlación de las unidades litológicas que se reportan en los cortes de los pozos PLCB-6, PGPB-5 y PLC-10. En el pozo PGPB-5 se indica la presencia de una capa de Riolita la cual, probablemente está relacionada con los basaltos que reportan los otros pozos. Además, en el pozo PLCB-15 se reporta una capa de arcilla de aproximadamente 350 metros de espesor; esta información se



(?) Datos dudosos



considera como dudosa en la que pudo existir problemas en la identificación del material atravesado por el pozo.

3.3 Geología Estructural

En esta zona se encuentra una serie de fallas normales de orientación N-S y NE-SW que han provocado la formación de una secuencia de Horst y Graben.

De lo anterior destaca el graben por el que corre el río Turbio; presenta una dirección NE-SW entre la Ciudad de León y San Francisco del Rincón, en los límites con la Sierra de Guanajuato; pero cambia a N-S hacia el sur del valle.

3.4 Geología Histórica

Los eventos geológicos que han actuado en la zona de estudio comenzaron con la deformación y alteración de las rocas del Jurásico, y aun anteriores, dando por resultado la formación del conglomerado rojo. Además ocurrieron una serie de eventos volcánicos del cual provienen las andesitas. Todo esto tuvo lugar durante el Eoceno como resultado de la Subducción de la placa del Pacífico bajo la placa de Norteamérica.

Esta misma placa, provocó una etapa de vulcanismo muy intenso durante la colisión entre esta y la dorsal del Pacífico durante el Oligoceno. Este evento se asocia con la formación de Tobas de composición riolítica y de ignimbritas de la Sierra Madre Occidental. Posteriormente se originó una serie de Horst y Graben como el del río Turbio y el Valle de León, debido a una etapa de esfuerzos distensivos que causarón una serie de fallas

normales.

Estas estructuras formaron un sistema de grandes lagos en los cuales se depositó material de tipo areno-arcilloso, gravas y una serie de calizas y margas continentales. A principios del Cuaternario, y debido a la actividad del eje Neovolcánico, ocurrió una serie de derrames de lavas basálticas, que cubrieron el material depositado anteriormente. El material aluvial que aquí se encuentra es el resultado de la acción de los agentes de la erosión y el intemperismo sobre el material existente en la región.

3.5 Geología Económica

En la región existen algunos recursos minerales de poca importancia. Existen yacimientos de minerales no metálicos como ópalo y ágatas, además de diatomitas.

También existen algunos manantiales hidrotermales que están relacionados con las últimas fases del vulcanismo Cuaternario de la región.

4. METODOS ELECTRICOS

A) FUNDAMENTOS FISICOS

El método eléctrico de exploración geofísica más empleado en aguas subterráneas es la técnica del sondeo eléctrico vertical SEV, el cual es una variedad dentro de los métodos de resistividades. El objetivo de este método es determinar la distribución espacial de la resistividad de las rocas de los lugares en donde se efectúa el SEV.

El desarrollo de las bases teóricas que fundamentan a este método se describe a continuación.

4.1. Ecuaciones Fundamentales

De acuerdo con la Teoría Electromagnética, la ecuación que determina el comportamiento del potencial eléctrico producto de una o más fuentes se determina por medio de:

a) Ley de Faraday

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

b) Ecuación de Continuidad

$$\nabla \cdot \vec{J} = - \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} \quad (2)$$

c) Ley de Ohm

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3)$$

en donde \vec{B} es la inducción magnética, \vec{J} es la densidad de corriente, σ es la conductividad eléctrica, \bar{q} es la densidad volumétrica de carga, t es el tiempo y \vec{E} es el campo eléctrico.

Como en este caso el campo eléctrico es estacionario, no hay variación con respecto al tiempo por lo que las ecuaciones anteriores se reescriben como:

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (5)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (6)$$

De la ecuación (4) podemos decir que el campo eléctrico es un campo irrotacional; y, de acuerdo con el cálculo vectorial, existe una función potencial tal que:

$$\vec{E} = -\nabla U \quad (7)$$

Además de las ecuaciones (5) y (6) tenemos:

$$\nabla \cdot \vec{J} = \nabla \cdot (\sigma \vec{E}) = 0$$

y de la ecuación (7)

$$\nabla \cdot (\sigma \vec{E}) = \nabla \cdot (\sigma \nabla U) = 0$$

que desarrollando se tiene:

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

o bien:

$$\nabla \sigma \nabla U + \sigma \nabla^2 U = 0 \quad (8)$$

La ecuación (8) es la ecuación que rige el comportamiento del potencial eléctrico y que está en función de la distribución de las conductividades eléctricas en el subsuelo.

En general el parámetro σ es un tensor que varía en todas direcciones, pero si consideramos un medio homogéneo isotrópico, se tiene que σ es una constante, por lo que $\nabla \sigma = 0$ y la ecuación

(8) se reduce a:

$$\nabla^2 U = 0 \quad (9)$$

que es la ecuación de Laplace.

Si consideramos que solo existe una fuente sobre la superficie del terreno y este es un medio homogéneo e isotrópico, el potencial dependerá solo de la distancia radial a la fuente, lo que implica la existencia de simetría esférica. Escribiendo la ecuación de Laplace en coordenadas esféricas y resolviendo, tendremos que:

$$U = C + \frac{D}{r} \quad (10)$$

en donde C y D son constantes que dependen de las condiciones del problema. En este caso, $C=0$ ya que $U=0$ cuando $r \rightarrow \infty$; y se puede demostrar que

$$D = \frac{I}{2\pi\sigma} \quad (11)$$

Por lo tanto,

$$U = \frac{I}{2\pi\sigma r} \quad (12)$$

4.2. Dispositivo Electrónico

Como en los sondeos realizados se emplea el dispositivo electrónico denominado Schlumberger, el cual es un dispositivo tetrapolar, colineal y simétrico de fuentes puntuales (Fig.4.1).

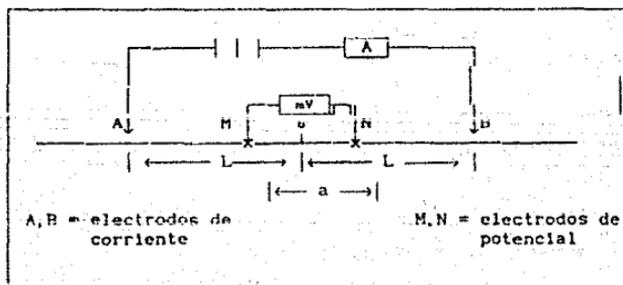


Figura 4.1 Dispositivo Electrónico Schlumberger

Para determinar el valor de la resistividad, se considera que la diferencia de potencial entre M y N esta en la misma dirección que el campo eléctrico obtenido, por lo que de la ecuación (7) se tiene:

$$E = - \frac{dU}{dr} = - \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{2\pi\epsilon r} \right)$$

en donde $\sigma = \frac{1}{\rho}$, por lo cual:

$$\bar{E} = - \frac{d}{dr} \left(\frac{\rho l}{2\pi r} \right) = \frac{\rho l}{2\pi r^2} \quad (13)$$

que para el dispositivo mencionado es:

$$E = \frac{\rho l}{\pi L^2} \quad \text{o bien} \quad \rho = \pi L^2 \frac{\bar{E}}{I} \quad (14)$$

lo cual manera de determinar el valor de la resistividad. Pero el procedimiento de campo no mide el campo eléctrico sino que mide una diferencia de potencial entre M y N, por lo que el campo eléctrico esta dada por:

$$E = \frac{U_a - U_b}{MN} = \frac{U_a - U_b}{a} \quad (15)$$

siempre y cuando $a \neq 0$; por lo tanto, y de la ecuación (14) y (15):

$$\rho_a = \frac{\pi L^2}{a} \frac{U_a - U_b}{I}$$

$$\rho_a = K \frac{U}{I} \quad (16)$$

en donde ρ_a es la resistividad aparente, K es el factor geométrico y U es la diferencia de potencial entre M y N.

4.3. Medio Estratificado

Cuando el subsuelo no se comporta como un semiespacio homogéneo e isotrópico, este se puede considerar como un medio estratificado, es decir, capas horizontales de resistividad constante que son paralelas entre sí, como se muestra en la figura 4.2.

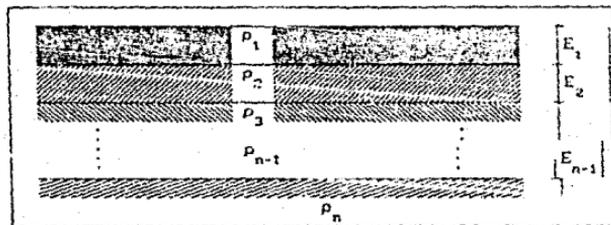


Figura 4.2 Medio Estratificado

De aquí podemos ver que la resistividad obtenida de la ecuación (16) es un valor que no es igual ni a la resistividad de la primera capa ni a la de la última, es un valor diferente que se obtiene del medio heterogéneo considerando que el medio es homogéneo, dándosele por esta razón la denominación de resistividad aparente.

Para conocer el potencial en cada una de las capas se hace uso de la ecuación de Laplace, excepto en la primera capa ya que ahí se cumple la ecuación de Poisson debido a que la fuente está colocada sobre la misma capa.

Si resolvemos la ecuación de Laplace tenemos:

$$\nabla^2 U = 0$$

que expresada en coordenadas cilíndricas dada la geometría del

sistema,

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0$$

en donde, por simetría del problema, no hay variación con respecto a φ , es decir:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (17)$$

Resolviendo por el método de separación de variables y proponiendo una solución del tipo:

$$U = R(r)Z(z) \quad (18)$$

Tenemos, derivando la ecuación (18)

$$\frac{\partial U}{\partial r} = Z(z)R'(r) \quad \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} = Z(z)R''(r)$$

$$\frac{\partial U}{\partial z} = R(r)Z'(z) \quad \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = R(r)Z''(z)$$

Sustituyendo en la ecuación (18)

$$Z(z) \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} Z(z) \frac{dR(r)}{dr} + R(r) \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} = 0$$

y dividiendo por $R(r)Z(z)$

$$\frac{1}{R(r)} \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \frac{1}{rR(r)} \frac{dR(r)}{dr} + \frac{1}{Z(z)} \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} = 0$$

si agrupamos los 2 primeros términos y pasamos el tercero al otro lado de la igualdad, esta solo podrá cumplirse si cada ecuación es igual a una constante, esto es:

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

la solución de estas ecuaciones es:

$$Z(z) = e^{-\lambda z}$$

$R(r) = J_0(\lambda r)$ en donde $J_0(\lambda r)$ es la función Bessel de primera especie y orden cero.

De lo anterior, la ecuación (18) queda como:

$$\begin{aligned} U_1 &= C_1 e^{\lambda z} J_0(\lambda r) \\ U_2 &= C_2 e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) \end{aligned} \quad (19)$$

Las soluciones (19) se conocen como las soluciones simples en donde las constantes C_1 y C_2 están en función de la variable λ , la cual se conoce como valor característico.

La solución más general de la ecuación de Laplace se puede obtener de la combinación lineal de todas las soluciones simples de la misma ecuación, es decir:

$$U_i(r, z) = \int_0^\infty [A'_i(\lambda) e^{-\lambda z} + B'_i(\lambda) e^{\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (20)$$

en donde el subíndice i nos indica que la solución está dada para la i -ésima capa. La ecuación (20) nos da el valor del potencial de la i -ésima capa, pero si en dicha capa existe una fuente, se debe de sumar una solución particular que está dada por la ecuación (12). Como ya se dijo que la fuente está en la primera capa, el potencial en esta se obtiene de la expresión:

$$U_1 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \frac{1}{r} + \int_0^\infty [A'_1(\lambda) e^{-\lambda z} + B'_1(\lambda) e^{\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (21)$$

expresando r en coordenadas cilíndricas.

$$U_1 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \frac{1}{(r^2+z^2)^{3/2}} + \int_0^\infty [A'_1(\lambda)e^{-\lambda z} + B'_1(\lambda)e^{\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda$$

De la integral de Weber-Lipschitz tenemos:

$$\int_0^\infty e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda = \frac{1}{(r^2+z^2)^{1/2}} \quad (22)$$

Sustituyendo (22) en (21):

$$U_1 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda + \int_0^\infty [A'_1(\lambda)e^{-\lambda z} + B'_1(\lambda)e^{\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (23)$$

Si definimos como:

$$A'_1(\lambda) = A_1(\lambda) \frac{\rho_1 I}{2\pi} \quad B'_1(\lambda) = B_1(\lambda) \frac{\rho_1 I}{2\pi}$$

tendremos:

$$U_1 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty [e^{-\lambda z} + A_1(\lambda)e^{-\lambda z} + B_1(\lambda)e^{\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (24)$$

de manera similar:

$$U_2 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty [A_2(\lambda)e^{-\lambda z} + B_2(\lambda)e^{\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda$$

$$U_n = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty [A_n(\lambda)e^{-\lambda z} + B_n(\lambda)e^{\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda$$

La expresión (24) nos da el valor del potencial en la superficie ($z=0$), por lo que necesitamos conocer el valor de $A_1(\lambda)$ y $B_1(\lambda)$. Para esto, debemos considerar las condiciones de

frontera siguientes:

a) cuando $r = 0$; $U_n = 0$

b) en $Z=0$ $E_n = 0$; es decir, que el campo eléctrico normal sea nulo en la superficie.

c) en $Z=Z_1$, $U_1 = U_{1,1}$, es decir, el potencial eléctrico entre los contactos de dos capas es continuo.

d) en $Z=Z_1$, $J_z = J_{z,1}$; es decir, la componente normal de la densidad de corriente es continua en las fronteras.

