



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISION DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**“EXPLORACIÓN GEOFÍSICA APLICANDO MÉTODOS
GEOELÉCTRICOS EN LA ZONA DE LA CALETA
DE XEL-HA, QUINTANA ROO”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A:

LEONID IGNACIO MÁRQUEZ GARCÍA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. OSCAR A. ESCOLERO FUENTES



CIUDAD UNIVERSITARIA, 2008.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Contenido

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
OBJETIVO.....	4
<i>Objetivo específico</i>	4
2. MARCO FÍSICO	5
<i>Localización y límites</i>	5
<i>Vías de comunicación</i>	5
<i>Fisiografía</i>	6
<i>Geología histórica</i>	6
<i>Geología superficial actual</i>	7
<i>Geología Kárstica</i>	8
3. CONCEPTOS TEÓRICOS.....	11
<i>Potencial eléctrico y diferencia de potencial</i>	11
<i>Corriente eléctrica</i>	11
<i>Densidad de corriente</i>	12
<i>Resistividad y Ley de Ohm</i>	12
<i>Ecuación general de la prospección eléctrica</i>	14
<i>Resistividad aparente</i>	18
<i>Métodos geoelectrónicos que miden ρ_a</i>	19
<i>Métodos de interpolación</i>	24
<i>Resistividad eléctrica de las rocas de acuerdo al contenido de agua</i>	25
4. METODOLOGÍA.....	27
<i>Selección</i>	27
<i>Prospección eléctrica</i>	28
<i>Procesamiento de datos geofísicos</i>	31
<i>Interpretación</i>	35
5. RESULTADOS	38
<i>Análisis de secciones obtenidas con calicatas</i>	38
<i>Análisis de secciones obtenidas con SEV's</i>	45
6. CONCLUSIONES	52
BIBLIOGRAFÍA.....	54
ANEXO 1	56
ANEXO 2	60
ANEXO 3	62

Índice de Figuras

Figura 2.1 Localización y vías de comunicación del área de estudio	
Figura 2.2 Fisiografía y clima del estado de Quintana Roo	6
Figura 2.3 Elementos de un paisaje kárstico.....	9
Figura 3.1 Líneas de corriente y superficies equipotenciales producidas por un electrodo puntual.....	16
Figura 3.2 Esquema que ejemplifica la diferencia de potencial entre dos puntos M y N dado un flujo de corriente. a) el punto N esta en el infinito, b) el potencial entre los puntos (electrodos) M y N se genera por la circulación de corriente entre los electrodos A y B.	17
Figura 3.3 Esquema del arreglo tipo Schlumberger.	18
Figura 3.4 Esquema que muestra la forma de operación del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV).	19
Figura 3.5 Esquema que muestra la forma de operación de la Calicata o Perfilaje eléctrico... ..	20
Figura 3.6 Esquema que muestra la forma de operación de la tomografía eléctrica.	20
Figura 3.7 Modelo conceptual de los parámetros de Dar Zarrouk.....	21
Figura 3.8 Ajuste de la variación a una función teórica (Variograma).....	25
Figura 4.1 Mapa de localización de perfiles eléctricos (líneas en color rojo) en coordenadas UTM WGS84.	27
Figura 4.2 Equipo para prospección eléctrica SYSCAL R1.....	28
Figura 4.3 Características de los arreglos tipo Schlumberger usados en las calicatas.....	29
Figura 4.4 Esquema de localización de los perfiles eléctricos (color rojo) en coordenadas UTM WGS84, sondeos eléctricos verticales (SEV) (en color azul) y pozos de muestreo en los alrededores de la Caleta de Xel-Ha (en color verde).	30
Figura 4.5 Muestreo de Pozos. a) sonda multiparamétrica HIDROLAB, b) muestra de piezómetros ubicados en el área de estudio, c) medición en piezómetros.....	31
Figura 4.6 Ejemplo de perfiles de resistividad aparente, a) perfil 1, creado con el método de interpolación inverso de la distancia (Inverse distance to a power); b) perfil 1, creado con el método de interpolación Krigin.....	32
Figura 4.7 Gráficas de la curva de campo antes y después de ajustar los empalmes.....	33
Figura 4.8 Modelos 1-D obtenidos con el programa WinGLink. Modelo estimado por programa (línea magenta) y modelo estimado por el interprete (línea verde). a) Muestra un ajuste bueno de la curva teórica con los datos de campo. b) Muestra un ajuste no muy bueno, pero que sigue la tendencia de los datos de campo.	34

<i>Figura 4.9 Sección geoelectrica 3 correspondiente a los SEV'S 10 A 14 obtenida con el programa WinGLink, se muestra la correlación que hay entre la imagen resultante de la interpolación y los modelos 1-D obtenidos.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4.10 Gráfica de conductividad eléctrica vs profundidad correspondiente al pozo de muestreo # 3.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4.11 Imagen de integración de los sistemas de cavernas en la zona de Xel Ha, (figura obtenida del "Programa de Monitoreo de Aguas Subterráneas de la Caleta de Xel-Ha y sus alrededores, Estado de Quintana Roo", 2005).....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 5.1 Sección geoelectrica correspondiente al Perfil 1, la correlación y calibración se hizo con los pozos 1 y 2.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 5.2 Sección geoelectrica correspondiente al Perfil 2, la correlación y calibración se hizo con los pozos 3 y 2.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 5.3 Sección geoelectrica correspondiente al Perfil 3 con alto contenido de agua en su mayoría.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 5.4 Sección geoelectrica correspondiente al Perfil 4, se presentan fracturas y zonas con baja resistividad debido al contenido de agua en ellas.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 5.5 Presencia de agua en los alrededores del Perfil 3 en los primeros 570 m.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 5.6 Sección geoelectrica correspondiente al Perfil 5. Presencia de fracturas, así como disminución de la resistividad en la dirección noreste.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 5.7 a) Sección eléctrica 1, b) sección geoelectrica 1.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 5.8 a) Sección eléctrica 2, b) sección geoelectrica 2.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 5.9 a) Sección eléctrica 3, b) sección geoelectrica 3.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5.10 Esquema de localización de cavernas de la zona de la Caleta de Xel-Ha.....</i>	<i>50</i>

Índice de Tablas

<i>Tabla 4.1 Configuración de la distancia de los electrodos en metros para cada SEV.</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 4.2 Datos de las curvas de campo antes y después de ajustar los empalmes (SEV 5)..</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 4.3 Resistividades eléctricas de materiales.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 5.1 Clasificación de las unidades geoelectricas.</i>	<i>45</i>

Resumen

El presente trabajo de exploración geofísica con métodos eléctricos, se realizó como parte del proyecto que tiene por nombre “Programa de Monitoreo de Aguas Subterráneas de la Caleta de Xel-Ha y sus alrededores, Estado de Quintana Roo”, realizado por investigadores del Instituto de Geología y Geofísica de la UNAM en conjunto con el Centro de Estudios del Agua – Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY). Con la finalidad de caracterizar el Kárts de los alrededores de la Caleta de Xel-Ha, para identificar cavernas que puedan transportar agua, proveniente de lugares más remotos que se encuentren mas al interior de la península de Yucatán, que interactúen directamente con ésta.

El trabajo de exploración geofísica consistió en la aplicación de dos técnicas de prospección eléctrica, por un lado la Calicata o Perfilaje Eléctrico, que proporcione un panorama de las estructuras de acuerdo a las imágenes construidas, en la que se presentan las variaciones laterales de resistividad aparente. La otra técnica fue el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), para buscar este tipo de variaciones también de forma vertical.

Los resultados obtenidos muestran que las unidades geoeléctricas encontradas en el subsuelo de los alrededores de la Caleta, principalmente se relacionan con rocas carbonatadas que presentan fracturamiento así como con calizas blandas o Sahcab como se les conoce localmente. Estas son propicias para la formación de cavernas (Duch, 1991), las cuales se relacionan a zonas con menor resistividad ya que posiblemente son cavidades llenas de agua. Todo lo anterior en conjunto con la presencia de agua a poca profundidad, verificada en campo, hace suponer una hidrodinámica tanto *In Situ* como con las regiones aledañas a esta, dada la semejanza geológica reportada en varios estudios hechos en la región.

1. Introducción

La Caleta de Xel-Ha se encuentra en la región conocida como Ribera Maya, en la Península de Yucatán, se considera como una de las regiones más bellas del mundo, ya que en ella se encuentra una gran riqueza cultural, por la presencia de vestigios de una de las culturas más importantes de Mesoamérica, la *Cultura Maya*. Tiene una gran riqueza natural por los ecosistemas marinos y terrestres que tiene, ya sean superficiales o subterráneos, que hacen que esta región sea una de las de mayor interés en el aspecto económico, como en el de la investigación, entre otros. Por tal razón es de gran importancia su conservación, conociendo bien la región en términos de los ecosistemas que en ella se encuentran. Uno de estos ecosistemas es el que se desarrolla en el ambiente kárstico presente en toda el área y debido a que es un ambiente subterráneo cambiante, es difícil determinar todas las formas que la componen así como la localización de éstas. Una de las disciplinas que se dedica a estudiar estas formas es la espeleología, la cual ha cartografiado gran parte de los cuerpos kársticos, pero dado que es una disciplina que por lo general requiere la presencia directa del hombre en el lugar, hace complicada esta labor, ya que se presentan zonas en donde debido a las dimensiones de estos cuerpos y aunado a la saturación de agua que presentan la mayoría de los Karst en esta región y a otras características, hacen casi imposible su localización, por lo que es necesario apoyarse en otras disciplinas.

Hablando específicamente de la Caleta de Xel-Ha, dado la preocupación por conservar el lugar, se desea conocer la estructura del subsuelo que en conjunto con otros estudios pueda determinar las zonas de riesgos que pueden poner en peligro esta conservación.

La realización del presente trabajo, tiene el objeto de dar un panorama general de la conformación del subsuelo que rodea a la Caleta de Xel-Ha, para lo cual se empleó la exploración geofísica a través de métodos geoelectricos, complementados con mediciones hechas en pozos de muestro localizados en la zona de estudio, y de información de otros trabajos referentes al tema.

Se tienen antecedentes de trabajos semejantes realizados en otras zonas aledañas a ésta con características similares, los cuales sirvieron de apoyo para el desarrollo de este trabajo, desde la planeación, hasta la interpretación, pasando por los procesos intermedios, tal es el caso del trabajo de tesis de "Exploración geofísica del acuífero de Puerto Morelos, Quintana Roo". Este estudio, empleó parte de los métodos que se

aplicaron, con la finalidad de localizar huecos así como su posible conexión entre ellos. Por lo que se tuvo gran interés en las recomendaciones hechas para tomar las medidas necesarias para obtener la mejor calidad de los datos.

El trabajo se estructura en cuatro partes: La primera hace referencia a los aspectos fisiográficos que se presentan en la zona, esto con la finalidad de tener un panorama de lo que se espera como resultados; la segunda parte presenta los conceptos teóricos que son fundamento y justificación de la obtención, manejo e interpretación de las mediciones hechas por los métodos geofísicos; la siguiente parte hace mención a la forma en que se desarrolló el trabajo, la cuarta parte se describe en dos capítulos que contienen los resultados y conclusiones generados del análisis cualitativo y cuantitativo que se hizo a partir de los perfiles y secciones de resistividad.

Objetivo

Caracterizar el Kárst de la Caleta de Xel-Ha y alrededores con métodos geofísicos de prospección eléctrica, ubicando cavidades y estableciendo posibilidad de conexión con la red de drenaje del Sistema Dos Ojos.

Objetivo específico

Emplear los métodos geofísicos Calicata eléctrica y Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) en forma conjunta con otras mediciones de campo y estudios realizados por otras disciplinas, en el afán de lograr la mejor caracterización del sitio de estudio.

2. Marco físico

Localización y límites

El área de estudio abarca la zona de la Caleta de Xel-Ha, Quintana Roo, México y sus alrededores, ubicada en el kilómetro 240 de la Carretera a Chetumal, 122 km al suroeste de la ciudad de Cancún y 13 km al noreste del poblado de Tulum.

Está comprendida entre las coordenadas geográficas latitud norte 20°20', sur 20°18', longitud este 87°21' y oeste 87°22.5'.

Vías de comunicación

A la zona de estudio se puede acceder directamente por vía terrestre, por la carretera No. 307 que va de Chetumal a Cancún Quintana Roo, pasando por todos los poblados costeros, lo que se conoce como Riviera Maya, sitio en el que se localiza la zona de interés. De forma aérea no hay acceso, pero se puede llegar por este medio a la ciudad de Cancún y posteriormente trasladarse por medios terrestres.

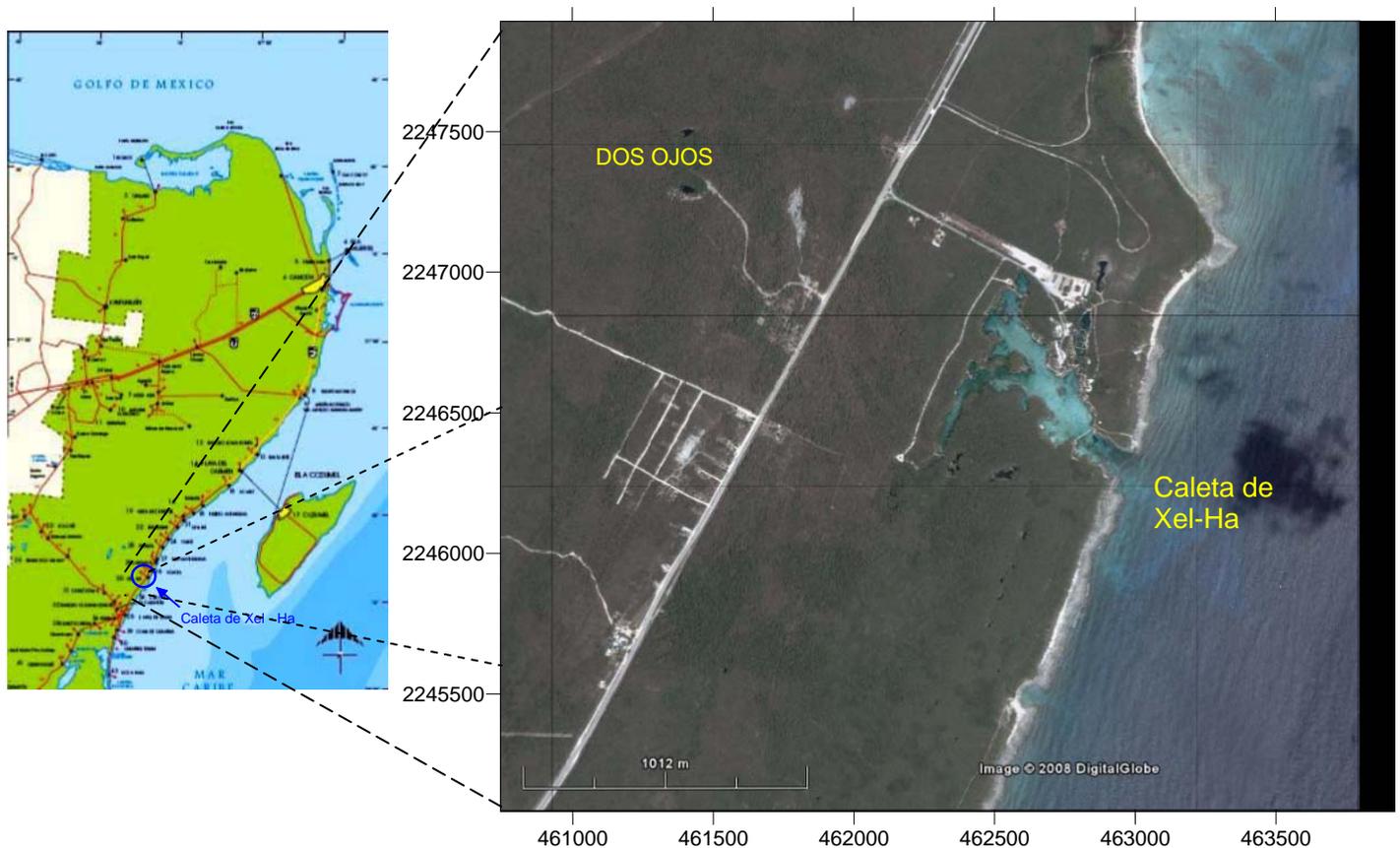


Figura 2.1 Localización y vías de comunicación del área de estudio

Fisiografía

El estado de Quintana Roo se divide en tres subprovincias fisiográficas “Carso y Lomeríos de Campeche”, “Carso Yucateco” y “Costa Baja de Quintana Roo”, pertenecientes a la provincia fisiográfica “Península de Yucatán”, (INEGI, 2006). En lo que respecta al área de estudio se encuentra en las dos últimas subprovincias la cual corresponde a la parte norte y oriente de la Estado de Quintana Roo. Presenta un relieve de planicie con poca pendiente de apenas unos cuantos metros de elevación sobre el nivel medio del mar con ligera tendencia descendente hacia el este. Está constituida por material carbonatado con presencia de abundantes cuerpos kársticos que van desde pequeñas oquedades hasta grandes depresiones (Cenotes), en las que se puede observar el nivel freático. Carece de un sistema de drenaje superficial que sea de consideración.

Tiene un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, su temperatura media anual varía entre 24° y 28 °C y con precipitación anual entre 700 y más de 1 500 mm. (INEGI, 2006)



Figura 2.2 Fisiografía y clima del estado de Quintana Roo

Geología histórica

El área de estudio está compuesta por sedimentos calcáreos con una presencia casi nula de material terrígeno, esto dado a que no existe ningún sistema de consideración que aporte estos. De forma regional la Península de Yucatán ha subsidido lentamente lo que ha dado pie a una gran secuencia sedimentaria con un espesor de cerca de 3000 m que empieza desde el Jurásico hasta el Reciente. Teniendo como basamento rocas metamórficas del paleozoico, sobre este se encuentran lechos rojos del Jurásico a los cuales subyacen una

sucesión de rocas evaporíticas y carbonatadas que tuvieron origen debido a varios periodos de subsidencia lenta de la plataforma. El basamento metamórfico históricamente formó un alto estructural el cual propició la generación de material terrígeno, que se depositó en forma de intercalaciones de evaporitas y lutitas carbonatadas. A comienzos del Cretácico, la plataforma presentaba depósitos de facies regresivas y transgresivas lo que indica que ésta tuvo oscilación. Ya para finales del Cretácico la parte norte había emergido lo que dio origen a la presencia de brechas y conglomerados formados por clastos de anhidrita, caliza y dolomía. Por otro lado en la parte occidental las litofacies están constituidas por margas, dolomías, derrames andesíticos, areniscas y horizontes de bentonita. Sobre esta secuencia sedimentaria se depositó biomicrita y lutita. Les subyacen sedimentos que presentan condiciones someras. En el Terciario y Cuaternario debido a que el nivel del mar osciló varias veces se formaron facies características de ambientes someros así como zonas restringidas a evaporíticas. Para el Pleistoceno y el Oligoceno hubo depósito de sedimentos carbonatados que fueron distribuidos en las márgenes de la plataforma debido a que se presentó una transgresión en la cual el nivel del mar alcanzó 5 metros arriba de él nivel actual según Ward y Wilson (citado por Aguayo, *et al*, 1979), en específico en el Sangamoniano, estos sedimentos son típicos de ambientes eólico-costero y de playa; después en el Wisconsiniano se formaron varias terrazas marinas paralelas a la costa esto debido a que se presentó un descenso en el nivel del mar; posteriormente después de la última glaciación se presenta una transgresión la cual dio origen a otra serie de terrazas según Logan *et al*, 1969 (citado por Aguayo, *et al*, 1979). Y para finalizar ya para el último periodo interglaciar hace 5,000 a 6,000 años, el nivel del mar estaba 4 ó 5 metros por debajo del actual y ha ido ascendiendo hasta el nivel actual (Aguayo, *et al*, 1980).

Geología superficial actual

La región del área de estudio y sus alrededores presentan la siguiente descripción, hacia Tulum se encuentran sedimentos de playa del holoceno y eolianitas del pleistoceno, los sedimentos recientes están constituidos por arena fina moderadamente bien clasificada formada principalmente por corales, la cual es proveniente de la barrera arrecifal que se encuentra aproximadamente a 0.5 km mar a dentro. Las eolianitas del pleistoceno que afloran forman los acantilados del Mar Caribe y su composición litológica varía de un lado a otro, según las condiciones de depósito de éstas. Hacia la localidad de Puerto Morelos se encuentran calizas coquinoideas formadas en ambientes someros de playa, esta se constituye principalmente de fragmentos de concha, moluscos y corales mal clasificados, Butterlin y

Bonet, 1963 (citado por Aguayo, *et al*, 1979) la consideraron como parte de la formación Carrillo Puerto del Terciario Superior (Aguayo, *et al*, 1979)..

Geología Kárstica

Como se ha venido describiendo la geología del área de estudio y dado que el objetivo de este trabajo, ambos tienen que ver con cavidades, las cuales son cuerpos de un ambiente sedimentario bien definido, llamado Kárstico, del cual se tienen las siguientes características. Se dice que la palabra Karst es la expresión alemana de la palabra eslovena kras y de la italiana carso; que significa «terreno rocoso» y corresponde a una amplia región del oeste de Yugoslavia, constituida por calizas con gran profusión de depresiones cerradas y cavidades subterráneas. En la actualidad se utiliza en la literatura científica para designar áreas y procesos de características similares a las existentes en la zona de su origen semántico. La rama de la geología que estudia las cavernas se denomina Kárstología.

