



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

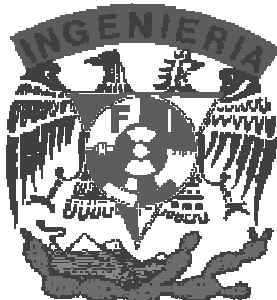
FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERIA EN CIENCIAS DE
LA TIERRA

**“EXPLORACIÓN GEOFÍSICA DEL ACUÍFERO
DE PUERTO MORELOS, QUINTANA ROO”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
I N G E N I E R O G E O F Í S I C O
P R E S E N T A
JANET ISABEL RAVELO CERVANTES



DIRECTOR DE TESIS: DR. OSCAR A. ESCOLERO FUENTES

CIUDAD UNIVERSITARIA, 2006



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
60-I-237

SRITA. JANET ISABEL RAVELO CERVANTES

Presente

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

EXPLORACIÓN GEOFÍSICA DEL ACUÍFERO DE PUERTO MORELOS, QUINTANA ROO

RESUMEN

- I INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**
- II MARCO FÍSICO DEL ÁREA DE ESTUDIO**
- III ANTECEDENTES TEÓRICOS**
- IV METODOLOGÍA**
- V RESULTADOS Y CONCLUSIONES**
- BIBLIOGRAFÍA**

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

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

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cd. Universitaria, D. F., a 15 de marzo de 2006

EL DIRECTOR


M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*JAGC*gtg

A papá y mamá, por enseñarme el valor de la perseverancia, el trabajo y la fé

*A Angeles, las niñas y Gabby, por aceptarme en el club de las niñas grandes y por el apoyo
infinito e incondicional*

*A Nacho y Beny que me quebraron la cabeza con mis primeras cuentas, a Alfonso que me enseñó a
bailar y me prestaba sus plumines y a Luis por las charlas y consejos*

A las señoras, los compadres y los bros, por los buenos tiempos en los que la geofísica nos hizo coincidir

A Adrien por los ratos bajo el sol, las bromas y las llaves...

Al seminario de Aguas Subterráneas por las sugerencias, críticas y consejos

*Al CICY por la beca y al proyecto GROUNDWATER AND NUTRIENT IMPACT ON THE
PUERTO MORELOS REEF, del Consorcio de Centros de Excelencia, capítulo México en el
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM.*

A la UNAM.... por el orgullo de ser PUMA

...la lista no termina, pero hay que comenzar...

...lo único que uno aprende es lo que uno averigua solo...

...la experiencia es lo que se obtiene justo después de que uno la necesita...

*“La ciudad de las bestias”
Isabel Allende*

Índice

Resumen	i
I. Introducción y Objetivos	
Justificación	iii
Objetivos	v
II. Marco Físico del Área de estudio	
Localización	1
Fisiografía	2
Geología	3
Geología Estructural	4
Karst	6
Clima	8
Hidrología local	8
III. Antecedentes teóricos	
Introducción	9
Método Geoeléctrico de Corriente Continua	9
Resistividad Aparente	10
Medio Estratificado	11
Técnica de Sondeo Eléctrico Vertical	11
Especificaciones Técnicas del equipo SYSCAL	13
Método Electromagnético	14
Inducción Electromagnética	14
Profundidad de Penetración	16
Técnica de Transitorio Electromagnético	18
Resistividad Aparente	20
Especificaciones Técnicas del equipo PROTEM	21
Acuíferos Costeros	22
Ley de Ghyben-Herzberg	22
Corrección de Hubert	24
Corrección de Glover	24
IV. Metodología	
Trabajo de campo	26
Punta Caracol I (Coordenadas)	28
Crucero Puerto (Coordenadas)	28
Punta Caracol II (Coordenadas)	29
Ojos de Agua (Coordenadas)	30
Procesamiento	31
SEVs	31
TEMs	31
Inversión Geofísica	33

SEVs	33
TEMs	35
Interpretación Geofísica	37
Modelo Hidrológico	49
Modelo de Glover	51
Conductancia Eléctrica Específica	52
V. Resultados y Conclusiones	
Resultados	54
Conclusiones	55
Bibliografía	59
Disco Compacto.	
Curvas de sondeo de la sección Punta Caracol I	CS-1
Curvas de sondeo de la sección Punta Caracol II	CS-6
Curvas de Sondeo de la sección Crucero-Puerto	CS-40

Resumen

La península de Yucatán es completamente diferente a cualquier otra región del país: ríos subterráneos y una latitud ideal para la existencia de arrecifes la distinguen. Puerto Morelos, Quintana Roo, es un poblado caribeño con un ecosistema transicional que combina mar, un sistema kárstico maduro con manantiales submarinos y la segunda barrera arrecifal más grande del mundo; aquí el agua tiene un importante papel en el constante transporte de materia y energía a través del ecosistema, situación que lo hace sumamente vulnerable, sobre todo a la actividad humana, cuyos efectos se acentúan antes que atenuarse con la distancia.

Este trabajo es parte de un proyecto hidrogeológico mayor en el área que surge de la necesidad del Centro de Estudios del Agua (Cancún) y el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología por conocer los procesos ecológicos que afectan al sistema coralino de Puerto Morelos, para lo cual es primordial conocer la configuración hidrológica y estructural del acuífero. Con esta idea en mente, se usó la técnica de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) y la de sondeos Electromagnéticos en el dominio del Tiempo (TEM) para obtener mediciones de voltaje (dada la relación directa existente entre la resistividad eléctrica y la salinidad), sobre la playa en dirección N-S y sobre la carretera que entra al pueblo en dirección E-W, auxiliares en la definición de la estructura del acuífero. Las siguientes páginas muestran todo el proceso geofísico para construir tres secciones con los datos antes mencionados: dos a lo largo de la playa con cada una de las técnicas mencionadas y finalmente una tercer sección sobre la carretera que entra al pueblo con la técnica de SEV, a partir de las cuales se tendrá una visión de la configuración hidrológica y estructural requerida.

La etapa de procesamiento, realizada con el programa WingLink, fue muy minuciosa, sobre todo en el caso de los TEM cuya respuesta se vio afectada por ruido relacionado con Polarización Inducida (PI). Para la inversión geofísica de los datos se utilizó la modalidad automática de WingLink, misma que dadas las características de las curvas de sondeo de los TEM no fue muy útil, por lo que hubo de

realizarse manualmente. Todos los datos hidrológicos presentados en este trabajo se obtuvieron del documento “Density stratified ground water circulation on the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula, Mexico” (Beddows, 2004), así mismo se comparan algunos resultados de la autora con los obtenidos en este trabajo con resultados poco satisfactorios debido al dinamismo del ecosistema y la distancia a los lugares de medición.

Las anomalías resistivas obtenidas mediante las dos técnicas empleadas, son consistentes con la localización esperada de los manantiales submarinos, aunque la respuesta de los TEM se ve profundamente limitada debido a la alta conductividad del medio. No se logró obtener mapas de resistividad, sin embargo se obtuvo la experiencia para sugerir la técnica de Polarización Inducida combinada con SEV como alternativa y/o complemento a este estudio.

I. Introducción y Objetivos

El paisaje y clima de la Península de Yucatán hacen de ella, en especial del estado de Quintana Roo, un escenario de acelerado desarrollo de la actividad turístico-comercial cuya consecuencia inmediata es el crecimiento poblacional (local y turístico) con su respectiva demanda de agua, lo que hace pensar en escenarios futuros de alto impacto ambiental.

El estado de Quintana Roo es en este sentido, un sistema hidrogeológico altamente complejo en el cual la presencia de sistemas kársticos y zonas costeras generan una serie de sistemas ecológicos en los cuales, antes que atenuarse con la distancia, los diferentes efectos del desarrollo se magnifican debido a la fragilidad tanto estructural como funcional de los subsistemas que componen la región. El agua superficial y subterránea juega uno de los papeles más importantes como vínculo entre los sistemas y como medio de transporte de materia y energía entre los mismos.

Si se analiza que el recurso hídrico es un factor limitante para todo desarrollo socioeconómico, vale la pena reflexionar que el estado de Quintana Roo sólo tiene una fuente de abasto de este recurso: un lente delgado de agua dulce que flota sobre agua salada. El acuífero es libre excepto por una banda paralela a la costa, por lo tanto la zona de recarga es a lo largo y ancho del mismo, característica que lo hace vulnerable y altamente expuesto a la contaminación por descarga de aguas residuales y lixiviación de desechos sólidos.

Asociado al agua, existe el deterioro de otros recursos naturales como los suelos, la vegetación originaria y la diversidad biológica, sin contar los daños que todo lo anterior provoca en el hombre. En este caso, la región conocida como Arrecife de Puerto Morelos (frente a las costas de Puerto Morelos, Quintana Roo), forma parte de la barrera arrecifal denominada “Gran Cinturón de Arrecifes del Atlántico Occidental”, considerada como la segunda barrera arrecifal más grande del mundo. El arrecife sustenta ricas comunidades biológicas que se encuentran bien conservadas y tienen valor ecológico, económico, recreativo, comercial, histórico, educativo, estético y para investigación, lo que confiere al área una importancia singular en el contexto nacional. Por otra

parte, la economía del poblado de Puerto Morelos y su área de influencia, depende de la conservación de su arrecife, ya que un alto porcentaje de la población se dedica a la pesca, al turismo y a la investigación sobre el ambiente marino, actividades donde la salud del ecosistema tiene gran importancia (CONANP).

De aquí que se requiera desarrollar visiones integrales con un alcance basado en la protección de los ecosistemas, el cuidado responsable y el manejo sustentable del recurso agua, para lo cual comprender la estructura del acuífero es la primera tarea a realizar.

Justificación

Con el propósito de investigar los procesos ecológicos que afectan al sistema coralino de Puerto Morelos, el Instituto de Limnología de la UNAM y el Centro de Estudios del Agua (Cancún) se han propuesto estudiar los flujos de agua subterránea y la dispersión de contaminantes en la costa adyacente al arrecife (Rebolledo, 2005). Un objetivo tan amplio como éste debe reposar en el conocimiento de la estructura del acuífero, pues aunque el acuífero no es esencialmente confinado, la distribución y descarga de agua dulce depende de la posición de la zona de mezcla misma que se ve modificada, entre otros factores, por zonas de alta porosidad y conductividad hidráulica. Con esta finalidad se propone realizar un estudio por medio de una técnica combinada de Sondeos Electromagnéticos en el dominio del tiempo (TDEM) y Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) para determinar el modelo geoelectrico de la zona.

Objetivos

La disolución de la caliza es hasta cierto punto aleatoria, depende entre otros factores, de los planos de debilidad de la roca, es por eso que en este trabajo se pretende investigar la localización y tamaño de los huecos así como su conexión, es decir, la heterogeneidad del medio. Dada la constitución geológica de la península de Yucatán, el agua de lluvia es filtrada a través de la roca caliza formando un lente de agua dulce subterráneo que flota sobre agua salada, de tal manera que también se busca ver la configuración de este lente y por consiguiente la profundidad de la interfase salina mediante la comparación de los dos métodos utilizados.

II. Marco Físico del Área de Estudio

Localización



Puerto Morelos es un pequeño centro urbano dentro del municipio Benito Juárez del estado de Quintana Roo en la península de Yucatán, a 21 km de Cancún por la carretera federal número 207, rumbo a Tulum. La comunidad de Puerto Morelos, rodeada de manglares y humedales junto con su arrecife, forman parte del corredor turístico de aproximadamente 120 kilómetros, conocido como “La Riviera Maya”.

Así mismo esta sección de la barrera arrecifal, ubicada frente a Puerto Morelos, se extiende al norte hasta la colindancia con el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, pasando por Punta Cancún y Punta Nizuc. (CONANP)

Figura 1. Vías de comunicación (www.maps-of-mexico.com)

De manera más específica, la zona de estudio está delimitada por las siguientes coordenadas en el sistema UTM datum WGS84:

Este [m]	Norte [m]	Elevación [msnmm]
510000	2310000	0
515000	2305000	0

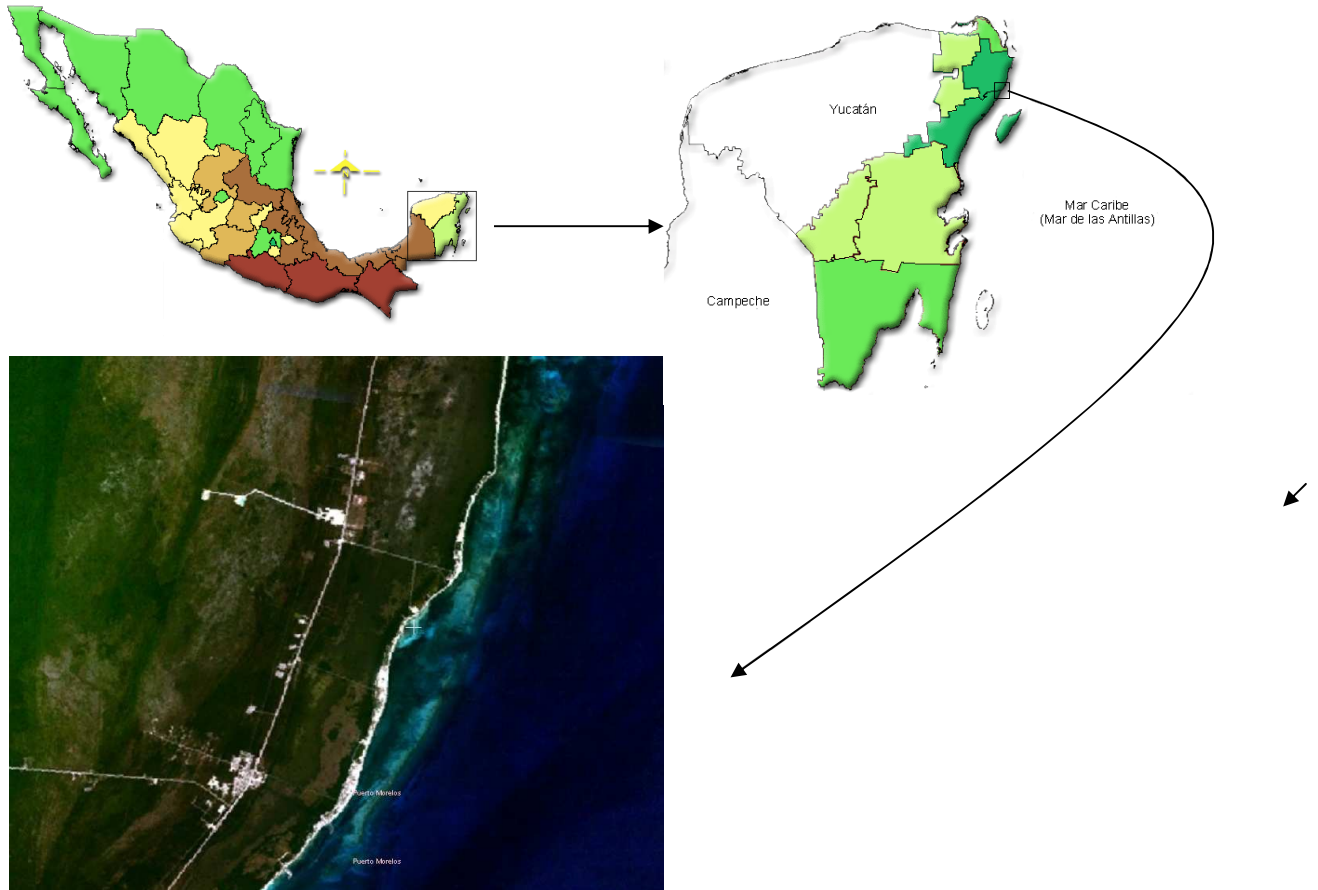


Figura 2. Localización de de Puerto Morelos. Foto aérea ,NASA

Fisiografía

El norte de la Península de Yucatán se extiende de manera casi horizontal con elevaciones no mayores a 40 metros sobre el nivel del mar. Hacia el sur, se eleva gradualmente con algunos pliegues suaves hasta llegar a las primeras montañas significativas en la Sierrita de Ticul, frontera entre la Planicie Yucateca y el área montañosa de Campeche (New Orleans, 1962). De acuerdo con las asociaciones de karst y desarrollo estructural Batllori y Febles (Avance y Perspectiva vol 21), dividen la península en cinco zonas geomorfológicas:

1. región costera,
2. anillo de cenotes,
3. llanuras con dolinas,
4. cuencas escalonadas,
5. cerros y valles.