Si suponemos un medio estratificado de 2 capas, tendremos:

$$U_1 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty [e^{-\lambda z} + A_1(\lambda)e^{-\lambda z} + B_1(\lambda)e^{\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (25)$$

$$U_2 = \frac{\rho_2 I}{2\pi} \int_0^\infty [A_2(\lambda)e^{-\lambda z} + B_2(\lambda)e^{\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (26)$$

para la condición a), vemos que $A_2(\lambda)e^{-\lambda z}$ tiende a cero cuando $Z \rightarrow \infty$.

por lo tanto:

$$B_2(\lambda) = 0 \quad (27)$$

para la condición b), tenemos:

$$\frac{\partial U_1}{\partial Z} \Big|_{z=0} = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty [-\lambda A_1(\lambda)e^{-\lambda z} + \lambda B_1(\lambda)e^{\lambda z}] \Big|_{z=0} J_0(\lambda r) d\lambda$$

se tiene que:

$$-\lambda A_1(\lambda) + \lambda B_1(\lambda) = 0 \quad \rightarrow \quad A_1(\lambda) = B_1(\lambda) \quad (28)$$

Substituyendo (27) y (28) en (25) y (26),

$$U_1 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty [e^{-\lambda z} + A_1(\lambda)(e^{-\lambda z} + e^{\lambda z})] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (29)$$

$$U_2 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^{\infty} A_2(\lambda) e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (30)$$

Para la condición c), en $Z=Z_1=h_1$

$$e^{-\lambda h_1} + A_1(\lambda) [e^{-\lambda h_1} + e^{\lambda h_1}] = A_2(\lambda) e^{-\lambda h_1}$$

$$A_1(\lambda) [e^{-\lambda h_1} + e^{\lambda h_1}] - A_2(\lambda) e^{-\lambda h_1} = -e^{-\lambda h_1} \quad (31)$$

Para la condición d), en $Z=Z_1=h_1$

$$\left. \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial U_1}{\partial Z} \right|_{z=z_1=h_1} = \left. \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial U_2}{\partial Z} \right|_{z=z_1=h_1}$$

$$\rho_2 \lambda [-e^{-\lambda h_1} + A_1(\lambda) (1 - e^{-\lambda h_1} + e^{\lambda h_1})] = \rho_1 \lambda [-A_2(\lambda) e^{-\lambda h_1}]$$

$$A_1(\lambda) [e^{-\lambda h_1} + e^{\lambda h_1}] - A_2(\lambda) e^{-\lambda h_1} = \frac{\rho_1}{\rho_2} e^{-\lambda h_1} \quad (32)$$

resolviendo simultaneamente (31) y (32), se tiene:

$$A_1(\lambda) = \frac{K_1 e^{-\lambda h_1}}{e^{\lambda h_1} - K_1 e^{-\lambda h_1}} \quad (33)$$

en donde
$$K_1 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

Substituyendo (33) en (29), haciendo $Z=0$:

$$U_1 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^{\infty} \left[1 + 2 \frac{K_1 e^{-\lambda h_1}}{(e^{\lambda h_1} - e^{-\lambda h_1})} \right] J_0(\lambda r) d\lambda$$

$$U_1 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty \frac{e^{\lambda h_1} - K_1 e^{-\lambda h_1} + 2K_1 e^{-\lambda h_1}}{e^{\lambda h_1} - K_1 e^{-\lambda h_1}} J_0(\lambda r) d\lambda$$

$$U_1 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty \frac{e^{\lambda h_1} + K_1 e^{-\lambda h_1}}{e^{\lambda h_1} - K_1 e^{-\lambda h_1}} J_0(\lambda r) d\lambda$$

si multiplicamos numerador y denominador por $e^{-\lambda h_1}$, se tiene:

$$U_1 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty \frac{1 + K_1 e^{-2\lambda h_1}}{1 - K_1 e^{-2\lambda h_1}} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (34)$$

que es la expresión del potencial U_1 en $Z=0$ para un medio de dos capas.

En la expresión anterior, el integrando que está multiplicado por $J_0(\lambda r)$ se conoce como función Kernel y es una función que contiene la información del subsuelo.

Para conocer el potencial U_1 en la superficie de un medio de n capas, Koefoed obtuvo la expresión:

$$U_1 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty N_n(\lambda) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (35)$$

en donde $N(\lambda)$ es la función Kernel de Slichter.

Con el resultado anterior se puede calcular la función de resistividad aparente que para el dispositivo eléctrico Schlumberger esta dado por la ecuación (16):

$$\rho_a = K \frac{\Delta U}{I} = \pi L^2 \frac{E}{I}$$

$$E = 2 \left[-\frac{\partial U}{\partial r} \right]_{r=r} = -2 \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty N_n(\lambda) \frac{\partial J_0(\lambda r)}{\partial r} d\lambda$$

$$E = \frac{\rho_1 I}{\pi} \int_0^\infty N_n(\lambda) J_1(\lambda r) \lambda d\lambda$$

$$\rho_a = \rho_1 r^2 \int_0^\infty N_n(\lambda) J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \quad (36)$$

Si consideramos la definición de la función de transformación de resistividades:

$$T(\lambda) = \rho_1 N_n(\lambda)$$

Tendremos que:

$$\rho_a = r^2 \int_0^\infty T(\lambda) J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \quad (37)$$

Considerando los siguientes cambios de variables:

$$\begin{aligned} \lambda &= e^{-y} \rightarrow \ln(\lambda) = -y & d\lambda &= -e^{-y} dy \\ r &= e^x \rightarrow \ln(r) = x & \text{si: } \lambda \rightarrow 0 \quad y &\rightarrow \alpha; \lambda \rightarrow \alpha \quad y \rightarrow \alpha \end{aligned}$$

entonces la ecuación (37) es:

$$\begin{aligned} \rho_a &= e^{2x} \int_0^{-\alpha} T(e^{-y}) e^{-y} J_1(e^{-y} e^x) (-e^{-y} dy) \\ \rho_a &= \int_\alpha^{-\alpha} T(e^{-y}) J_1(e^{-y} e^x) e^{2(x-y)} dy \end{aligned} \quad (38)$$

la ecuación (38) se puede expresar como:

$$\rho_a = \int_0^\alpha T(y) h_a(x-y) dy \quad (39)$$

en donde $h_a = e^{2x} J_1(x)$

Se puede ver que la ecuación (35) es una integral de convolución en donde el operador del filtro es $h_1(z)$ y es una función de Bessel de primer orden, la cual permite calcular la resistividad aparente a cualquier abertura eléctrica.

B) CONDUCTIVIDAD ELECTROLITICA

Como ya se mencionó, el método eléctrico de resistividades es el más utilizado en la exploración de aguas subterráneas, ya que uno de los parámetros físicos que pueden indicar la presencia de agua es su conductividad eléctrica (el inverso de la resistividad eléctrica).

En las rocas y minerales que forman la corteza terrestre se pueden presentar 2 tipos de conductividad eléctrica como son la conductividad electrónica y la conductividad electrolítica o iónica.

La conductividad electrónica, también conocida como conductividad metálica, es aquella en la cual la conducción se da por el movimiento de electrones libres del material, debido a una diferencia de potencial.

La conductividad electrolítica se presenta cuando en los minerales o en la roca (que se puede considerar como un aislante), existe agua que facilita la conducción. En este caso la conducción se realiza por el transporte de iones al paso de la corriente eléctrica. Esta conductividad esta en función de la cantidad de sales disueltas. La principal sustancia que influye en la conductividad es el cloruro de sodio NaCl. Las demás sales que existan disueltas en el agua se pueden expresar en equivalentes de NaCl de acuerdo con la siguiente tabla:

| IGN | EQUIVALENTE QUIMICO | EQUIVALENTE EN NaCl |
|-------------|---------------------|---------------------|
| K^+ | 39.10 | |
| Na^+ | 23.00 | 1.00 |
| Ca^{++} | 20.04 | 0.95 |
| Mg^{++} | 12.15 | 2.0 |
| Cl^- | 35.46 | 1.0 |
| HCO_3^- | 61.02 | 0.27 |
| CO_3^{--} | 30.00 | 1.27 |
| SO_4^- | 48.03 | 0.50 |

De lo anterior se puede observar que la conductividad sera menor cuando existan sólidos disueltos de bicarbonato de calcio y sulfato de calcio; la conductividad aumentará si aumenta la presencia de cloruro de sodio o potasio.

En la figura 4.3 se muestra la resistividad de las soluciones de NaCl en función de la concentración en gramos por litro a una temperatura de 18-C.

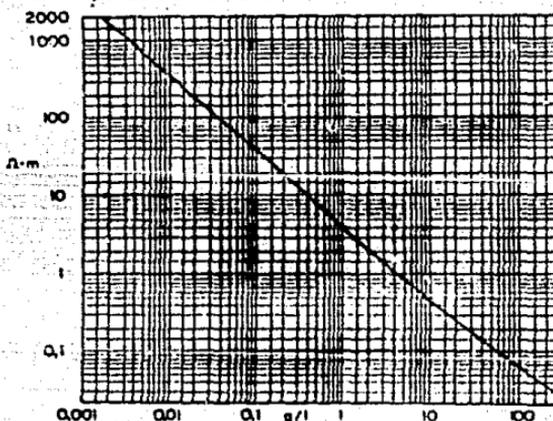


Figura 4.3. Variación de la resistividad con el contenido de NaCl

En la figura 4.4 se observa la variación de la conductividad en función del contenido de sólidos totales disueltos en ppm a 25°C.

Por lo anterior, se puede ver que la resistividad de una roca en el subsuelo estará en función de la resistividad de los elementos que la componen, de la resistividad del electrolito que ocupa el espacio poroso de la misma y de la relación entre el volumen de la parte sólida y el volumen del espacio poroso; aunque la conductividad depende principalmente de la composición química de la roca y del electrolito así como de su concentración.

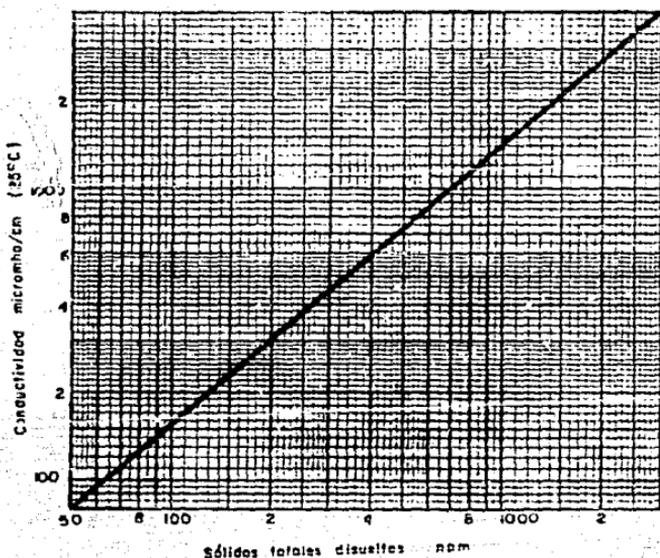


Figura 4.4 Variación de la Conductividad con el contenido de sólidos totales disueltos en ppm.

En general, las rocas compactas o que tienen porosidad muy baja son poco conductoras. Cuando la porosidad de la roca aumenta, en especial la porosidad efectiva (los poros están interconectados); la roca se llena de agua lo que aumenta su conductividad de acuerdo con los siguientes factores:

- a) Volumen del espacio poroso o factor de porosidad, V .
- b) Disposición geométrica del mismo espacio poroso. También se le conoce como factor de formación, F .
- c) Resistividad del agua que contiene, ρ_w .

La relación entre los factores anteriores esta dada por la ley de Archie:

$$\rho = \frac{F}{V} \rho_w \quad \text{en donde } \rho \text{ es la resistividad.}$$

Si consideramos que la roca esta 100% saturada de agua, entonces el volumen del espacio poroso esta completamente lleno de agua por lo que $V=1$. Entonces, para la roca saturada de agua:

$$\rho = F \rho_w \quad (40)$$

por lo que el factor de formación se define como como la relación entre la resistividad de la roca 100% saturada del electrolito entre la resistividad del electrolito, es decir:

$$F = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (41)$$

Como ya se mencionó, el factor de formación depende de la disposición geométrica del mismo espacio poroso, por lo que varios investigadores han tratado de determinar la relación matemática entre este factor y la porosidad ϕ . Los resultados de estas investigaciones han sido meramente experimentales por lo que no tienen caracter universal pero son ampliamente utilizadas.

Una de las relaciones entre F y ϕ esta dado por la ley de

Archie, quien mostro que si se graficaban en escala logarítmica estos parametros, las curvas resultantes se podian expresar por medio de relaciones sencillas. De esta manera, obtuvo que para arenas la relación era:

$$F = \phi^{-m} \quad (42)$$

en donde m es el exponente de cementación, el cual varia entre 1.3 y 2.0 dependiendo de que tan consolidada estuviera la muestra de roca.