Si a un macizo kárstico se le hace un corte de manera que se pueda ver su interior, se reconocen tres niveles bien diferenciados: La zona de absorción, la zona de circulación vadosa y la zona freática.

- Zona de absorción: Es la zona por donde el agua entra hacia el interior de la tierra.
- Zona de circulación vadosa: También se llama a esta zona, como de transferencia vertical, y es donde se dan las grandes simas o tiros verticales. El agua, por efecto de la gravedad desciende en forma de torrenteras y cascadas erosionando las paredes hasta dejarlas pulidas.
- Zona freática: Son las galerías que ya se encuentran cubiertas por agua

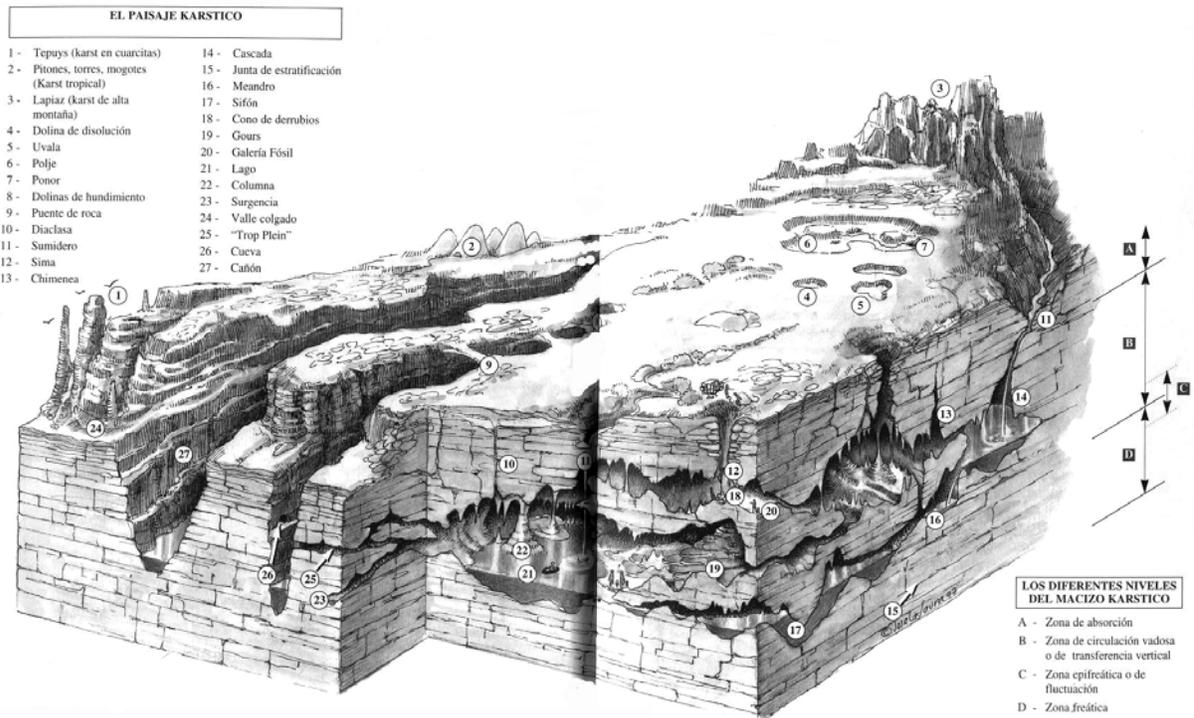


Figura 2.3 Elementos de un paisaje kárstico.

Hay dos cosas esenciales que ayudan a reconocer un paisaje kárstico: presenta numerosas depresiones cerradas de distintos tamaños; y no presenta manantiales ni otros afloramientos superficiales de agua, ni siquiera en zonas muy lluviosas. En cuanto cae el agua de la lluvia, esta se filtra por las grietas (porosidad secundaria) hasta llegar a grandes conductos (porosidad terciaria) producidos por la disolución de la roca, que hacen posible que el agua sea drenada hasta el fondo de los valles, donde vuelve a emerger en forma de afloramientos. Esto ocurre debido a que la roca caliza es bastante soluble. Además, deben ser lo suficientemente puras como para no arrastrar otros materiales que colmaten las grietas por donde se filtra el agua; y por último, deben ser lo bastante sólidas como para que no se desplomen los techos.

Estas tres condiciones sólo se cumplen con los mármoles, la caliza y las dolomías. En los terrenos donde se da estos tipos de roca, la superficie presenta formas peculiares que forman el paisaje kárstico, de las cuales las más importantes son:

- Lapiaces: Son desiertos de piedra desnudos, agrietados, con ranuras y cantos vivos producidos por la corrosión química provocada al contacto de la roca con el agua de lluvia, el hielo y la nieve.
- Simas: Conductos verticales que en ocasiones pueden ser espectaculares por sus dimensiones. Se pueden formar por hundimiento de la bóveda de algún techo, disolución exagerada en el fondo de una dolina, o erosión y corrosión en sumideros activos.
- Dolinas: Son depresiones circulares en el suelo provocadas por el hundimiento del terreno debido al colapso de una antigua cavidad o por infiltración de agua en algunos puntos concretos.
- Poljé: Es una extensa depresión cerrada, de fondo plano, de dimensiones kilométricas, dominada por vertientes escarpadas. La notable planitud del poljé se debe a la acumulación en el fondo de la arcilla de descalcificación. Dentro de un poljé encontramos formas kársticas menores: dolinas y lapiaces. También encontramos grandes cerros residuales, de pendientes acusadas, llamados humus (o cuetos). La existencia de poljés está relacionada con los grandes accidentes tectónicos y la organización de la red hidrográfica. Al ser una depresión cerrada la evacuación del agua se realiza a través de pozos llamados ponors o sumideros. El ponor comunica el poljé con el exterior, a través de una red subterránea. Dependiendo de la capacidad del ponor, y el aporte de agua, los poljés pueden inundarse, formando lagos temporales, lo que favorece la existencia de un fondo plano (www.espeleokantil.org, 2007).

Así se van formando las galerías subterráneas. El agua, cargada de gas carbónico, disuelve la caliza y agranda paulatinamente el conducto inicial. Con el tiempo aparecen las distintas concreciones, el agua profundiza hacia capas más bajas y sólo el tramo inferior permanece inundado. El efecto de la erosión hace que tanto los techos como las paredes se debiliten. Por eso, de vez en cuando, se producen desplomes que dan lugar a nuevas salas en la cavidad.

Todo lo anterior da un panorama a grandes rasgos de la fisiografía que presenta el área de este estudio, lo cual fue tomado en consideración tanto para la planeación como para el análisis de resultados.

3. Conceptos teóricos

Dentro de las diferentes técnicas geofísicas se encuentran las que se relacionan con la propiedad física resistividad eléctrica que poseen los materiales. En este caso se presentan los principios teóricos que rigen al método de Prospección Eléctrica.

Partiendo del concepto de Campo Eléctrico el cual dice que, cualquier carga eléctrica (ya sea positiva o negativa), genera un campo eléctrico, el cual atrae o repele a otras cargas según su polaridad (cargas iguales se repelen, cargas diferentes se atraen).

La fuerza con la que se atraen o repelen las cargas se conoce como intensidad de campo eléctrico.

Potencial eléctrico y diferencia de potencial.

El potencial eléctrico se define como el trabajo realizado para rechazar o atraer una carga de 1 coulomb hasta o desde el infinito. De esta manera se dice que la diferencia de potencial entre dos puntos es el trabajo realizado para mover una carga de un punto al otro, y su unidad es el volt [V], 1 volt equivale al trabajo de 1 Joule, realizado para mover una carga de 1 coulomb. Dado los conceptos anteriores podemos dar un tercero, que es el de superficies equipotenciales que son aquellas en las que el valor del potencial es igual en cualquier punto (Sánchez M., 2003).

Corriente eléctrica

La corriente eléctrica se define como el flujo de cargas eléctricas que por unidad de tiempo atraviesa un área transversal.

Si ΔQ es la carga que fluye a través de área A en un tiempo Δt , la intensidad de la corriente promedio se define como (Sánchez J., 2004):

$$I = \Delta Q / \Delta t \quad 3.1$$

El flujo de la carga por unidad de tiempo puede no ser constante, en cuyo caso general la definición de la corriente de una fuente natural en un tiempo infinitesimal, es la corriente instantánea I definida como (Sánchez J., 2004):

$$I = dQ / dt \quad 3.2$$

Y su unidad es el Ampere [A].

Densidad de corriente

Otro concepto importante es el de densidad de corriente, que está definida como J y es la cantidad de corriente I , que pasa por unidad de área A .

$$J = I / A \quad 3.3$$

Ahora se explica lo anterior en otros términos. Sea n el número de partículas cargadas negativamente por unidad de volumen y suponiendo que cada partícula contiene una carga q que se mueve con una velocidad v en un tiempo Δt , cada una recorre una distancia $v \Delta t$, todas las partículas contenidas en el volumen $A v \Delta t$, pasan a través del área A en el tiempo Δt . El número de partículas contenidas en este volumen es $n A v \Delta t$ y su carga es q . Entonces la carga total que fluye a través del área A del conductor, en un tiempo Δt es:

$$\Delta Q = nqAv\Delta t \quad 3.4$$

Entonces sustituyendo la ecuación 3.4 en 3.1 tenemos que:

$$I = \Delta Q / \Delta t = nqAv \quad 3.5$$

Y sustituyendo la ec. 3.5 en 3.3.

$$J = I / A = nqv \quad 3.6$$

En forma vectorial:

$$\vec{J} = nq\vec{v} \quad 3.6a$$

Resistividad y Ley de Ohm

Los electrones adquieren una velocidad de arrastre v en sentido contrario al campo eléctrico E . El campo eléctrico es proporcional a la velocidad de arrastre o desplazamiento.

$$v \propto E$$

$$v = \mu E \quad 3.7$$

Donde μ es la movilidad de los portadores de carga libre. Cada material tiene un μ característico.

Entonces sustituyendo la ec. 3.7 en 3.6a tenemos:

$$\vec{J} = nq\vec{v} = \rho_L \mu \vec{E} \quad 3.8$$

Donde

$\rho_L = nq$: densidad de electrones libres

$\sigma = \rho_L \mu$: conductividad

Así obtenemos la ecuación vectorial de la Ley de Ohm

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad 3.9$$

La densidad de corriente J en un punto tiene la misma dirección y sentido del campo E en el mismo punto.

Despejando el campo eléctrico obtenemos que

$$E = \frac{1}{\sigma} J \quad 3.9a$$

$$E = \rho J \quad 3.10$$

donde, $\rho = \frac{1}{\sigma}$ se conoce como resistividad y sus unidades son el Ohm·metro [$\Omega \cdot m$].

Otra forma válida de expresar el campo eléctrico es (Sánchez M., 2003):

$$E = V/l \quad 3.11$$

Entonces sustituyendo las ecuaciones 3.3 y 3.11 en 3.10

$$\frac{V}{l} = \rho \frac{I}{A}$$

Despejando el potencial queda:

$$V = \rho \frac{l}{A} I \quad 3.12$$

Donde al producto $\rho \frac{l}{A} = R$, a esta expresión se le conoce como resistencia, nótese que la resistencia depende de la geometría del cuerpo conductor.

Entonces la ec. 3.12 se reescribe como:

$$V = RI \quad 3.13$$

Esta expresión se conoce con el nombre de Ley de Ohm (Sánchez M., 2003).

Para la prospección eléctrica lo que interesa una propiedad que sea independiente de la geometría del material, dicha propiedad es la resistividad, la cual queda definida matemáticamente de acuerdo a la expresión de resistencia R como:

$\rho = R \frac{A}{l}$ ó, de acuerdo a la Ley de Ohm como :

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I} \quad 3.14$$

Donde k es un factor geométrico que depende de la geometría del dispositivo.

Ecuación general de la prospección eléctrica

Los conceptos básicos anteriores, ahora se explicará su aplicación en la prospección eléctrica, que se rige por las ecuaciones de Maxwell.

$$\begin{aligned} \vec{\nabla}_x \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{\nabla}_x \vec{H} &= \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{aligned} \quad 3.15$$

Donde

\vec{E} - Campo eléctrico existente en el espacio, creado por las cargas.

\vec{D} - Campo dieléctrico que resulta de los efectos eléctricos de la materia.

\vec{B} - Campo magnético existente en el espacio, creado por las corrientes.

\vec{H} - Campo magnético que resulta de los efectos magnéticos de la materia.

Como se trata de un campo estacionario, las derivadas temporales son nulas. Por lo cual las ecuaciones se reducen a:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla}_x \vec{E} &= 0 \\ \vec{\nabla}_x \vec{H} &= \vec{J} \end{aligned} \quad 3.16$$

De las ecuaciones anteriores se observa que el campo eléctrico \vec{E} es conservativo y de acuerdo a las propiedades del operador vectorial $\vec{\nabla}$, existe al menos una función escalar V tal que:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} V \quad 3.17$$

En efecto, se cumple que

$$\vec{\nabla}_x E = \vec{\nabla}_x(-\vec{\nabla} V) = 0$$

Ahora retomando el concepto de densidad de corriente J , y sabiendo que tienen la misma dirección y sentido que el campo eléctrico E . Se cumple la ecuación de continuidad y como se sabe que el campo es estacionario, entonces se tiene la siguiente ecuación:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \quad 3.18$$

Que se cumple en todos los puntos excepto en los electrodos. Ahora bien, regresando a la ecuación vectorial de la Ley de Ohm, (ec. 3.9) y sustituyendo ésta en la ec. 3.18

$$\vec{\nabla} \cdot (\sigma \vec{E}) = 0 \quad 3.19$$

Esta es la ecuación general de la prospección eléctrica. Desarrollando se obtiene lo siguiente:

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

Sustituyendo la ec. 3.17 en el primer termino de la adición anterior

$$-\sigma \cdot \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \cdot \vec{V} + \vec{E} \cdot \vec{\nabla} \cdot \sigma = -\sigma \cdot \vec{\nabla}^2 \cdot \vec{V} + \vec{E} \cdot \vec{\nabla} \cdot \sigma = 0$$

Si dentro de cada zona con conductividad σ uniforme se cumple que $\vec{\nabla} \cdot \sigma = 0$, entonces queda finalmente la ecuación 3.19 como:

$$\vec{\nabla}^2 V = 0 \quad 3.20$$

Esta es la ecuación de Laplace, la cual es valida en todo el semiespacio excepto en los electrodos.

En un campo eléctrico debido a un electrodo puntual, las líneas de flujo de corriente forman superficies semiesféricas equipotenciales $\vec{\nabla}$ perpendiculares a este campo (Figura 3.1),

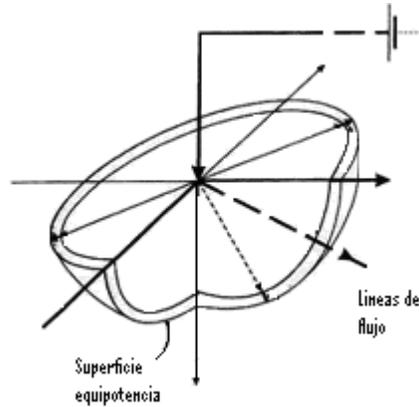


Figura 3.1 Líneas de corriente y superficies equipotenciales producidas por un electrodo puntual

Entonces de la ecuación de densidad de corriente J (ec.3.3).

$$J = I / A = I / 2\pi r^2$$

Donde $A=2\pi r^2$ que es el área de la semiesfera. Por consiguiente al sustituir el término anterior en la expresión vectorial de la Ley de Ohm, (ec. 3.9), y despejando el campo eléctrico en valor absoluto obtenemos el valor del campo eléctrico de un electrodo puntual.

$$|E| = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad 3.21$$

La diferencia de potencial entre dos puntos M y N se puede obtener al sustituir la ec. 3.21 en la ec. 3.17.

$$-\bar{\nabla}V_N^M = \frac{I\rho}{2\pi r}$$

Integrando,

$$V_N^M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_M} - \frac{1}{r_N} \right) \quad 3.22$$

Donde r_M y r_N son las distancias del electrodo de corriente a los puntos M y N respectivamente (Figura 3.2a). Para considerar potenciales absolutos, habrá que atribuir a un punto determinado el potencial cero. Para esto se dice que el punto N está en el infinito por lo que la ec. 3.22 queda como:

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi r_M} \quad 3.23$$

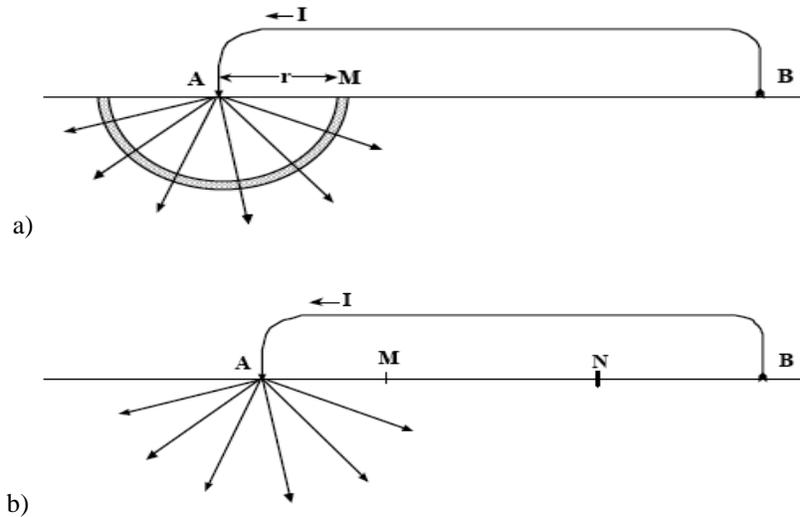


Figura 3.2 Esquema que ejemplifica la diferencia de potencial entre dos puntos M y N dado un flujo de corriente. a) el punto N esta en el infinito, b) el potencial entre los puntos (electrodos) M y N se genera por la circulación de corriente entre los electrodos A y B .

En la realidad, para poder introducir corriente en el subsuelo, debe de existir otro electrodo B por lo que lo que el potencial en el punto M tendrá la influencia del electrodo de corriente A menos la del electrodo B , así mismo, como no se puede medir el potencial con un sólo electrodo en un punto, es necesario un segundo electrodo N , el cual tendrá la misma influencia que producen los electrodos de corriente A y B en el punto M (Figura 3.2b), por lo que, la ecuación 3.22 queda de la siguiente manera:

$$V_M - V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$

Despejando la resistividad ρ

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \left(\frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \right)$$

De la ec. 3.14 tenemos que el factor geométrico k es,

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \quad 3.24$$

él cual solo depende de la geometría del dispositivo.

Se llama dispositivo electródico al conjunto de electrodos que por lo general consta de n electrodos, en dos de los cuales circula la corriente I llamados A y B otros dos M y N en los cuales se mide la diferencia de potencial generada por la corriente (Sánchez J., 2004) (Figura 3.2b).

Estos dispositivos pueden adoptar cualquier disposición geométrica sobre la superficie del terreno, éstas se denominan modalidades, configuraciones o arreglos. Para fines de este trabajo nos referiremos a arreglos. Existen varios tipos de arreglos establecidos, los cuales han sido utilizados y creados de acuerdo a las diferentes condiciones y objetivos de estudio requeridos a lo largo de la historia de la prospección eléctrica.

Tanto para los sondeos eléctricos verticales como para las calicatas eléctricas, para este trabajo se utilizó un arreglo tipo Schlumberger, el cual es de tipo simétrico y tiene la siguiente geometría (Figura 3.3). A partir de un centro de sondeo se colocan simétricamente los electrodos de potencial M y N . La distancia entre ellos tiene una magnitud d . Y los electrodos de corriente se colocan de igual forma a una distancia $2L$ entre ellos, la cual debe de ser por lo menos 5 veces mayor que la distancia d .

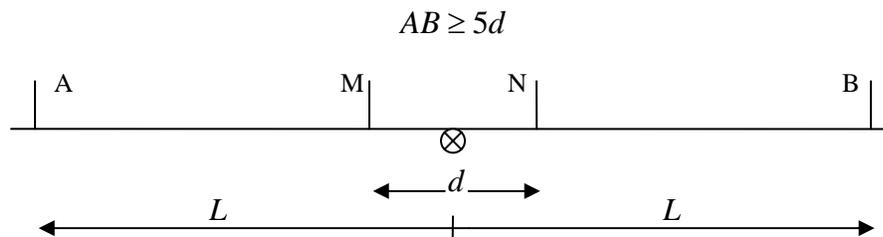


Figura 3.3 Esquema del arreglo tipo Schlumberger.