Figura 3. Zonas fisiográficas

Puerto Morelos se ubica dentro de la zona oriental de la llanura con dolinas en la región costera del Caribe. Esta zona se caracteriza por la presencia de poco relieve, corrientes superficiales embrionarias, escaso y discontinuo desarrollo del suelo, estructuras laterales kársticas de poco crecimiento con abundantes cenotes y dolinas (CNA, 1990). A lo largo de la costa son comunes también las salientes semicirculares llamadas caletas que separan en playas la línea de costa, estas playas se asocian a la disolución de las rocas carbonatadas causada por la descarga del acuífero a través de manantiales (Rebolledo, 2005).

Geología

Estudiar la geología superficial de la Península de Yucatán no resulta sencillo debido a la alteración en caliche de la mayoría de los afloramientos causada por factores externos como la lixiviación y alteración in situ, sin embargo se sabe que el Neógeno aflora en buena parte de la península como una secuencia calcárea y dolomítica con intercalaciones de evaporitas; que yace sobre el Cretácico constituido por anhidritas, calizas, dolomías, intercalaciones de bentonitas y algunas intercalaciones de materiales piroclásticos, ambos prácticamente sin deformación alguna y separados del basamento (una riolita porfírica del Paleozoico -410 ma-) por las Capas Rojas del Triásico-Jurásico: limonitas y areniscas con algunas intercalaciones de arena cuarzosa, grava, bentonita verde y caliza dolomítica (Morán, 1994; López - Ramos, 1979).

Quintana Roo esta formado por rocas sedimentarias (SARH, 1989), que fueron originadas en los periodos del Terciario y Cuaternario, en los últimos 66 millones de años (m.a.). Las rocas más antiguas son calizas dolomitizadas, silicificadas y recristalizadas, de coloración clara y con delgadas intercalaciones de margas y yeso; datan del Paleoceno al Eoceno (66-52 m.a.). Afloran en la porción sur del estado, y tienen espesor hasta de varios cientos de metros. Sobre estas rocas y aflorando en la parte centro occidental de la entidad, se encuentran calizas fosilíferas del Eoceno Medio (52-43 m.a.), cuyo espesor promedio es de 185 m. Una secuencia de rocas que datan del intervalo Mioceno Superior – Plioceno (11-2 m.a.) están expuestas en la región Bacalar - Chetumal; margas yesos y cretas, con espesor total menor a 100 m, constituyen la parte inferior de la secuencia, mientras que la parte superior está constituida por coquinas y calizas que en conjunto tienen espesor de unos 20 m.

Entre el Terciario Superior y el Cuaternario (últimos 23 m.a.), las depresiones fueron rellenadas por sedimentos arcillosos y depósitos evaporíticos variando su espesor entre 10 y 140 m. Las

rocas más jóvenes, depositadas entre el Pleistoceno y el Reciente (menos de 1.5 m.a.) tales como coquinas, calizas, depósitos de litoral – arcillosos en la faja costera-, material residual arcilloso y calichoso -producto de la alteración y de espesor reducido-, afloran en áreas dispersas.

Las rocas presentan una disposición prácticamente horizontal en casi toda la entidad, excepto en las inmediaciones del río Hondo, donde se encuentran plegadas, y en la porción meridional de aquella, donde la continuidad de los estratos es interrumpida por fallas normales que dan al terreno configuración escalonada. Las fallas tienen longitud de varios kilómetros y se manifiestan escarpes con desnivel de 10 a 100 m; algunas de ellas originando fosas, gradualmente convertidas en pantanos, lagos y lagunas, siendo la mayor de ellas la laguna de Bacalar.

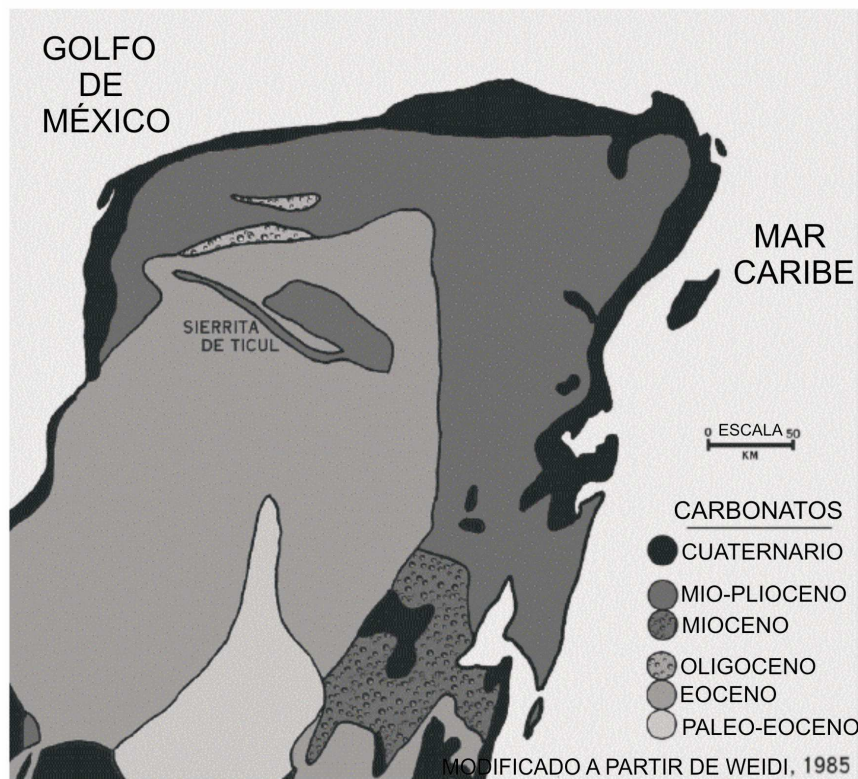


Figura 4. Geología de la región, tomado de Beddows 2004

Geología Estructural

De acuerdo con la New Orleans Geological Society (1962) hay tres zonas principales de fracturas y fallas, que caracterizan estructuralmente la región, estas son: zona de Río Hondo constituida por una serie de fallas normales con orientación preferencial NE-SW, Sierrita de Ticul con orientación NW-SE y fracturas Holbox con tendencia N-S.

Con base en lo anterior y a partir del análisis estructural y las observaciones de campo hechas por la Comisión Nacional del Agua (1990) se pone en evidencia lo siguiente:

- A. Una tendencia estructural NE-SW, que se manifiesta con más del 80% de depresiones tales como dolinas, cenotes y uvalas elongadas alineadas en esta dirección, así mismo llanuras de inundación paralelas a la línea de costa con dimensiones muy variables que pueden llegar a ser de hasta 60 km de longitud.
- B. Otra zona con orientación estructural NW-SE. Este sistema de fracturamiento se presenta en la porción occidental del área, dentro de la formación Carrillo Puerto, alrededor de las poblaciones Nuevo X-Can, Tres Reyes y Punta Laguna, así como también en la zona de Cobá. Las fracturas con paredes cubiertas por bandas de carbonato de calcio y rellenos de caliza y fósiles pueden tener 1 a 20cm de abertura.

La familia principal es la dirección NE-SW, donde ocurre el 77% del total de fracturas con longitudes de hasta 60 km; el 23% restante corresponde a las estructuras con orientación NW-SE con longitudes de hasta 20 km.

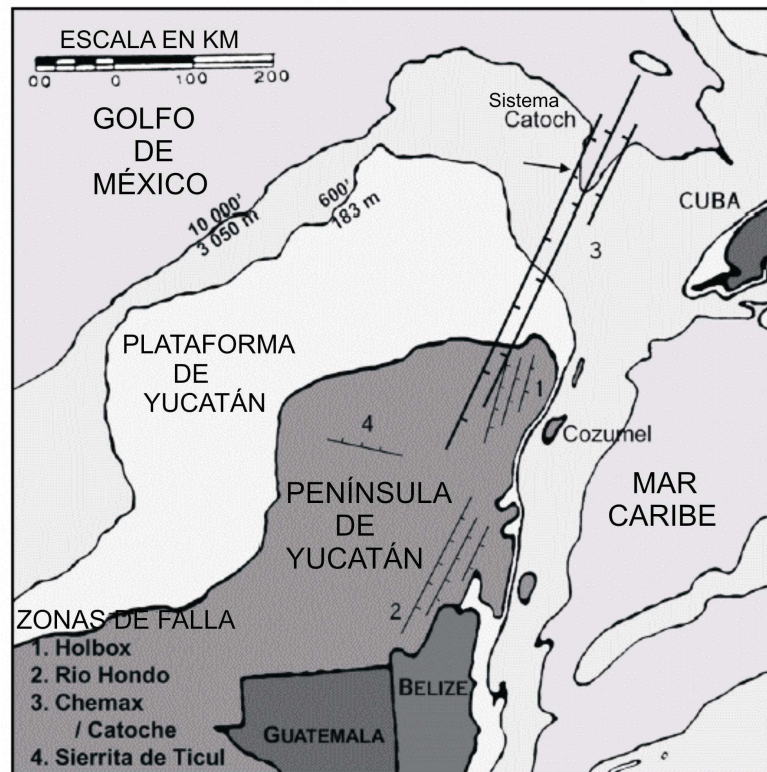


Figura 5. Geología Estructural. (Beddows, 2004)

Karst

El karst es un terreno con una hidrogeología y toposformas distintivas que surgen de la combinación entre la alta solubilidad de las rocas y una porosidad secundaria bien desarrollada. La alta solubilidad de una roca por sí sola no es suficiente para producir karst su estructura también es muy importante: las expresiones kársticas típicas en superficie y bajo ella resultan de la disolución a lo largo de rutas provistas por la estructura (Ford, Williams; 1989). El desarrollo de un acuífero kárstico depende de los procesos químicos y mecánicos que resultan de la relación entre factores geológicos, geomorfológicos, climáticos y biológicos, los cuales a su vez tienen estrecha relación con las propiedades físicas del acuífero tales como la porosidad, conductividad hidráulica y capacidad de almacenamiento.

El ciclo del agua dentro de un medio poroso y con la estructura idónea, es el motor que pone a funcionar el proceso de karstificación. La excavación por disolución en la zona freática o vadosa es el proceso inicial cerca de la superficie que causa el desarrollo de pasajes kársticos (Carrasco et. al.; 2004). La excavación de pasajes se inicia donde la recarga superficial es concentrada en las aberturas preexistentes, como son los planos de estratificación, o las fracturas. Las fracturas se extienden continuamente a lo largo y ancho de la recarga subterránea de agua como es el caso de los cenotes (huecos de disolución profundos y comunicados entre sí con pasajes subterráneos), o en las zonas de descarga como son los manantiales.

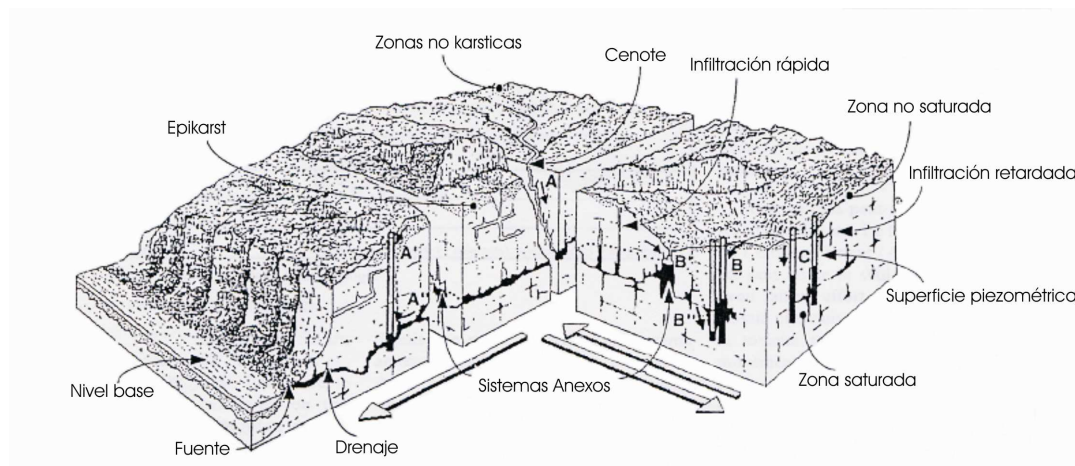


Figura 6. Sistema Kárstico

El agua, factor imprescindible para la formación del karst depende del clima, el cual influye también en el régimen térmico y la distribución del escurrimiento dependiendo del relieve. Las características bioquímicas del agua condicionan el proceso de disolución: éstas aumentan

proporcionalmente la adición de iones no comunes y la existencia de microorganismos. Por otro lado las plantas además de favorecer el clima húmedo y retardar la evaporación, actúan mecánicamente sobre todo tipo de grietas ensanchándolas, facilitando el paso de las precipitaciones además de aportar ácidos de diversas índoles que aceleran la disolución de las rocas. En zonas donde el suelo tiene cierta potencia, la vegetación no actúa manera tan agresiva sobre el sustrato (A. Martínez, C. Martínez; Sian Ka'an N° 5).