Posteriormente, Winsauer et. al. (1952) Determinaron que la ecuación de Archie era incorrecta y propusieron la siguiente expresión:

$$F = G\phi^{-m} \quad G = \text{constante} \quad (43)$$

que para el caso particular de areniscas toma la forma:

$$F = 0.65\phi^{-2.15} \quad (44)$$

que es conocida como la ecuación de Humble.

Posteriormente, diversos autores han mostrado la validez de la ecuación de Winsauer y consideran a la ecuación de Archie como un caso particular de esta. Además sugieren que las constantes m y G sean estimadas para obtener resultados confiables.

Otras relaciones importantes son la obtenida por la compañía Schlumberger:

$$F = 0.81\phi^{-2} \quad (45)$$

y de Timur et. al. (1972)

$$F = 1.13\phi^{-1.73} \quad (46)$$

Por lo anterior, se ha mostrado experimentalmente que la relación entre el factor de formación y la porosidad, considerada como ecuación general es:

$$F = C\phi^{-a} \quad (47)$$

Aunque la ecuación no cumple con la condición física de que $F=1$ si $\phi = 1$.

Varios autores han tratado de darle fundamento teórico a las relaciones anteriores. En el siglo pasado Maxwell desarrolló el problema y posteriormente se obtuvo que la relación:

$$F = 3 - \frac{\frac{1}{r}}{2\phi} \quad (48)$$

era adecuada para sistemas de esferas dispersas. La expresión anterior se conoce como ecuación de Maxwell.

Posteriormente Fricke (1924) realizó una geometrización de la ecuación de Maxwell y propuso la relación:

$$F = (x+1) - \frac{\phi}{x\phi} \quad (49)$$

en donde X es un valor que depende de la geometría y conductividades del sistema y generalmente es menor a 2; si $X=2$ la ecuación se reduce a la ecuación de Maxwell.

Otros investigadores han determinado ecuaciones similares pero todas ellas tienen la forma de la ecuación de Fricke:

$$F = P(1+\phi)/\phi \quad (50)$$

en donde P es un parámetro que depende de la geometría interna del medio poroso y su valor aumenta si la esfericidad de las

partículas disminuye. La expresión anterior se conoce como ecuación de Maxwell-Fricke.

El más importante desarrollo teórico que da validez a las expresiones experimentales es el realizado por Pérez-Rosales (1983). Este parte de la observación de la porosidad. Si consideramos una muestra, como se observa en la figura 4.5;

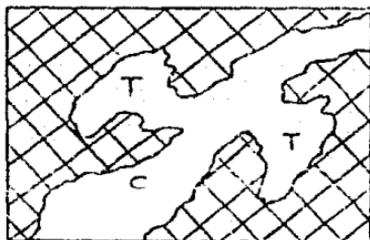


Figura 4.5 Muestra esquemática de una roca porosa.

saturada de un electrolito, si se aplica una diferencia de potencial, la corriente eléctrica circula a través de los canales (C). Además, como los poros son muy irregulares, se formarán trampas (T), las que no permiten el paso de la corriente.

De lo anterior se establecen 3 postulados. El primero indica que la porosidad total (ϕ) estará dada por la porosidad que permite la conducción (ϕ_c) y por la porosidad de estancamiento (ϕ_T) es decir:

$$\phi = \phi_c + \phi_T \quad (51)$$

El segundo postulado nos dice que la porosidad de conducción no puede ser mayor que la porosidad total, por lo que:

$$\phi_c = \phi^m \quad m \geq 1 \quad (52)$$

El último de los postulados establece que al relacionar el factor de formación con la porosidad siempre se tiene una relación

como la de Maxwell-Fricke. La ecuación que expresa lo anterior se obtuvo debido a que la ecuación de Maxwell-Fricke se puede generalizar tanto para emparamientos de partículas o medios porosos si se sustituye la porosidad total por la porosidad de conducción definida anteriormente, por lo que:

$$F = 1 + G(1 - \phi_c) / \phi_c \quad (53)$$

en donde G es una forma generalizada del parámetro P. Si consideramos la ecuación (52) y la expresión anterior se tendrá que:

$$F = 1 + G(\phi^{-m} - 1) \quad (54)$$

Como en el laboratorio es posible efectuar mediciones de F y ϕ , se ha observado que la expresión anterior da validez a expresiones experimentales. Además, se ha observado que para rocas naturales G tiene un valor de aproximadamente 1, por lo que si G=1 entonces la expresión anterior toma la forma de la ecuación de Archie:

$$F = \phi^{-m} \quad (55)$$

Por otra parte, la expresión (54) se puede reescribir como

$$F = G\phi^{-m} - (G-1) \quad (56)$$

y si G es aproximadamente 1, entonces $G\phi^{-m}$ es mayor que $(1-G)$; por lo tanto la expresión (56) toma la forma:

$$F = G\phi^{-m} \quad (57)$$

la cual es la ecuación generalizada de Archie.

Si ahora consideramos valores de ϕ grandes, ϕ^{-m} es aproximadamente ϕ y la ecuación (14) es:

$$F = 1 + G(1 - \phi) / \phi \quad (58)$$

que es la ecuación de Fricke, de la cual se puede obtener la

ecuación de Maxwell.

Si bien el desarrollo anterior ha permitido dar validez a las relaciones experimentales, no se ha podido dar un análisis teórico de los parámetros m y G que se emplean en la ecuación (53), que permitan establecer una relación de estos con las diferentes propiedades petrofísicas de las rocas, tales como: tortuosidad, grado de compactación o cementación, tipo de porosidad o permeabilidad, entre otras.

5. PROCESO DE INTERPRETACION GEOELECTRICA

El proceso de el manejo de datos geoelectricos comienza desde la adquisicion de los mismos en campo. La toma de datos se hace de acuerdo con el dispositivo electrico implementado, que en este caso es el Schlumberger; se realizan mediciones de diferencia de potencial y de intensidad de corriente para calcular el valor de la resistividad aparente dada por la ecuación (16) del capitulo 4. Para efectuar tales mediciones se requiere de implementar los circuitos mostrados en la figura 4.1 del capitulo 4.

El circuito de emision tiene la finalidad de introducir una corriente electrica de intensidad constante I en el subsuelo, a traves de los electrodos A y B. Está compuesto por una fuente de corriente, 2 electrodos, un amperimetro, cables y elementos de conexión. El circuito de recepción se compone de un voltmetro, 2 electrodos, cables y elementos de conexión; el objeto de este circuito es medir la diferencia de potencial entre los electrodos M y N producida por la corriente I en el terreno.

Una vez que se calcula la resistividad aparente, se grafica su valor en papel bilogarithmico, para llevar un control de calidad del trabajo y corregir posibles errores durante su ejecución.

Posteriormente, ya en gabinete, se procede a realizar las pseudosecciones de isoresistividades aparentes. Estas pseudosecciones se construyen considerando una serie de SEV's que se encuentran alineados constituyendo un perfil. Se construyen al

configurar puntos de igual valor de resistividad aparente. El objeto de estas secciones es de dar una idea de la posible geometría o distribución espacial de los parámetros geoelectricos de los materiales que se encuentran en el subsuelo.

Después de esto se realiza la interpretación de la curva de resistividades aparentes de cada uno de los sondes, para determinar los valores de resistividad y espesor de los horizontes geoelectricos. La interpretación de la curva de resistividades aparentes se puede efectuar de diversas maneras, siendo las más comunes la interpretación gráfica y la interpretación automática.

a) Método Gráfico: Los métodos de interpretación gráfica fueron los primeros que se emplearon, pero son totalmente empíricos aunque Zhody (1965) ha tratado de darle una justificación teórica. La técnica más empleada es el llamado "Método del Punto Auxiliar", el cual es una variante del método de superposición; consiste en reducir las primeras 2 capas a una sola para poder interpretar una capa siguiente. Solo es recomendable su empleo cuando la curva de resistividades aparentes tiene de 3 a 5 horizontes geoelectricos; en caso de no ser así, el error en la interpretación puede ser muy grande. La determinación de los parámetros de las capas se hace con base en los catálogos de curvas maestras publicadas, como las de Orellana y Money (1966).

b) Método Automático: La interpretación automática se basa en el cálculo de la ecuación (39) del capítulo 4, la cual expresada

en el dominio discreto, toma la forma:

$$\rho_{a1} = \sum_j T_j F_{1-j}$$

que representará la suma convolución de los valores de la función de transformación de resistividades y los coeficientes del filtro.

Para efectuar lo anterior, se propone un modelo inicial, al cual se le obtiene la función de transformación de resistividades $T(k)$ a partir de la relación de Pekeris. Después se hace la convolución de estos valores con los coeficientes del filtro de O'Neill y se obtiene la resistividad aparente. Se compara la curva obtenida con la curva de campo y se calcula el error entre ambas. Si el error está dentro de los límites aceptables (generalmente $\leq 5\%$) se considera que la interpretación es adecuada, si no es así se modifican los parámetros del modelo inicial y se repite el proceso.

Otro elemento de apoyo en la interpretación, es la elaboración de mapas de isorresistividades aparentes. Estos mapas son la configuración en planta de los valores de resistividad aparente para una separación eléctrica $AB/2$ dada. Estos mapas también nos proporcionan una idea de la distribución espacial de los valores de resistividad.

Finalmente, con la información previamente obtenida, se elaboran los perfiles o cortes geoelectricos, los cuales representan el modelo propuesto de la distribución de los

parametros geoelectricos en el subsuelo. La elaboración de estos cortes se hace considerando y asociando los valores de tales parametros y, de alguna manera están en función, también, del criterio y experiencia del intérprete.

Hasta el punto anterior, la interpretación se ha realizado solo matematicamente, sin darle un verdadero significado geológico, de ahí la importancia de un correcto manejo de la información. Ahora bien, para darle un sentido geológico a los modelos obtenidos, se hace una descripción de las características de las diferentes unidades geoelectricas detectadas.

En base a la interpretación final anterior, se procede a realizar la integración geológica-geofísica para asociar los modelos geoelectricos con la información de la zona de estudio. Para esto es muy importante contar con información de geología regional, estratigrafía, información de pozos o cualquier otra que permitan emitir una interpretación geológica final.

5.1 Interpretación de la Curva de Resistividad Aparente.

La interpretación de la curva de resistividad aparente de cada uno de los sondeos fué realizada utilizando un programa de interpretación de sondeos eléctricos verticales desarrollado por personal del Departamento de Recursos Naturales del Instituto de Geofísica de la UNAM.

El programa es interactivo y requiere de los datos obtenidos en campo y de un modelo inicial propuesto por el usuario para ser comparado con el modelo teórico que genera mediante el proceso ya descrito al inicio de este capítulo. El filtro que utiliza el

MODELADO DE SEVs TIPO SCHLUMBERGER

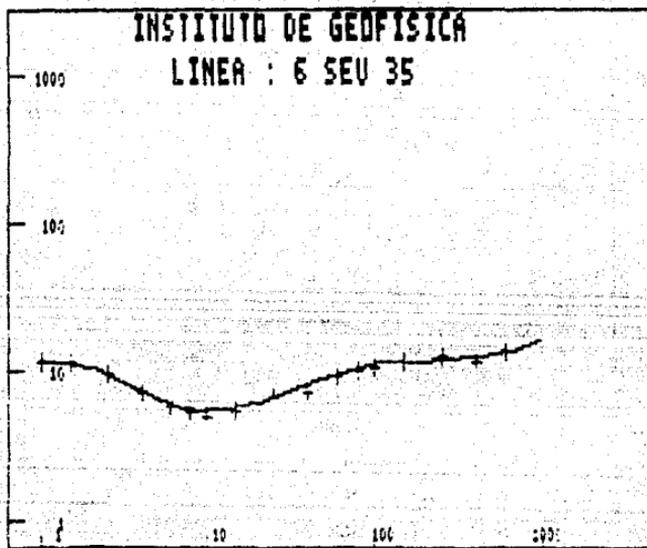
LINEA: 6 SEU 35

RESISTIVIDAD % FACTOR
 ESPACIAMIENTO MODELADA CAMPO ERROR RELATIVO

| | | | |
|--------|------|------|------|
| 1.0 | 12.7 | | |
| 1.5 | 12.1 | | |
| 2.2 | 10.9 | 10.9 | -0.5 |
| 3.2 | 9.0 | 8.8 | 2.3 |
| 4.6 | 7.2 | 6.8 | 5.5 |
| 6.8 | 6.0 | 5.8 | 3.9 |
| 10.0 | 5.6 | 5.0 | 11.2 |
| 14.7 | 5.8 | 5.6 | 4.0 |
| 21.5 | 6.5 | 6.6 | -2.6 |
| 31.6 | 7.5 | 7.1 | 5.3 |
| 46.4 | 8.8 | 8.2 | 6.7 |
| 68.1 | 10.2 | 10.1 | 6.9 |
| 100.0 | 11.5 | 11.0 | 4.2 |
| 146.8 | 12.1 | 11.7 | 3.1 |
| 215.4 | 12.2 | 13.0 | -6.1 |
| 316.2 | 12.3 | 12.4 | -0.2 |
| 464.2 | 12.5 | | |
| 681.3 | 14.4 | | |
| 1000.0 | 16.6 | | |