Como el valor que necesitamos obtener es el de resistividad, tenemos que el factor geométrico que necesitamos para el arreglo Schlumberger empleado, se calcula con la siguiente ecuación.

$$k = \frac{\pi(AM * AN)}{MN} \cong \frac{\pi L^2}{d} ; \quad L = \frac{AB}{2} \quad 3.25$$

Resistividad aparente

Hasta el momento se ha dicho que se obtiene el potencial para poder calcular la resistividad real de los materiales, pero esto sólo es posible en un medio homogéneo, cosa que en la naturaleza no sucede, lo que en realidad miden la mayoría de los métodos geoelectrónicos es una resistividad producida por la combinación de resistividad real de varios materiales; ésta

resistividad se conoce como resistividad aparente ρ_a , que se usa para hacer el procesamiento y posteriormente la interpretación. Mediante el proceso de inversión esta resistividad aparente se transforma en una resistividad eléctrica real

Métodos geoelectrónicos que miden ρ_a

Cuando se explicó el concepto de resistividad aparente se mencionó el concepto de métodos geoelectrónicos. En la prospección eléctrica existen tres métodos de corriente directa que obtienen ρ_a los cuales son:

- Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)
- Calicata eléctrica o perfilaje eléctrico
- Tomografía eléctrica

Sondeo Eléctrico Vertical

El objetivo del sondeo eléctrico vertical es obtener la distribución de la resistividad de manera vertical a diferentes profundidades sobre un mismo punto en la superficie del terreno, este método funciona mejor en medios estratificados y su interpretación es cuantitativa (Figura 3.4).

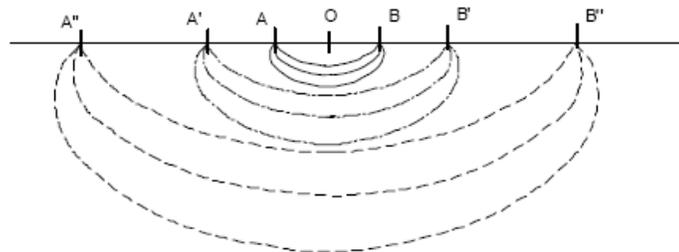


Figura 3.4 Esquema que muestra la forma de operación del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV).

Calicata eléctrica

El objetivo del Perfilaje o Calicata eléctrica es el de observar la distribución espacial de resistividades eléctricas a profundidad constante. A diferencia del SEV este método no registra los cambios en profundidad, es adecuado para detectar estructuras que se presentan como cambios de ρ_a laterales (contactos, fallas, diques, cavernas). La interpretación de este método es cualitativa (Figura 3.5)

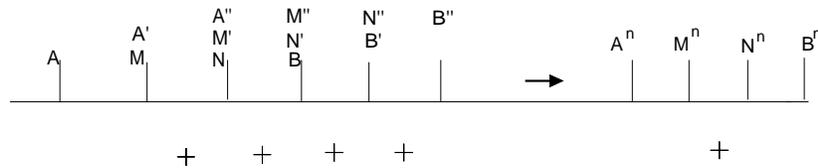


Figura 3.5 Esquema que muestra la forma de operación de la Calicata o Perfilaje eléctrico.

Tomografía

Lo concerniente a la tomografía o imagen eléctrica, es un método que se ha utilizado en la exploración moderna y se puede decir que es una combinación de los dos métodos anteriores, con la finalidad de obtener una gran cantidad de ρ_a tanto lateral como verticalmente, distribuidos en toda la zona de estudio (Figura 3.6). Esto se traduce en suficiente información útil para lograr realizar mediante el procesamiento, modelos del subsuelo en 2-D y 3-D.

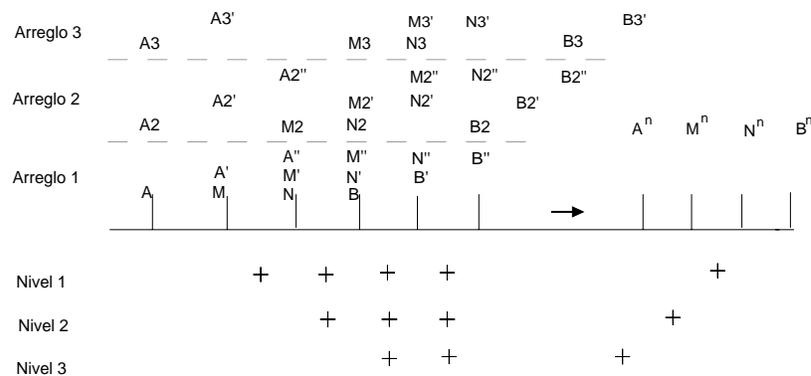


Figura 3.6 Esquema que muestra la forma de operación de la tomografía eléctrica.

Los sondeos eléctricos verticales así como la tomografía miden la resistividad aparente que al procesarla se generan secciones geoelectricas, que son imágenes que reflejan las diferentes unidades que se caracterizan por rangos de resistividades diferentes (ρ_i) y espesores (h_i). A estas unidades se les llama unidades geoelectricas, las cuales no siempre coinciden en una primera instancia con los límites de secciones geológicas con interfaces bien definidas. Esto se debe a que las propiedades eléctricas de las capas geológicas adyacentes se ven influenciadas ambas por si mismas y hacen difuso el contacto entre ellas o bien se puede tener capas con la misma resistividad lo cual genera una sola unidad geoelectrica. Además de los dos parámetros que caracterizan las unidades geoelectricas ρ_i y h_i (donde i se refiere a la i -ésima capa), se caracterizan también por la conductancia longitudinal (S), la resistencia transversal (T), la resistividad transversal (ρ_T) y la resistividad

longitudinal (ρ_L), los cuales se conocen como los parámetros Dar Zarrouk (Alonso 2001). En la figura 3.7 se muestra estos parámetros en un modelo conceptual.

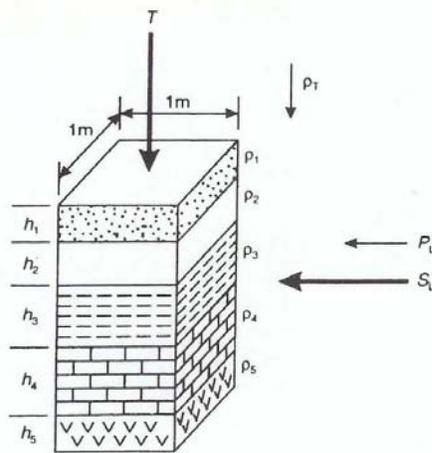


Figura 3.7 Modelo conceptual de los parámetros de Dar Zarrouk.

Los valores de dichos parámetros se calculan matemáticamente de acuerdo a las siguientes ecuaciones.

Conductancia longitudinal

$$S = \frac{E}{\rho} = E \cdot \sigma \quad 3.26$$

Resistencia transversal

$$T = E \cdot \rho \quad 3.27$$

Resistividad longitudinal

$$\rho_L = \frac{E}{S} \quad 3.28$$

Resistividad transversal

$$\rho_T = \frac{T}{E} \quad 3.29$$

Donde el espesor $E = h_i$

Los parámetros de resistividad longitudinal y transversal, nos llevan al concepto de anisotropía eléctrica, el cual se refiere a que en un medio anisótropo, las propiedades cambian su valor al cambiar la dirección de medición, esto se debe a las variaciones estructurales y de composición de los materiales. La forma matemática para calcular la

anisotropía se da en la ecuación 3.30 (Alonso, 2001). Este concepto se usa para establecer la variabilidad de la resistividad en el sentido transversal o longitudinal y de acuerdo a ésta se puede establecer densidades óptimas de puntos de muestro.

$$A = \sqrt{\rho_T / \rho_L} \quad 3.30$$

La importancia de la conductancia longitudinal S y la resistencia transversal T es que demuestran que no es posible conocer simultáneamente la resistividad (o la conductividad) verdadera de un estrato y su espesor, lo que nos lleva al principio de equivalencia y al de superposición.

El principio de equivalencia, se explica de la siguiente manera: una capa más resistiva que las subyacentes con una T grande y S pequeña, puede producir el mismo efecto en el SEV que otra capa con diferentes E y ρ , pero con la misma T . O de otra forma una capa más conductora que las subyacentes con una T pequeña y S grande, puede causar el mismo efecto en el SEV que otra capa con diferentes E y ρ , pero con la misma S (Sánchez S. R., 2004).

De igual manera se explica el principio de superposición. Una capa delgada con resistividad intermedia entre las subyacentes, puede pasar desapercibida en la interpretación.

El procesamiento de los datos geoelectricos, se fundamenta en la representación gráfica de los valores de resistividad y distancia ($AB/2$), por medio de curvas semi o bilogarítmicas que están en función de los espesores de las capas, y son interpretadas mediante procedimientos de igualación de curvas, utilizando el método del punto auxiliar, generando sistemas lineales discretos (Ghosh, 1971; citado por Márquez W., 2003), donde la curva de resistividad aparente de un sondeo puede ser representada como la respuesta de un proceso de convolución entre una señal de entrada (definida como la transformada de resistividad del modelo geoelectrico) y la función de transferencia del sistema definido como una función de Bessel de primer orden y en primera clase (Márquez, *et al*, 2003).

En este sentido, se puede establecer que un modelo geológico definido en función del espesor y resistividad para un número finito de capas, puede ser expresado en término de su transformada de resistividad, tomando en consideración que en cada interfase geoelectrica se puede determinar un coeficiente de reflexión resistivo según la siguiente ecuación:

$$k_{J-1} = \frac{\rho_J - \rho_{J-1}}{\rho_J + \rho_{J-1}} \quad 3.31$$

ρ : resistividad real de la capa.

k_{J-1} : coeficiente de reflexión resistiva.

De esta forma, la transformada de la resistividad para un subsuelo estratificado, se puede calcular en forma recursiva a partir de la expresión:

$$T_J(\lambda) = \frac{W_J(\lambda) + T_{J+1}(\lambda)}{1 + W_J(\lambda)T_{J+1}(\lambda)/\rho^2_J} \quad 3.32$$

donde,

$$W_J = \rho_J \frac{1 - e^{-2\partial_J\lambda}}{1 + e^{-2\partial_J\lambda}}$$

3.33

∂_J : espesor de la capa

$$\lambda = 1/AB/2$$

A partir del conocimiento de la transformada de la resistividad del modelo geoelectrico (T) y de la resistividad aparente, se puede definir el modelo convolutivo expresado como:

$$\rho_J = \sum b_J * T_{m-J} \quad 3.34$$

ρ : valores digitales de resistividad aparente.

b_J : valores digitales del filtro de convolución.

T : valores digitales de la transformada de resistividad.

Posteriormente, para obtener los valores de resistividad, se procede a convolucionar los valores de la serie digital de la transformada de la resistividad con el filtro digital (Márquez, *et al*, 2003).

En otras palabras las ecuaciones anteriores generan curvas con valores de resistividad aparente dado un modelo geoelectrico de capas con resistividades y espesores ya definidos (problema directo) y a partir de éstas, por medio de igualación de curvas, se establece el modelo geoelectrico que más se ajusta a los valores de la curva de resistividades aparentes obtenida en campo (problema inverso, Capítulo 4).

Con respecto al procesamiento de los datos obtenidos con calicata eléctrica, estos se pueden graficar directamente para observar variaciones en la curva que se genera con los valores de resistividad aparente medidos o bien acomodar los datos de tal forma que cada punto de atribución tenga sus valores de resistividad aparente, posición en superficie y pseudoprofundidad, con el fin de poder crear por medio de métodos de interpolación una sección de resistividades aparentes que muestren estas variaciones las cuales se relacionan con diferentes estructuras geológicas.

Métodos de interpolación

Siguiendo con los fundamentos del procesamiento, es necesario mencionar que son los métodos de interpolación y en que consisten los utilizados para este trabajo, ya que con ellos se construyen las imágenes de los perfiles y secciones eléctricas (Capítulo 4 y 5). Se denomina interpolación a la obtención de nuevos puntos partiendo del conocimiento de un conjunto discreto de puntos medidos.

En ingeniería y algunas ciencias es frecuente disponer de un cierto número de puntos obtenidos por muestreo o a partir de un experimento y pretender construir una función que los ajuste. Se trata de, a partir de n parejas de puntos (x_k, y_k) , obtener una función f que verifique

$f(x_k) = y_k$, $k = 1, \dots, n$, a la que se denomina función interpolante de dichos puntos. A los puntos x_k se les llama nodo. Existen muchos métodos de interpolación, pero para fines de este trabajo, dado las características de los datos a procesar y los resultados deseados, se describen brevemente a continuación los métodos empleados:

- I) Inverso de las distancias (Inverse distance to a power), consiste en que el valor del punto problema se estima asignando pesos a los datos del entorno, en función inversa de la distancia que los separa del punto problema. Se establece, por tanto, que los puntos más cercanos tienen un peso mayor en el cálculo, aunque la relación no tiene porque ser lineal.
- II) Kriging. Este método de interpolación asume que la variable representada puede definirse como una variable regionalizada. Esta hipótesis supone que la variación espacial de la variable a representar puede ser explicada al menos parcialmente mediante funciones de correlación espacial (Gómez, 2007).

La variación espacial de los valores de z puede deducirse de los valores circundantes de acuerdo con unas funciones homogéneas en toda el área (Figura 3.8).

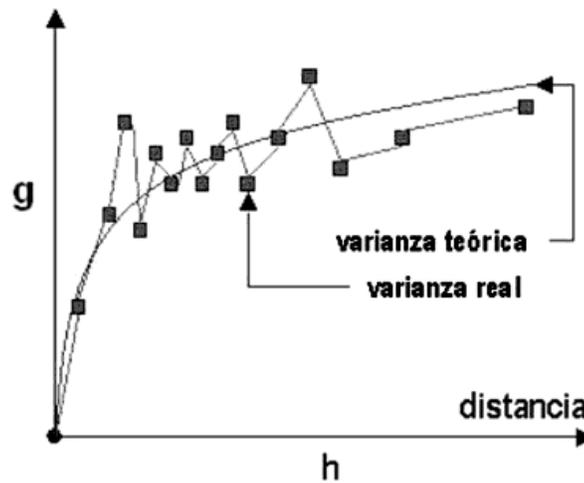


Figura 3.8 Ajuste de la variación a una función teórica (Variograma)

La función de ajuste al variograma, habitualmente emplea modelos de ajuste Gaussiano, Exponencial, Esférico, Polinomial, etc. (Gómez, 2007).

Resistividad eléctrica de las rocas de acuerdo al contenido de agua

Un concepto importante a tomar en cuenta para la etapa de interpretación es el del cambio en la resistividad de acuerdo al contenido de agua en la roca, estudios demuestran que en rocas y suelos calcáreos, por sus minerales constituyentes son altamente resistivos, así mismo, la resistividad del aire es extremadamente alta, por lo que un material calcáreo completamente seco, es decir con sus poros llenos de aire presentan altas resistividades, las cuales disminuyen si la misma roca presenta un grado de humedad progresivo (Espinosa y Carrillo 2002), esto debido a la conductividad del agua, dado que es difícil obtener un agua absolutamente pura, debido a que es un buen solvente. La misma agua destilada de altísima calidad tiene algunas sustancias químicas disueltas en ella, la más frecuente es la sal. Esas impurezas, incluso en concentraciones muy bajas, permiten al agua conducir electricidad mucho mejor, ya que impurezas como la sal se separan en iones libres en ella, a través de la cual la corriente eléctrica puede fluir.

La conductividad (lo inverso a resistividad) es usada comúnmente para medir la cantidad de sal en el agua (es un importante indicador de la calidad de agua). (Schlumberger Limited, 2008).

En resumen hay tres factores que influyen sobre la resistividad de un terreno:

- La porosidad de la roca: a mayor porosidad saturada de agua, ya sea intrínseca (primaria), de fractura (secundaria) o de disolución (terciaria), menor resistividad
- La resistividad del agua: a menor resistividad del agua (más salada), menor resistividad de la roca.
- La arcillosidad del terreno: a mayor arcillosidad del terreno menor resistividad, por la cantidad de agua intersticial.

Por esto los métodos de resistividad eléctrica son empleados para la determinación de las zonas más favorables a la presencia de agua en coordinación con otras informaciones disponibles (Bernard y Leite).

4. Metodología

Selección

La selección de los sitios se hizo de acuerdo a los objetivos de este estudio, los cuales se adecuaron a las condiciones fisiográficas que presentaba la zona, con la finalidad de cubrir el frente y los flancos, para así rodear en lo posible a la Caleta de Xel-Ha, tratando de detectar toda posible cavidad por la cual pudiera pasar un flujo de agua que interactuara directamente con la Caleta, tomando en cuenta lo anterior se estableció realizar cinco perfiles con calicata eléctrica siguiendo brechas y carreteras ya existentes con el fin de facilitar el trabajo dada la espesa vegetación de los alrededores, quedando como se muestra en la Figura 4.1.

Por otra parte, la selección de los sitios para los SEV's se estableció realizarlos en algunas secciones sobre perfiles de acuerdo a los resultados en una primera interpretación en campo.

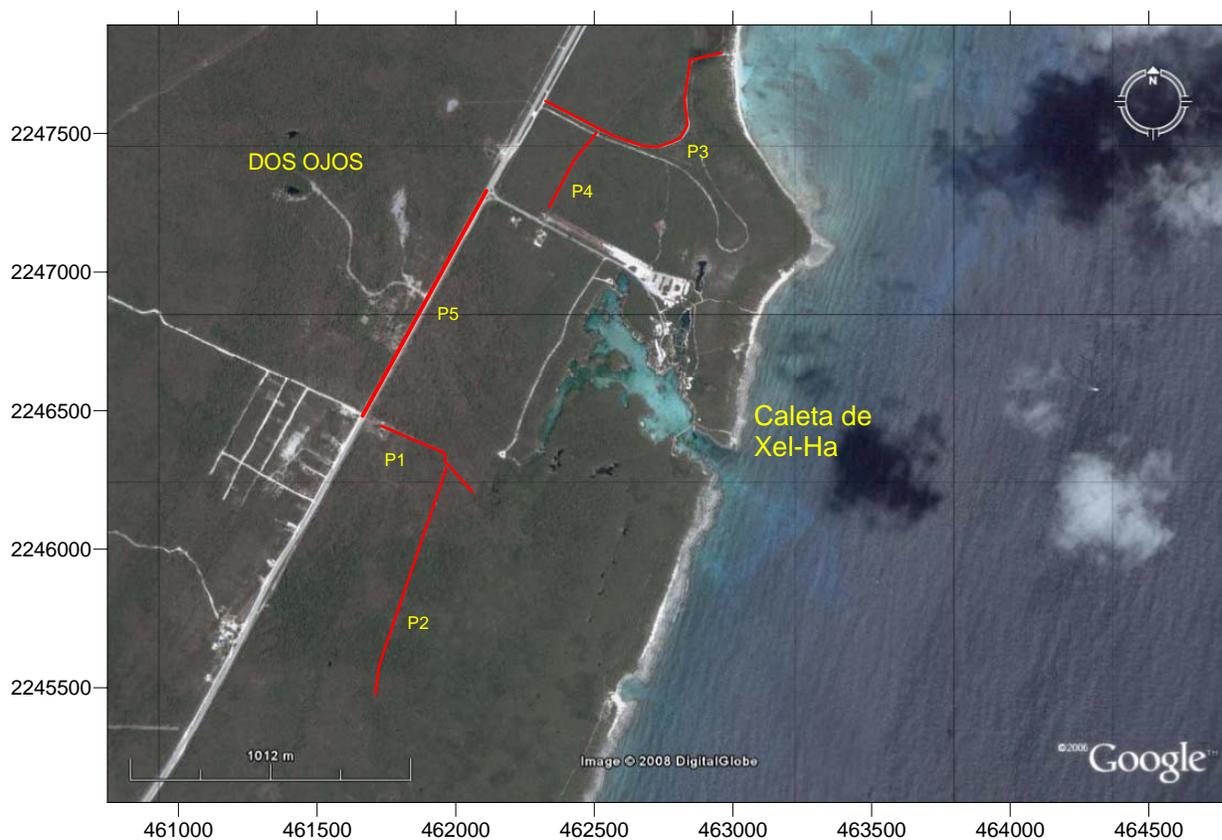


Figura 4.1 Mapa de localización de perfiles eléctricos (líneas en color rojo) en coordenadas UTM WGS84.

Prospección eléctrica

Para los métodos de prospección eléctrica empleados en este trabajo se utilizó el equipo modelo SYSCAL R1 de la marca IRIS Instruments el cual tiene las siguientes características:

- Mide voltaje y corriente simultáneamente
- Potencia de salida de 200 W
- Voltaje máximo 1200V
- Corriente máxima de 2.5 A
- Convertidor de A/D DE 20 bits
- Hace mediciones de resistividad y potencial inducido (IP)
- Despliega el valor del potencial espontáneo (SP) en cada medición, la compensación del SP es automática, con una corrección de tendencia lineal por medio de un filtro digital, el valor del SP se mide durante el apilamiento con un intervalo de cada 3 apilados y este valor es el que usa para aplicar la corrección por SP.
- Calcula el valor del factor geométrico automáticamente al introducirle los datos del tipo de arreglo, así como las dimensiones de este y por ende da directamente el valor de la resistividad aparente ρ_a .



Figura 4.2 Equipo para prospección eléctrica SYSCAL R1.

Calicata eléctrica

Para este fin los perfiles trazados (Anexo 1), se ubicaron como se muestra el esquema (Figura 4.4), se realizaron las mediciones sobre los perfiles con dos arreglos Schlumberger, tratando de tener dos registros en un mismo lugar (centro de sondeo) a dos pseudopropundidades diferentes, uno con $AB/2$ igual a 15 m y el otro con 32 m. Ambos con una distancia entre los electrodos de potencial MN de 3 m constante (Figura 4.3) y un desplazamiento de 10 m entre cada centro de sondeo.