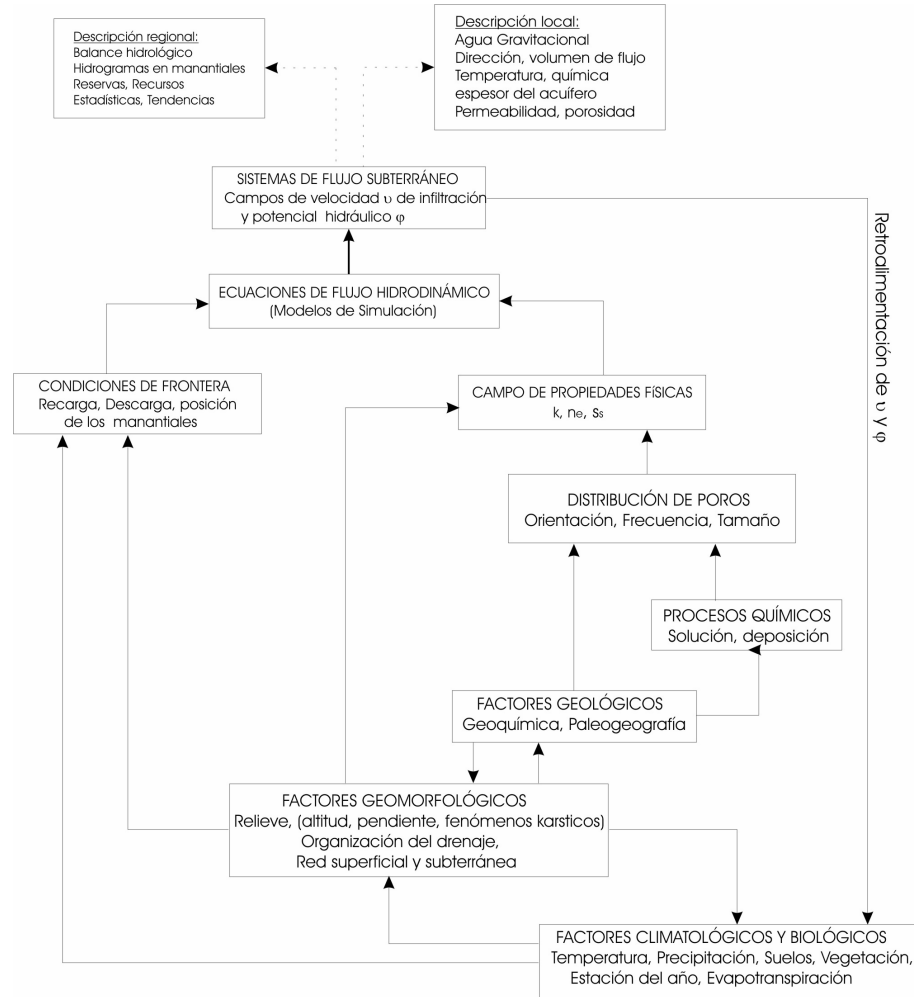


Figura7. Relación esquemática entre los factores que afectan el desarrollo del Karst (Ford y Williams,1989)

Clima

El Municipio Benito Juárez está localizado en el Trópico de Cáncer, por debajo de los 23° de Latitud Norte, en la zona térmica denominada Zona Tropical Norte. Debido a su cercanía al

ecuador donde la incidencia de los rayos solares es mayor, el municipio, cuya altitud es la del nivel del mar, tiene elevada temperatura y baja presión atmosférica, además está situado en la costa oriental del continente, por lo que recibe la influencia de corrientes marinas calientes, principalmente la Corriente del Golfo de México, que propicia un clima cálido y lluvioso.

El clima predominante en el Municipio Benito Juárez es cálido subhúmedo, con lluvias todo el año, aunque más abundantes en verano; la precipitación más abundante tiene lugar en los meses de junio y septiembre mientras que el estiaje abarca los meses de noviembre a abril con temperatura promedio de 25°. Por otra parte, las isoyetas se encuentran cercanas a los 1,500 mm y el cociente precipitación/temperatura es mayor que 55.3, mientras que los valores medios de humedad relativa varían en un rango de 80 a 90% como consecuencia del régimen de lluvias prevaeciente. El escurrimiento medio anual es de 0-20mm mientras que el déficit por evapotranspiración para la zona es de 600 a 700 mm anuales (www.cancun.gob.mx).

Hidrogeología local

Dentro de la zona geomorfológica e hidrogeológica de las cuencas escalonadas existe un acuífero que subyace a todo el estado de Quintana Roo. Está formado por calizas de características variadas y depósitos de litoral con un espesor máximo de 400 metros, que cuando se disuelven dejan prácticamente ningún residuo, lo que ha resultado en sistema kárstico maduro con gran permeabilidad, poco suelo y un sistema bien desarrollado de cavernas y conductos interconectados (Steinich, Marín; 1997). La porosidad y permeabilidad primarias del acuífero dependen de su litología; sus valores son altos en los estratos constituidos por conchas y esqueletos de organismos, así como en lugares donde ha habido bastante disolución de la roca. A escala estatal, se trata de un acuífero libre, heterogéneo, anisotrópico y bastante vulnerable.

Beddows (2003) describe el acuífero costero de Quintana Roo como un acuífero de porosidad triple y comenta que es a través de la matriz, fracturas, y sistema de cavernas interconectadas donde es necesario considerar el flujo del agua subterránea. La orientación de las cavernas de esta zona es NNW-SSE, casi perpendicular a la costa, su formación fue multi-facética cuando el nivel del mar se encontraba más abajo que el actual (Rebolledo, 2005).

III. Antecedentes Teóricos

Introducción

Dependiendo del objetivo, dimensiones y profundidad de estudio, es posible elegir la propiedad física más conveniente a medir y por lo tanto, el método geofísico correspondiente para detectar los contrastes de dicha propiedad en el subsuelo.

Existe una relación directa entre la salinidad y la conductividad eléctrica del agua, por ende el método geofísico más adecuado será el que pueda medir esta última en un acuífero costero, donde la mezcla de agua dulce y agua salada es común y somera por tratarse de un acuífero kárstico. Los métodos más adecuados para problemas como éste son los Geoelectrónicos de los cuales, el método con mayor tradición en hidrogeología es el de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), sin embargo los métodos Electromagnéticos han cobrado gran importancia en los últimos años, pues tienen la gran ventaja de poder aplicarse exitosamente en superficies con alta resistividad eléctrica. El presente trabajo usa ambas técnicas geoelectrónicas de exploración.

La variable índice que expresa los resultados de las mediciones de los Métodos Eléctricos y Electromagnéticos y la que se toma como base en la interpretación es la *resistividad aparente* (Q_a). Este índice ayuda a normalizar los datos y facilita la comparación entre mediciones hechas en diferentes áreas y en condiciones similares. El objetivo de las siguientes páginas es explicar la forma en la que se llega a esta normalización en cada una de las técnicas y así mismo la teoría que las sustenta. Finalmente se hablara un poco del concepto hidráulico de un acuífero costero con la idea de que una modelación de esta naturaleza respalde los resultados geofísicos obtenidos.

Método Geoeléctrico de Corriente Continua

A partir de las Ecuaciones de Maxwell (Orellana, 1972) se sabe que

$$\begin{aligned}\nabla \times E(r) &= -\frac{\partial B(r)}{\partial t} \\ \nabla \times H(r) &= J(r) + \frac{\partial D(r)}{\partial t}\end{aligned}\quad (1)$$

Como las corrientes son continuas se trabaja con campos estacionarios, por lo que las derivadas temporales quedan anuladas

$$\nabla \times E(r) = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times H(r) = J \quad (3)$$

Si de acuerdo con la ecuación (2) el campo eléctrico es estacionario, según el Teorema de Hemholtz, el Campo Eléctrico proviene del gradiente de un potencial

$$E(r) = -\nabla U(r) \quad (4)$$

y si se considera una fuente puntual, por ejemplo un electrodo de corriente, las ecuaciones que rigen el Campo Eléctrico son

$$\nabla \times E(r) = 0 \quad (5)$$

$$\nabla \cdot J(r) = I\delta(r) \quad (6)$$

al sustituir la ecuación (4) en la (6) encontramos que el potencial para la fuente puntual será

$$\nabla^2 U(r) = -I\rho\delta(r) \quad (7)$$

y para la región donde no hay fuente,

$$\nabla^2 U(r) = 0$$

$$\nabla \cdot E(r) = 0 \quad (8)$$

El potencial producido por la fuente puntual en un medio homogéneo dependerá de la distancia de ésta al punto de interés, para medirlo y de esa manera calcular la resistividad a través de la Ley de Ohm, es necesario contar con un *dispositivo* conocido como *eléctrico* o *electródico* que puede ser tan sencillo como dos electrodos: uno de corriente y otro para medir el potencial. Entonces, de la Ley de Ohm

$$\rho = 2\pi R \frac{U(r)}{I} \quad (9)$$

donde $U(r)$ es el potencial en el punto de interés y $2\pi R$ representa la distancia radial desde el punto

de medición a la fuente es decir, el *factor geométrico* que asocia la posición de los electrodos. Es posible definir diferentes tipos dispositivos con más de dos electrodos, por lo que de manera general el factor geométrico se suele escribir como:

$$\rho = k \frac{\Delta U}{I} \quad \text{donde} \quad k = 2\pi R$$

$$\rho = \text{resistividad verdadera del medio homogéneo} \quad (10)$$

• Resistividad aparente

Si ahora en vez de tener un espacio homogéneo como el antes planteado tenemos uno heterogéneo, al obtener las medidas de ΔU y de I , los valores de resistividad serán ficticios y dependerán de los valores de resistividad que conforman el medio heterogéneo y de las dimensiones del dispositivo eléctrico. La forma en la que contribuye cada medio de diferente resistividad y espesor es muy variable, en todo caso, aun cuando esta resistividad se calcula con la ecuación (10), es una resistividad ficticia que se denomina como *resistividad aparente*, definida como:

$$\rho_a = k \frac{\Delta U}{I} \quad (11)$$

• Medio estratificado

El más conocido de los métodos Geolétricos es el SEV. Es un método de corriente continua aplicado en la investigación de la distribución de resistividad respecto a la profundidad. Los primeros investigadores encontraron que el modelo básico para tratar un SEV es el medio estratificado que consiste en n capas o estratos homogéneos e isótropos que se superponen, por lo que cada uno de ellos cumplirá con la ecuación de Laplace - ecuación (8) -. También se observó que la única excepción para este modelo se encuentra en la primera capa, donde al tener fuentes, éstas contribuirán con una solución particular en la solución general de dicha ecuación.

El rumano Sabba Stefanescu (Orellana, 1972) demuestra que el potencial en la superficie ($z=0$), producido por una fuente puntual sobre un medio estratificado puede ser expresado como:

$$U = \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda) d\lambda \quad (12)$$

donde $k(\lambda)$ es la función que se define por los espesores y resistividades de las capas de un medio estratificado particular y es llamada función Kernel o característica que puede ser obtenida por la función de recurrencia de Pekeris (Koefoed, 1979) que es:

$$k_1 = \frac{k_{i+1} + p_i \tanh(\lambda E_i)}{p_i + k_{i+1} \tanh(\lambda E_i)} \quad (13)$$

donde $p_i = \rho_i / \rho_{i+1}$

así, se encontró que al aplicar la ecuación (7) para cada una de las fuentes (principio de superposición), se puede obtener un ΔU de los electrodos M y N de potencial y con la ecuación (11) se definirá una curva de resistividad aparente para el dispositivo empleado.

• Técnica de Sondeo Eléctrico Vertical

Para llevarlo a cabo se utilizan dos contactos galvánicos o electrodos como transmisores de corriente a través del subsuelo para después medir la diferencia de potencial establecida por esta corriente entre un segundo par de electrodos (electrodos de potencial) alineados con el primero (Keller, 1966), así podemos averiguar la distribución vertical de la resistividad bajo el *punto de atribución* o punto de sondeo eléctrico.

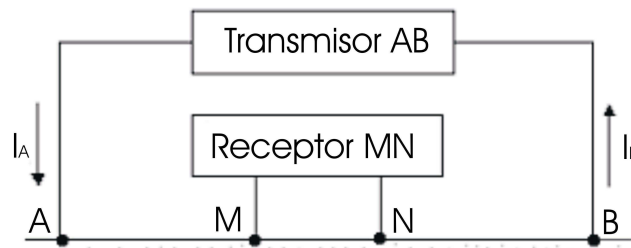


Figura 8. Posiciones de electrodos de corriente y potencial durante un SEV

Para cada abertura de AB, empezando por una pequeña y aumentándola paulatinamente a lo largo de la línea, se obtienen los valores de diferencia de potencial, corriente y factor geométrico donde el valor de este último dependerá de la separación de los electrodos de potencial y arreglo de electrodos elegido, por lo tanto para cada una de las aberturas habrá un valor de resistividad aparente calculado por medio de la ecuación (11). Estos valores son dibujados en una gráfica bilogarítmica llamada *curva*

de campo donde los ejes x & y representan la mitad de la separación entre los electrodos de corriente ($AB/2$) y la resistividad aparente (ρ_a) respectivamente.

Cuando el valor de voltaje medido entre los electrodos de potencial cae a valores muy bajos (debido a la disminución progresiva del potencial con el aumento de la separación entre electrodos), los electrodos de potencial son separados un poco más en una operación conocida como *empalme*. Las mediciones continúan hasta que sea necesario abrir de nuevo los electrodos de potencial o hasta alcanzar la “profundidad deseada”. Las mediciones fueron realizadas con un equipo SYSCAL de Iris, sus características son descritas a continuación.

Especificaciones técnicas del equipo

- ✓ Mide densidad de corriente, voltaje, potencial espontáneo. Apila automáticamente y despliega el número de registros apilados.
- ✓ Calcula el factor geométrico k tomando en cuenta que $a=AB/2$ y $b=MN$, de donde $k=\pi a^2/b$, para calcular después la Resistividad aparente.
- ✓ La corriente se inyecta en forma de una sucesión de pulsos de positivos y negativos. La resolución de la corriente es: $10\mu A$, con una exactitud típica de 0.3% en todo el rango de temperatura operable.