4.0

| | | |
|---|-------|----|
| 1 | 1.5 | 13 |
| 2 | 10.3 | 5 |
| 3 | 21.5 | 10 |
| 4 | 27.1 | 23 |
| 5 | 71.0 | 9 |
| 6 | 76.7 | 15 |
| 7 | 127.9 | 9 |
| | | 26 |



MODELADO DE SEVS TIPO SCHLUMBERGER

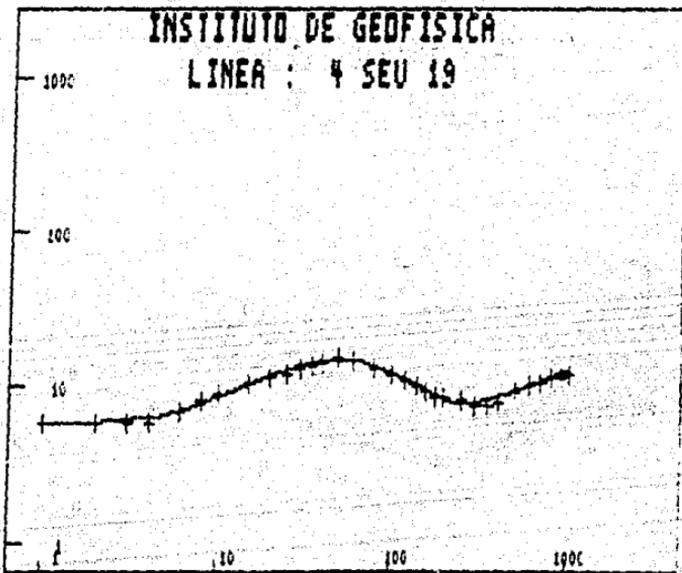
LINEA: 4 SEV 19

RESISTIVIDAD Y FACTOR
 ESPACIAMIENTO MODELADA CAMPO ERROR RELATIVO

| | | | |
|--------|------|------|------|
| 1.0 | 6.0 | | |
| 1.5 | 6.0 | | |
| 2.2 | 6.1 | 6.1 | 0.3 |
| 3.2 | 6.3 | 6.0 | 4.4 |
| 4.6 | 6.7 | 6.4 | 4.3 |
| 6.8 | 7.6 | 7.8 | -2.6 |
| 10.0 | 9.0 | 9.4 | -4.8 |
| 14.7 | 10.6 | 10.9 | -2.5 |
| 21.5 | 12.5 | 12.1 | 2.7 |
| 31.6 | 14.3 | 13.7 | 4.1 |
| 46.4 | 15.5 | 15.7 | -1.2 |
| 68.1 | 15.4 | 14.5 | 5.7 |
| 100.0 | 13.3 | 12.5 | 6.8 |
| 146.8 | 10.4 | 10.3 | 1.5 |
| 215.4 | 8.4 | 8.8 | -4.5 |
| 316.2 | 8.1 | 7.8 | 4.3 |
| 464.2 | 9.2 | 9.2 | 0.1 |
| 681.3 | 11.1 | 11.1 | 0.4 |
| 1000.0 | 13.2 | | |

Fig. 1

| | | |
|---|-------|----|
| 1 | 4.0 | 6 |
| 2 | 12.0 | 15 |
| 3 | 22.0 | 28 |
| 4 | 200.0 | 6 |
| 5 | | 21 |



programa para obtener el modelo teórico es el filtro de O'Neill de 20 coeficientes.

El resultado de la interpretación nos da los valores de resistividad y espesor del modelo final así como los valores de resistividad aparente de la curva de campo y de la curva teórica, además el factor relativo y porcentaje de error entre ambas. Además nos presenta la gráfica de la curva de campo y la curva teórica en escala bilogarítmica.

Los resultados de la interpretación de cada uno de los sondeos se anexan al final del escrito.

5.2 Análisis de los Mapas de Isorresistividad.

Para realizar la interpretación geoelectrica se procedió a la elaboración de una serie de mapas de resistividad aparente para una separación electródica determinada. Con este fin se elaboraron los mapas para las aberturas AB/2 de 50, 100, 200 y 400 metros.

De los mapas ya mencionados se puede observar que de manera regional, el área de estudio se encuentra sobre un medio muy consistente, de resistividades ligeramente bajas en el que se muestra la presencia de un máximo relativo resistivo sobre el perfil 3.

Este máximo se observa desde el mapa 5.1a aunque se enfatiza en los mapas 5.1b y 5.1c, por lo que se puede considerar su mayor manifestación ocurre cuando la separación AB/2 es aproximadamente de 100 metros.

En el mapa 5.1d se puede observar que desaparece el máximo

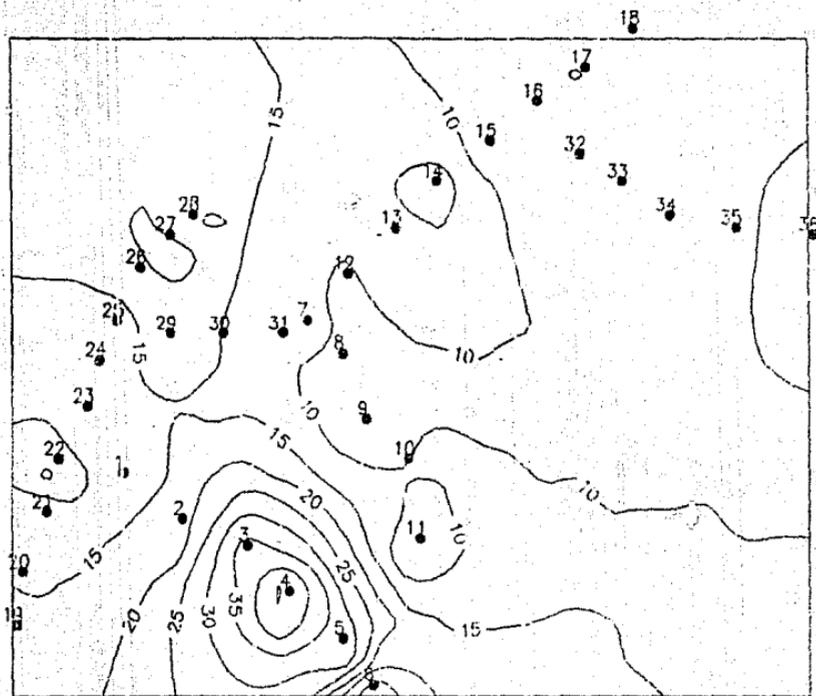


FIG. 5.1a MAPA DE ISORRESISTIVIDAD APARENTE $AB/2=50$

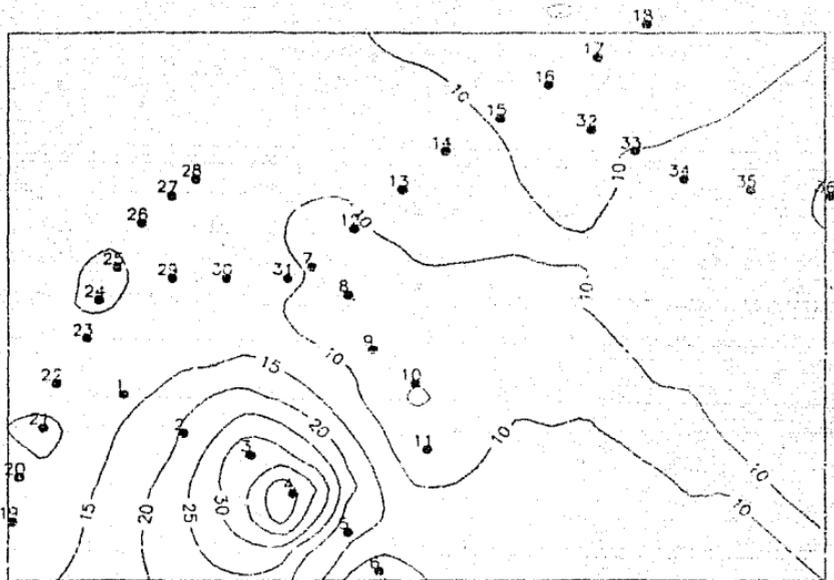


FIG. 5.1b MAPA DE ISORRESISTIVIDAD APARENTE $AB/2=100$

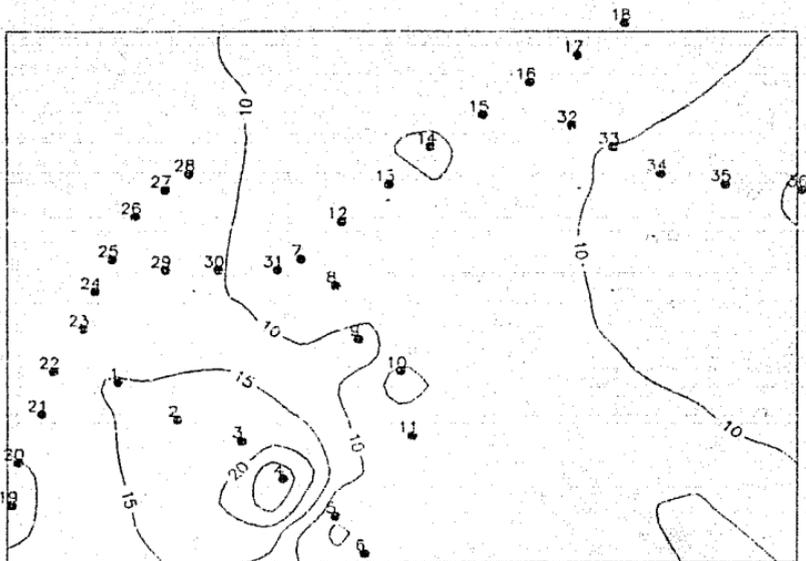


FIG. 5.1c MAPA DE ISORRESISTIVIDAD APARENTE $AB/2=200$

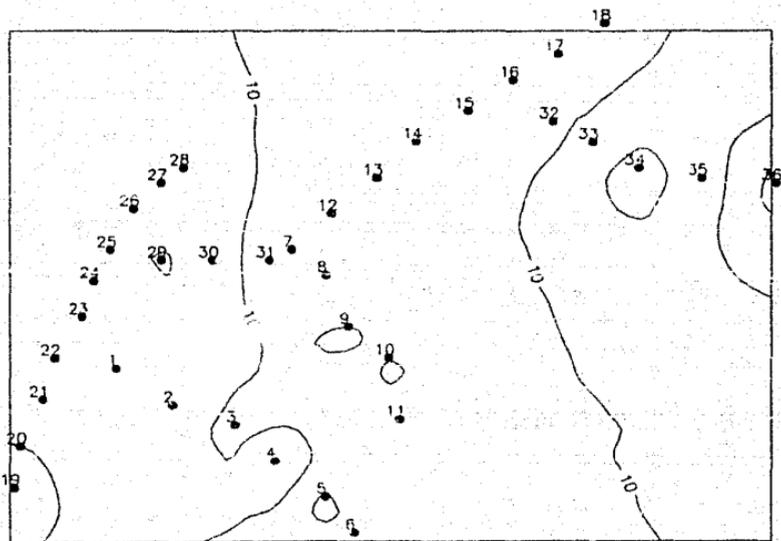


FIG. 5.1d MAPA DE ISORRESISTIVIDAD APARENTE $AB/2=400$

ya mencionado lo que parece indicar que se trata de un cuerpo que no se continúa ni a profundidad ni lateralmente y el medio puede considerarse completamente homogéneo geoelectricamente y de resistividades bastante bajas.

5.3 Perfiles Geoelectricos.

- Perfil 1

Este perfil se encuentra a unos 4 Km al sureste de San Francisco del Rincón. Tiene una orientación NW-SE y una longitud de 9 Km. Está compuesto por los sondeos 23, 1, 2, 3, 4, 5 y 6. El sondeo 23 pertenece también al perfil 4.

De acuerdo con la pseudosección de isorresistividades aparentes que se muestra en la figura 5.2, se puede decir que, en la parte superior, se trata de un modelo estratificado de capas que no son completamente horizontales y que muestran cierto buzamiento del SEV 23 hacia el 4; mientras que en la parte inferior es notoria la presencia de un gran paquete muy consistente de lavas resistivas el cual se hace superficial hacia el SEV 6.

En el perfil geoelectrico de la figura 5.3 se presenta el modelo resultado de la interpretación de cada uno de los SEV's que componen este perfil. Se puede ver que se trata de un modelo de capas en el que se presentan 6 unidades geoelectricas.

La primera de estas unidades presenta resistividades menores a $10 \Omega\text{-m}$ y solo se encuentra entre los sondeos 23 y 1, con un espesor aproximado de 2 a 8 metros.

La segunda unidad se encuentra por debajo de la unidad

anterior y está presente también hacia el SEV 2, tiene un rango de resistividad de 25 a 30 Ω -m y espesor variable de 2 a 15 metros.

La unidad 3 se encuentra debajo de la unidad anterior y hacia el SEV 3 se encuentra en la superficie. Muestra un rango de resistividades bajas del orden de 5 a 10 Ω -m y espesor de 5 a 20 metros.