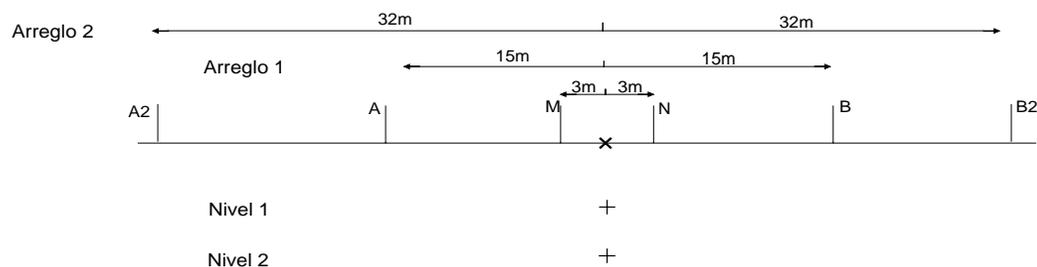


Figura 4.3 Características de los arreglos tipo Schlumberger usados en las calicatas.

Sondeo eléctrico vertical

Después de haber medido sobre los perfiles, se determinó los puntos de medición de los SEV's, de acuerdo a los resultados preliminares de los perfilajes eléctricos. Dichos sondeos quedaron ubicados sobre los mismos perfiles con posicionamiento GPS como se indica en la figura 4.4. Los SEV's correspondientes a cada perfil (Anexo 2) tienen las siguientes características: una separación aproximada de 40 m entre ellos, con aberturas entre electrodos de corriente $AB/2$ y de potencial MN mostrados en la tabla 4.1

Tabla 4.1 Configuración de la distancia de los electrodos en metros para cada SEV.

AB/2	1	1.5	2	3	4.5	7	10	15	22	32	46	68	100
MN	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	-	-	-	-	-	-	-
MN	-	-	-	-	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	-	-	-
MN	-	-	-	-	-	-	-	-	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
MN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	15

Como se observa en la tabla anterior, se realizaron tres empalmes, con los dos últimos puntos y los dos valores de distancia MN correspondientes. Se hicieron un total de 14 sondeos distribuidos en 3 perfiles como se ve en la figura 4.4.

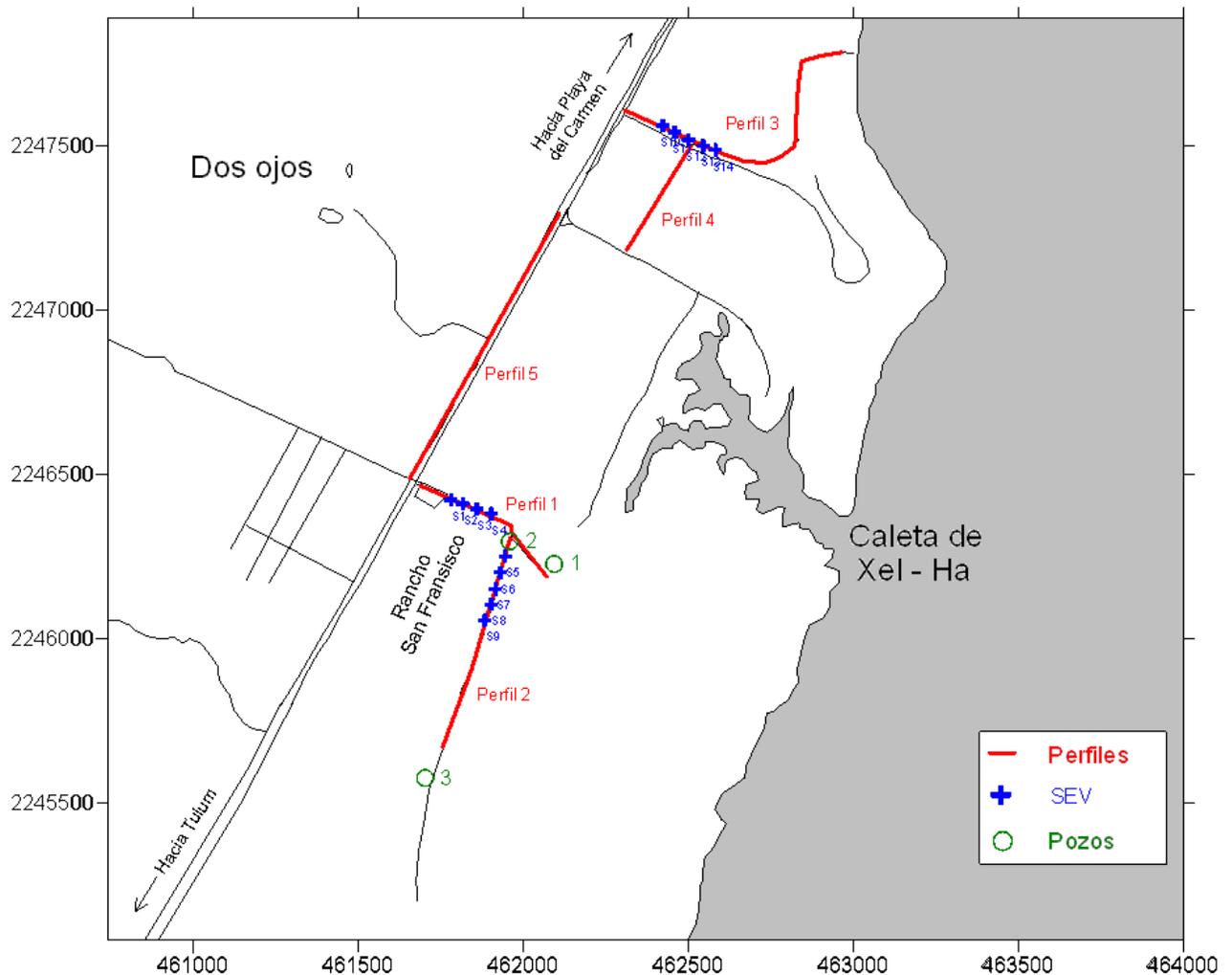


Figura 4.4 Esquema de localización de los perfiles eléctricos (color rojo) en coordenadas UTM WGS84, sondeos eléctricos verticales (SEV) (en color azul) y pozos de muestreo en los alrededores de la Caleta de Xel-Ha (en color verde).

Piezometría y muestreo de pozos

Como complemento a este trabajo y dada la presencia de algunos pozos de muestreo dentro de nuestra área de estudio (Figura 4.4), se midió el nivel freático con sonda y además se hizo el corrido de una sonda multiparamétrica en cada pozo, midiendo en profundidad (para nuestro fin) la variación de salinidad de acuerdo a la conductividad del agua. Se midieron otros parámetros físico-químicos, utilizados en trabajos paralelos a este. La herramienta utilizada para las mediciones fue la sonda modelo HIDROLAB. (Figura 4.5).

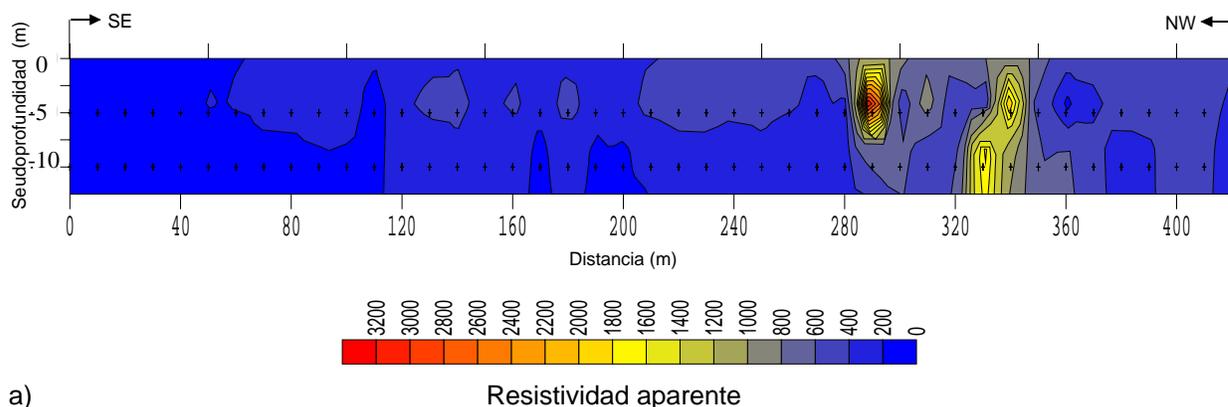


Figura 4.5 Muestreo de Pozos. a) sonda multiparamétrica HIDROLAB, b) muestra de piezómetros ubicados en el área de estudio, c) medición en piezómetros

Procesamiento de datos geofísicos

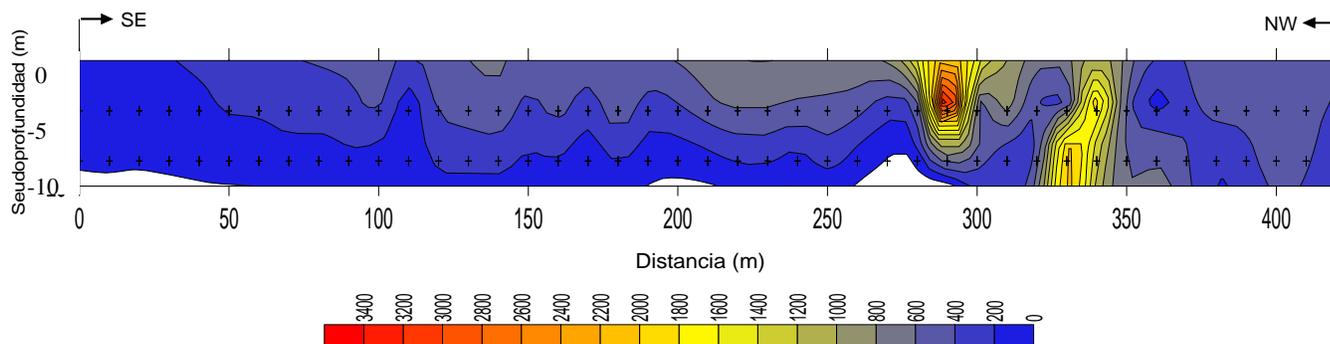
Una vez obtenido los datos de campo, se inicia la etapa de procesamiento para lo cual se separan los obtenidos en el perfilaje eléctrico y los de los SEV's. En el caso del calicateo a los datos se les asignó una posición y una seudoprofundidad de acuerdo a la separación de cada punto de atribución y tamaño de los arreglos descritos anteriormente en este capítulo. Posteriormente se elaboraron los perfiles de resistividad aparente con ayuda del software Surfer 8.0, utilizando dos métodos de interpolación contenidos en este software, dichos métodos son Inverse Distance to a Power y Kriging, con la finalidad de ver que método dada sus características de operación (ver capítulo 3), mostraba el mejor resultado en cuanto a las variaciones laterales que nos pueden indicar la presencia de cavidades y otras características del subsuelo.

El método de interpolación Inverse Distancia to a Power es el que dio una mejor configuración (Ejemplo de los perfiles figura 4.6). Entonces de esta forma se obtuvieron las imágenes de los diferentes perfiles realizados en campo.



a)

Resistividad aparente



b) Resistividad aparente

Figura 4.6 Ejemplo de perfiles de resistividad aparente, a) perfil 1, creado con el método de interpolación inverso de la distancia (Inverse distance to a power); b) perfil 1, creado con el método de interpolación Krigin.

Para el caso de los SEV's se graficaron los datos y se hicieron los ajustes de los empalmes realizados en campo, conservando fijos ya sea el primero o le segundo tramo de la curva según su calidad (ejemplo Tabla 4.2 y Figura 4.7) con la finalidad de dejar una curva continua. Cada SEV se ubicó geográficamente con GPS.

Tabla 4.2 Datos de las curvas de campo antes y después de ajustar los empalmes (SEV 5).

Datos registrados en campo con empalmes			Datos ajustados	
AB/2	MN	pa	AB/2	pa
1	0.5	1122	1	1122
1.5	0.5	846.7	1.5	846.7
2	0.5	811.2	2	811.2
3	0.5	760.1	3	760.1
4.5	0.5	811	4.5	811
7	0.5	754.5	7	754.5
4.5	1.5	814	10	618
7	1.5	758.1	15	510.4
10	1.5	621	22	291.2
15	1.5	513.4	32	56.2
22	1.5	294.2	46	18.5
32	1.5	59.2	68	20.9
22	4.5	281.2	100	59.3
32	4.5	91.1		
46	4.5	8.5		
68	4.5	10.9		
100	4.5	49.3		
68	15	3.9		
100	15	32.3		

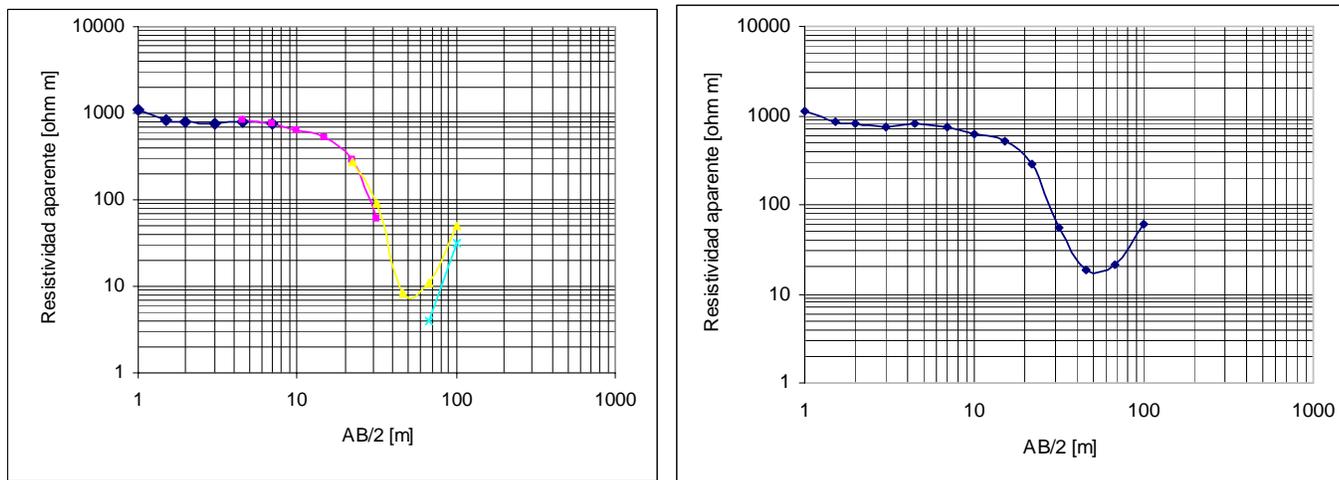


Figura 4.7 Gráficas de la curva de campo antes y después de ajustar los empalmes.

Una vez hecho lo anterior, se trabajó con estas curvas en el software WinGLink, las cuales en algunos casos fue necesario editarlas con las herramientas de este software, para eliminar los efectos de datos malos provocados por ruido y así lograr un mayor suavizamiento, que en el momento de la inversión nos diera mejores resultados.

Los modelos 1-D y las secciones geoelectricas obtenidas de la inversión (Figura 4.7) se realizaron bajo el concepto de *Filtrado Lineal* (ver Capítulo 3) empleado por el programa WinGLink.

Para la inversión se definió el Error Cuadrático Medio (RMS) que se desea como máximo, así como el número de iteraciones necesario. Para el caso que nos compete se asignó 5% como máximo para el RMS y de 10 iteraciones máximo, que son los valores que trae por defecto el programa.

Una vez hecha la inversión se ajustó cada modelo (Anexo 3) según el criterio, para tratar de hacer que la curva teórica se aproximara lo mejor posible a los datos de campo por un proceso de prueba-error sin llegar a sobre estimar, tanto el número de capas como los espesores (Figura 4.8).

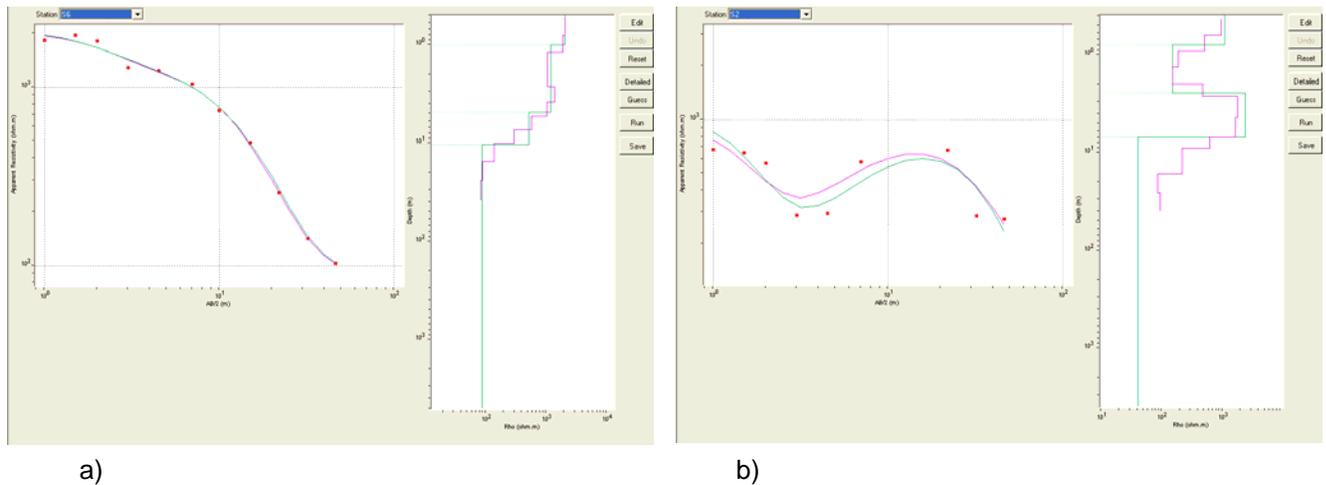


Figura 4.8 Modelos 1-D obtenidos con el programa WinGLink. Modelo estimado por programa (línea magenta) y modelo estimado por el interprete (línea verde). a) Muestra un ajuste bueno de la curva teórica con los datos de campo. b) Muestra un ajuste no muy bueno, pero que sigue la tendencia de los datos de campo.

Para la realización de las 3 secciones, con las herramientas del programa se seleccionaron los sondeos correspondientes a cada sección, en forma automática el programa realiza una interpolación inicial, en la cual se hicieron los ajustes modificando los valores de las variables siguientes:

- Tamaño de la separación de los nodos de la malla (Grid) de cada sección.
- Límites de la interpolación tanto en profundidad como en longitud.
- Radio de interpolación entre valores
- Tipo de escala (lineal o logarítmica) para presentar la sección.

Estos valores variaron para cada sección, excepto la escala, la cual fue logarítmica para todas las secciones, tratando de obtener una sección coherente de acuerdo a la información que se conoce (Figura 4.9).

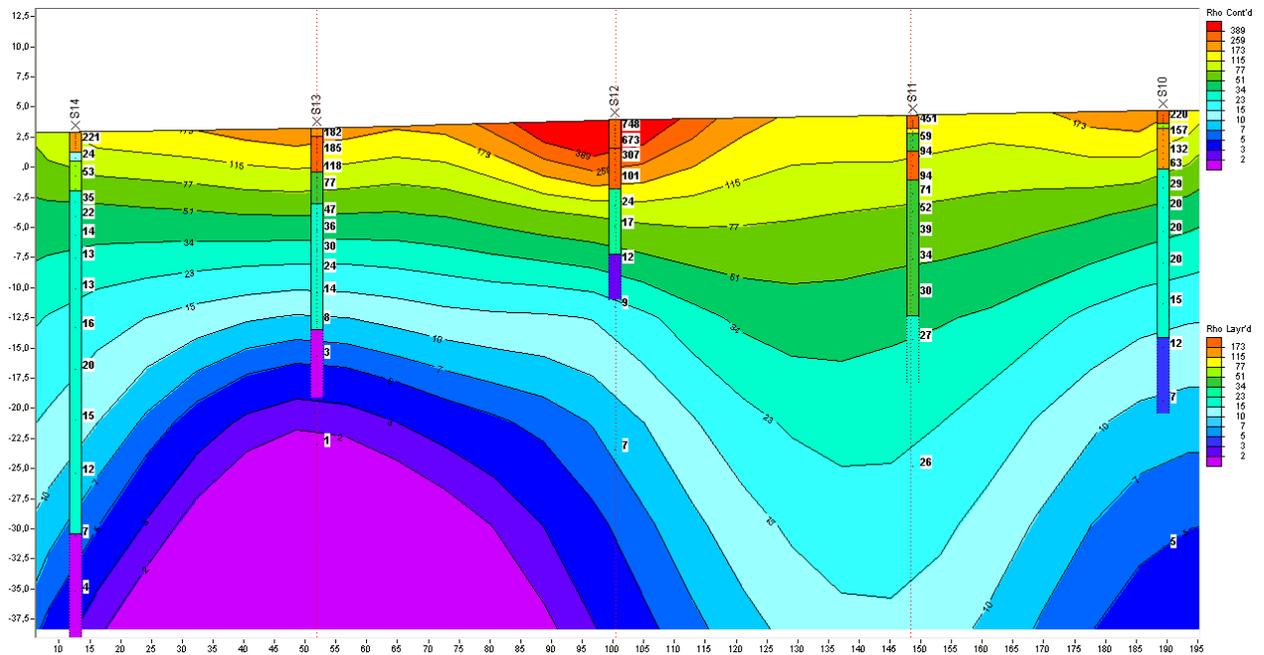


Figura 4.9 Sección geoelectrica 3 correspondiente a los SEV'S 10 A 14 obtenida con el programa WinGLink, se muestra la correlación que hay entre la imagen resultante de la interpolación y los modelos 1-D obtenidos.