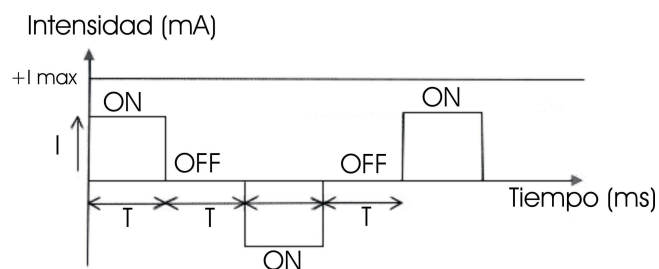


Figura 9. Forma de corriente de entrada SYSCAL

Receptor

- ✓ Impedancia de entrada: 100Mohm.
- ✓ Rango de entrada de voltaje: -5V a +5V
- ✓ Filtro de rechazo de 50Hz y 60Hz
- ✓ Resolución del voltaje: $10\mu V$ durante la medición, $1\mu V$ después del apilado

Transmisor

- ✓ Voltaje máximo de salida: 400V
- ✓ Corriente máxima de salida: 1200mA
- ✓ Máxima potencia de salida: 100W



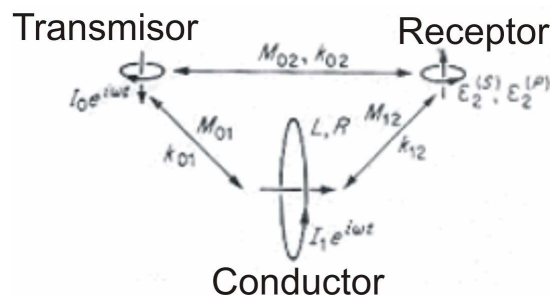
Figura 10. SYSCAL

Método Electromagnético

En esta técnica geofísica, la corriente eléctrica no es conducida de manera directa a través de contactos galvánicos, sino completamente inducida en el subsuelo por un dipolo magnético.

• Inducción Electromagnética

La forma más sencilla e ilustrativa de explicarla es por medio de la teoría de circuitos usada por Grant & West (1965). La propuesta es usar tres bobinas, una receptora una transmisora y una que represente el medio conductor o subsuelo. El circuito de inducción propuesto es el siguiente:



Si se hace pasar una corriente $I_0 e^{i\omega t}$ por la bobina transmisora ésta genera un campo magnético alterno en el ambiente circundante, lo que induce a su vez una fem en la bobina receptora y en el subsuelo. Estas fems están gobernadas por la ley de Faraday como sigue

$$\varepsilon_j = -M_{ij} \frac{dI_i}{dt} \quad (14)$$

donde ε_j es la fem inducida en un circuito por una corriente I_i fluyendo en otro circuito si M_{ij} es su inductancia mutua*. De tal manera que

$$\begin{aligned}\varepsilon_2^{(P)} &= -M_{02} \frac{d}{dt} I_0 e^{i\alpha t} = -i\omega M_{02} I_0 e^{i\alpha t} \\ \varepsilon_1 &= -i\omega M_{01} I_0 e^{i\alpha t}\end{aligned}\quad (15)$$

son las fems inducidas por la bobina transmisora en la bobina receptora y el subsuelo, respectivamente. Cuando las corrientes parásitas ($I_1 e^{i\omega t}$) empiezan a fluir en el subsuelo, se genera una fem que se representará como la suma de la caída de voltaje por la resistencia del circuito y la fem de retorno generada por la auto-inductancia

$$\varepsilon_1^* = -R I_1 e^{i\alpha t} - L \frac{d}{dt} I_1 e^{i\alpha t} = -(R + i\omega L) I_1 e^{i\alpha t}$$

Para obtener la corriente I_1 , es decir la corriente parásita inducida en el subsuelo se toma en cuenta que alrededor de todo circuito cerrado la fem total debe desaparecer, entonces

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 + \varepsilon_1^* &= 0 \quad \text{de forma que} \\ I_1 e^{i\alpha t} &= -\frac{i\omega M_{01}}{R + i\omega L} I_0 e^{i\alpha t} = -\frac{M_{01}}{L} \left[\frac{i\omega L(R - i\omega L)}{R^2 + \omega^2 L^2} \right] I_0 e^{i\alpha t}\end{aligned}\quad (16)$$

Pero como lo que realmente interesa es el campo magnético secundario que estas corrientes producen, y particularmente la fem inducida en la bobina receptora, entonces

$$\varepsilon_2^{(S)} = -i\omega M_{12} I_1 e^{i\alpha t}\quad (17)$$

donde M_{12} es la inductancia mutua entre el subsuelo y el receptor. En la mayoría de los casos los equipos miden este voltaje anómalo comparándolo con la fem inducida por el campo primario en ausencia del circuito representativo del subsuelo, es decir, mide $\varepsilon_2^{(S)} / \varepsilon_2^{(P)}$. Así, la respuesta del sistema de prospección al subsuelo está dado por

$$\frac{\varepsilon_2^{(S)}}{\varepsilon_2^{(P)}} = \frac{-i\omega M_{12} I_1 e^{i\alpha t}}{-i\omega M_{02} I_0 e^{i\alpha t}} = -\frac{M_{01} M_{12}}{M_{02} L} \left[\frac{i(\omega L / R)(1 - i\omega L / R)}{1 + (\omega L / R)^2} \right] = -\frac{M_{01} M_{12}}{M_{02} L} \left(\frac{\alpha^2 + i\alpha}{1 + \alpha^2} \right)\quad (18)$$

$$\text{donde } \alpha = \frac{\omega L}{R}$$

una parte de la respuesta es $-M_{01} M_{12} / M_{02} L$ la cual sólo depende de los tamaños relativos y posiciones de los tres circuitos, la otra parte de la ecuación es una cantidad adimensional que depende sólo de la frecuencia del campo y las propiedades del subsuelo. A la primera cantidad se le

da el nombre de *coeficiente de acoplamiento* que escrito en términos de la auto-inductancia es

$$M_{ij} = k_{ij} \sqrt{L_i L_j} \quad |k| \leq 1 \quad \text{de donde}$$

$$-\frac{M_{01} M_{12}}{M_{02} L} = -\frac{k_{01} k_{12}}{k_{02}} \quad (19)$$

de acuerdo a ésto, el coeficiente de acoplamiento mide la cantidad de flujo que acopla al receptor con el transmisor a través del subsuelo en relación con el que acopla al transmisor con el receptor directamente. Su valor cambia con la posición del sistema, pero no con las propiedades eléctricas del subsuelo o con la frecuencia de la corriente alterna.

A la función compleja $f(\alpha) = (\alpha^2 + i\alpha)/(1 + \alpha^2)$ se le da el nombre de *función de respuesta* y a la variable adimensional α el de *parámetro de respuesta*. Esta parte de la respuesta tiene que ver estrictamente con las propiedades eléctricas del subsuelo y con la frecuencia de la corriente alterna. De hecho debe ser ahora notorio que sólo la posición y tamaño del loop afectará al coeficiente de acoplamiento, mientras que sólo la resistencia y tamaño del conductor o características del subsuelo afectarán la función de respuesta.

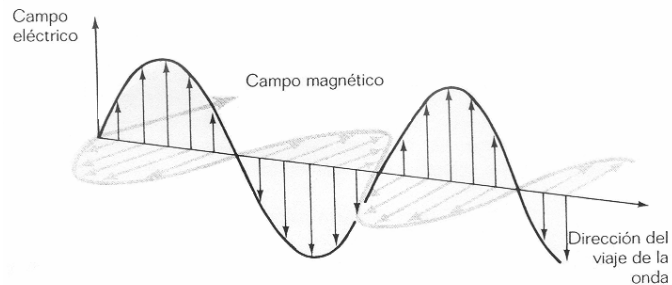
El límite inductivo para un circuito corresponde de hecho, al caso de un medio con conductividad perfecta. En la esquematización simple usada, este caso corresponde al de flujos primarios y secundarios totales cortando al circuito con igual magnitud pero en sentido opuesto.

• Profundidad de Penetración

Si asumimos que el campo EM se mueve en la dirección z (verticalmente hacia abajo) a través de un semiespacio de conductividad σ con un campo eléctrico cuya única componente es en la dirección x y un campo magnético sólo en la componente y , y la amplitud de ambos variando sinusoidalmente en dirección z entonces según la teoría de campo \mathbf{E} y \mathbf{H} pueden representarse de la forma siguiente

$$E_x = E_0 e^{-i(\alpha+i\beta)z}$$

$$H_y = H_0 e^{i(\alpha+i\beta)z}$$



donde E_0, H_0 son las amplitudes de los vectores de campo en un punto de referencia en la superficie, α [rad/m] es el factor de fase y β [db/m], es el factor de atenuación de onda

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{\mu\epsilon}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2} \right)^{1/2} + 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (21)$$

$$\beta = \omega \left\{ \frac{\mu\epsilon}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2}$$

Es usual en la prospección EM que $\sigma^2 / \epsilon^2 \omega^2 \gg 1$ por lo tanto, las expresiones para α y β se simplifican a

$$\alpha = \beta = \sqrt{(\omega\mu\sigma / 2)} \quad (22)$$

El factor de atenuación β , se relaciona con la profundidad en la cual la amplitud de los campos se reduce a $1/e = (\pm 37\%)$ de su valor en superficie, a esta profundidad δ se le conoce como *skin depth*, y se refiere a la profundidad de penetración de una onda electromagnética

$$\delta = 1/\beta = (2/\mu_0\rho\omega)^{1/2} = 504(\rho/f)^{1/2} \quad (23)$$

f es la frecuencia de la onda EM en Hz, y $\mu \cong \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ para un medio no magnético.

Sin embargo, para que el campo EM se establezca en toda el área de interés, el vector de campo \mathbf{H} con su respectiva derivada, deberá ser continuo en cada interfase, pero donde existan discontinuidades en σ ó μ también existirán discontinuidades en \mathbf{H} . Con ayuda de las Ecuaciones de Maxwell, observaremos lo que sucede en la interfase entre dos medios con características electromagnéticas distintas como la mostrada en la figura siguiente (Grant & West, 1965)

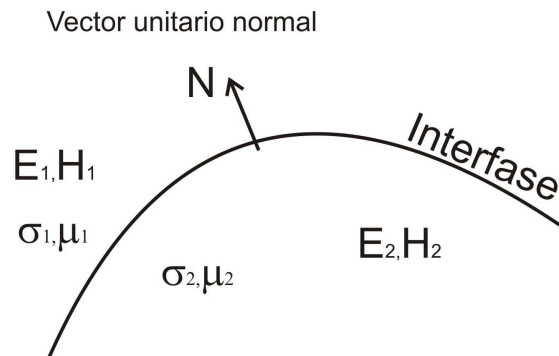


Figura 11. Frontera entre dos medios con propiedades electromagnéticas distintas.

$$\text{de } \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \text{ se deduce } N \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = 0, \quad (24)$$

lo que significa que el campo magnético tangencial a la interfase es continuo, pero si σ_1 ó σ_2 son infinitas, puede fluir una corriente a una distancia infinitesimal de la interfase. Si denotamos la densidad de esa corriente superficial con el símbolo de K [amp/m], se obtiene

$$N \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = \mathbf{K} \quad (25)$$

además, de $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ se obtiene que

$$N \cdot (\mu_1 \mathbf{H}_1 - \mu_2 \mathbf{H}_2) = 0 \quad (26)$$

por lo tanto cuando $\sigma \omega \rightarrow \infty$ en una región, \mathbf{H} (y también \mathbf{E}) desaparecen, de tal manera que las condiciones de frontera para \mathbf{H} se reducen a

$$N \cdot \mathbf{H}_1 = 0 \quad \text{y} \quad N \times \mathbf{H}_1 = \mathbf{K} \quad \text{cuando } \sigma \omega \rightarrow \infty \quad (27)$$

De aquí que dicha corriente superficial impida la continuidad del campo magnético en un medio perfectamente conductor, lo que en términos del skin depth queda demostrado al tomar la condición de $\rho \rightarrow 0$ para cualquier frecuencia de la forma siguiente

$$\delta = 504(\rho / f)^{1/2} = 504(0 / f)^{1/2} = 0 \quad (28)$$

• Técnica de Transitorio Electromagnético

La inducción EM es la base para la técnica de sondeos electromagnéticos en tiempo (TEM) que se realizaron con un receptor y un transmisor unidos a una bobina receptora y a un loop transmisor cuadrado, respectivamente y comunicados entre si mediante un cable de referencia. Al comenzar el sondeo, el loop transmisor es energizado con una corriente que después de algunos segundos se apaga rápidamente causando cambios abruptos en el campo magnético primario, lo que de acuerdo con la ley de Faraday induce corrientes parásitas, que concentradas en la superficie tienden a mantener el campo primario.

En la llamada etapa temprana, el voltaje inducido es invariante en el tiempo y proporcional a la resistividad más cercana a la superficie. Conforme el tiempo transcurre, comienza el decaimiento aproximadamente exponencial de las corrientes, el voltaje se vuelve proporcional a $t^{-5/2}$ y a $\rho^{-3/2}$ donde ρ es la resistividad de la capa más profunda; esto se llama la etapa tardía (Fitterman, 1986).

La localización de la máxima amplitud de las corrientes inducidas se distribuye hacia abajo y hacia fuera con el tiempo, como una serie de anillos de humo, dando así información acerca de regiones más profundas conforme el tiempo aumenta.

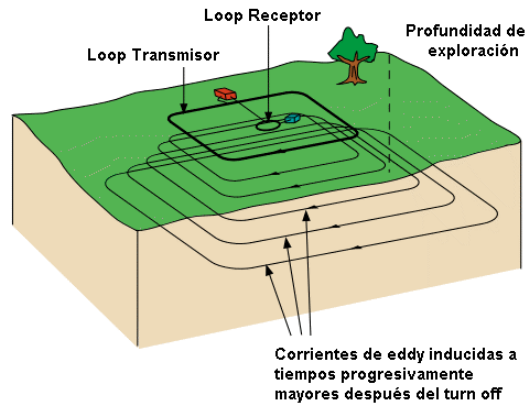
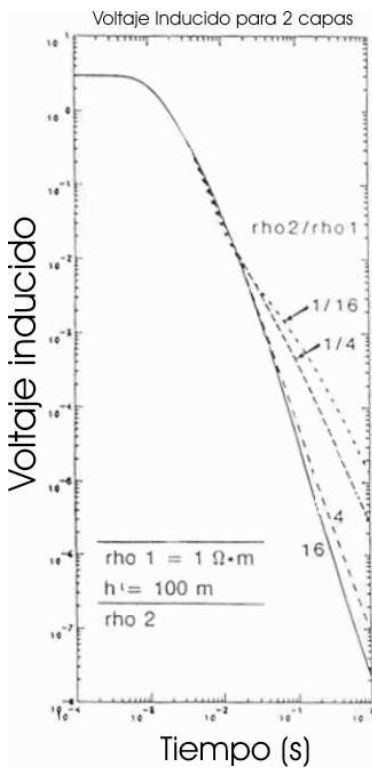


Figura 12. Corrientes inducidas en el subsuelo.