Subyaciendo a la unidad 3 se encuentra la unidad 4, la cual se encuentra a lo largo de todos los sondeos excepto el SEV 6. Esta unidad tiene un espesor de 60 a 100 metros con un máximo en el SEV 4 (150 metros) y un mínimo hacia el SEV 5 (20 a 0 metros). Su resistividad varía de 25 a 80 Ω -m.

La unidad 5 se encuentra en todo el perfil y hacia el SEV 6 se encuentra en la superficie. Esta unidad presenta resistividades muy bajas dentro del rango de 1 a 10 Ω -m y espesores del orden de 150 a 200 metros, siendo la más consistente geoelectricamente.

Finalmente se presenta la unidad 6, la cual tiene resistividades que varían entre 20 y 50 Ω -m con un espesor no determinado. Esta unidad se encuentra en todo el perfil aunque en el SEV 23 no es evidente su límite con la unidad anterior, pudiéndose encontrar a una profundidad mayor a los 400 metros.

- Perfil 2

El perfil 2 se localiza al este de San Francisco del Rincón, tiene una orientación NW-SE aproximadamente paralelo al perfil 1.

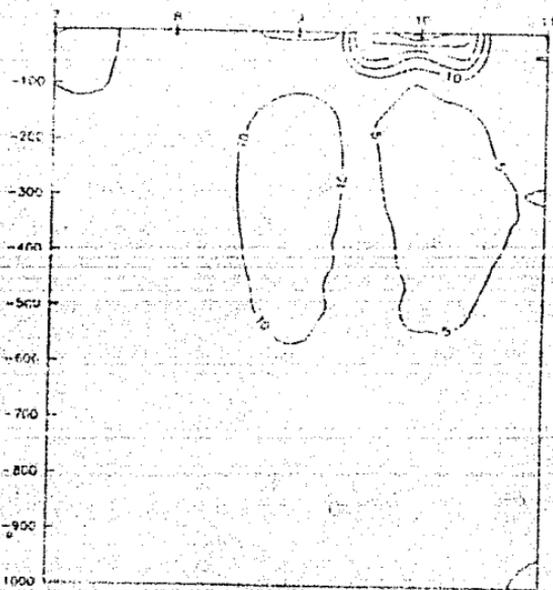
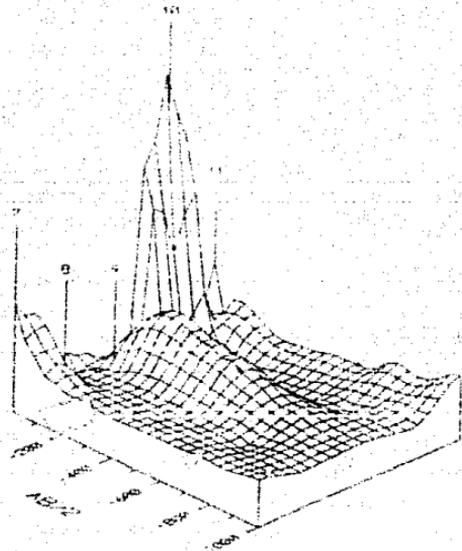


FIG. 5.4 PERFIL DE ISORRESISTIVIDAD APARENTE 2

Tiene una longitud de 6.2 km y se compone de 8 SEV's, los números 7, 8, 9, 10 y 11. El SEV 7 sirve como punto del anclaje con los perfiles 3 y 5.

La subsección de isorresistividades aparentes de este perfil, figura 5.4, muestra en general un modelo de un medio muy homogéneo de bajas resistividades, aunque en la parte superficial del SEV 10 se tiene una zona oscura de alta resistividad pudiéndose asociar con los máximos relativos del perfil 1 y debajo de esta, una zona de mínima resistividad. En general las tendencias conductivas son similares a las del perfil 1.

En el perfil geoelectrico de la figura 5.5, se muestra un modelo de 5 unidades geoelectricas. La primera de estas solo se presenta en los SEV's 7 y 11 con espesor menor a 10 metros y resistividades de 12 a 20 Ω -m.

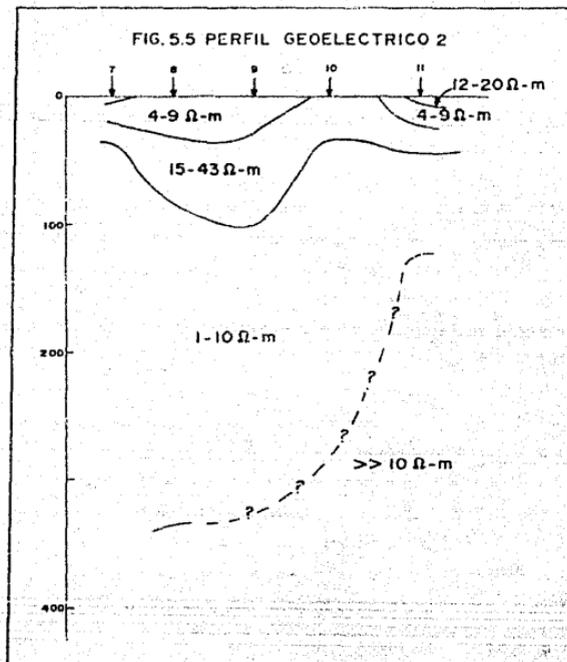
La unidad 2 se presenta en todos los sondeos excepto en el SEV 10. Esta unidad muestra resistividades entre 4 y 9 Ω -m con espesor de 15 a 40 metros.

La unidad 3 se presenta a lo largo de todo el perfil y a la altura del SEV 10 se hace superficial. La resistividad varia entre 13 y 45 Ω -m con espesores de 18 a 60 metros.

Debajo de la unidad anterior se encuentra la unidad 4 la cual consiste en un gran paquete que presenta resistividades extremadamente bajas, menores a 10 Ω -m y un espesor mínimo de 80 metros con un máximo de aproximadamente 300 metros en el SEV 7.

En la parte final de todo el perfil se encuentra la unidad 5, esta unidad solo se hace evidente su presencia en los sondeos 8 y 11, pero dada la morfología de la curva de resistividad

FIG. 5.5 PERFIL GEOELECTRICO 2



aparente de cada uno de los sondeos que forman este perfil, se infiere su presencia. Su resistividad varía pero generalmente es mayor a los 10 Ω -m. Las dos últimas unidades se asocian a las 2 detectadas en la parte inferior del perfil 1.

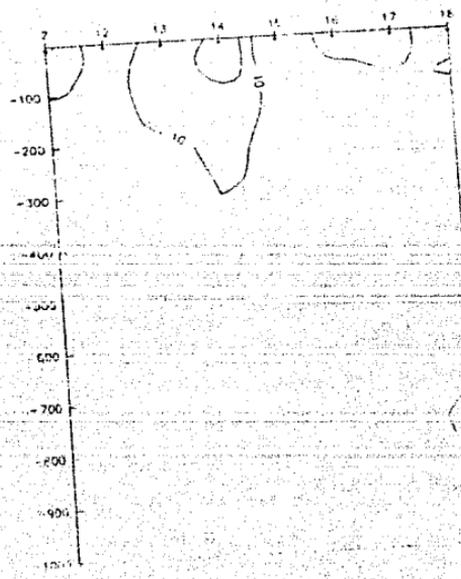
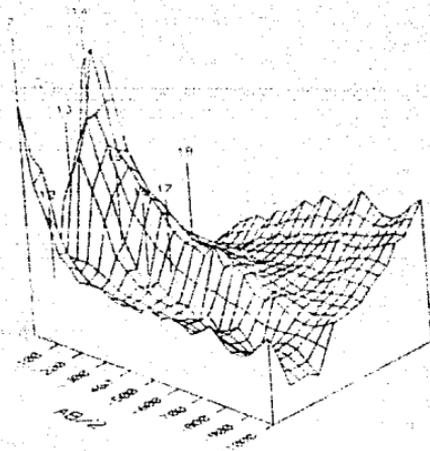
- Perfil 3

Se encuentra al este de San Francisco del Rincón, tiene una dirección NE-SW hacia la ciudad de León. Está compuesto de 8 SEV's con longitud de 11 Km aproximadamente. Los SEV's que lo forman son el 7, 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 18. Se correlaciona con los perfiles 2 y 5 en el SEV 7, en tanto que con el perfil 6 en el SEV 16.

De la seudosección de isorresistividades aparentes, figura 5.6, se puede observar que se trata de un medio bastante homogéneo geoelectricamente, de muy bajas resistividades el cual se extiende a lo largo de todo el perfil. Muestra además, una zona de resistividades ligeramente mayores pero solo superficialmente. Se nota también un ligero aumento de la resistividad hacia el final del SEV 17 y 18.

En el perfil geoelectrico de la figura 5.7 se puede notar la presencia de 4 unidades geoelectricas. La primera unidad se encuentra en los primeros 5 SEV's, tiene un espesor de 1 a 8 metros y resistividad entre 12 y 20 Ω -m.

La segunda unidad se encuentra debajo de la primera unidad y se presenta en la superficie hacia los SEV's 16, 17 y 18. Esta unidad aparece en dos partes, la primera de ellas entre los sondeos 7, 12 y 13 con un rango resistivo entre 6 y 8 Ω -m y con



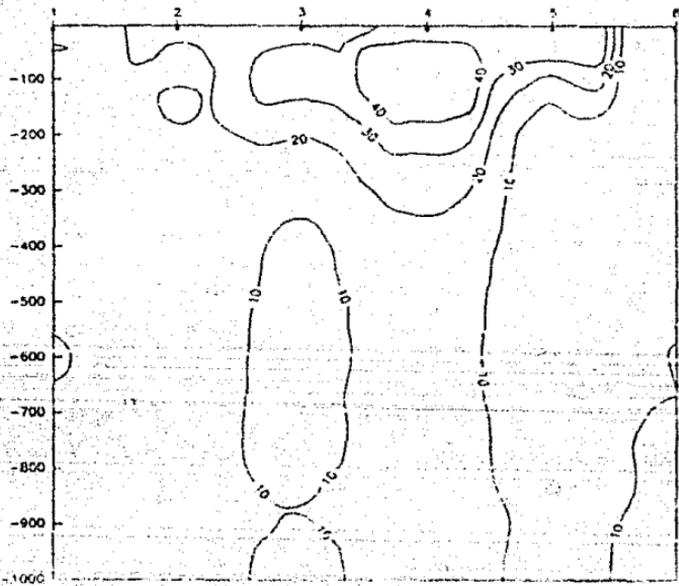
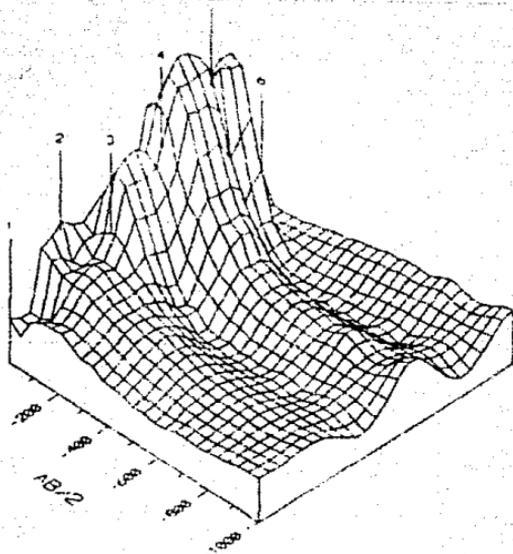


FIG. 5.2 PERFIL DE BARRAS SIMILAR ASENTI 1

un espesor de 4 a 20 metros; la segunda unidad se encuentra en todo el perfil con un espesor mínimo de 20 metros y resistividades que varían de 2 a 12 Ω -m.

La tercera unidad se presenta como una intercalación dentro de la unidad anterior y no se presenta en los SEV's 17 y 18. Tiene un rango de resistividades de 10 a 31 Ω -m con espesor variable de 20 a 70 metros y no está bien definido su límite hacia el final del perfil.

La última unidad, de carácter conductivo (6-14 Ω -m), no presenta una geometría muy definida, infiriéndose su presencia hacia el sondeo 13.

- Perfil 4

Este perfil se localiza a 10 Km al sur de San Francisco del Rincón y tiene una orientación casi N-S. Está formado por los SEV's del 19 al 28, con una longitud de aproximadamente 11.5 Km. Tiene conexión con el perfil 1 en el sondeo 23 y con el perfil 5 en el sondeo 25.

En la pseudosección de isorresistividades aparentes de la figura 5.8 se puede observar que se trata de un medio estratificado en la parte superficial de todo el perfil, con un cierto buzamiento en dirección del SEV 19, a partir del SEV 22 y 23.

Hacia la parte inferior se trata de un medio homogéneo de gran espesor y en la parte final se observan ligeros aumentos de resistividad a partir del sondeo 22 al 29.