Interpretación

Dada la finalidad de la interpretación de relacionar las secciones de resistividad con materiales, sustancias y/o estructuras físicamente conocidas, se tiene que comparar los valores de resistividad obtenidos mediante medición en campo con las resistividades de los probables materiales en el subsuelo. Para esto se utilizan tablas ya establecidas de resistividad eléctrica de materiales medidas experimentalmente, de las cuales existen muchas en la literatura referente al método geoelectrico. En este trabajo se usó la siguiente que es una combinación de las realizadas por Alonso L., 2001; Orellana, 1972; Espeso J., 2005 (Tabla 4.3).

Tabla 4.3 Resistividades eléctricas de materiales

Material	Resistividad [Ohm•m]	Material	Resistividad [Ohm•m]
Calizas compactas	1000 - 5000	Margas, turba, humus, muy seco	100
Terrenos rocosos - calizos (Jurásico) seco	3000	Marga y humus seco	50
Agua de Arroyos y Lagos de alta montaña	1000 - 3000	Margas (Jurásico)	30 - 40
Calizas agrietadas	500 - 1000	Margas, arcillas y humus húmedo	10
Suelo calcáreo	300 - 400	Aguas Subterráneas	1 - 20
Calizas blandas (Sahcab)	100 - 300	Agua de Mar	0.2 - 1
Margas y arcillas compactas	100 - 200		

Además se hizo una correlación con las mediciones hechas en los pozos tomando en cuenta la variación de los valores de conductividad eléctrica del agua, dado que para el agua subterránea en general se tiene valores de 4 mS/cm y para el agua de mar es mayor o igual a 50 mS/cm aproximadamente (Schlumberger Limited, 2008). En la figura 4.10 se muestra una de las gráficas obtenida con los valores de conductividad medidos en los pozos, en la cual se observó claramente el contacto entre el agua subterránea y el agua de mar.

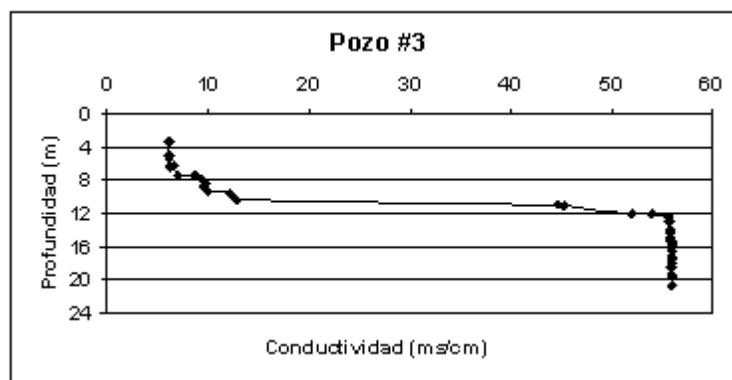


Figura 4.10 Gráfica de conductividad eléctrica vs profundidad correspondiente al pozo de muestreo # 3.

Y como complemento también se usaron mapas en superficie, de las rutas por donde pasan los conductos de los cuerpos cársticos trazados por espeleólogos (Figura 11); para observar y medir cualitativamente si lo obtenido en el procesamiento concuerda con lo medido en campo directamente y también con lo reportado en otros estudios.



Figura 4.11 Imagen de integración de los sistemas de cavernas en la zona de Xel Ha, (figura obtenida del "Programa de Monitoreo de Aguas Subterráneas de la Caleta de Xel-Ha y sus alrededores, Estado de Quintana Roo", 2005).

5. Resultados

Análisis de secciones obtenidas con calicatas

Las secciones eléctricas obtenidas con las calicatas muestran la variación lateral de resistividad eléctrica en el área de estudio, con lo cual se obtuvieron los siguientes resultados.

Perfil 1

En el se encontró una anomalía, que se relaciona con una cavidad vacía dados los altos valores de resistividad aparente (ρ_a) y su poca profundidad, así mismo se halló otra zona con un rango de resistividades aparentes altas sin llegar a ser tanto como las de la anomalía anterior, por lo que a esta zona se considera que es un material mas compacto y poco permeable dada su posición y tamaño. Las resistividades de ambos cuerpos contrastan con los valores del material que la rodean, dicho material como se observó en campo y de acuerdo al rango de ρ_a y a la descripción geológica reportada en artículos y otros documentos, corresponde a rocas carbonatadas. En general este perfil (omitiendo las zonas de alta resistividad), se encuentra en un rango de ρ_a menores o igual a los 800 ohm·m. Además, se localizaron varias zonas que presentan resistividades bajas que pueden estar relacionadas directamente con el grado de saturación de agua, así como con la salinidad de esta, dichas zonas se encuentran más someras en la parte más cercana a la costa y va aumentando en profundidad conforme avanzamos tierra adentro. La presencia de agua a poca profundidad se corrobora con las mediciones hechas en el pozo de nuestro No. 1 que se encuentra a aproximadamente 40 m de distancia del inicio del perfil, el cual nos indica que el nivel estático (N.E.) se localiza a 6 m de profundidad y el contacto con el agua salada está a los 12 m aproximadamente. Así mismo, en el pozo No. 2 se midió un N. E. a 6.36 m y el contacto con el agua salada a los 12.2 m aproximadamente (Figura 5.1).

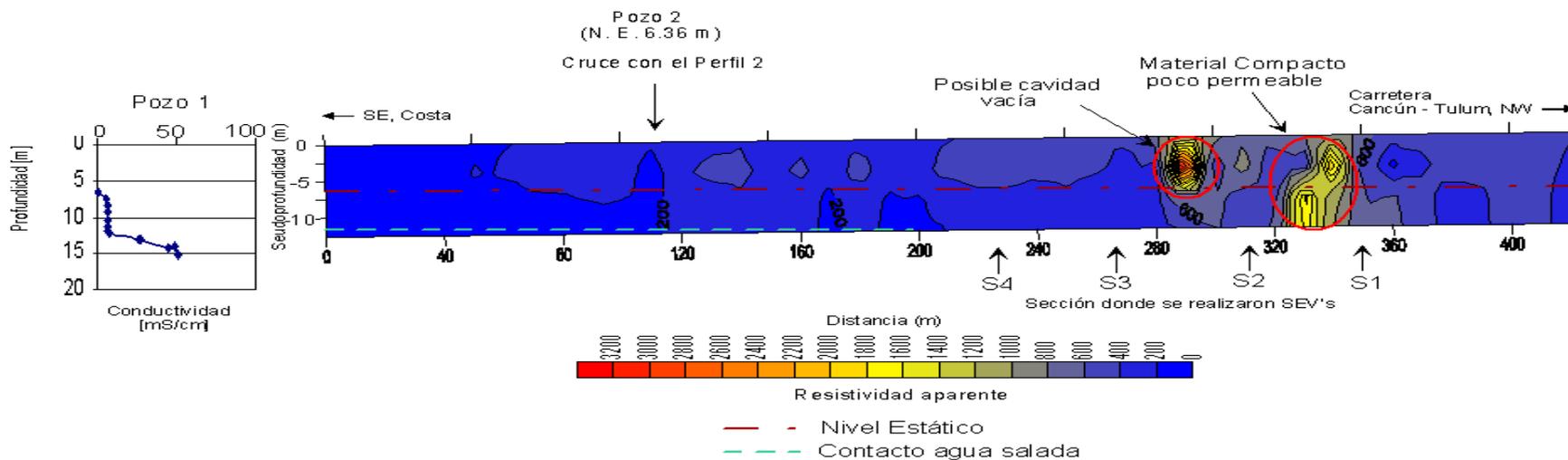


Figura 5.1 Sección geoelectrica correspondiente al Perfil 1, la correlación y calibración se hizo con los pozos 1 y 2.

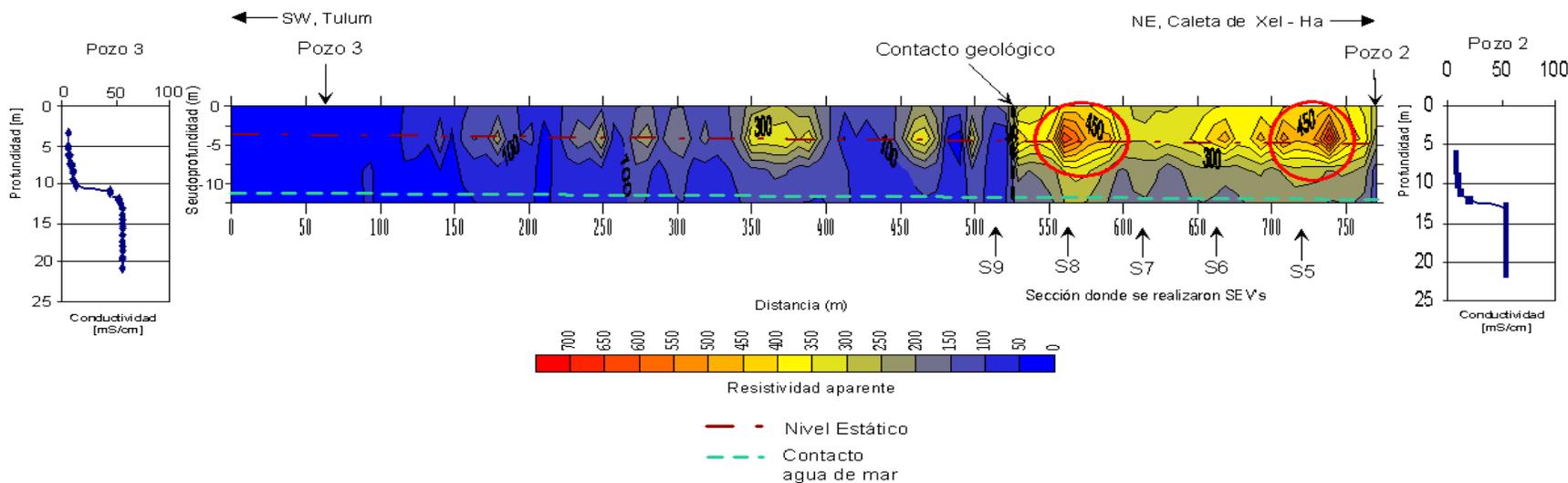


Figura 5.2 Sección geoelectrica correspondiente al Perfil 2, la correlación y calibración se hizo con los pozos 3 y 2.

Perfil 2

En el caso de este perfil se obtuvieron los siguientes resultados: se muestran bastantes discontinuidades laterales lo que es indicativo de una roca bastante fracturada, en la que, se encontraron dos zonas con $\rho_a > 300$ ohm-m, lo cual se relaciona con un material más compacto (círculos en rojo Figura 5.2). De igual forma se identificaron las zonas más saturadas que corresponden a resistividades aparentes menores a 150 ohm-m y que se localizan de forma más homogénea al inicio del perfil. Al igual que en el perfil 1 corresponde a la parte más baja con apenas 4 m.s.n.m. aproximadamente. También se observaron resistividades bajas en forma de cuñas verticales en la parte central del perfil. Esto confirma la presencia de fracturas ya que el agua corre a través de los intersticios de estas haciendo que los valores de resistividad bajen. En el extremo final no hay presencia de resistividades bajas. Esto puede ser debido a que la roca sea más compacta y menos permeable (Figura 5.2).

En este caso la presencia de agua se pudo corroborar debido a que se encontraron dos pozos de muestreo, el pozo No. 2 y No.3 con mediciones del N. E. de 6.36 m y 3 m respectivamente. Así mismo la profundidad a la cual se encuentra el contacto con el agua salada, va de los 10 m del lado del pozo No.3 a los 12.5 m del lado del pozo No. 2 (Figura 5.2).

Perfil 3

El perfil tiene resistividades aparentes relativamente bajas en comparación a las secciones geoelectricas anteriores, lo que significa que, de acuerdo al concepto que se ha manejado, todo el perfil contiene agua, sin embargo, del lado noreste del perfil había agua estancada con un significativo contenido de sal, a diferencia de los perfiles anteriores.

Los primeros 570 m de este perfil presentan muy bajas resistividades igual o menores a 20 ohm-m. Esto debido a que es la parte que se encuentra más cercana a la costa y que tiene menor elevación, así como a la presencia de un espejo de agua que se encontraba a lo largo de este tramo a los costados de la carretera de terracería sobre la cual se hizo el perfil (Figura 5.5).

El resto del perfil presenta más variaciones de resistividades aparentes, asociadas con una zona de roca fracturada esto se dedujo debido a la casi nula continuidad lateral de resistividades aparentes entre un punto de medición y otro. En esta parte se encontraron dos zonas asociadas con posibles cavidades llenas de agua (Figura 5.3).

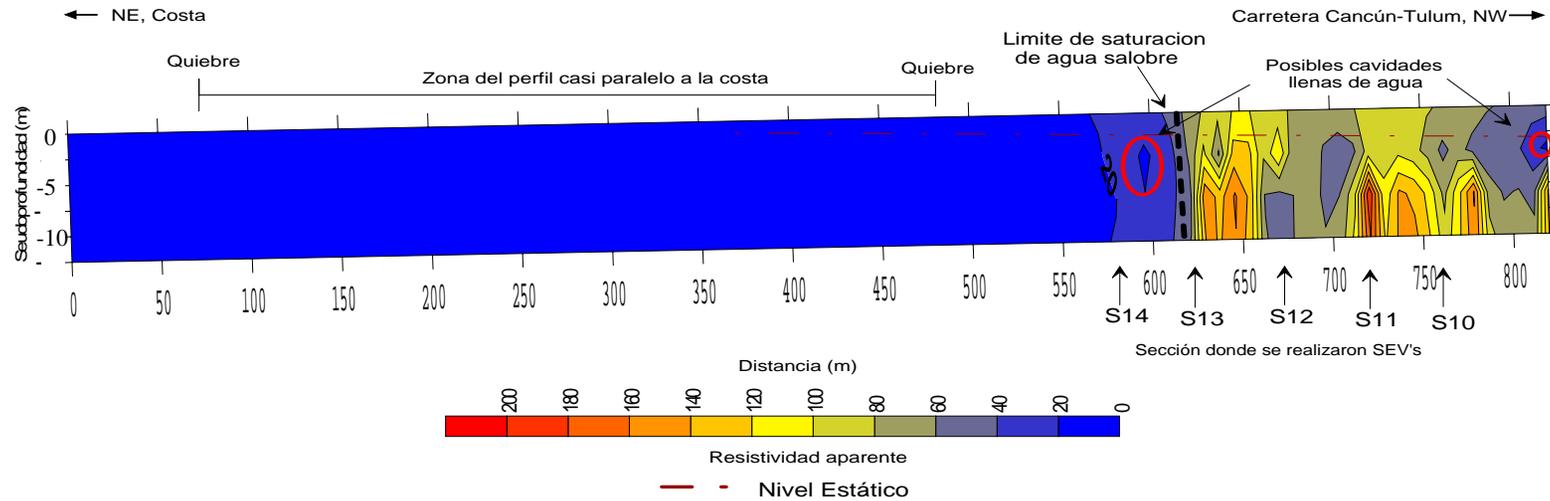


Figura 5.3 Sección geoelectrica correspondiente al Perfil 3 con alto contenido de agua en su mayoría.

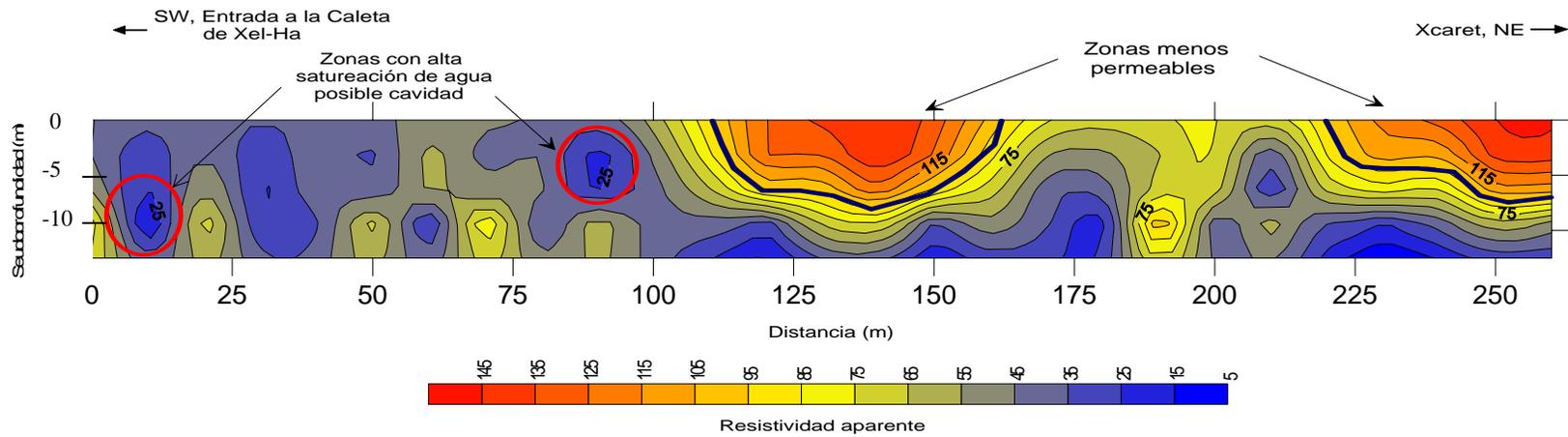


Figura 5.4 Sección geoelectrica correspondiente al Perfil 4, se presentan fracturas y zonas con baja resistividad debido al contenido de agua en ellas.

Cabe mencionar que para el perfil 3 el Nivel estático del agua se extrapoló el perfil 1 ya que también es perpendicular a la línea de costa, tomando en cuenta que el extremo más elevado tiene aproximadamente 1 m por debajo de la cota del perfil 1 en el extremo más elevado.



Figura 5.5 Presencia de agua en los alrededores del Perfil 3 en los primeros 570 m.

Perfil 4

El Perfil tiene un rango de valores de resistividad relativamente bajo, así como, también presenta el comportamiento que se ha venido observando en lo correspondiente a zonas con fracturamiento de los perfiles anteriores, el cual se presenta a lo largo de todo el perfil.

En este perfil es claro observar que hay dos cuerpos con resistividades aparentes más altas que el resto del perfil ($\rho_a > 95 \Omega \cdot m$) los cuales corresponden a material menos permeable, también se encuentran cuerpos con resistividades aparentes iguales o menores a 35 ohm m (Figura 5.4), al igual que en el caso del perfil 3 son de gran interés para los fines de este trabajo, ya que pueden tratarse de cavernas con importante flujo de agua.

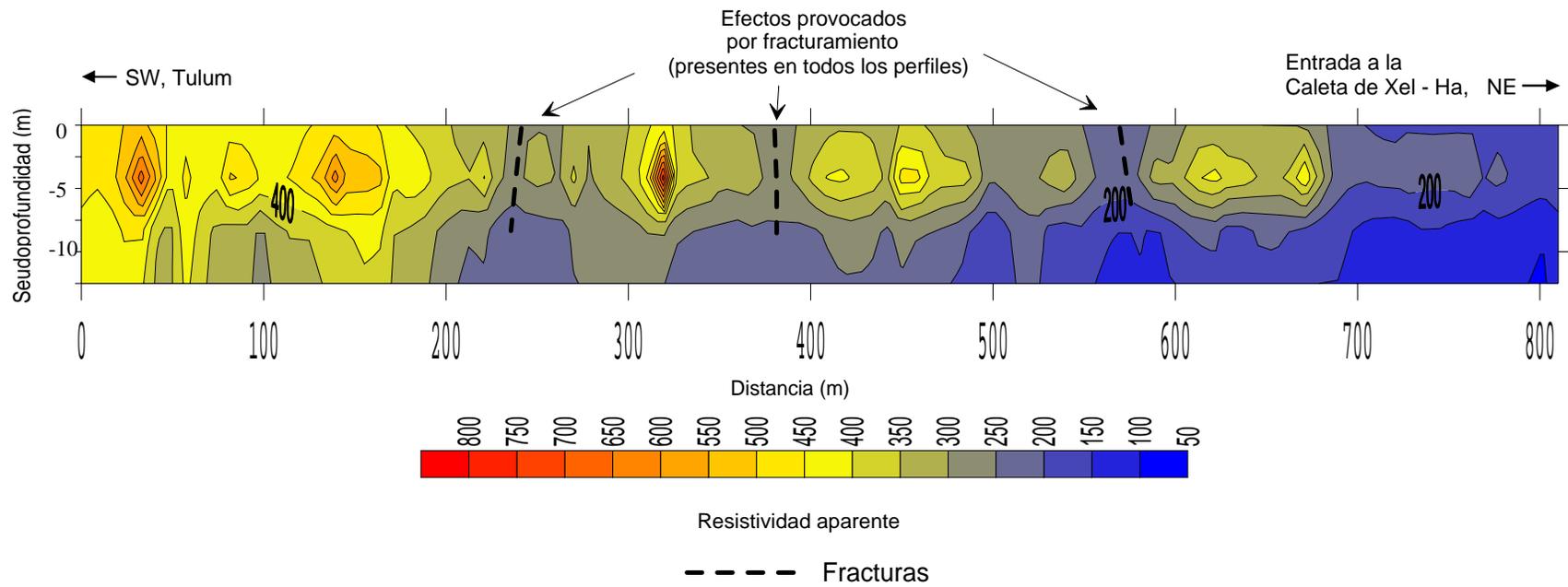


Figura 5.6 Sección geoelectrica correspondiente al Perfil 5. Presencia de fracturas, así como disminución de la resistividad en la dirección noreste.