El registro, llamado *transitorio*, obtenido por el receptor mientras el transmisor está apagado, se puede ver en la figura de la izquierda. Se trata de un voltaje inducido en la bobina receptora durante un periodo muy corto de tiempo correspondiente al proceso de formación del campo electromagnético hasta que éste alcanza el estado estacionario o de corriente continua, por lo que este tipo de sondeos también son llamados *sondeos de formación de campo* o *sondeos de establecimiento de campo* (Orellana, 1982). Concretamente es el producto del momento M_R de la bobina receptora (área veces el número de vueltas), multiplicado por la derivada temporal del flujo magnético.

En la práctica, la corriente consiste en periodos iguales de tiempo de encendido y apagado (*turn on y turn off time*) con frecuencias base en el rango de 3 a 75 Hz. El flujo de corriente no se detiene instantáneamente, ocurre en un periodo muy breve conocido como la *rampa de tiempo* durante la cual el campo magnético es variable en el tiempo, posterior a ésta llega el tiempo de medición, el *time off*. La ilustración de estos conceptos está

en la Figura 13, la cual muestra arriba la función de entrada para el transmisor y abajo la función respuesta del receptor (Manual PROTEM 47, 2006).

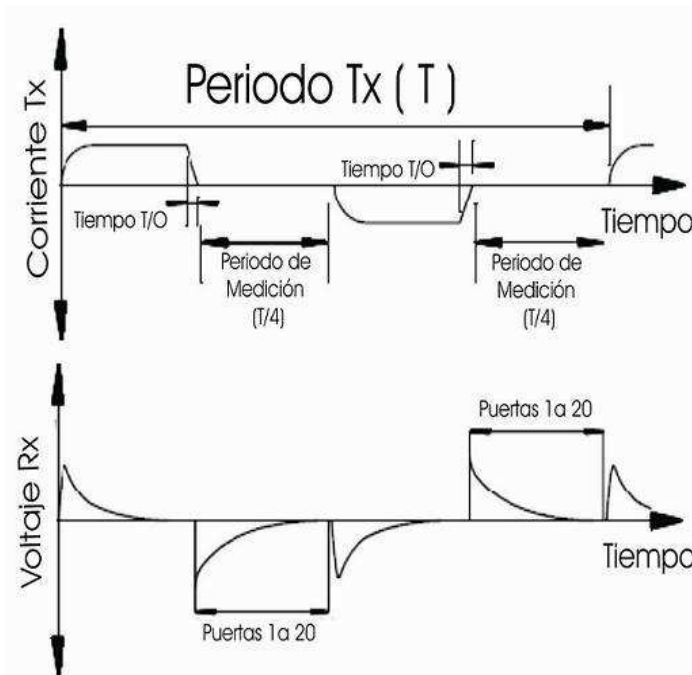


Figura 13. Tiempos de medición e inyección de corriente del PROTEM

• Resistividad Aparente

El transitorio no es directamente representativo de las características eléctricas del subsuelo, por esa razón las curvas de voltaje se convierten a curvas de resistividad aparente, esto se hace comparando el voltaje observado con el voltaje que sería medido en un semiespacio de resistividad constante

$$\frac{\rho_a}{\rho_t} = \left| \frac{V_{semi}(\rho_t, t)}{V_{obs}(t)} \right|^\lambda \quad (29)$$

donde λ es un número real, V_{obs} es el voltaje observado en el tiempo t , y V_{semi} es el voltaje que sería observado en un semiespacio de resistividad uniforme ρ_t en el tiempo t . Lo anterior sólo es posible si conocemos el valor de ρ_t para calcular V_{semi} . Este problema se soluciona asumiendo que el campo V_{semi} sigue el comportamiento de la etapa tardía y eligiendo $\lambda = 2/3$, de tal manera que:

$$\rho_a = \frac{\mu}{4\pi} \left| \frac{2\pi\mu r^2 M_r I}{5tV} \right| \quad (30)$$

donde μ es la permeabilidad magnética, r es el radio del loop transmisor, M_r es el momento magnético de la bobina transmisora, I es la corriente transmitida, t es el tiempo después del turnoff y V es el voltaje inducido en la bobina receptora. Las mediciones fueron realizadas con un equipo PROTEM de Geonics descrito a continuación.

Especificaciones técnicas del equipo

Los Transitorios Electromagnéticos fueron realizados con un equipo PROTEM 47 de Geonics, mismo que cuenta con las siguientes características:

Receptor

- ✓ Cantidad Medida: decaimiento del campo magnético inducido en el la componente z nV/m^2 .
- ✓ Sensor: bobina con núcleo de aire.
- ✓ Canales: Un canal para una componente.
- ✓ Puertas de tiempo: 20 ó 30 puertas que cubren dos o tres décadas de tiempo respectivamente.
- ✓ Rango dinámico: 23 bits (132 dB).
- ✓ Frecuencia base: 0.3, 0.75, 3, 7.5, 30, 75 y 285 Hz
- ✓ Tiempo de integración: 0.5, 2.4, 8, 15, 30, 60, ó 120 s
- ✓ Sincronización: Cable de referencia.



Figura 14. Receptor PROTEM



Figura 15. Transmisor PROTEM 47

Transmisor

- ✓ Forma de la corriente: bipolar rectangular.
- ✓ Frecuencia base: 30, 75 ó 285 donde la frecuencia de las líneas de poder es de 60 Hz.
- ✓ Tiempo de apagado: 2.5 μs a 3 A en un loop de 40 x 40 m, menor tiempo en un loop más pequeño.
- ✓ Loop Transmisor: espiras de 5 x 5 hasta 100 x 100 ó de 5 x 5 con 8 espiras.

- ✓ Voltaje de salida: 0 a 9 V, variable

Acuíferos Costeros

Una plataforma calcárea como la Península de Yucatán se distingue por la rápida infiltración de agua meteórica o cualquier tipo de agua alogénica; en tales ambientes, el agua salina se extiende tierra adentro acuñándose desde la costa. Debido a la diferencia de densidades que produce la concentración de sales entre las dos masas de agua, el agua dulce infiltrada forma lentes que flotan sin mezclarse sobre el agua salada y que se extienden de manera regional alcanzando su espesor máximo lejos de la costa y reduciéndose al acercarse a ella debido a la descarga de agua causado por el gradiente hidráulico.

La región en que el aumento de la concentración de sal es más agudo relativo al incremento en la profundidad se conoce como *haloclina* y representa el equilibrio entre las dos masas de agua. Aunque el acuífero de Quintana Roo es esencialmente un acuífero superficial no confinado, la distribución y descarga del agua dulce están limitados por la posición de la haloclina. Muchos estudios acerca de la interfase agua salada-agua fresca en regiones costeras tienen una aseveración en común: los dos fluidos son inmiscibles y están separados por una superficie rígida considerada como la haloclina a lo largo de la cual no puede ocurrir ningún flujo. Esta superficie es común a ambos fluidos, en algunos casos sólo uno de los fluidos puede moverse, en otros ambos fluidos se mueven.

Ley de Ghyben-Herzberg

Los primeros estudios sobre el tema fueron realizados por Ghyben y Herzberg. Sus resultados se basan en el equilibrio estático de columnas de agua de diferente densidad. Las hipótesis básicas admitidas son:

- a) El flujo de agua dulce es perfectamente horizontal y por lo tanto el potencial es constante a lo largo de cualquier vertical.
- b) No existe flujo de agua salada.
- c) La interfase es un plano, no existiendo zona de mezcla.

Bajo estas condiciones, en un punto cualquiera de la interfase debe equilibrarse la presión de agua dulce y agua salada.

$$\rho_f g(z_s + z_w) = \rho_s g z_s \quad (31)$$

siendo: $g = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$

z_s = distancia vertical a la interfase bajo el nivel del mar

z_w = altura del agua dulce sobre el nivel del mar

ρ_f = densidad del agua dulce (1.000) g/cm³

ρ_s = densidad del agua salda, si tomamos como referencia el peso específico del agua generalmente entre 1.020 y 1.030 g/cm³, siendo el valor más frecuente 1.025, de tal manera que:

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \cdot z_w = \frac{z_w}{\beta} \quad (32)$$

donde

$$\frac{1}{\beta} = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \quad (33)$$

$1/\beta$ varía de acuerdo al contenido de sales entre 50 y 33 siendo el valor más frecuente 40. En otras palabras, según la ley de Ghyben-Herzberg la interfase se sitúa a una profundidad bajo el nivel del mar igual a 40 veces la cota del agua dulce sobre el nivel medio del mar en aquel punto. El fondo impermeable del acuífero determina la mayor profundidad a la que es posible encontrar agua salada, se produce cuando

$$z_w = z_0 \beta \quad (34)$$

z_0 representa la profundidad de la base del acuífero bajo el nivel medio del mar. La ley antes enunciada funciona bajo las condiciones ideales de ausencia de zona de mezcla ilustradas en el dibujo A de la Figura 16.

Sin embargo, en zonas cercanas a la costa (aún en ausencia de zona de mezcla), donde de existir gradiente piezométrico en el agua dulce, la circulación del agua debe ser a velocidades mayores con la consecuente aparición de componentes verticales por la sucesiva menor sección de salida, existe un aumento en el gradiente, de modo que el nivel del agua en el acuífero tiene una cota superior a la que se obtendría al suponer un flujo rigurosamente horizontal. Ello explicaría la existencia de manantiales en playas y lugares costeros a cotas ligeramente superiores a las del mar. Bajo estas condiciones la ley de Ghyben-Herzberg resulta ser poco funcional.

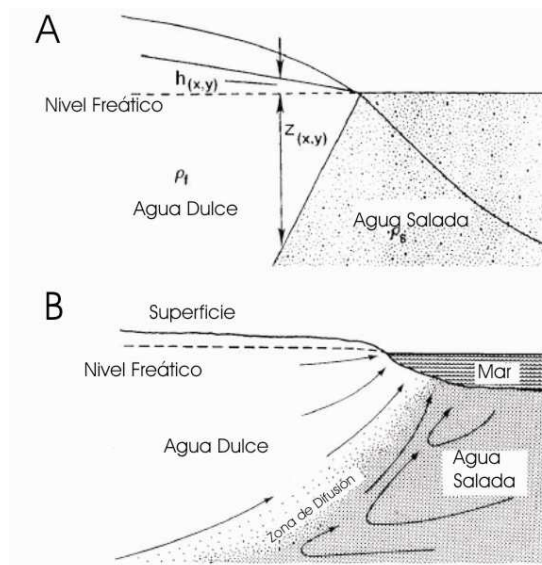


Figura 16. Ley de Ghyben - Herzberg (Beddows,2003)

Corrección de Hubbert

Hubbert (1940), notó que el lente de agua dulce no es estático sino en equilibrio dinámico con la carga y descarga, de donde concluyó que la intersección de la zona de mezcla debe ocurrir en el mar, resultando en una descarga submarina; así mismo siguió asumiendo una zona de mezcla estrecha y una masa de agua salina estática. En 1959 Cooper rechaza la corrección de Hubbert pues encuentra que la descarga de agua dulce resulta en un flujo paralelo de agua salada induciendo un ciclo de intrusiones de agua salina. La dispersión y difusión molecular de la sal proveniente de el agua marina que intrusióna el agua dulce resulta en una zona de salinidad y densidad intermedia, caso B de la figura anterior. Esta agua salobre estará en movimiento a lo largo de la zona de dispersión elevándose hasta descargarse en el mar. Hipotéticamente la zona de dispersión es inducida por la influencia de las mareas en la carga hidráulica, geometría y heterogeneidad espacial del flujo subterráneo, velocidad y bombeo potencial en la zona (Beddows, 2003).

Corrección de Glover

A partir de las observaciones anteriores, Glover (1964) hace el análisis mostrado en la figura 17, donde la descarga total ocurre bajo el nivel del mar (Domenico, Schwarts; 1990). La posición de la interfase agua dulce agua salina está determinada por

$$z_0^2 = \frac{2Q'x\rho_f}{K(\rho_s - \rho_f)} + \left[\frac{Q'\rho_f}{K(\rho_s - \rho_f)} \right]^2 \quad (35)$$

Donde z_0 es la profundidad bajo el nivel del mar a la interfase, x es la distancia positiva medida tierra adentro a partir de la línea de costa y Q' es el flujo de agua dulce por unidad de longitud de la línea de costa. El espesor de la descarga de agua dulce está determinado por $x=0$

$$x_0 = \frac{Q'\rho_f}{2K(\rho_s - \rho_f)} \quad (36)$$

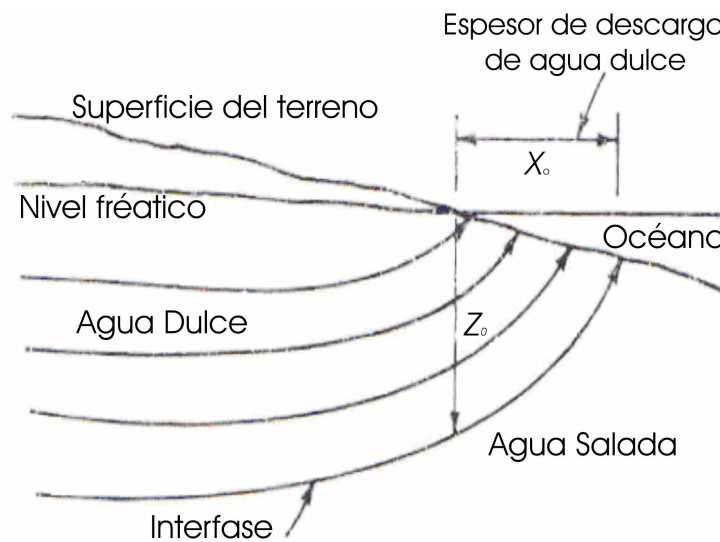


Figura 17. Parámetros para el desarrollo de Glover.

Mientras que la profundidad de la interfase bajo el nivel del mar en la línea de costa ($x=0$) está dado por

$$h_f = \frac{2Q'x(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f K} \quad (37)$$

De tal manera que a $x=0$, $h_f=0$. Así entre más grande sea el flujo hacia el mar la interfase estará a mayor profundidad, por lo tanto será más grande la cantidad de agua dulce necesaria a descargar. Este desarrollo muestra la importancia del flujo de agua dulce al mar como principal controlador del avance del agua salada.