En el perfil geoelectrico de la figura 5.9 se puede ver que

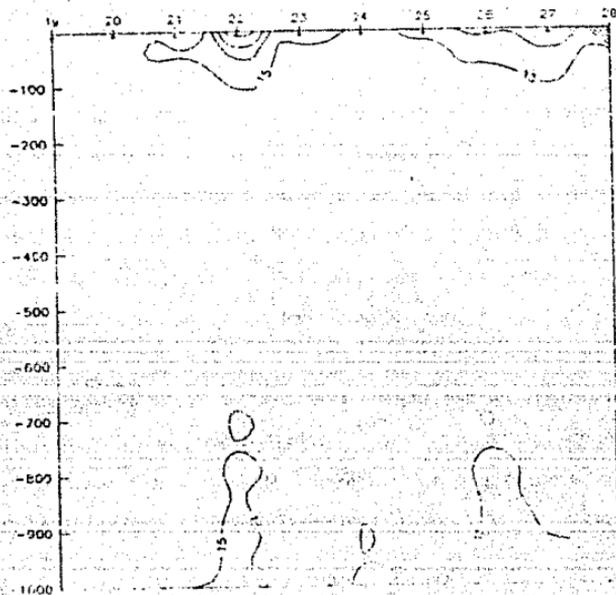
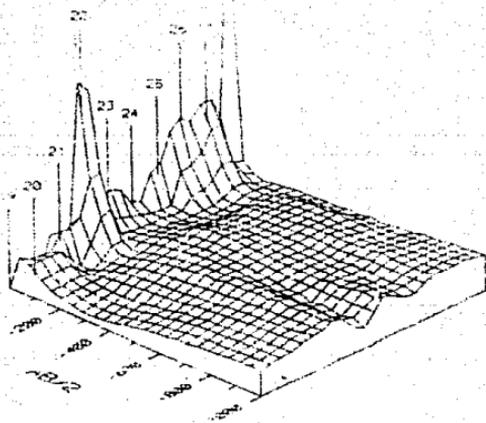


FIG. 1. E. PROFILE DE ...

el modelo corresponde a un medio de 7 unidades geoelectricas.

La primera unidad se presenta unicamente del SEV 22 al 28. Tiene un rango de resistividades de 20 a 90 Ω -m y un espesor máximo de 10 m. Se observa un aumento del espesor hacia el SEV 26 y 27 en donde es máximo.

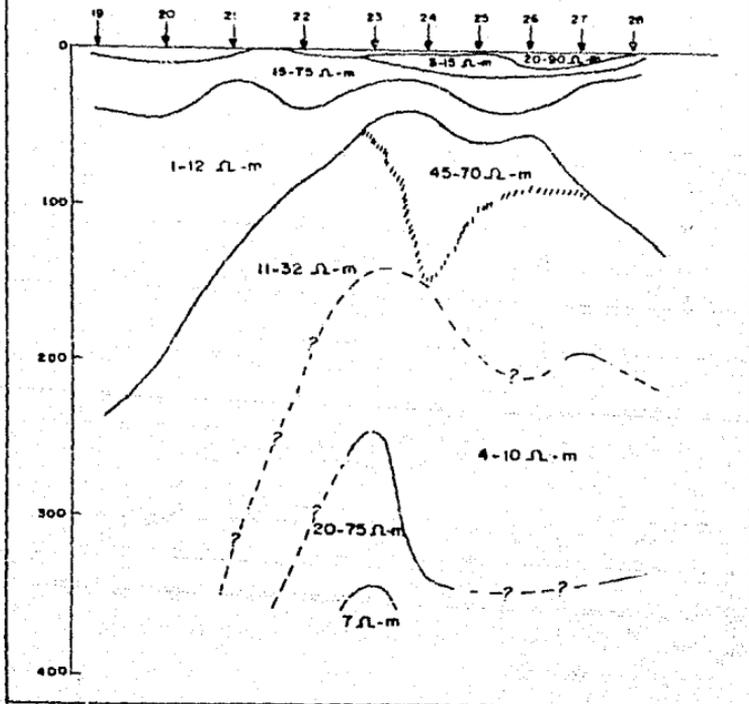
Debajo de la unidad anterior se encuentra la unidad 2, la cual se presenta en todo el perfil excepto en el SEV 22. Esta se encuentra superficialmente del SEV 19 al 21 y alcanza espesores de hasta 25 metros. Se trata de una unidad muy conductiva, con resistividades de 3 a 15 Ω -m.

La tercera unidad se extiende por todo el perfil siendo superficial entre los sondeos 21 y 22. Se puede notar la presencia de una secuencia de crestas y valles a lo largo de toda la unidad debido a la variación del espesor que es del orden de 8 a 40 m. Su resistividad varia dentro del rango de 15 a 75 Ω -m pero con mayor frecuencia es del orden de 30 Ω -m.

Subyaciendo a la unidad anterior se encuentra la unidad 4, la cual consiste de un paquete con bajas resistividades y espesor muy variable. El espesor es de unos 15 a 20 metros del sondeo 23 al 26 pero hay un gran aumento del mismo hacia ambos lados del perfil, siendo este de unos 200 m hacia el SEV 19. Las resistividades son muy bajas llegando a ser menores a 2 y como máximo 12 Ω -m.

La quinta unidad sigue la tendencia de la unidad anterior e incluso su limite inferior no está claramente diferenciado y no se detecta en la parte inicial del perfil. Entre los sondeos 23 a 26 se presenta un aumento muy notable de la resistividad por lo

FIG. 5.9 PERFIL GEOELECTRICO 4



que se hace notar en el perfil como una discontinuidad de la unidad, que presenta resistividades de 45 a 70 Ω -m. El espesor de la unidad no está perfectamente definido pues, como ya se mencionó, no se detecta claramente su límite inferior. La resistividad de la unidad varía de 11 a 32 Ω -m.

La sexta unidad sigue también la tendencia del buzamiento hacia el SEV 19. Su espesor no está bien determinado pero es del orden de 100 m, con un rango de resistividades de 4 a 10 Ω -m. Debajo de esta unidad se observa una cúpula que sigue con la tendencia ya mencionada, muestra resistividades de 20 a 75 Ω -m. Al final del SEV 23 se nota un ligero descenso de la resistividad pero es de manera local y no muy clara.

- Perfil 5

Este perfil se localiza a 3 Km al este de San Francisco del Rincón y está constituido por los sondeos 25, 29, 30, 31 y 7; tiene una orientación casi E-W con una longitud de 6 Km aproximadamente. Este perfil tiene enlace con el perfil 4 en el SEV 25 y con los perfiles 2 y 3 mediante el SEV 7.

En la pseudosección de isorresistividades aparentes de la figura 5.10 se puede observar que en la parte superior de la misma se trata de un medio estratificado de resistividades ligeramente altas, sobretudo a la altura de los sondeos 29 y 30; sin embargo, hacia la parte inferior se observa un paquete de gran espesor y bajas resistividades que muestra una tendencia a disminuir en la dirección del SEV 7.

En el perfil geoelectrico de la figura 5.11 se observa que

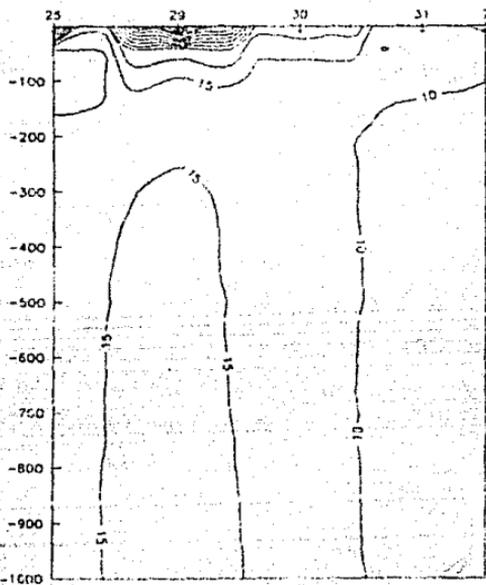
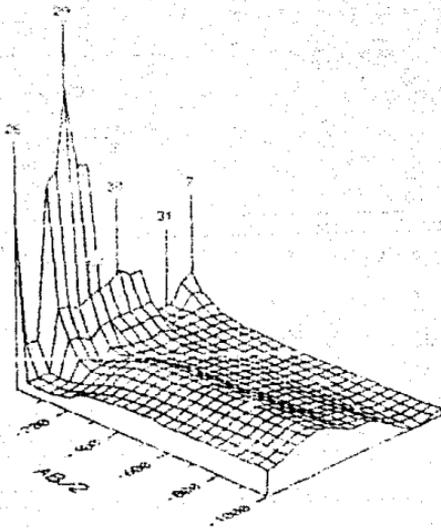


FIG. 5.17. PROFILE DE LA RECTIFICATION ASPECTE 1

se trata efectivamente de un medio estratificado en el que se han detectado 6 unidades geoelectricas. La primera de estas se encuentra superficialmente en todo el perfil excepto en el SEV 29 y muestra un rango de resistividades de 15 a 60 Ω -m con espesor máximo de 10 metros.

La segunda unidad se encuentra de la misma manera que la anterior y no se presenta en el SEV 29, es una unidad de espesor no mayor a 20 metros y con un rango de resistividades muy bajas, del orden de 3 a 15 Ω -m.

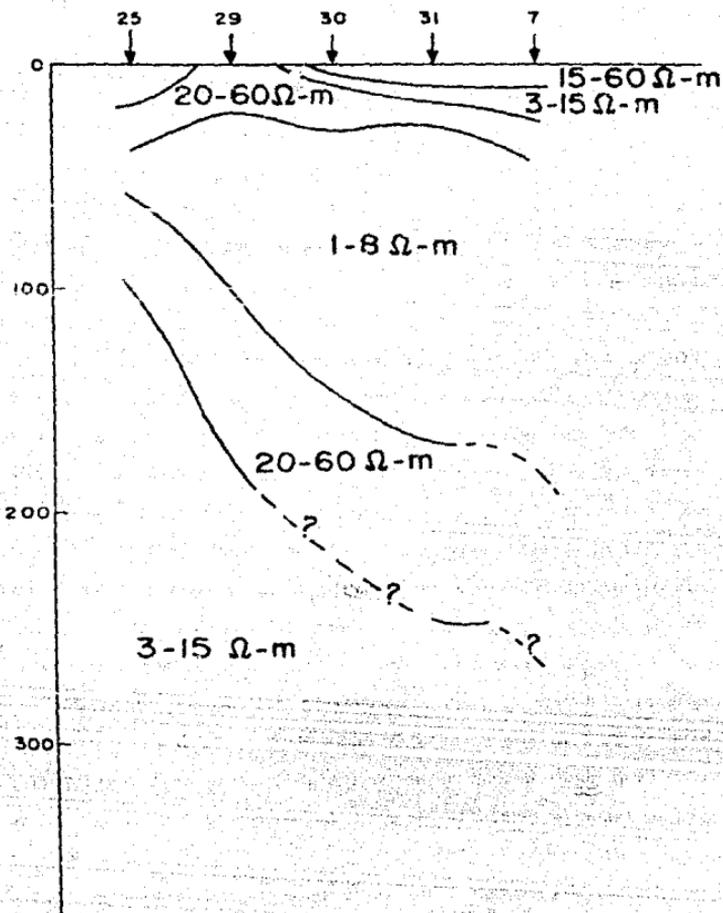
Debajo de la unidad anterior se encuentra la tercera unidad, la cual se presenta a lo largo de todo el perfil y a la altura del SEV 29 se encuentra superficialmente y es donde alcanza su máximo espesor. Presenta resistividades ligeramente altas dentro del rango de 20 a 60 Ω -m y con un espesor de 10 a 25 metros.

La cuarta unidad se presenta en todo el perfil y se trata de un paquete de resistividades muy bajas, dentro del rango de 1 a 8 Ω -m y un espesor mínimo de 24 metros. El espesor de esta unidad aumenta en dirección del SEV 7, pero en este sondeo no está bien determinado, por lo que solo se infiere su límite.

A la cuarta unidad le subyace la unidad 5, la que muestra una variación de su resistividad del orden de 20 a 60 Ω -m y un espesor de 40 a 80 metros que, como la unidad anterior, tiende a aumentar en dirección del SEV 7. El límite de esta unidad a la altura del SEV 30 no se encuentra bien definido, pero dada la forma de la curva de resistividad aparente de este sondeo, se supone su presencia.

Finalmente, la sexta unidad se encuentra en la parte

FIG. 5.11 PERFIL GEOELECTRICO 5



inferior del perfil, esta unidad muestra resistividades del orden de 3 a 15 Ω -m con un espesor no determinado y sigue la tendencia de las dos unidades anteriores en el sentido de la variación de su espesor.

- Perfil 6

Este perfil se localiza a unos 9 Km al suroeste de la Ciudad de León y tiene una orientación casi NW-SE. Está compuesto de 6 sondeos que son el 16, 32, 33, 34, 35 y 36; con una longitud aproximada de 9 Km. Este perfil tiene enlace con el perfil 3 mediante el SEV 16.

En la pseudosección de isorresistividades aparentes de la Figura 5.12 se puede observar que se trata de un medio estratificado de resistividades no muy altas. Se nota también la tendencia del buzamiento de las capas en dirección del SEV 16 además de un aumento de los valores de resistividad a la altura de los sondeos 35 y 36.

En el perfil geoelectrico de la figura 5.13 se observa claramente que se trata de un medio estratificado de 7 capas que efectivamente muestran la tendencia del buzamiento ya señalado por la pseudosección anterior. La primera de estas capas se encuentra superficialmente únicamente del sondeo 34 al 36, con espesor de 2 metros y resistividades de 15 a 53 Ω -m.

La segunda unidad se encuentra a lo largo de todo el perfil con un espesor variable de 8 a 80 metros y con un rango de resistividades de 3 a 10 Ω -m.