Perfil 5

En lo que respecta al perfil 5, se observa la presencia de fracturas a lo largo de todo el perfil. Los rangos de resistividad aparente son menores a 800 ohm·m igual que los perfiles 2 y 1, sin tomar en cuenta las anomalías del perfil 1. La distribución de resistividades se presentó de la siguiente manera: al principio del perfil se ubican las resistividades aparentes más altas ($> 350 \Omega \cdot m$) correspondientes a una roca más compacta y con menor saturación, conforme se fue avanzando se fueron presentando resistividades aparentes de menor valor más cercanas a la superficie, terminado el perfil con resistividades en un rango menor a los 200 ohm m (Figura 5.6).

Para finalizar con el análisis cualitativo de las secciones eléctricas de resistividad aparente hechas con calicatas; se hace una interpretación conjunta de ellos. Se observan dos regiones con rangos de resistividad aparente diferentes. Uno en el cual las resistividades aparentes de las rocas alcanzaron los 800 ohm·m la cual corresponden a los perfiles 1, 2 y 5 que se encuentran en el área del lado Suroeste (SW) de la entrada hacia la Caleta de Xel – Ha y otra que apenas alcanzó resistividades aparentes de 200 ohm m, siendo los perfiles 3 y 4 los que presentaron esta característica y que se encuentra en el costado Noreste (NE) de la entrada. Esto es indicativo de una mayor saturación de agua, que puede ser debido a las características físicas de las roca que los contiene combinado con la topografía del terreno ya que la zona más baja es la parte NE lo que hace que el nivel estático si se extrapola el medido en el perfil 1 se encontraría a 1 m aproximadamente más cerca de la superficie.

Algo muy importante y que esta relacionado al objetivo de este trabajo es la ubicación de las zonas de mayor saturación. Para el caso de los perfiles 1, 2 y 5, debido a los rangos de resistividad aparente, solo fue posible localizar y delimitar estas zonas sin hacer una descripción detallada de ellas. Por lo cual sólo se especulará que en ellas puede haber la presencia de conductos o cavidades saturadas de agua. No así para el caso de los perfiles 3 y 4 en los cuales, es más factible debido a la escala de resistividades aparentes decir que las zonas con resistividades aparentes menores a 25 ohm m y que presentan un gradiente alto se relacionan con posibles cavidades llenas de agua y que la variación de la *resistividad aparente* dentro de ellas es debido a la salinidad.

Análisis de secciones obtenidas con SEV's

En un análisis cuantitativo, obtenido por inversión de mediciones de resistividad aparente de SEV's realizados, se obtuvieron modelos unidimensionales de resistividad y a partir estos, secciones eléctricas.

A partir de las secciones eléctricas se definieron unidades geoelectricas según el tipo de material en el subsuelo de la zona, de acuerdo a la tabla de resistividades presentada en el capítulo 4 (Tabla 5.1).

Tabla 5.1 Clasificación de las unidades geoelectricas.

Unidad Geoelectrica	Rango de resistividades [Ω-m]	Material
U1	$\rho > 1000$	Caliza compacta
U2	$1000 \geq \rho > 300$	Caliza fracturada
U3	$300 \geq \rho > 100$	Caliza blanda o Sahcab
U4	$\rho \leq 100$	Material con gran saturación de agua o Calizas Margosas

Sección eléctrica 1

De la sección eléctrica que corresponde a los SEV's 1 a 4 (perfil 1), se observó un cuerpo con alta resistividad el cual se relaciona con un cuerpo de material compacto, muy duro y poco permeable, correspondería al cuerpo de mayor tamaño detectado con el perfilaje eléctrico, no se relaciona con una posible cavidad ya que los valores de resistividad grandes nos indicarían que se encuentra vacía, lo cual es casi imposible dado que se encuentra por debajo del nivel estático medido en campo. En relación a la cavidad mostrada en el perfil 1, y que no se vio presencia de ella en esta sección eléctrica, se atribuye a la separación de los SEV's, que hizo que no coincidiera alguno de ellos con dicha cavidad. En el perfilaje eléctrico dicha cavidad solamente fue registrada por una medición lo que indica que no es demasiado grande, para ser detectada según la escala que se manejó para la sección eléctrica (Figura 5.7a).

La sección se ajustó a los parámetros establecidos de las unidades geoelectricas, en su mayoría corresponden a la unidad U2, presentando en algunos lugares lentes de la unidad U1 como es el caso del cuerpo compacto antes mencionado. Así mismo, la unidad U3 en particular es muy favorable para la formación de cavidades (Duch, 1991). Aunque la unidad U4 solo se presenta en una pequeña porción (Figura 5.7b), si se observa la sección de resistividades, estas tienden al rango de ésta unidad con forme se profundiza (Figura 5.7a).

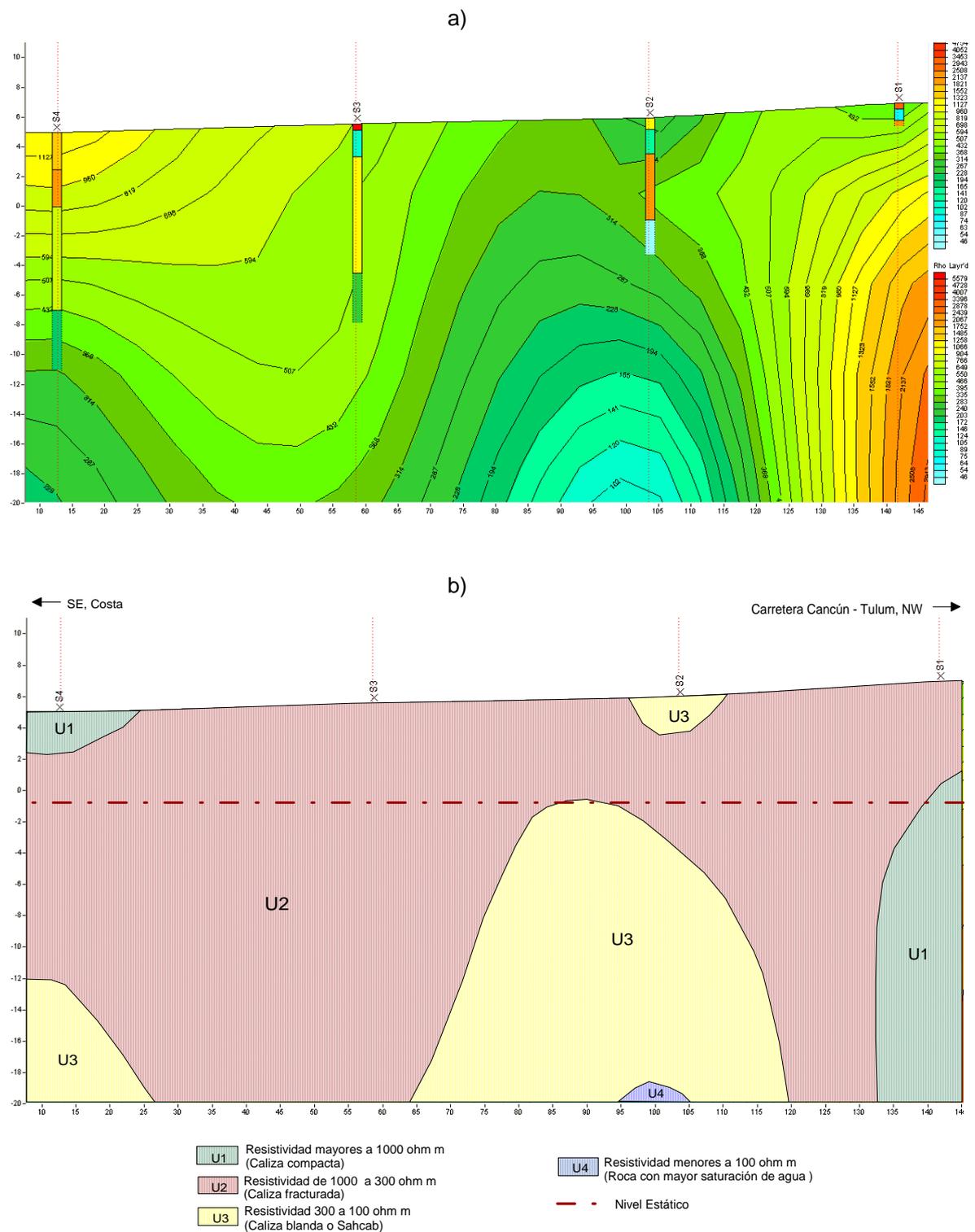


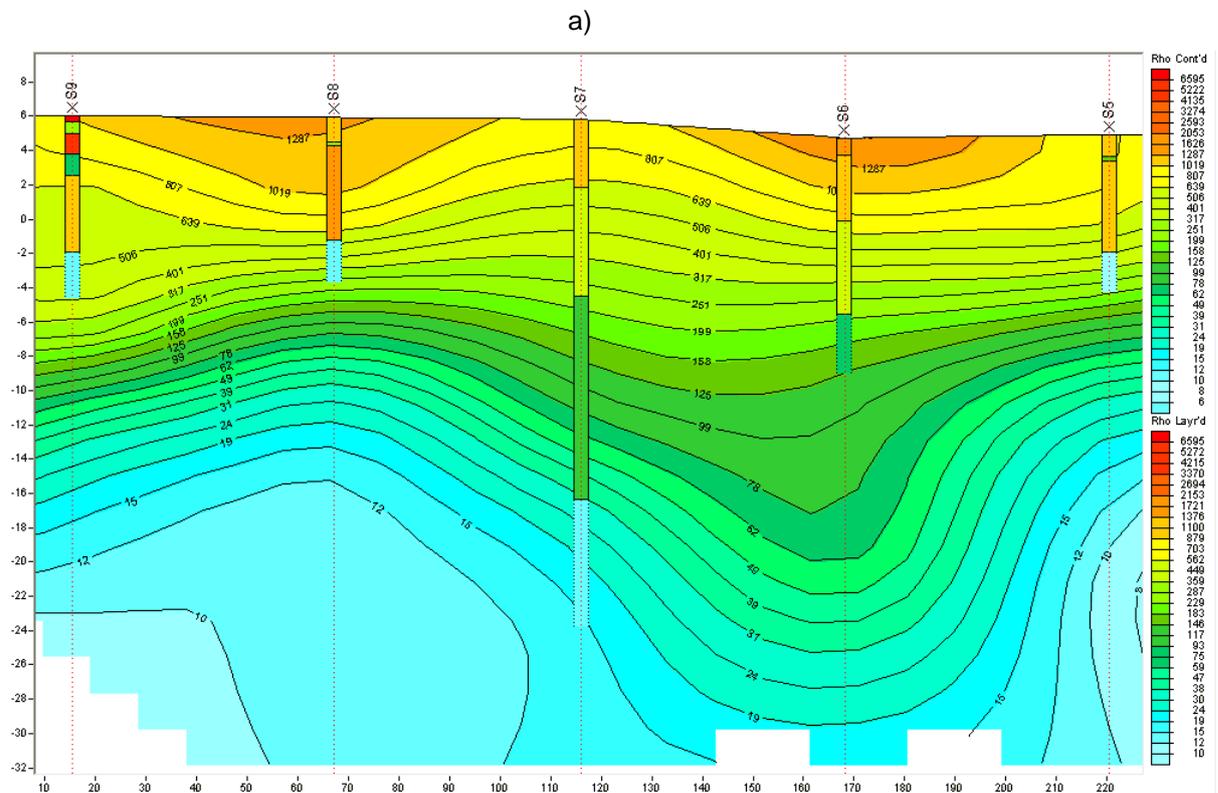
Figura 5.7 a) Sección eléctrica 1, b) sección geoelectrica 1.

Sección eléctrica 2

Para ésta sección la cual corresponde a los SEV's 5 a 9 (perfil 2), no hubo presencia de ningún cuerpo con resistividades altas, anómalas al del resto de la sección. Lo que

si fue observable, es una franja en la cual la resistividad disminuye relativamente rápido de acuerdo a la profundidad, dicha franja la relacionamos con el nivel estático y también con el contacto de agua salada, ya que corresponde con los mostrados en los perfiles de pozos, los cuales como ya se mencionó fueron medidos en campo (Figura 5.8a).

También se identificó la presencia de las cuatro unidades geoelectricas, en la parte somera se encuentra una capa continua que corresponde a la unidad U2 en la cual esta contenida en dos porciones la unidad U1, la cual hace mención a un material compacto y poco permeable, posteriormente se encuentran las unidades U3 seguida de la U4, lo que indica una mayor saturación de agua o mayor cantidad de sales en ésta conforme se profundiza (Figura 5.8b).



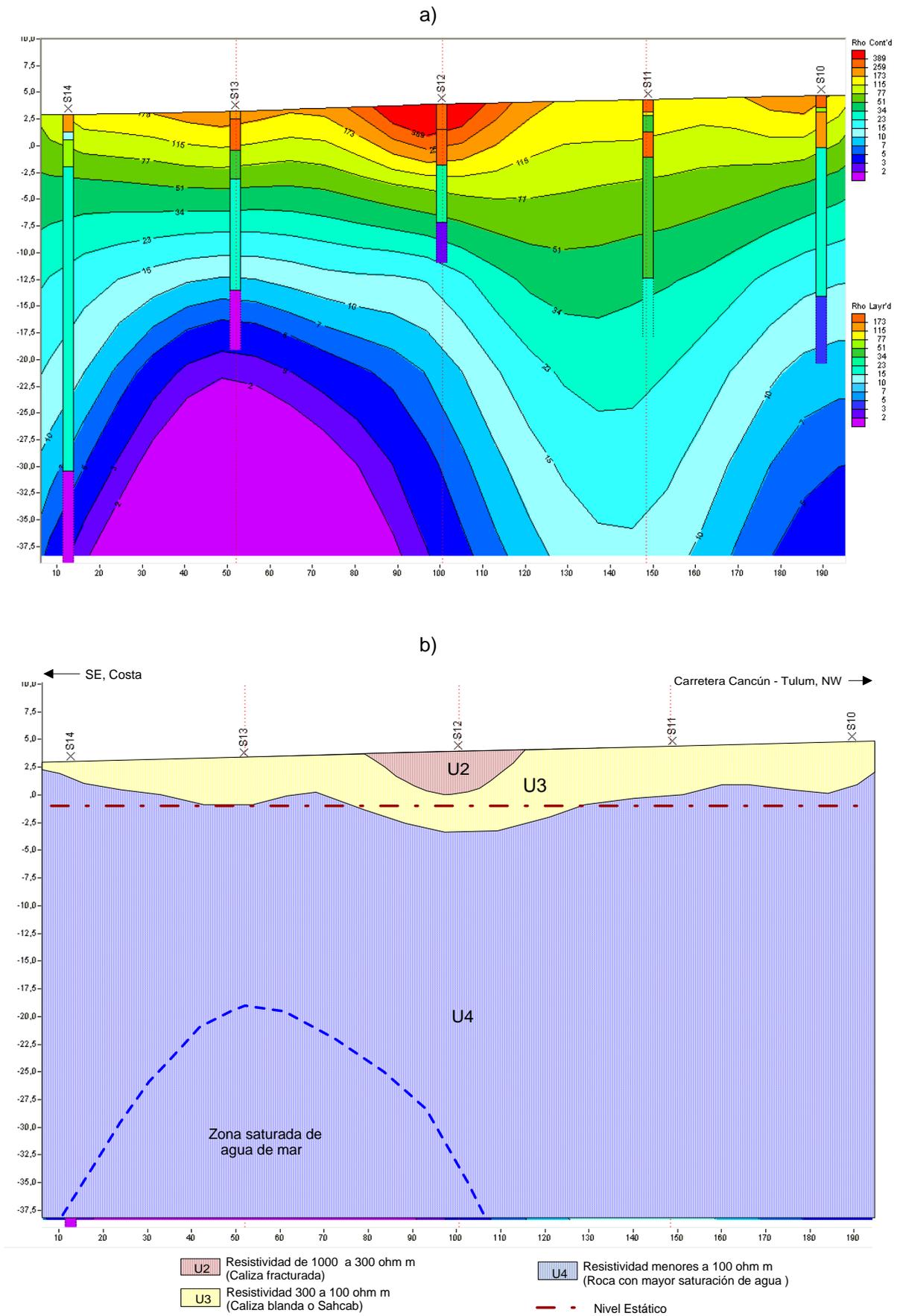


Figura 5.9 a) Sección eléctrica 3, b) sección geoelectrica 3.

El hecho de haber encontrado con la calicata lo que se ha considerado como posibles cavidades llenas de agua y el que no fuera así con los SEV's, es debido a las diferentes resoluciones de estos métodos, esto nos indica que los cuerpos encontrados con el método de calicata, tiene dimensiones no tan grandes como para ser detectados por los SEV's. Así mismo, cuerpos más pequeños en dimensión a los detectados pudieron pasar desapercibidos.

Con todo lo anterior se realizó el esquema de localización de las posibles cavidades encontradas en esta investigación, complementado con la digitalización del sistema en cavernas de el mapa "Integración de los sistema de cavernas en la zona de Xel-Ha" elaborado por O. Escolero, *et al* (2005) para el Programa de Monitoreo de Aguas Subterráneas de la Caleta de Xel-Ha y sus alrededores, Estado de Quintana Roo, presentado en la figura 4.11 (capítulo 4).

El posicionamiento de las cavidades encontradas se realizó de acuerdo a la ubicación en superficie que ocupan dentro los perfiles y secciones eléctricas, esquematizados en el mapa de localización de estos (Figura 4.3, Capítulo 4), Así entonces se obtuvo el siguiente esquema:

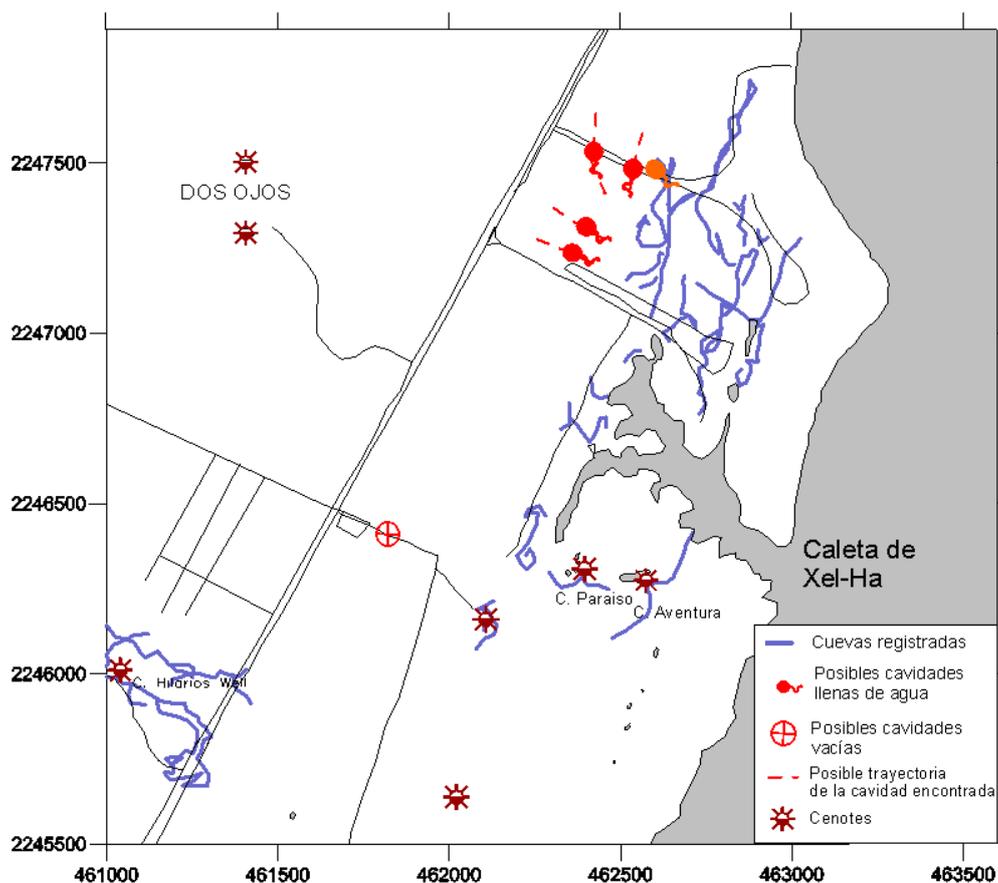


Figura 5.10 Esquema de localización de cavernas de la zona de la Caleta de Xel-Ha.