IV. Metodología

Trabajo de campo

Tomando en cuenta los objetivos del trabajo, se obtuvieron datos en sólo dos segmentos representativos del área, si bien la zona de interés es extensa, la presencia de humedales, limita en gran medida los lugares donde se pueden realizar sondeos con las características descritas.

La particularidad del lugar elegido en la playa es que muy cerca de aquí se encuentra la mayor cantidad de manantiales submarinos conocidos hasta el momento. La cercanía a **Punta Caracol** da el nombre de **pc** a los 15 sondeos eléctricos y de **PC** a los 102 electromagnéticos que cubren una longitud de 1020 m. Una capa de entre 50 y 70 cm de algas secas cubría la superficie dando como resultado un terreno irregular; las posibles consecuencias de esto se discutirán más adelante. También se realizó un perfil eléctrico con una extensión de 1908m que va del **crucero** de la carretera federal 207 con la carretera que entra al pueblo de **Puerto Morelos**, de ahí el nombre de **cp** para los 26 sondeos que lo conforman. La distancia a los cables de alta tensión más cercanos era de unos 70 m, por lo que no fueron, en ningún caso, causantes de perturbación alguna en la señal.

Para los SEVs se usó el arreglo electródico Schlumberger, en el cual los electrodos de potencial son colocados a una distancia fija que no es más de un quinto del AB, se supone que estos electrodos están a una distancia infinitesimal, mientras que los electrodos de corriente son colocados a distancias progresivamente mayores. El punto de atribución se toma como el punto medio del arreglo de electrodos y hay 68 m entre cada uno de ellos. Las aberturas usadas para los electrodos potencial (MN) fueron de 1 ó 9 m según fue necesario y las de los electrodos de corriente fueron las siguientes:

AB	1	2	3	4	6	9	14	20	30	44	64	136
----	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	-----

Para los TEMs se usó un loop transmisor cuadrado de 10 x 10 m en la modalidad In Loop. Tomando como *punto de atribución* el centro del loop transmisor, la distancia media entre cada uno es de 10 m, con una corriente de entrada de 3–3.5 Amperios. La Figura 18 muestra las localizaciones de los centros de sondeo para ambas técnicas utilizadas así como la ubicación de los manantiales submarinos más cercanos.

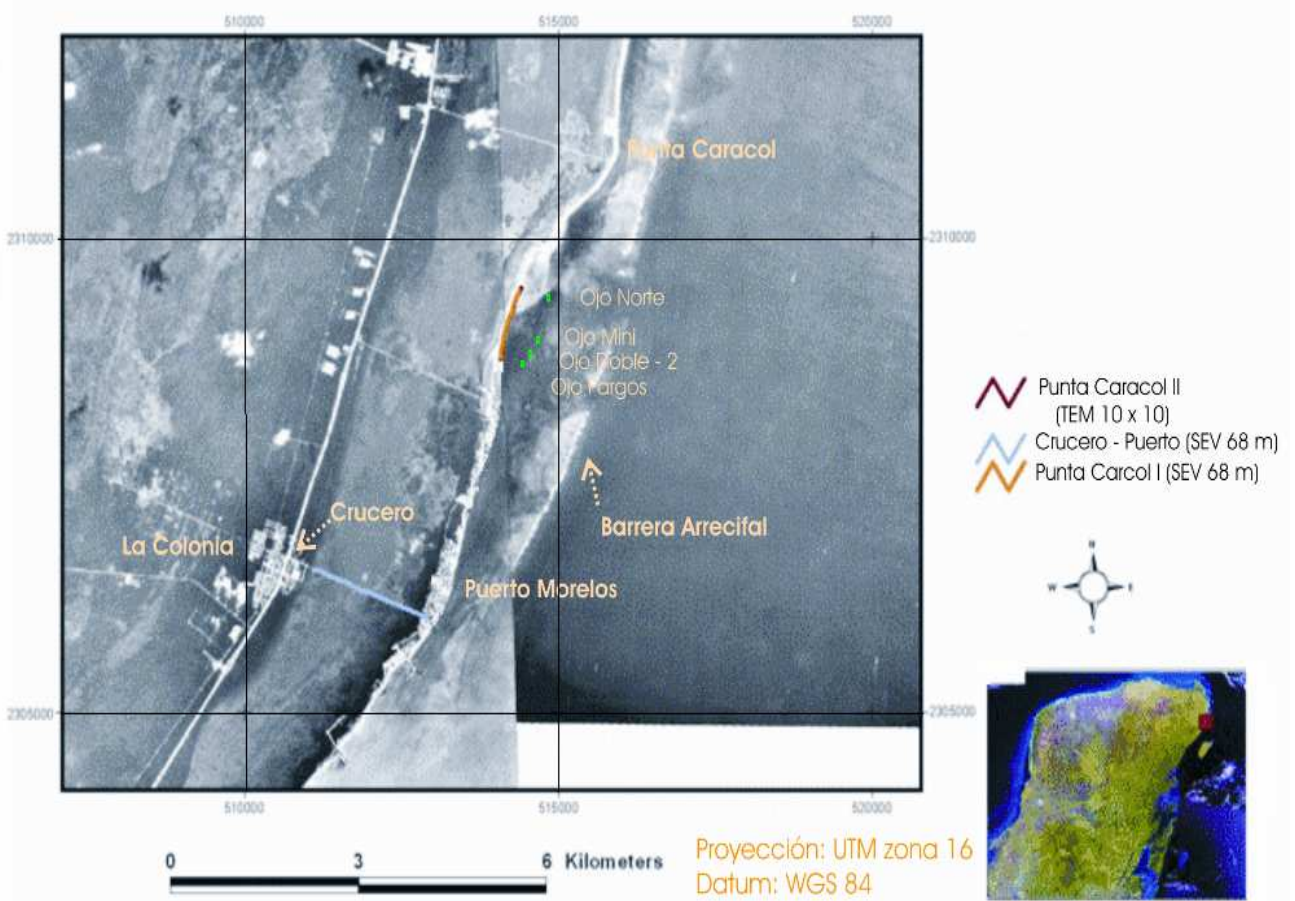


Figura 18. Localización de los puntos de sondeo en el área de estudio

A continuación se presentan las coordenadas de cada uno de los centros de sondeo clasificados en tres tablas de acuerdo al perfil geoelectrico al que pertenecen. Como veremos más adelante a las secciones en la playa las identificaremos como **Punta Caracol: I** si es la de SEVs (sondeos con el nombre de **pc#**) y **II** si es la de **TEMs** (sondeos con el nombre de **PC#**). A la sección a lo largo de la carretera que entra a Puerto Morelos la identificaremos como **Crucero-Puerto** (sondeos con el nombre de **cp#**). Además se presentan las coordenadas de los cuatro Manantiales Submarinos cercanos a la zona de estudio.

Punta Caracol I

Nombre	X UTM WGS 84	Y UTM WGS 84	Elevación
pc15	514382	2309838	0
pc14	514350	2309774	0
pc13	514319	2309712	0
pc12	514287	2309647	0
pc11	514270	2309582	0
pc10	514246	2309518	0
pc9	514213	2309455	0
pc8	514187	2309387	0
pc7	514167	2309319	0
pc6	514146	2309253	0
pc5	514128	2309188	0
pc4	514115	2309123	0
pc3	514102	2309054	0
pc2	514092	2308995	0
pc1	514081	2308917	0

*La orientación del tendido en cada centro de sondeo eléctrico vertical es NE-SW.

Crucero-Puerto

Nombre	X UTM WGS 84	Y UTM WGS 84	Nombre	X UTM WGS 84	Y UTM WGS 84	Elevación
cp1	511101	2306015	cp14	511947	2305716	0
cp2	511169	2306006	cp15	512012	2305695	0
cp3	511230	2305985	cp16	512075	2305669	0
cp4	511299	2305957	cp17	512137	2305649	0
cp5	511366	2305934	cp18	512202	2305620	0
cp6	511432	2305912	cp19	512264	2305595	0
cp7	511496	2305889	cp20	512330	2305572	0
cp8	511555	2305869	cp21	512394	2305549	0
cp9	511620	2305840	cp22	512458	2305526	0
cp10	511682	2305815	cp23	512526	2305496	0
cp11	511747	2305787	cp24	512592	2305476	0
cp12	511813	2305764	cp25	512652	2305455	0
cp13	511882	2305739	cp26	512723	2305431	0

*La orientación del tendido en cada centro de sondeo eléctrico vertical es W-E.

Punta Caracol II

Nombre	X UTM WGS 84	Y UTM WGS 84	Nombre	X UTM WGS 84	Y UTM WGS 84	Elevación
PC000	514082	2308929	PC33	514160	2309291	0
PC00	514089	2308942	PC34	514163	2309300	0
PC0	514093	2308952	PC35	514165	2309309	0
PC1	514094	2308966	PC36	514165	2309318	0
PC2	514095	2308976	PC37	514170	2309328	0
PC3	514097	2308986	PC38	514171	2309337	0
PC4	514097	2308995	PC39	514174	2309346	0
PC5	514100	2309001	PC40	514179	2309356	0
PC6	514099	2309012	PC41	514183	2309364	0
PC7	514102	2309023	PC42	514184	2309373	0
PC8	514102	2309031	PC43	514189	2309381	0
PC9	514105	2309041	PC44	514194	2309389	0
PC10	514105	2309049	PC45	514196	2309400	0
PC11	514106	2309060	PC46	514200	2309410	0
PC12	514107	2309069	PC47	514204	2309420	0
PC13	514106	2309072	PC48	514205	2309428	0
PC14	514111	2309085	PC49	514211	2309439	0
PC15	514112	2309096	PC50	514217	2309448	0
PC16	514114	2309107	PC51	514219	2309455	0
PC17	514117	2309126	PC52	514226	2309465	0
PC18	514120	2309137	PC53	514229	2309474	0
PC19	514127	2309157	PC54	514234	2309479	0
PC20	514125	2309164	PC55	514241	2309491	0
PC21	514126	2309173	PC56	514241	2309499	0
PC22	514130	2309185	PC57	514247	2309508	0
PC23	514130	2309191	PC58	514247	2309521	0
PC24	514135	2309202	PC59	514254	2309529	0
PC25	514136	2309211	PC60	514258	2309535	0
PC26	514137	2309223	PC61	514260	2309544	0
PC27	514143	2309230	PC62	514264	2309553	0
PC28	514142	2309242	PC63	514269	2309561	0
PC29	514146	2309250	PC64	514273	2309569	0
PC30	514148	2309261	PC65	514274	2309580	0
PC31	514152	2309270	PC66	514278	2309588	0
PC32	514155	2309280	PC67	514282	2309599	0

Nombre	X UTM WGS 84	Y UTM WGS 84	Elevación
PC68	514283	2309605	0
PC69	514287	2309614	0
PC70	514292	2309622	0
PC71	514291	2309632	0
PC72	514294	2309641	0
PC73	514298	2309652	0
PC74	514301	2309660	0
PC75	514304	2309672	0
PC76	514305	2309682	0
PC77	514309	2309691	0
PC78	514314	2309699	0
PC79	514319	2309709	0
PC80	514321	2309718	0
PC81	514326	2309728	0
PC82	514332	2309736	0
PC83	514337	2309744	0
PC84	514341	2309753	0
PC85	514343	2309762	0
PC86	514345	2309769	0
PC87	514353	2309776	0
PC88	514358	2309785	0
PC89	514362	2309793	0
PC90	514361	2309793	0
PC91	514366	2309803	0
PC92	514371	2309810	0
PC93	514377	2309818	0
PC94	514382	2309827	0
PC95	514387	2309833	0
PC96	514389	2309845	0
PC97	514395	2309848	0
PC98	514401	2309860	0
PC99	514406	2309867	0

Ojos de Agua

Nombre	X UTM WGS 84	Y UTM WGS 84
Norte	514828	2309581
Mini	514673	2309138
Doble2	514540	2309001
Pargos	514422	2308895

Procesamiento

Esta etapa es fundamental para mejorar la relación S/R de los datos mediante el suavizamiento de las curvas de campo (desplazando y enmascarando puntos), lo cual se hizo con ayuda de la herramienta de edición de WinG Link.

SEVs

En el caso de los SEVs, el desplazamiento de los puntos debió tomar en cuenta que la teoría que sustenta al arreglo Schlumberger dice que al tomar $AB \leq 5MN$ en las mediciones de campo, la sobreestimación mínima cometida en la resistividad aparente es de un 4% para cuando $AB=5MN$. En las primeras tres lecturas $AB < 5MN$, por lo que debieron ser corregidas bajo esta consideración, desplazando los puntos hacia abajo con la ayuda de la herramienta de Edición de Wing Link.

TEMs

En algunos de los sondeos por transitorios, los valores de las curvas de decaimiento son negativos y presentan depresiones como se ve en la Figura 19, donde las curvas en color representan diferentes mediciones realizadas en el mismo centro de sondeo y línea negra la media de ellas.

La causa de estas depresiones e inversiones de signo es la *polarización inducida** (PI), pues si el material superficial cercano al loop responde al efecto de (PI), éste es polarizado por fuertes corrientes iniciales, entonces, el decaimiento lento de la corriente de descarga produce un campo magnético en dirección opuesta a la de la corriente de inducción, éste puede ser más grande que el campo magnético normal a tiempos tardíos, especialmente si el terreno cercano es relativamente resistivo de tal manera que las corrientes de inducción decaigan rápidamente. Como resultado, el

* Es un método de exploración que tiene que ver con medir el decaimiento lento del voltaje en el terreno después de detener un pulso de corriente (método en el dominio del tiempo) o variaciones de baja frecuencia en la impedancia del terreno -menores a 100 Hz- (método en el dominio de la frecuencia o de sobrevoltaje). La mayoría de la energía envuelta en IP es química, tiene que ver con la movilidad de los iones (polarización de membrana) o el efecto IP normal y variaciones debidas al cambio de conducción iónica a electrónica donde hay minerales metálicos presentes (polarización de electrónica, potencial inducido o polarización interfacial) la última es la de mayor efecto. Se usan varias configuraciones de electrodos, especialmente el arreglo dipolo-dipolo. (Tomado de Sheriff, 2001).

campo magnético y su derivada temporal pueden presentar cambios de signo (Omán, Newman; 1990).