La tercera unidad se presenta como una intercalación dentro

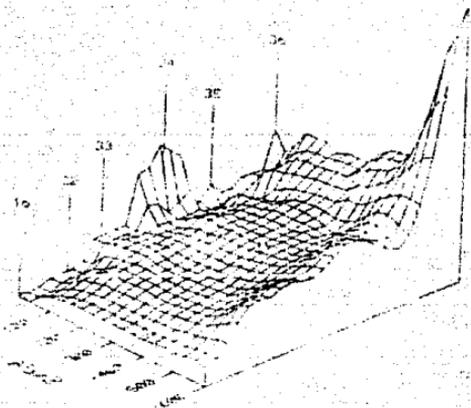
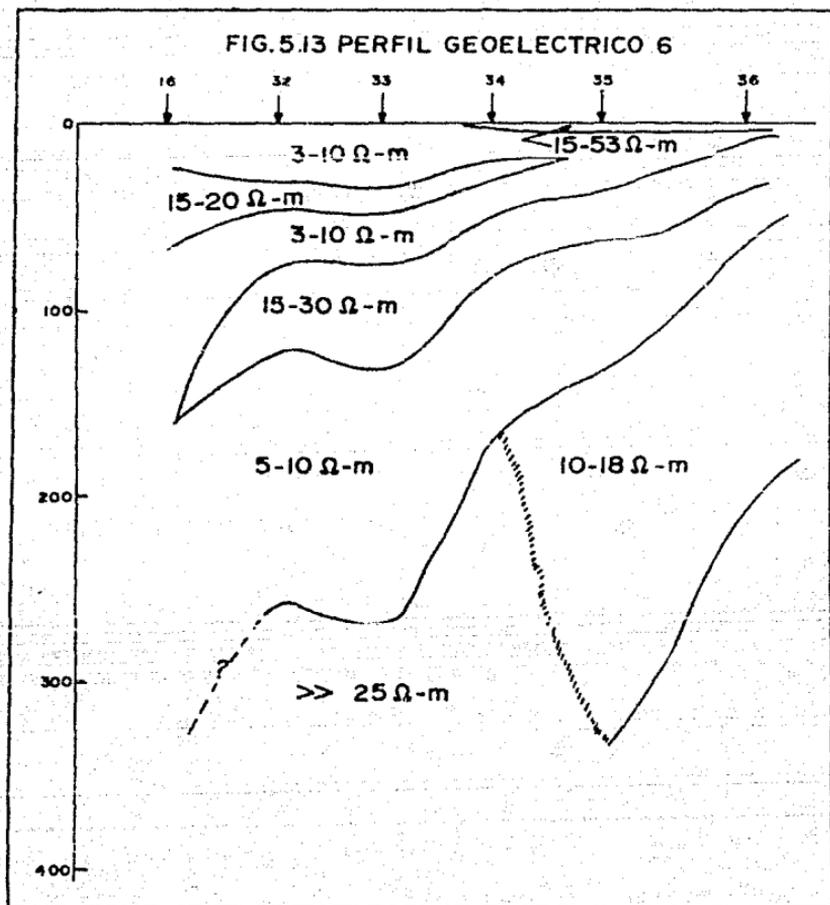


FIG. 1. CURVA DE PAPER GRABED APARENTE

FIG. 5.13 PERFIL GEOELECTRICO 6



de la unidad anterior. La unidad va disminuyendo su espesor hacia la parte derecha del perfil y no se presenta a la altura de los sondeos 35 y 36. Su máximo espesor es de 40 metros y la resistividad varía de 15 a 20 Ω -m.

La cuarta unidad sigue con la tendencia ya mencionada y se encuentra a lo largo de todo el perfil. Su resistividad es del orden de 15 a 30 Ω -m con un espesor variable. El espesor tiende disminuir hacia el SEV 16 y es máximo hacia el SEV 33 con aproximadamente 60 metros.

Debajo de la unidad anterior se encuentra la quinta unidad. Esta unidad presenta resistividades muy bajas, generalmente de 5 a 10 Ω -m. Su espesor varía de 25 a 200 metros y a la altura del sondeo 16 no se encuentra claramente definido.

La sexta unidad se presenta únicamente hacia los sondeos 35 y 36 y consiste de un paquete de espesor aproximado a 200 metros con resistividad de 10 a 18 Ω -m que sigue la tendencia anteriormente mencionada. Esta unidad se encuentra en contacto lateral de manera irregular con la séptima unidad, la cual presenta resistividades muy altas generalmente \gg 25 Ω -m y espesor no determinado.

6. MODELO FUNCIONAL

6.1 Introducción.

Para el planteamiento de un modelo funcional del sistema acuífero, se realiza la integración de la información geológica superficial y subterránea (de los pozos ya mencionados en el capítulo 3), con los resultados de la interpretación geoelectrica descrita en el capítulo anterior. Con base en la integración anterior se lleva a cabo la representación en 2 secciones isométricas que muestran los resultados obtenidos de esta.

Además se incorporan los resultados de la revisión de la información piezométrica de la zona de estudio para establecer el papel que representan en el funcionamiento hidrodinámico del sistema.

Se realiza también una correlación hidrogeoquímica de análisis químicos de la zona, con la información geoelectrica obtenida. Es importante aclarar que los resultados geoquímicos del estudio efectuado por IGF(1989), corresponde a análisis fisicoquímicos de descargas de pozos y no tienen una representatividad vertical.

6.2 Secciones isométricas.

Tomando como base los perfiles geoelectricos, se estructuraron 2 secciones isométricas las cuales muestran los resultados de la integración geológica-geoelectrica. El objeto de estas secciones es de dar una idea de la posible distribución espacial de los materiales en el subsuelo, hasta una profundidad

aproximada de 350 metros. La primera de las secciones está compuesta por los perfiles 2, 3 y 6, los cuales ya han sido descritos anteriormente. La otra sección isométrica se compone de los perfiles 4, 5, 3 y 6. A continuación se describen ambas secciones.

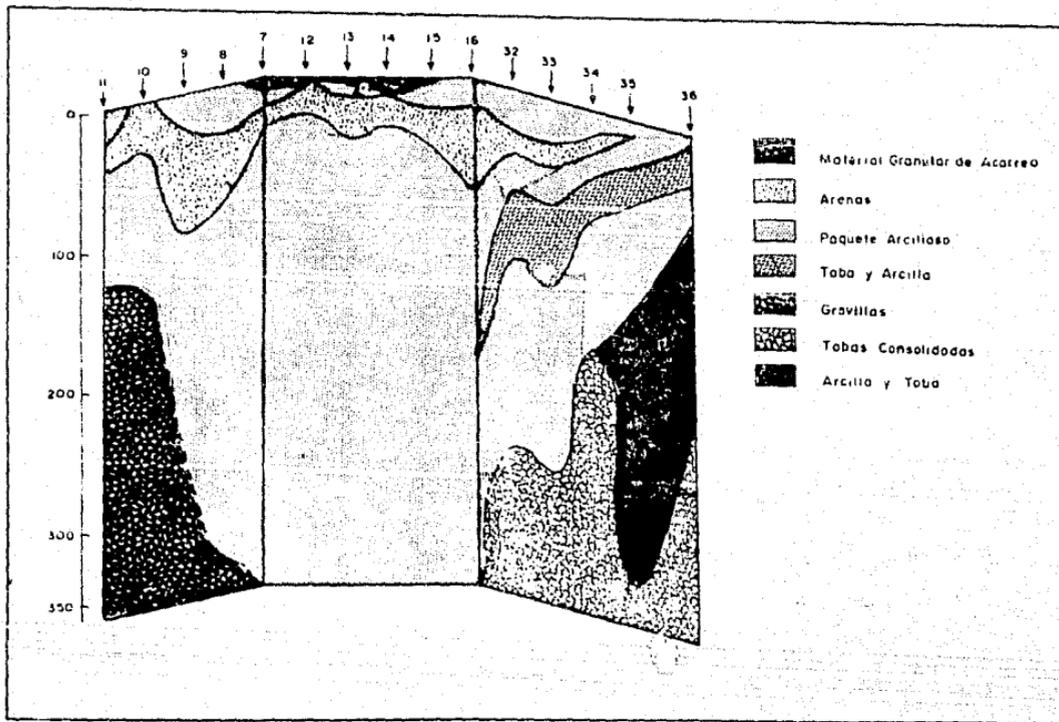
6.2.1 Sección Isométrica 2-3-6

Esta sección está formada por los perfiles 2, 3 y 6, los cuales ya fueron interpretados geoelectricamente como se mostró en el capítulo anterior. De acuerdo con esos resultados y con la información obtenida de los pozos PL-3, PL-4 y PLCB-15, se propone la presencia de 7 unidades, las cuales se muestran en la figura 6.1 de este capítulo.

La primera unidad se compone de material granular de acarreo, de forma y composición muy variable y que solo se encuentra superficialmente en la parte central de la sección.

La segunda unidad se asocia, probablemente, a un paquete de arenas que se encuentra a lo largo de toda la sección. Esta unidad presenta resistividades ligeramente altas con respecto a los paquetes conductivos, lo que puede indicar un cierto grado de compactación de los materiales de la misma.

La tercera unidad consiste de un gran paquete que presenta resistividades sumamente bajas por lo que se supone está compuesto de material arcilloso que muestra una baja porosidad y permeabilidad. Se considera que se trata de un solo paquete el que está presente a lo largo de toda la sección, ya que geoelectricamente no es posible diferenciar la presencia de capas



que muestran variaciones en el tamaño de grano del material o bien en su forma.

La cuarta unidad se presenta hacia los SEV's 16 al 36 sobre el perfil 6 y tal vez está constituido por una alternancia de tobas. Presenta resistividades ligeramente bajas por lo que la disminución de esta se puede asociar a la presencia de arcillas empacadas en las tobas.

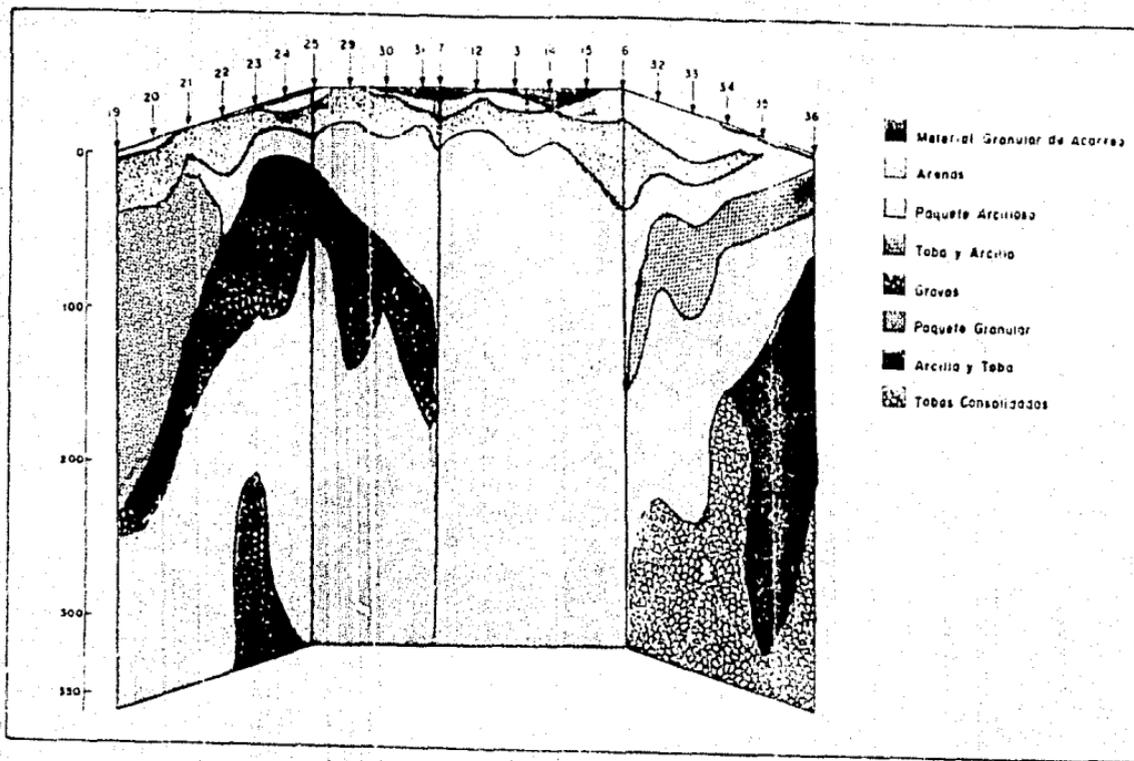
La quinta unidad consiste de un paquete de Gravilla y Grava, el cual se presenta unicamente sobre la zona del perfil 2. Se puede observar un aumento de resistividad con la profundidad, por lo que suponemos que a medida que aumenta la profundidad se incrementa el grado de compactación de la gravilla disminuyendo su permeabilidad.

La sexta unidad se trata de un paquete de arcilla con intercalaciones de tobas. En conjunto presenta resistividades ligeramente bajas debido a la presencia de la arcilla. Se encuentra solamente a la altura de los SEV's 34, 35 y 36 pero llega a tener un espesor del orden de los 100 metros.