En el cual se observa que las que posibles cavidades encontradas en este estudio son 5 de las cuales, y una zona saturada de agua de mar que coincide con uno de los extremos de las cavernas ya exploradas (marca color naranja, figura 5.8), pero dadas sus dimensiones tan grandes es más probable que se trató de intrusión salina. Las cavidades encontradas están en zonas en las que de acuerdo al mapa de *“Integración de los sistema de cavernas en la zona de Xel-Ha”* no hay registro de ellas o sea son nuevas posibles cavidades (marcas color rojo, figura 5.8), las cuales están cercanas a las ramificaciones de las cavernas ya exploradas, lo que puede ser indicativo de una posibles conexión de las cavernas encontradas con las ya registradas y mapeadas.

Con todos resultados de los análisis tanto cualitativos como cuantitativos presentados en este capítulo, se ha formado un panorama de las condiciones que se presenta en el subsuelo de la Caleta de Xel-Ha y sus alrededores.

6. Conclusiones

De la geofísica se desprende que el área de estudio está constituida por roca muy fracturada así como cavidades que probablemente estén conectadas entre ellas y que sean parte de la red de conductos de los diferentes sistemas de cavernas que se encuentran en la región.

Se determinaron zonas dentro del área de estudio que presentan un rango de resistividad mayor, las cuales se relacionan con un material compacto y poco permeable. Así mismo, hay zonas con resistividades bajas que concuerda con material fracturado o blando en el que hay mayor saturación de agua tanto lateral como en profundidad, las cuales son idóneas para presentar porosidad terciaria, por la que circule libremente el agua.

Se detectaron 5 posibles cavidades y una zona saturada de agua de mar la cual concuerda con parte de las cavernas registradas en estudios anteriores, de las cinco posibles cavidades cuatro se encuentran saturadas de agua y una se encuentra vacía o seca. De acuerdo a los antecedentes que se tienen de la zona de este estudio no hay registro de ellas, por lo cual este sería su primer indicio de existencia.

El gran contenido de agua en la roca, aunado a la combinación de las estructuras que reporta este trabajo (porosidad secundaria y terciaria), indica una hidrodinámica de consideración en toda la región, por lo que no se puede tomar como un sitio aislado del entorno.

Manejos ecológicos inadecuados dentro y fuera del área de estudio, de cuerpos principalmente de agua que estén ligados directamente con los encontrados en este estudio, tendrían probablemente repercusiones directas sobre la caleta de Xel-Ha

Este trabajo por si sólo no hacen factible conocer el comportamiento hidrodinámico plenamente, como para llegar a identificar los lugares de procedencia directa del agua que interactúa con la Caleta de Xel-Ha, pero si los lugares por donde circula más libremente.

Los métodos geoelectricos empleados en este estudio se complementaron muy bien, dando resultados satisfactorios dentro de los alcances de cada uno.

Con el método de perfilaje eléctrico (calicata eléctrica) se detectaron zonas con contrastes de resistividad eléctrica bien definida relacionadas con zonas fracturadas o con abundantes conductos kársticos y zonas kársticas poco permeables.

Si se tuviera que hacer un estudio similar, en condiciones semejantes emplearía ambos métodos dándole mayor peso al perfilaje eléctrico debido a que este método es el idóneo

para encontrar estructuras que se distribuyen de forma lateral como son las cavidades, contactos, fallas, complementado por los SEV's, para así también tener un panorama de cambios estructurales a profundidad como se hizo en esta investigación.

No obstante si se cuenta con las condiciones para aplicar el método de tomografía eléctrica, este sería más recomendable, puesto que el empleo de los métodos usados en este estudio se hizo tratando de generar información tanto lateral como en profundidad, la cual se obtendrían directamente de una tomografía eléctrica.

La complementación de la prospección geofísica con la piezometría hecha en campo, además de los estudios anteriores tanto geofísicos como de otras disciplinas que sirvieron como antecedente, son vitales para dar mayor sustentabilidad a los resultados obtenidos.

Este estudio puede considerarse de utilidad como antecedente o complemento de otros que se relacionen con el tema.

Bibliografía

Alonso, D., L. A. 2001. Estudio de prospección geofísica y geotécnica para el emplazamiento del ensamble de San Esteban de Andagoya (Álaya). Escuela Técnica Superior de ingenieros de minas.

Aguayo, C., J.E., R. Bello M., M. A. Del Vecchio C., J. Araujo M. y M. A. Basañez L. 1979. Estudio sedimentológico en el área Tulum-Cancún-Isla Mujeres, Estado de Quintana Roo, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo XLI, No 1 y 2, 1980. Pag. 15.

Bernard, J. Leite, O., Utilización de métodos de resistividad en los estudios hidrogeológicos, Iris Instruments, Francia.

Cantaldi, A., Zambrano F., y Rojas H. Aplicación de métodos de resistividad en investigación hidrológica (Experiencia en Venezuela). TRX Consulting C. A., XIII Congreso Venezolano de Geofísica

Duch, GJ. 1991. Fisiografía del Estado de Yucatán—su relación con la agricultura. Centro Regional de la Península de Yucatán (CRUPY), Universidad Autónoma de Chapingo, México.

Escolero, O., M. Rebolledo, L. Marín, y A. Alcalá. 2005. Propuesta para el “Programa de Monitoreo de Aguas Subterráneas de la Caleta de Xel-Ha y sus alrededores, Estado de Quintana Roo”. Universidad Nacional Autónoma de México.

Espeso S., J. A. y Fernández Z., F. 2005. Cordinadores de seguridad y salud en el sector de la construcción: Manual para la formación. Editorial Lex Nova.

Espinosa G. y L. Carillo M., G. E. 2002. Propiedades geofísicas de rocas y suelos calcáreos. Mediciones en laboratorio en especímenes pequeños. Ingeniería revista académica, mayo-agosto. Volumen 2 No. 002. Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida. México. Pags. 23 – 32.

Gómez M., F.J. y J. A. Gutiérrez G. 2007. Modelo de propagación magnética de alta frecuencia en la ciudad de Cáceres. Mapping interactivo, Revista Internacional de Ciencias de la Tierra. Universidad de Extremadura.

Márquez W, M. Cardozo y G. Villasmil. 2003. Digital processing of geoelectric data applying the ridge regression in the Parish Oligario Villalobos of the municipality Maracaibo, Zulia state. Revista técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Zulia. Volumen 26 No. 3

- Orellana E. 1972. Prospección eléctrica en corriente continua. Paraninfo. 523pp
- Ravelo C, J. I. 2006. Exploración geofísica del acuífero de Puerto Morelos, Quintana Roo. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México
- Sánchez M., A. 2003. Apuntes de electricidad y magnetismo. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sánchez S. R., F. J. 2004. Prospección Geofísica: Sondeos Eléctricos Verticales. Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, España.
- Paginas electrónicas consultadas.
- INEGI. 2006. "Climatología del Estado de Quintana Roo", Entrada 2007. URL: <http://cuentame.inegi.gob.mx/monografias/informacion/qroo/territorio/clima.aspx>
- INEGI. 2006. "Fisiografía del Estado de Quintana Roo" ", Entrada 2007. URL: <http://mapserve.inegi.gob.mx/geografia/español/estados/qroo/fisio.cfm>
- Schlumberger Limited. 2008. "Tema Resistividad.- Salinidad". Entrada 11 de Agosto, 2008. URL: <http://www.seed.slb.com/qa2/FQAView.cfm>
- "Geología Kárstica" Entrada 2007 URL: <http://www.espeleokantil.org/geologia/paisajekarstico.htm>

Anexo 1

Tabla de registros de campo del Perfil 1

Punto	AB/2	ρ_a [ohm*m]	AB/2	ρ_a [ohm*m]	Punto	AB/2	ρ_a [ohm*m]	AB/2	ρ_a [ohm*m]
0	15	53,5	32	10,8	220	15	616,4	32	180,1
10	15	63,5	32	16,5	230	15	596	32	208,7
20	15	50,1	32	12,6	240	15	533	32	54,3
30	15	115	32	17,3	250	15	517,1	32	309,9
40	15	128	32	34,5	260	15	469,8	32	86,6
50	15	229	32	48,7	270	15	222,6	32	20,4
60	15	223,7	32	52,3	280	15	236,4	32	39,3
70	15	300	32	98	290	15	4018,6	32	63,5
80	15	285	32	83,7	300	15	281,5	32	607
90	15	315,4	32	153,5	310	15	969,1	32	230
100	15	469	32	71,2	320	15	335	32	229,5
110	15	3,11	32	111	330	15	249,7	32	2966,1
120	15	440	32	245,5	340	15	2217	32	918
130	15	499	32	213	350	15	435,8	32	486,3
140	15	578	32	253	360	15	55,3	32	788,7
150	15	281	32	155	370	15	329,7	32	455,7
160	15	507	32	187	380	15	537,6	32	96,6
170	15	218,6	32	50,3	390	15	493,2	32	293,2
180	15	587,5	32	204	400	15	552,8	32	542,7
190	15	258,3	32	73,6	410	15	515,5	32	461,7
200	15	358,6	32	52,9	420	15	351,2	32	155,2
210	15	532,3	32	84,6					

Tabla de registros de campo del Perfil 2

Punto	AB/2	ρ_a [ohm*m]	AB/2	ρ_a [ohm*m]	Punto	AB/2	ρ_a [ohm*m]	AB/2	ρ_a [ohm*m]
0	15	13,3	32	5,5	390	15	370,7	32	44,9
10	15	13,9	32	14,3	400	15	216,7	32	25,8
20	15	11,18	32	2,5	410	15	8,2	32	192,7
30	15	15,5	32	2,7	420	15	100,9	32	15,6
40	15	11,3	32	2,9	430	15	85,2	32	8,9
50	15	20,4	32	8,7	440	15	106	32	9
60	15	0,5	32	1,6	450	15	211,4	32	31,7
70	15	21,1	32	6,4	460	15	361	32	30,4
80	15	52,9	32	3	470	15	506,8	32	18
90	15	39,3	32	105,5	480	15	6,4	32	49,4
100	15	0,3	32	17,8	490	15	1,6	32	12,6
110	15	41,3	32	13,4	500	15	393	32	127,9
120	15	70,7	32	55,9	510	15	4,6	32	13,3
130	15	43,1	32	8,4	520	15	7,8	32	12,8
140	15	156,5	32	21,8	530	15	520,3	32	183,4

Punto	AB/2	ρ_a [ohm*m]	AB/2	ρ_a [ohm*m]	Punto	AB/2	ρ_a [ohm*m]	AB/2	ρ_a [ohm*m]
150	15	14,4	32	6,9	540	15	470,9	32	16,5
160	15	218,7	32	7,8	550	15	444,6	32	71,8
170	15	133,9	32	25,8	560	15	697,2	32	207,4
180	15	258,9	32	33,1	570	15	673,5	32	205,6
190	15	96,9	32	59,8	580	15	584,8	32	128,2
200	15	136,9	32	30,8	590	15	505,3	32	109,1
210	15	7,4	32	8,6	600	15	339,4	32	96,6
220	15	65,3	32	46,3	610	15	332,1	32	136,1
230	15	253,4	32	10	620	15	377,6	32	141,6
240	15	163	32	7,8	630	15	344,8	32	53,1
250	15	293,2	32	25,9	640	15	370,5	32	108,8
260	15	0,9	32	24,2	650	15	447,9	32	127,8
270	15	231	32	139,6	660	15	468	32	123,4
280	15	255,7	32	68,3	670	15	520,6	32	94,4
290	15	134	32	4,2	680	15	411,5	32	80,3
300	15	263,4	32	105,3	690	15	542,3	32	148,5
310	15	135,1	32	33,9	700	15	421,6	32	143,1
320	15	178,4	32	27,7	710	15	617,3	32	110,4
330	15	107,5	32	21,7	720	15	552,3	32	105
340	15	198,8	32	61,6	730	15	551,9	32	148,5
350	15	374	32	48,2	740	15	764,1	32	71,2
360	15	392,5	32	25,3	750	15	528,9	32	87,5
370	15	492,7	32	24,1	760	15	436,6	32	158,5
380	15	314,7	32	33,2	770	15	224,1	32	38,7

Tabla de registros de campo del Perfil 3

Punto	AB/2	ρ_a [ohm*m]	AB/2	ρ_a [ohm*m]	Punto	AB/2	ρ_a [ohm*m]	AB/2	ρ_a [ohm*m]
0	15	16,7	32	4,8	420	15	3,4	32	2,1
10	15	13,7	32	6,6	430	15	4,1	32	2,7
20	15	19,5	32	5	440	15	4,8	32	2,8
30	15	9,3	32	3,1	450	15	3,3	32	2,1
40	15	8,8	32	2,9	460	15	4,8	32	3,2
50	15	9,5	32	2,7	470	15	3,3	32	2,8
60	15	7,2	32	2,3	480	15	4,4	32	3,6
70	15	8,4	32	2,5	490	15	4,2	32	2,9
80	15	7,6	32	3,6	500	15	4,7	32	2,8
90	15	6,2	32	2,1	510	15	5,6	32	3,9
100	15	4,1	32	1,9	520	15	8,3	32	3,5
110	15	5,4	32	2,8	530	15	4,5	32	2,3
120	15	3,8	32	2,2	540	15	12,3	32	4,2
130	15	4,6	32	3,4	550	15	8,2	32	2,5
140	15	5,1	32	2,7	560	15	13,5	32	9,2
150	15	5,4	32	2,8	570	15	16,5	32	18,2
160	15	4,7	32	2,3	580	15	27,8	32	15,2

Punto	AB/2	ρ_a [ohm*m]	AB/2	ρ_a [ohm*m]	Punto	AB/2	ρ_a [ohm*m]	AB/2	ρ_a [ohm*m]
170	15	4,3	32	2,4	590	15	25,6	32	23,5
180	15	4,8	32	2,6	600	15	1,2	32	9,8
190	15	3,2	32	2	610	15	29,5	32	29
200	15	3,9	32	2,4	620	15	60,2	32	20,5
210	15	3	32	2	630	15	108,4	32	221,6
220	15	2,8	32	2,1	640	15	29,3	32	165
230	15	2,1	32	1,8	650	15	188,1	32	276,6
240	15	2,5	32	2	660	15	73,8	32	11,6
250	15	2,3	32	1,8	670	15	129,2	32	22,5
260	15	2,3	32	1,8	680	15	61,4	32	51,8
270	15	2,7	32	2,1	690	15	81,3	32	68
280	15	2,6	32	2	700	15	33,1	32	26,8
290	15	2,7	32	2,2	710	15	36,8	32	80,3
300	15	3,3	32	3,5	720	15	85,1	32	299
310	15	3	32	2,3	730	15	88,2	32	84,5
320			32	2,6	740	15	87,3	32	216
330	15	3,7	32	2,5	750	15	59,1	32	186,1
340	15	3,9	32	2,5	760	15	42,2	32	52,4
350	15	3,7	32	2,3	770	15	65	32	136,4
360	15	4,1	32	2,2	780	15	43,7	32	256,7
370	15	3,9	32	2,3	790	15	23,1	32	25,3
380	15	3,9	32	2,1	800	15	38,7	32	82,1
390	15	2,9	32	1,9	810	15	19	32	32,4
400	15	4,1	32	2,4	820	15	8,5	32	209,3
410	15	3,1	32	1,8					

Tabla de registros de campo del Perfil 4

Punto	AB/2	ρ_a [ohm*m]	AB/2	ρ_a [ohm*m]	Punto	AB/2	ρ_a [ohm*m]	AB/2	ρ_a [ohm*m]
260	15	132,3	32	38,8	130	15	108,2	32	59,6
250	15	132,6	32	52,4	120	15	124,5	32	15,9
240	15	86,3	32	31,9	100	15	41,5	32	41,7
230	15	103,9	32	13,5	90	15	8,88	32	69,3
220	15	83,5	32	28,5	80	15	51,2	32	31,4
210	15	11,5	32	66,3	70	15	36,2	32	92
200	15	82,4	32	31,4	60	15	67,9	32	16,6
190	15	59,5	32	112,5	50	15	24,9	32	75,1
180	15	44,6	32	13,7	40	15	48,9	32	31,2
170	15	41,3	32	36,5	30	15	19,1	32	25,8
160	15	79,6	32	48,9	20	15	54	32	76,3
150	15	115	32	20,8	10	15	21,9	32	9,1
140	15	143,3	32	65,3	0	15	47	32	86

Tabla de registros de campo del Perfil 5

Punto	AB/2	ρ_a [ohm*m]	AB/2	ρ_a [ohm*m]	Punto	AB/2	ρ_a [ohm*m]	AB/2	ρ_a [ohm*m]
0	15	484,9	32	409,6	410	15	425,1	32	193,9
10	15	456	32	406	420	15	471,1	32	193,8
20	15	492,8	32	376	430	15	450,4	32	186
30	15	808,5	32	418,9	440			32	188,1
40	15	576,1	32	250,4	450	15	494,7	32	211
50	15	394,9	32	264,7	460	15	520,9	32	150,7
60	15	501,6	32	501,6	470	15	432,4	32	127,2
70	15	397,7	32	226,1	480	15	447,7	32	122,4
80	15	549,8	32	258,1	490	15	351,7	32	118,1
90	15	504,3	32	278,9	500	15	254,3	32	81
100	15	468,3	32	159,6	510	15	298,7	32	127,1
110	15	490	32	270,8	520	15	322,8	32	257,2
120	15	526,3	32	247,6	530	15	353,4	32	78,9
130	15	533,6	32	293,2	540	15	368,7	32	98,7
140	15	662,5	32	327	550	15	294,6	32	155,7
150	15	567	32	308,9	560	15	274,9	32	52,7
160	15	643,9	32	392,4	570	15	247,1	32	67,1
170	15	411,1	32	294,7	580	15	262,9	32	104,2
180	15	457,1	32	305,6	590	15	350,7	32	47,1
190	15	441,2	32	277	600	15	346,9	32	78,2
200	15	407,7	32	191,7	610	15	513,1	32	50,7
210	15	369,1	32	162,9	620	15	470,8	32	130,3
220	15	425,4	32	212,7	630	15	395,8	32	76,3
230	15	308,8	32	177,2	640	15	415	32	80,6
240			32	162,8	650	15	410,9	32	115,1
250	15	369,8	32	152	660	15	406	32	87,4
260	15	295,5	32	173,9	670	15	494,6	32	92
270	15	377	32	227	680	15	349,5	32	88,8
280	15	289,5	32	231	690	15	241,2	32	106,5
290	15	358	32	201	700	15	222	32	74,9
300	15	398	32	191,5	710	15	229,7	32	66,4
310	15	474,2	32	233,1	720	15	218,5	32	87,6
320	15	870,2	32	177,3	730	15	248,1	32	76,5
330	15	358,6	32	109	740	15	248,4	32	104,7
340	15	422,9	32	149,8	750	15	245,8	32	66,5
350	15	319	32	184,5	760	15	263,4	32	82,3
360	15	349,1	32	173,1	770	15	202	32	75,2
370	15	344,7	32	202,5	780	15	250,9	32	77,5
380	15	284,7	32	187,6	790	15	210,7	32	57,7
390	15	323,7	32	173,8	800	15	184,1	32	49,1
400	15	376,2	32	186,7	810	15	201,6	32	102,9

Anexo 2

Tabla de coordenadas de localización de los SEV'S

SEV	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD
S1	461781	2246424	7
S2	461817	2246411	6
S3	461859	2246395	5,6
S4	461903	2246381	5
S5	461946	2246252	5
S6	461931	2246202	4,8
S7	461916	2246152	5,7
S8	461903	2246105	6
S9	461884	2246057	6,1
S10	462423	2247563	4,8
S11	462459	2247544	4,4
S12	462501	2247520	4
S13	462546	2247502	3,3
S14	462583	2247489	3

Tabla de registros de campo de los SEV'S

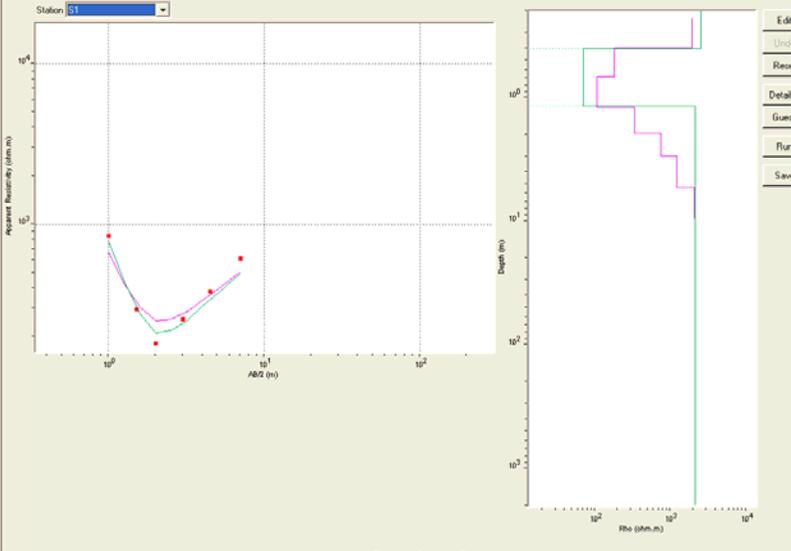
SEV 1		SEV 2		SEV 3		SEV 4	
AB/2	ρ_a [ohm m]						
1	848,3	1	679,4	1	1871,8	1	1403
1,5	294,6	1,5	650,1	1,5	1111,3	1,5	1635
2	181,2	2	570,3	2	291,1	2	1421
3	258,5	3	289,5	3	184,9	3	1477,4
4,5	380,5	4,5	296,8	4,5	46,9	4,5	1319,1
7	615,2	7	580,2	7	297,9	7	1504,5
10	1223,5	15	1460,8	10	2289,2	10	1330,9
15	1567,4	22	673,4	15	1172,9	15	944,7
22	4776	32	286,7	22	595	22	544
32	8158,2	46	275,1	32	389,5	32	372,8
68	16050,9	68	372,6	46	359,2	68	339,1
100	7712,3	100	374,2	68	281,5	100	631,22
				100	360,3		
SEV 5		SEV 6		SEV 7		SEV 8	
AB/2	ρ_a [ohm m]						
1	1122	1	1834	1	872,9	1	1311,1
1,5	846,7	1,5	1945,1	1,5	837,7	1,5	1354,5
2	811,2	2	1815,9	2	878,6	2	1180,2
3	760,1	3	1292,4	3	844,1	3	1160,9
4,5	811	4,5	1237,3	4,5	926,8	4,5	1215,8
7	754,5	7	1039,6	7	645,1	7	1302,1
10	618	10	742,8	10	513,5	10	962,2
15	510,4	15	488,5	15	338,6	15	536,8
22	291,2	22	256,6	22	185,2	22	420,9
32	56,2	32	142,6	32	146,6	32	95,5
46	18,5	46	102,70	46	37,4	68	12,7
68	20,9	68	88,3	100	45,2	100	25
100	59,3	100	96,8				