De esta forma, la cercanía de la bobina receptora al loop transmisor, dadas las dimensiones del último, afecto los datos electromagnéticos en la forma antes mencionada, por lo tanto, previo a la etapa de procesamiento hay un pre-procesamiento esencial cuya primera parte es realizada automáticamente por Wing Link al momento de cargar los datos y consiste en cambiar los signos negativos por positivos. Por otro lado, las depresiones en las curvas debieron ser suavizadas de la forma siguiente: el PROTEM 47 realiza un mínimo de tres mediciones en cualquier tiempo de integración elegido; de la cantidad total de mediciones realizadas (curvas en color en la Figura 19) podemos elegir sólo unas cuantas de ellas y deshabilitar los puntos “botados” de forma tal que no sean tomados en cuenta en la obtención de la *curva de decaimiento media* que será la curva de trabajo definitiva. Una vez que la etapa de pre-procesamiento ha terminado, es posible afinar los últimos detalles, al igual que en los sondeos eléctricos verticales, con la herramienta de Edición de Wing Link.

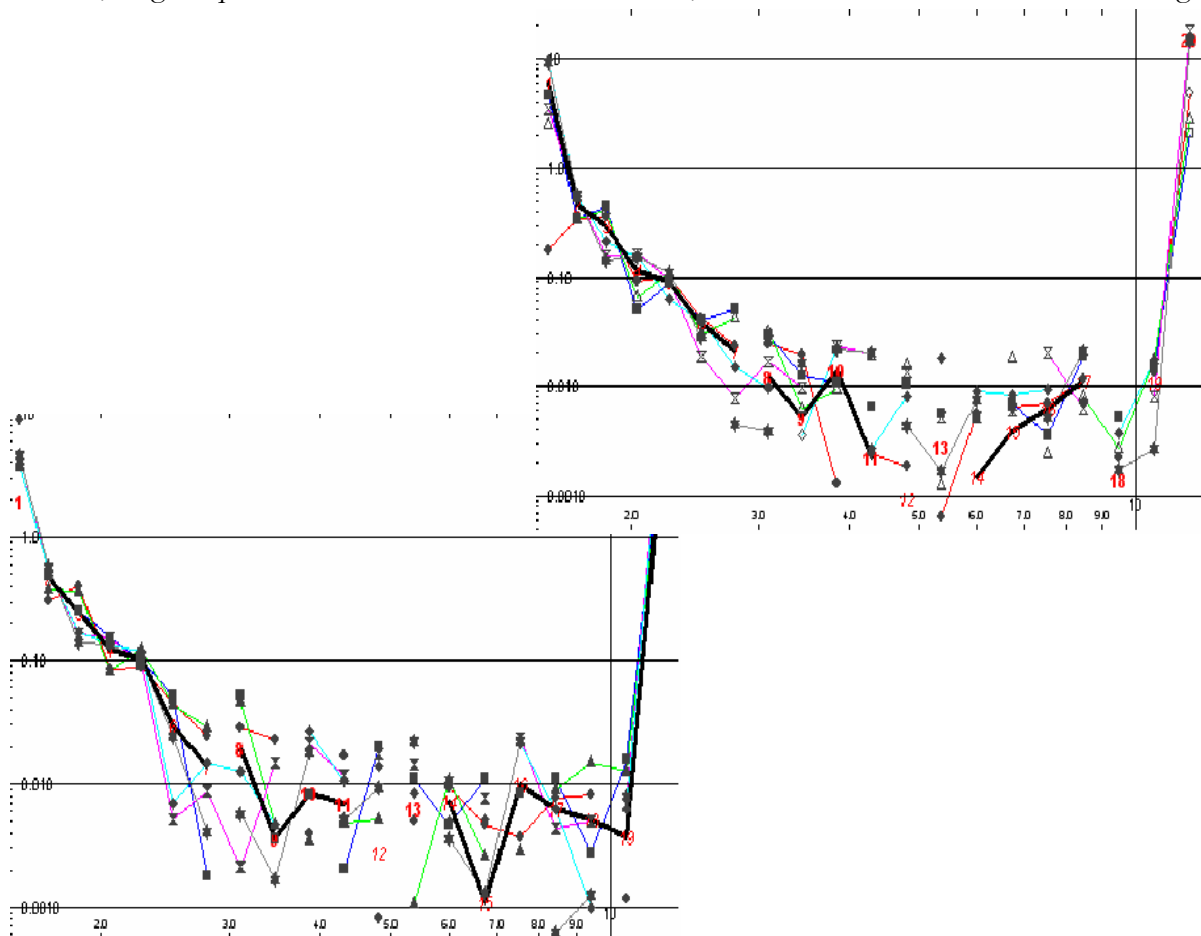


Figura 19. Efecto de Polarización Inducida en los datos de TDEM

Inversión Geofísica

Una herramienta importante en la interpretación de datos geoelectricos ha sido la comparación de las curvas de resistividad aparente derivadas de las observaciones de campo con las curvas teóricas de resistividad calculadas a partir de modelos asumidos de estratificación subterránea. Este método de prueba y error es básicamente un procedimiento de ajuste de curvas, de tal manera que los parámetros de la capa se varían hasta llegar a un modelo que permite un ajuste con la curva observada en campo y en concordancia con cualquier otra información geológica o geofísica previa disponible en el área de estudio.

SEVs

La respuesta teórica al método de sondeo eléctrico vertical de un modelo de estratificación es calculada a partir de deducción de Stefanescu por medio de las “relaciones de recurrencia” como la de Pekeris -ecuación (13)- y después ajustada con la curva de campo, es decir, el método de inversión de SEVs llamado *Filtrado Lineal**.

Este es el método usado por WinG Link, los datos de entrada para el programa son las resistividades aparentes y la abertura $AB/2$ (curva de campo), después de acuerdo a un modelo inicial propuesto por el interprete o por el programa (número de capas con sus respectivos espesores y resistividades), se calcula una curva teórica suavizada a partir de la cual se realizará el ajuste con la curva de campo. Antes de “correr” la inversión es necesario especificar el porcentaje de Error Cuadrático Medio (RMS) máximo deseado así como el número de iteraciones a realizar; para este caso se uso 5 y 10 respectivamente.

A continuación (Figura 20) se muestran ejemplos de los resultados obtenidos por la inversión 1-D de dos centros de sondeo no consecutivos, modificada a partir de la inversión automática. La finalidad de estas figuras es simplemente ilustrativa, la inversión de cada uno de los sondeos está en el Apéndice 1 junto con los valores de espesor y resistividad calculados. El modelo en magenta es el modelo suavizado, mientras que el verde es el de menor número de capas mismo que será utilizado para la integración de los perfiles e interpretación.

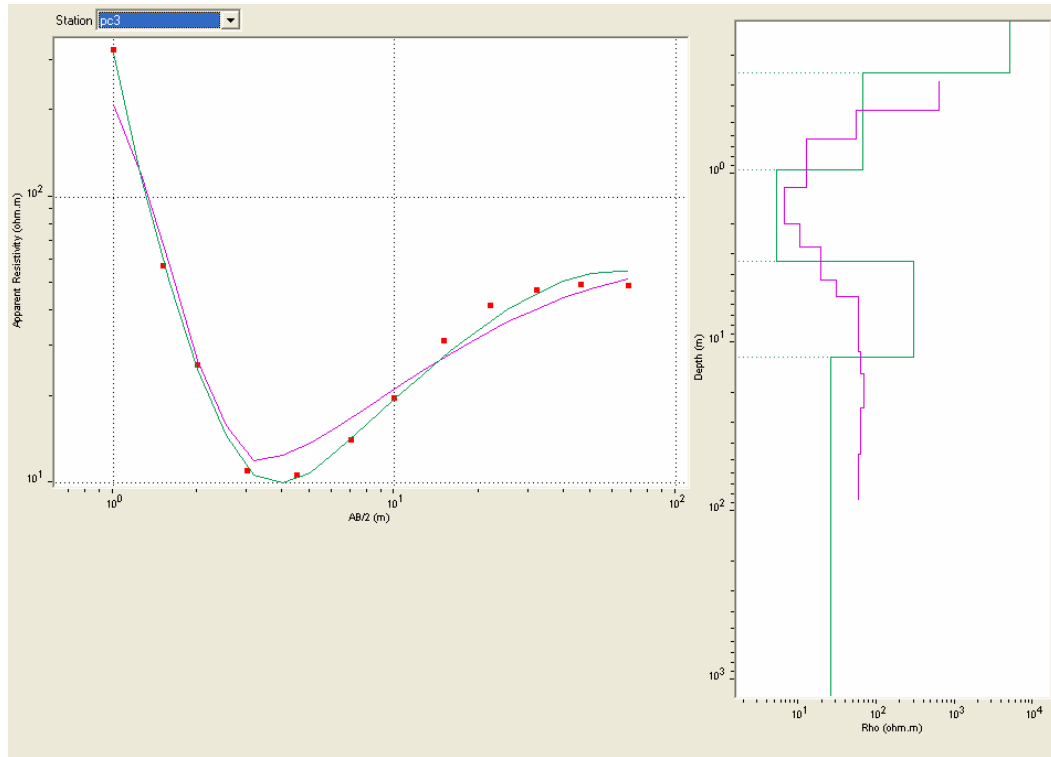
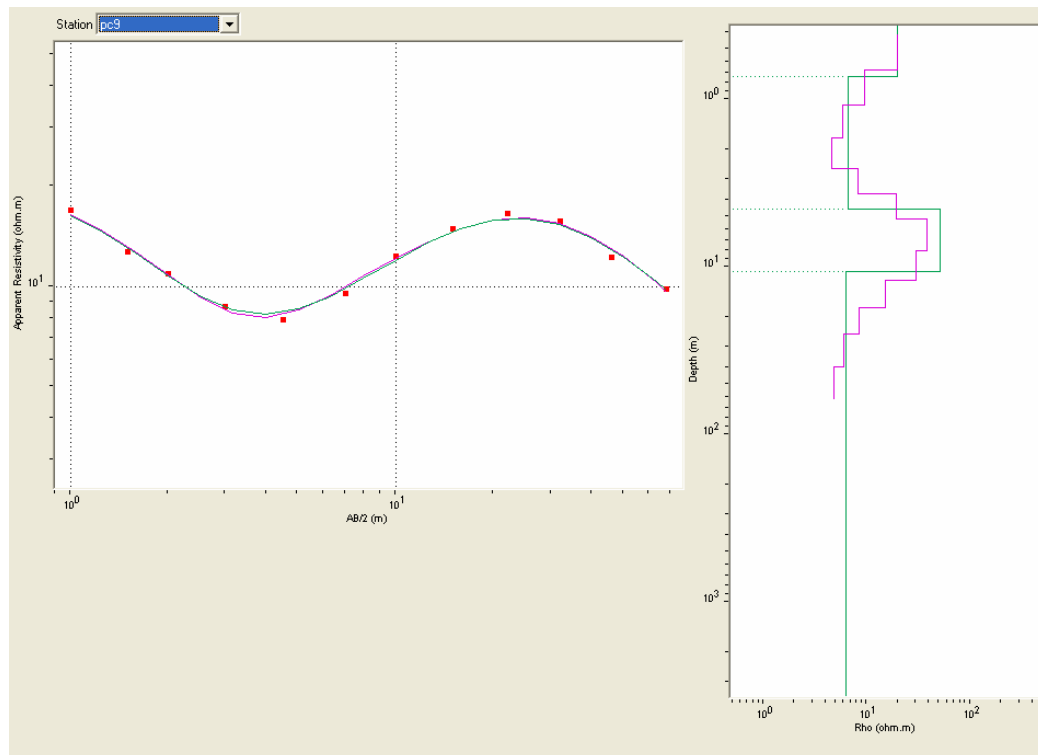


Figura 20. Los tres cuadros mostrados (dos en esta página y uno en la siguiente) muestran la inversión de tres centros de sondeo. Los puntos rojos representan las mediciones de campo, la línea verde es la del modelo invertido y la magenta es el modelo suavizado. Resulta aquí evidente la heterogeneidad de la zona.



TEMs

El problema de calcular la respuesta teórica de un conductor a un campo electromagnético consiste en resolver las ecuaciones de Maxwell bajo las condiciones de frontera apropiadas. En ausencia de cualquier conductor el voltaje inducido en el receptor como resultado de una corriente I en una fuente primaria es $Z_0 I$ donde Z_0 es la impedancia mutua entre la fuente y el receptor en el vacío. Sin embargo, este voltaje también es igual a KB_0 donde B_0 es la densidad de flujo en el receptor y K es el factor geométrico del arreglo. En presencia de un conductor el voltaje será $ZI = KB$, obviamente $B/B_0 = Z/Z_0$. Puesto de otra manera, el problema de encontrar la respuesta electromagnética es esencialmente el de calcular la impedancia mutua* de la fuente y el receptor en presencia de un sistema conductor de interés (Parasnis, 1997).

Una vez sorteados los inconvenientes nada triviales que presenta calcular la respuesta teórica a un campo magnético, se comparan las anomalías observadas en campo con las calculadas a partir de capas con diferentes espesores y resistividades. Si la curva observada puede ser ajustada satisfactoriamente con una de las respuestas teóricas, concluimos que se ha encontrado el modelo apropiado (Grant & West, 1965).

Bajo esta idea, a partir de las curvas de decaimiento, Wing Link calcula la resistividad aparente. Las resistividades aparentes para cada tiempo son los datos de entrada para la inversión. El procedimiento es proporcionar al programa el número de capas junto con sus espesores y resistividades de acuerdo con un modelo teórico esperado con la finalidad de crear una curva teórica y compararla posteriormente con la curva de campo, no sin antes haber proporcionado el RMS y el número de iteraciones a realizar. En este caso, primero se realizó la inversión automática de cada uno de los sondeos para después pasar a una inversión manual, método que resulto ser el más conveniente dadas las características de los datos. En la Figura 21 se muestran ejemplos de inversión 1-D para dos sondeos electromagnéticos no consecutivos. Estas figuras son simplemente ilustrativas, para mayor información en el Apéndice 1 se encuentran las inversiones para cada uno de los sondeos electromagnéticos realizados con los valores de espesor y resistividad obtenidos.