La séptima unidad presenta resistividades altas, aunque solamente se encuentra hacia la porción ocupada por el perfil 6. Muestra una forma muy irregular pero dada su alta resistividad se supone que se trata de una serie de tobas bien consolidadas que pueden estar relacionadas con las unidades reportadas por los cortes litológicos de los pozos PL-3 y PL-4 del capítulo 3.

6.2.2 Sección Isométrica 4-5-3-6

Esta sección se compone de los perfiles 4, 5, 3 y 6 que



también ya han sido descritos e interpretados anteriormente. Para la integración geoelectrica-geológica de esta sección se conto con la información de los pozos PLCB-6, PGFB-5 y PLC-10.

En la sección isométrica de la figura 6.2 se puede observar la presencia de 8 unidades. De estas unidades algunas ya han sido descritas puesto que pertenecen también a la sección isométrica 2-3-6, por lo cual solo se describen aquellas unidades que no han sido consideradas anteriormente.

En primer lugar tenemos la presencia de una serie de gravas. Esta unidad se encuentra en la zona de los perfiles 4 y 5. Su forma es variable y su limite inferior no se encuentra claramente definido. Se puede notar un cambio gradual en las características de la grava, en especial el grado de consolidación que presenta. Dado su comportamiento geoelectrico se supone que las gravas se encuentran más consolidadas hacia el perfil 5.

La otra unidad propuesta en esta sección se localiza unicamente en el perfil 4. Esta unidad se compone, probablemente, de un gran paquete de material granular del tipo de arenas y/o gravas. Esta unidad se considera como una variación en el tamaño de grano de la unidad descrita como paquete arcilloso, pero que presenta aproximadamente, el mismo comportamiento geoelectrico. Las demás unidades que conforman esta sección ya se han descrito anteriormente.

6.3 Correlación Hidrogeoquímica.

Del mapa de STD se puede observar una zona de valores altos (2500 mg/lit), hacia los sondeos del perfil 6 y los SEV's 16, 17 y

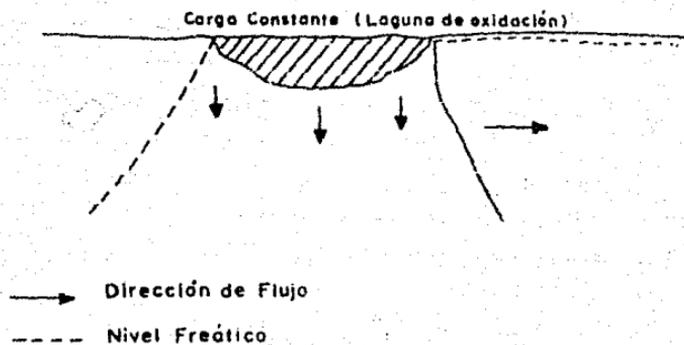
figuras 5.1 del capítulo anterior. Se puede notar que estas corresponden con las zonas en donde la resistividad toma sus valores más bajos, alrededor de 10 Ω -m. en toda la zona de estudio (figura 6.3).

En la parte norte de la zona de estudio se encuentra la zona preferencial de descargas de aguas negras, lo que da lugar a tres lagunas de oxidación que se encuentran en el mapa de referencia, provocando escurrimientos importantes, lo cual ocasiona que la zona comprendida entre la carretera a San Francisco del Rincón y la carretera a San Roque de Torres, pudiera considerarse como una zona de carga constante, con niveles de saturación altos y constantes que facilitan la infiltración hacia el sistema acuífero; esto aunado a una posible fuente de contaminación por cromatos ha originado que se modifique la conductividad de todo el paquete granular saturado como se muestra en la figura 6.1. En este no fue fácil determinar el nivel de saturación ya que este se encuentra entre los 0 y 5 metros debido a la carga existente de las aguas negras de la ciudad de León.

Todo el paquete se considera como uno solo debido a que, como se menciona en el capítulo 4, el medio está saturado por un buen electrolito que debe tener preferencialmente cloro proveniente de la descomposición de materia orgánica de las aguas negras vertidas en la zona.

La zona conductiva es relativamente grande, dado que desde Plan de Ayala, Malagana y Granjas, es una zona agrícola que es regada con aguas negras que no pasan por ningún tratamiento y la remoción del suelo facilita aun más la infiltración de estas

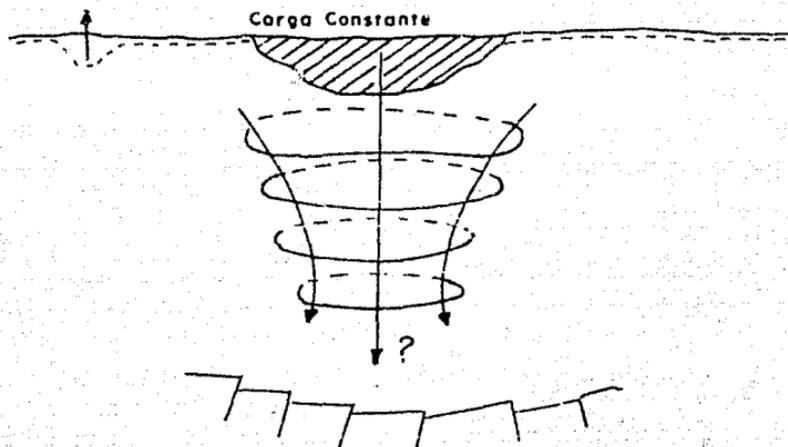
Fig. 6.4 Distribución de lixiviado por flujo regional



aguas con el consecuente arrastre de fertilizantes e insecticidas agregados en los procesos agrícolas.

Si se hace un análisis de los mapas de isoresistividad aparente de la figura 5.1, la distribución preferencial de las zonas conductivas no corresponde a un medio con una fuente localizada de contaminación en el cual las isolinneas de SFD aumentan lateralmente y en profundidad (figura 6.4). Este esquema, probablemente no se está representando debido a que, según IGF(1989), se postula la hipótesis de que existen componentes importantes de flujo vertical (figura 6.5), en donde los contaminantes son acarreados por este flujo hasta las partes más profundas del acuífero y, quizás allí, difundidos a todo el sistema. Esto se puede comprobar por el hecho de que las zonas más conductivas van estrangulándose con la profundidad, como también lo señala el estudio de IGF(1989).

Fig. 6.5 Distribución de lixiviado por flujo vertical



ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

7. DISCUSION DE RESULTADOS

De los resultados encontrados en este estudio se puede obtener una serie de conclusiones, de las cuales las más importantes desde el enfoque geofísico son las siguientes:

- i) La zona de estudio, que corresponde a la porción norte de la cuenca del río Turbio, presenta paquetes conductivos uniformizados por la presencia de un electrolito en los cuales no es posible distinguir geoelectricamente o hacer referencias estratigráficas ya que esta cuenca es de origen tectónico y los sedimentos deben tener espesores mayores a 400 metros y estar constituidos por sucesiones de material de grano fino, las que deben tener diferencias en transmisibilidades o permeabilidades pero que al estar saturados por el electrolito no son distinguibles. Por esto es que, como se ve en las secciones trabajadas (fig 6.1 y 6.2), se mencionan grandes paquetes conductivos más que de capas, ya que no es posible hacer una diferenciación estratigráfica.

- ii) El papel de un electrolito en las variaciones de conductividad de un medio saturado con el mismo, es bastante complejo. En este trabajo lo más que se

pudo observar, siendo además lo obvio, es que a mayor mineralización menor resistividad. Se infiere que el mayor peso en la conducción electrolítica lo tienen los iones de cloro, no pudiéndose discernir el rol de los cromatos. Este tipo de correlación requiere de pruebas de laboratorio en muestras no alteradas de roca saturada con el flujo local. Sería de gran interés continuar con esta investigación vinculando profesionales de otras áreas (Químicos, Físicos, Matemáticos) ya que en problemas de contaminación es de gran utilidad.

iii) Dado el origen geológico de la cuenca, sería probable que la respuesta geoelectrica se deba a niveles de evaporitas producto de los depósitos lacustres de la misma o a un efecto conjunto del electrolito con las evaporitas, lo cual explicaría la homogeneidad geoelectrica del paquete. Lo anterior no se puede comprobar con la información de los pozos ya que la descripción de estos se refiere a muestras de canal.

iv) No es posible diferenciar el nivel de saturación ya sea nivel freático, nivel estático o en su caso el dinámico ya que es una zona de explotación, debido por un lado a la presencia de la zona de carga constante que provoca la existencia de un nivel de

saturación de 0 a 5 metros en una zona de baja precipitación, y por otro lado, debido a que los contrastes resistivos entre la zona saturada y no saturada son muy bajos ya que es una zona de agricultura intensa y los primeros metros están mineralizados por la presencia de insecticidas y abonos arrastrados por el retorno del riego.

vi) Analizando los SEV's realizados en 1981 por SARH(1982) con los realizados en 1988 por el Instituto de Geofísica de la UNAM, se encontró al integrar las secciones isométricas, ligeras diferencias en los valores de resistividad, los cuales fueron explicados debido a que en ese lapso de tiempo se incorporaron más sales al sistema acuífero y bajó sus valores promedio de resistividad. Esta diferencia fue, por paquetes, de 5 a 10 Ω -m pero que pudieron ser correlacionados por contrastes entre estos, siendo una constante en todos los SEV's realizados entre 1981 y 1988. Esto explica también que el proceso de enriquecimiento de sales del sistema continúa y sería importante tener un monitoreo para poder determinar la manera en que esto afecta la resistividad de los paquetes.

vi) Sería conveniente profundizar en estudios de carácter hidrogeoquímico o hidrogeológico en esta

zona debido a que las aguas subterráneas presentes sirven como fuente de abasto para la ciudad de León y San Francisco del Rincón y, como se ha visto, se han evidenciado grados de mineralización que pudieran afectar la calidad de esta agua.

vii) El proceso de interpretación de los SFV's se basa en programas de computadora que siguen el algoritmo del filtrado lineal propuesto por O'Neill. Se probaron otros programas y las diferencias en interpretación no fueron significativas, seleccionandose el primero por permitir una interacción más íntima entre el geofísico y el sistema de interpretación, lo cual certifica que los resultados reflejan la experiencia, calidad y habilidad en el manejo de un programa de este tipo.

viii) El poder resolutivo de los métodos eléctricos en este tipo de situaciones no es tan alto como el que se pudiera esperar en una cuenca sedimentaria con un sistema acuífero con agua de calidad normal. Esto es debido a que los contrastes no son suficientemente grandes como para poder hacer inferencias estratigráficas. Esto no significa que el método no sea bueno, quizás no se debería de tomar sus resultados como del todo resolutivos ya que habría que incorporar por ejemplo, información

química vertical (la cual no existe en la zona) y una mayor correlación con la litología de los pozos de la zona.

- (ix) Para definir que tipo de electrolito está saturando el medio, sería conveniente (además de efectuar un análisis hidrogeoquímico) incluir un estudio isotópico combinando por ejemplo Oxígeno-18 con Deuterio para entender la dinámica del sistema acuífero; así como realizar perfiles de flujo vertical en algunos de los pozos que se encuentran en la limitante entre la zona sedimentaria y la Sierra de Guanajuato.

8. BIBLIOGRAFIA

- ASTIER, J.L. Geofísica Aplicada a la Hidrogeología. Ed. Paraninfo. Segunda Edición. Madrid 1982.
- CANTOS FIGUEROLA, J. Tratado de Geofísica Aplicada. Escuela Superior de Ingenieros de Minas. Segunda Edición. Madrid. 1978.
- CRUZ HERNANDEZ, J. Propiedades Físicas y Químicas del agua desde el punto de vista geoelectrico. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias, UNAM. 1986.
- IGF.UNAM. Estudio Hidrogeoquímico y Modelación Matemática del Acuífero del Río Turbio, para definir las acciones encaminadas a proteger de contaminantes la fuente de abastecimiento de agua de la ciudad de León, Gto. CNA-SARH. México 1989.
- KOEFOED, O. GEOSOUNDING PRINCIPLES 1. Ed. Elseiver Pub. Co. Amsterdam. 1979.
- LOPEZ RAMOS, E. Geología de México. Tomo III. México 1983.
- MENDOZA R., G. Conducción eléctrica en rocas sedimentarias que están total o parcialmente saturadas con agua. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias. UNAM. 1985.
- ORELLANA, E. Prospección Geoelectrica en Corriente Continua. Ed. Paraninfo. Segunda Edición. Madrid 1972.
- ORELLANA, E. & MONEY, H. Tablas y Curvas para Sondeos Eléctricos Verticales. Ed. Interciencia. Madrid 1965.
- PEREZ-ROSALES, C. Teoría sobre la relación entre factor de resistividad y porosidad. Revista del Instituto Mexicano del Petroleo. Vol. XV No. 4 Octubre de 1983. México.

- SARH. Estudio Geohidrológico Cuantitativo de la Cuenca Alta del Río Turbio, Guanajuato. Reporte Técnico. México 1982.

- SARH. Estudio de Exploración Geofísica y Actividades Geohidrológicas complementarias en la zona sur de León. Reporte Técnico. México 1988

- SPP Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática. Síntesis Geográfica de Guanajuato. México 1980.

- ZHODY, A. The Auxiliary Point Method of Electrical Sounding Interpretation and its Relationship to the Dar Zarrouk Parameter. Geophysics Vol. 30 pp 644-660. U.S.A. 1965.