SEV 9		SEV 10		SEV 11		SEV 12	
AB/2	ρ_a [ohm m]						
1	2135,3	1	213,5	1	372,8	1	830,2
1,5	891,6	1,5	243,3	1,5	344	1,5	721,7
2	715,1	2	181,2	2	251,4	2	657,7
3	753,6	3	145,9	3	145,8	3	648,8
4,5	907,3	4,5	132	4,5	87,6	4,5	452,9
7	869,8	7	111,9	7	86,3	7	289,4
10	548,9	10	80,4	10	77,5	10	202,7
15	461,5	15	36,2	22	47,7	15	35,3
22	372,6	22	23,5	32	44,9	22	18,1
32	248	32	14,5	46	133,6	32	20,7
46	104,9	46	44,8	68	116,4	46	57,5
68	87,4	68	92,6	100	119,2	68	51,5
100	91	100	142,5			100	15,5
SEV 13		SEV 14					
AB/2	ρ_a [ohm m]	AB/2	ρ_a [ohm m]				
1	142,5	1	137,7				
1,5	180,6	1,5	166,5				
2	184,3	2	156,8				
3	188,4	3	105,7				
4,5	183,4	4,5	56,9				
7	142,1	7	39,8				
10	75,9	10	35,7				
15	38,1	15	27,4				
22	35,1	22	17,5				
32	12,2	32	15,3				
46	2,4	68	7,4				
68	13,7	100	3,3				
100	28,9						

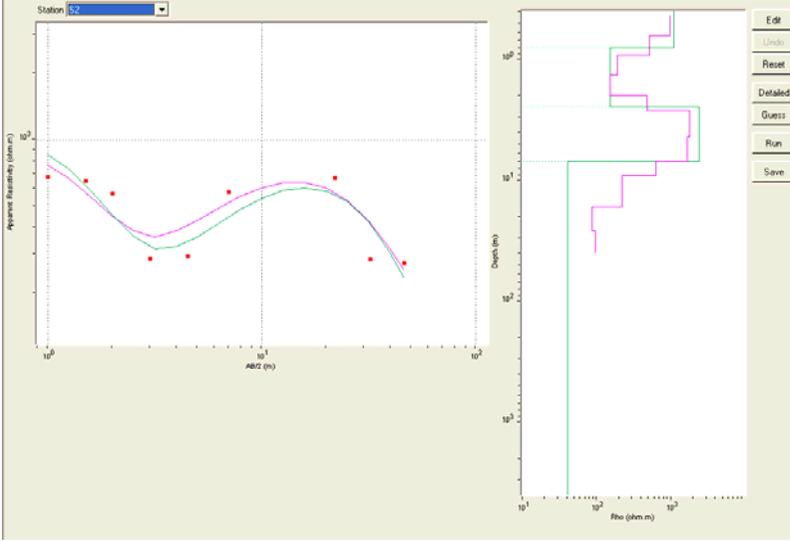
Anexo 3

Esquemas de las inversiones de los SEV's (curvas y modelos 1-D)

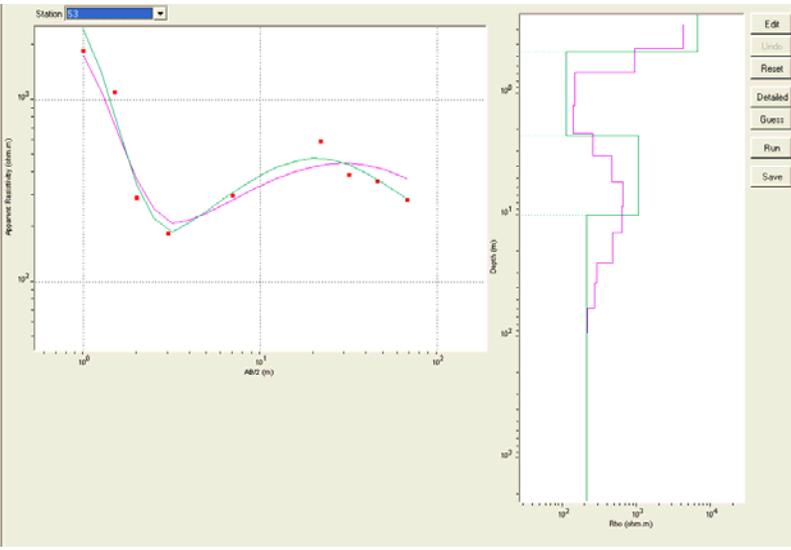
Sondeo 1



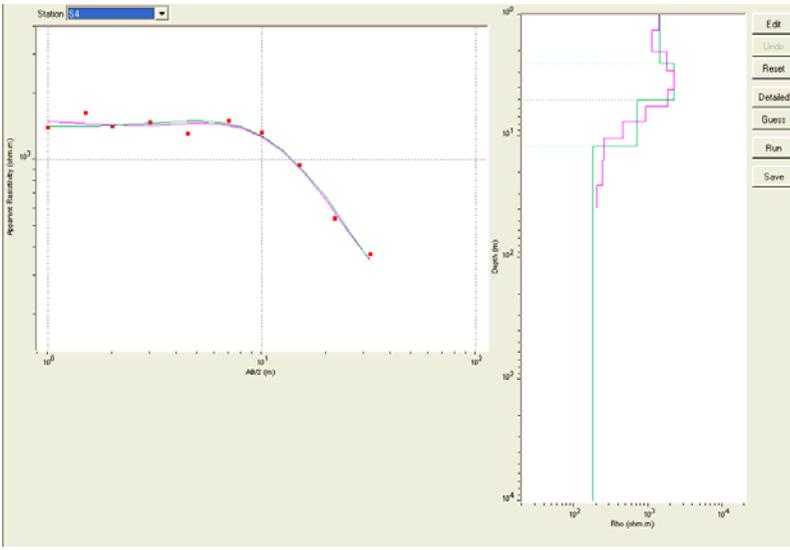
Sondeo 2



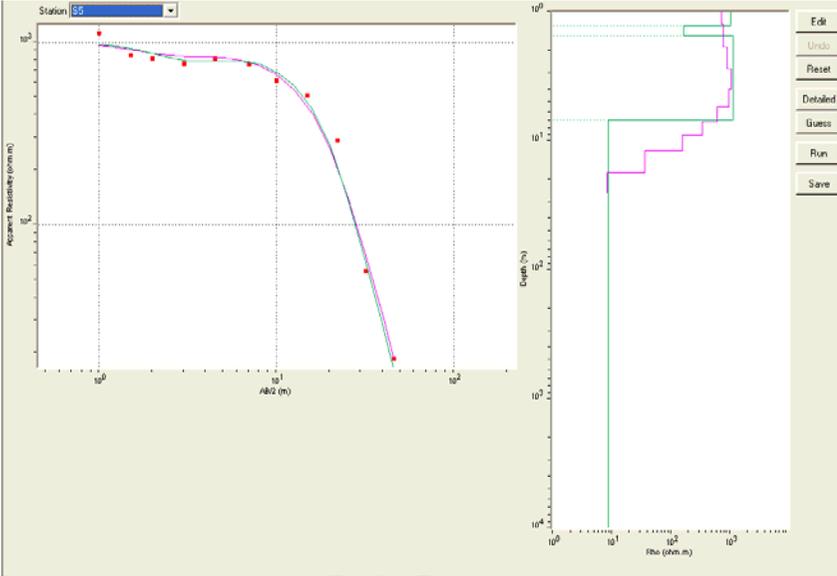
Sondeo 3



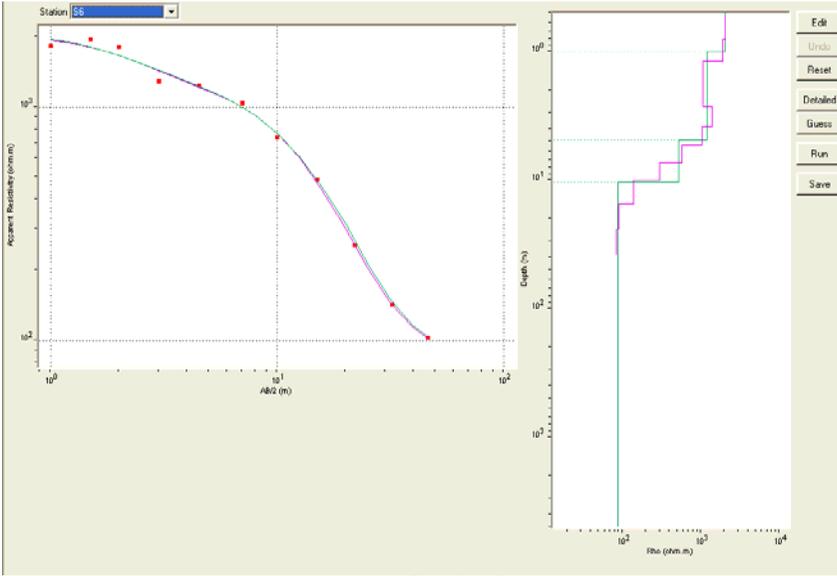
Sondeo 4



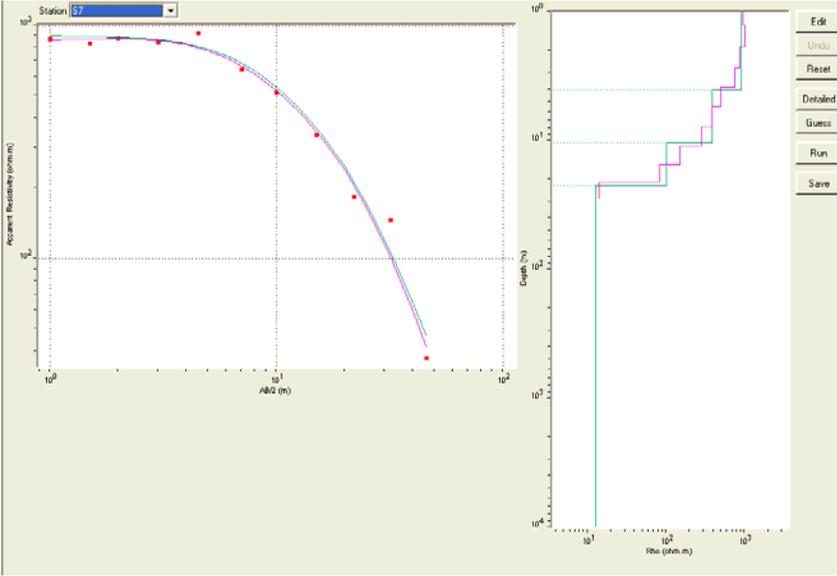
Sondeo 5



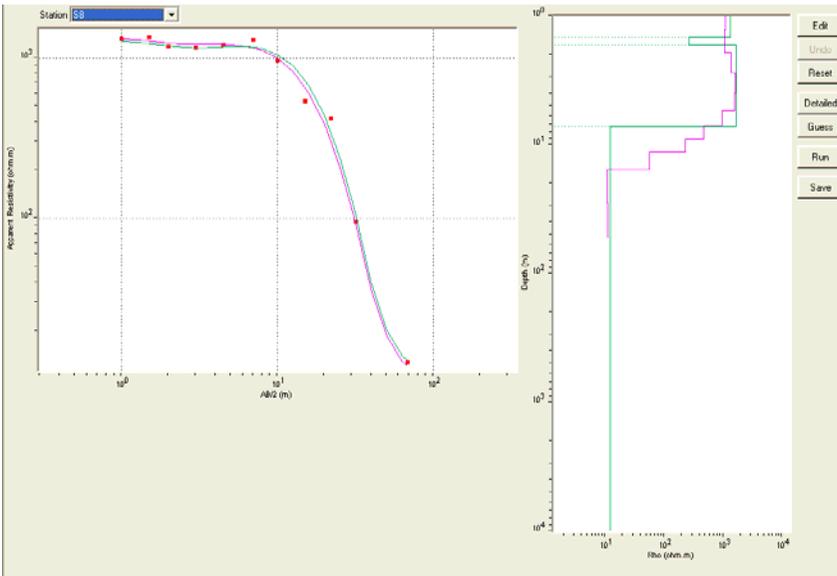
Sondeo 6



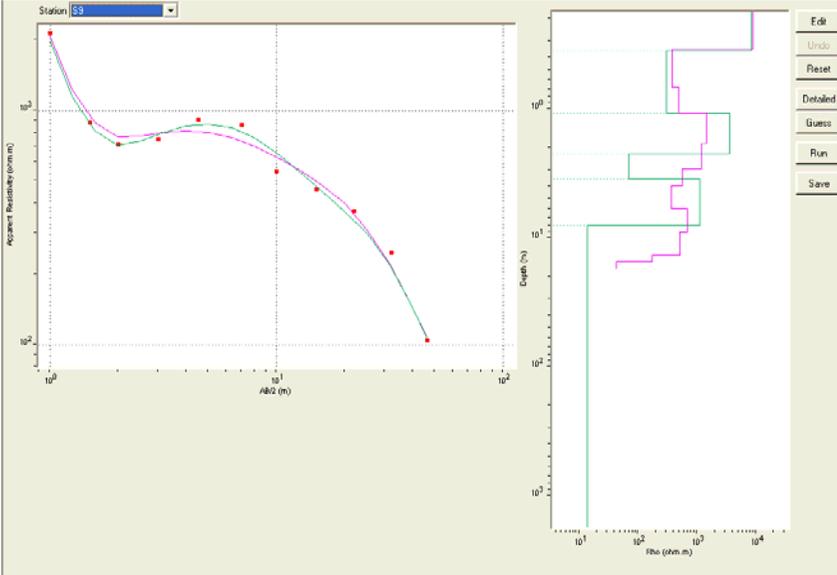
Sondeo 7



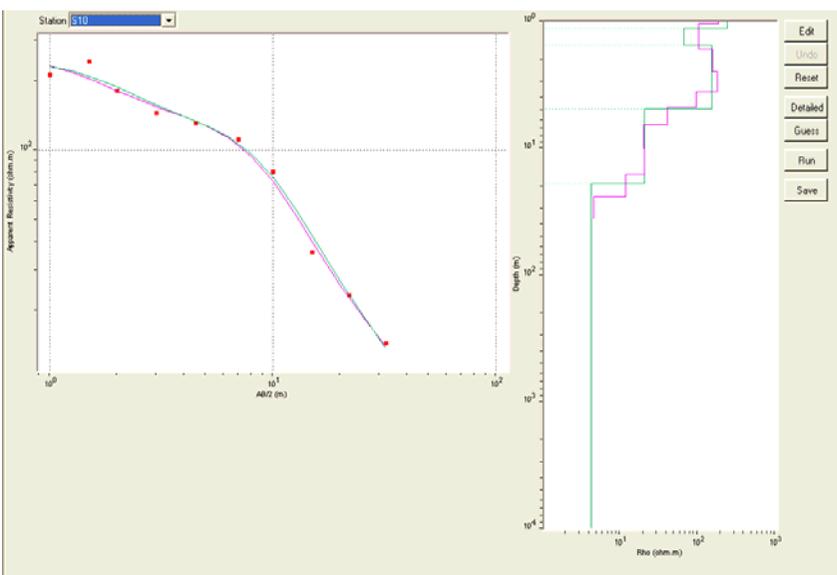
Sondeo 8



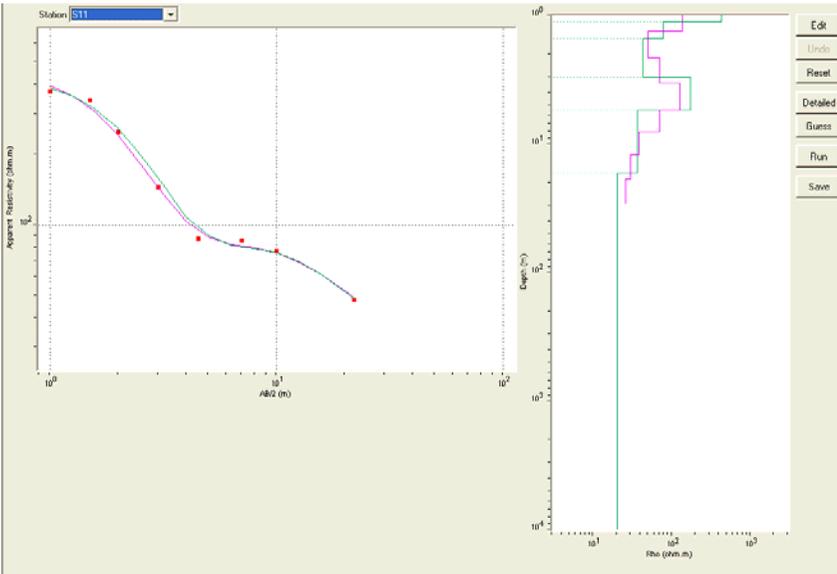
Sondeo 9



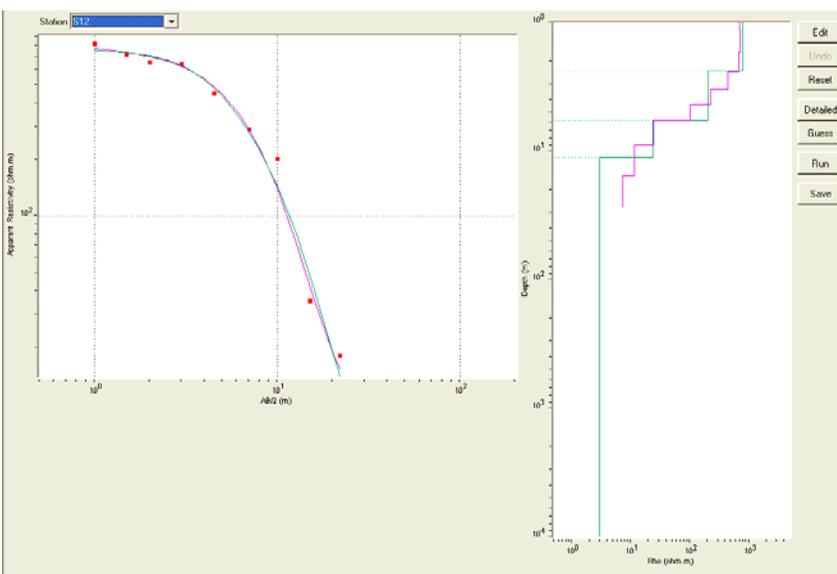
Sondeo 10



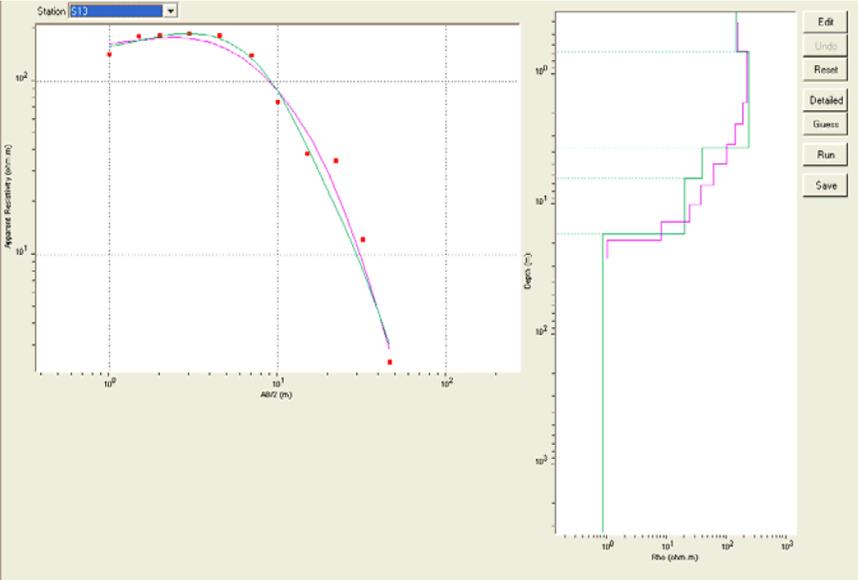
Sondeo 11



Sondeo 12



Sondeo 13



Sondeo 14