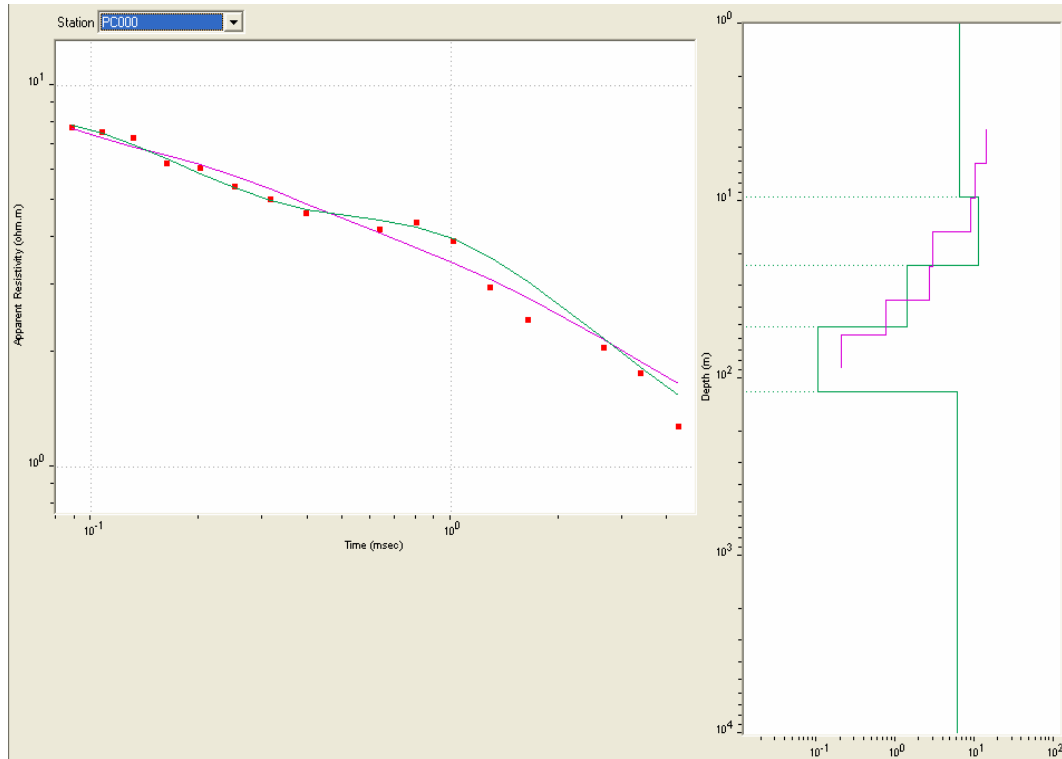
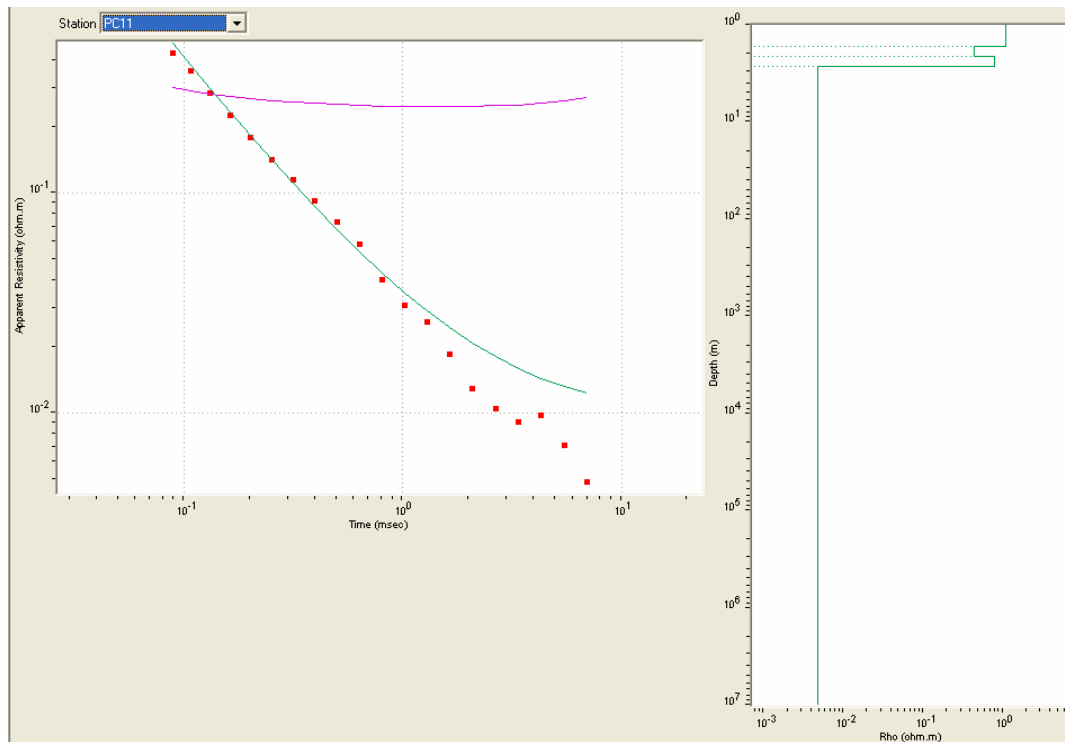


Figura 21. Los tres cuadros mostrados (uno en esta página y dos en la siguiente) muestran la inversión de tres centros de sondeo. Los puntos rojos representan las mediciones de campo, la línea verde es la del modelo invertido manualmente y la línea magenta es la inversión automática, no muy conveniente en la mayoría de los casos.



Interpretación Geofísica

Lo que se espera obtener tomando como guía un informe de MORO-CIGSA (2003) en las secciones de resistividad Punta Caracol I y II son zonas con resistividad correspondiente a la de agua dulce coincidentes con la ubicación de los manantiales submarinos y disminución paulatina de la resistividad alrededor de ellas hasta llegar a la correspondiente con agua salada. La primera observación importante es que al analizar las curvas de resistividad aparente resulta muy notorio que, contrario a lo que sucede en un medio estratificado, en sólo 68 m las variaciones laterales son importantes, condición de por sí esperada por tratarse de un medio kárstico.

En la mayoría de las rocas la conducción eléctrica es a través de los fluidos contenidos en sus poros (agua, aceite o gas) los cuales actúan como electrolitos, mientras que los granos de minerales contenidos contribuyen muy poco, excepto cuando estos minerales son en sí mismos excelentes conductores. Tomando ésto en cuenta, y dado que el fluido con el que trabajamos es agua, Astier (1975) realiza la siguiente clasificación de rangos de resistividad para acuíferos:

Aguas o Rocas	Resistividad	Aguas o Rocas	Resistividad
Agua de mar	0.2	Areniscas arcillosas	50-300
Agua de acuíferos aluviales	10-30	Areniscas cuarcitas	300-10 000
Agua de fuentes	50-100	Cineritas, tobas volcánicas	20-100
Arenas y gravas secas	1 000-10 000	Lavas	300-10 000
Arenas y gravas c/ agua dulce	50-500	Esquistos grafitosos	0.5-5
Arenas y gravas c/agua salada	0.5-5	Esquistos arcillosos o alterados	100-300
Arcillas	2-20	Esquistos sanos	300-3000
Margas	20-100	Gneis, Granito alterados	100-1 00
Calizas	300-10 000	Gneis, granito sanos	1 000-10 000

Tabla 1. Rangos de resistividad en [Ω m] de las aguas y rocas. Tomado de J.L. Astier (1975)

Como lo que interesa es encontrar la distribución regional de la resistividad, se organizaron los datos en secciones de la forma siguiente: los resultados de la inversión (espesores y resistividades) obtenidos en Wing Link para cada sondeo fueron interpolados en Surfer con el método Kriging dada la naturaleza aleatoria del karst. El resultado de dicha interpolación son las secciones mostradas en las Figuras 22 y 23.

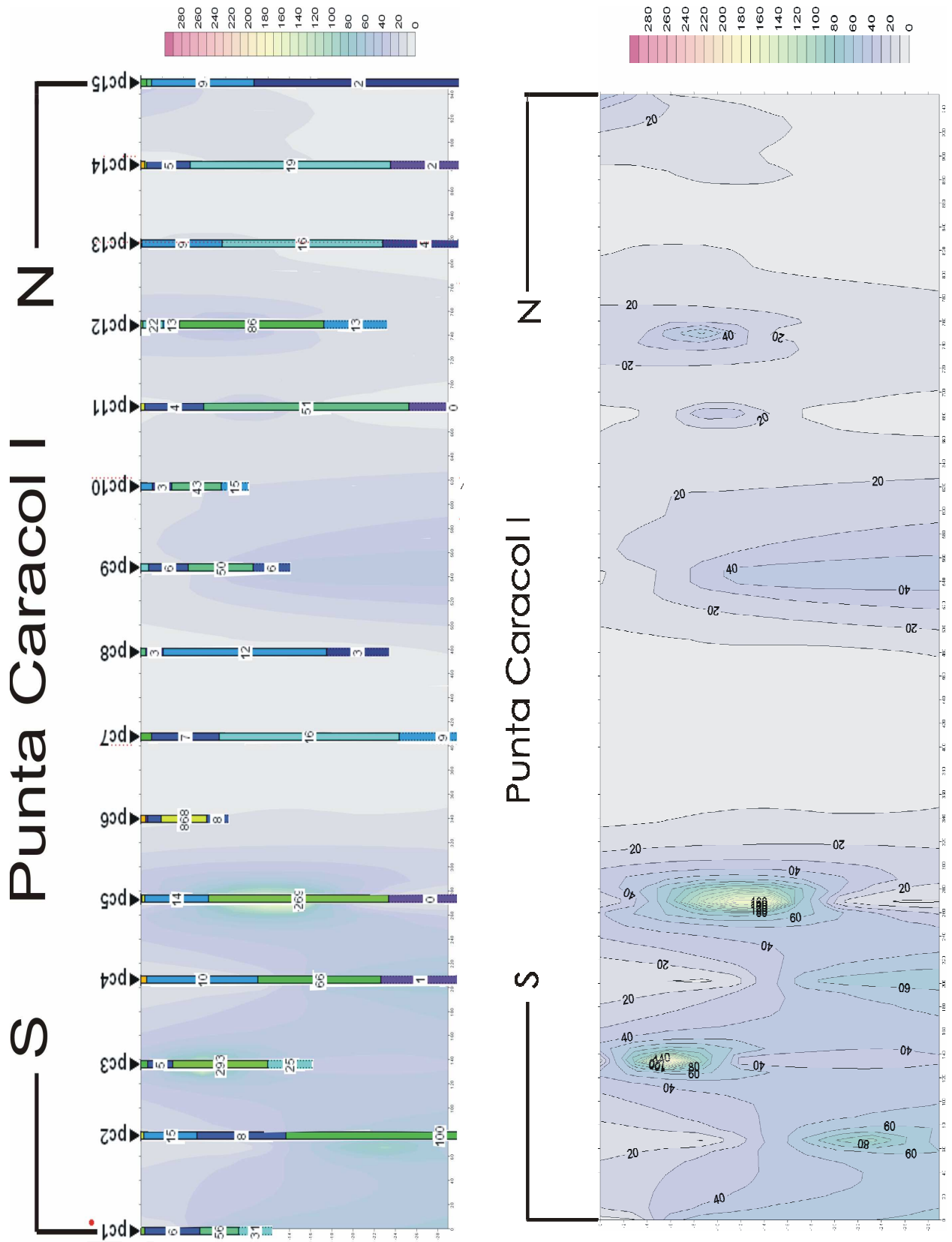


Figura 22. Sección de Sondeos Eléctricos Verticales en la playa. Las columnas de colores representan los modelos de capas planas para cada centro de sondeo.

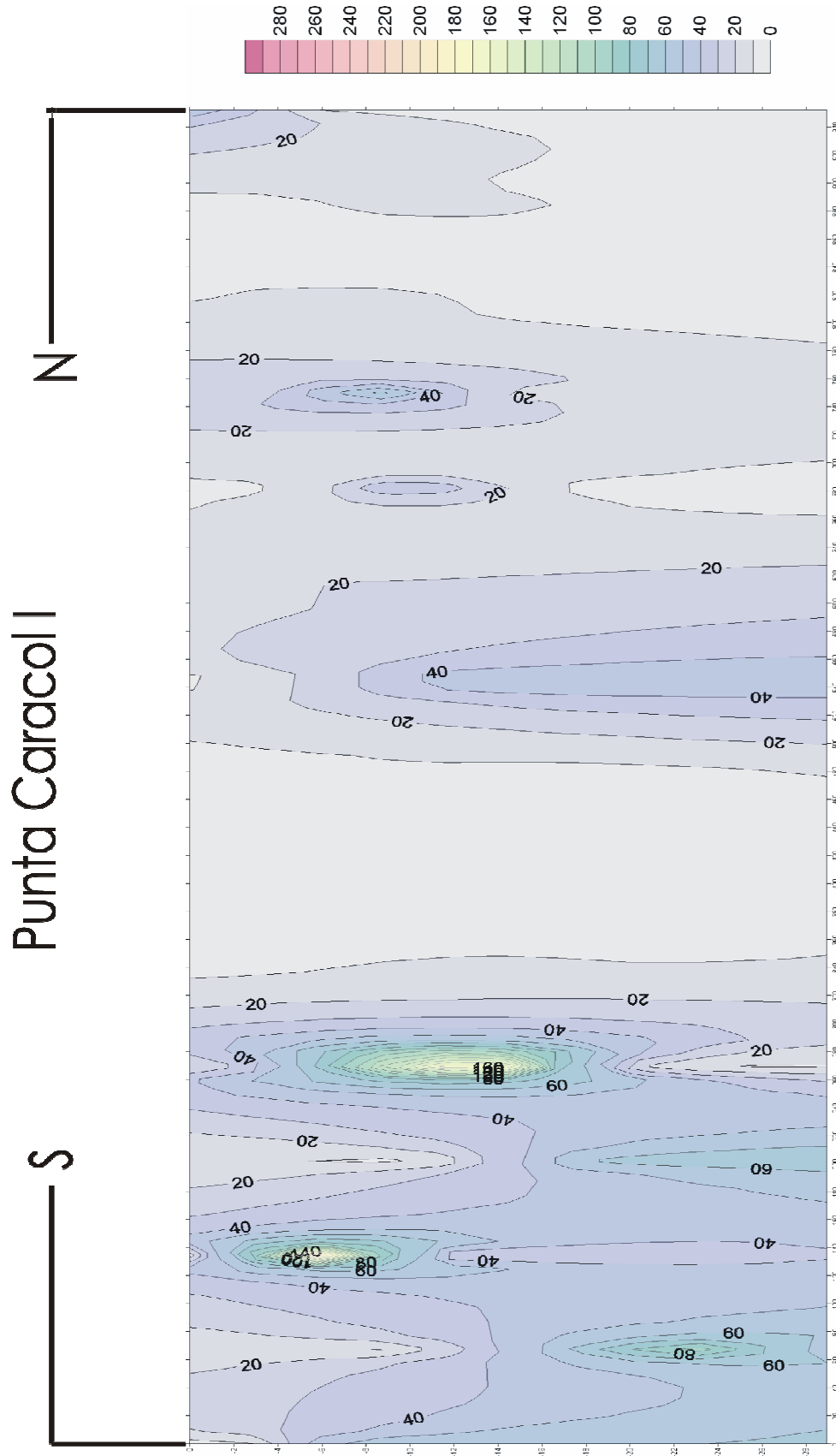
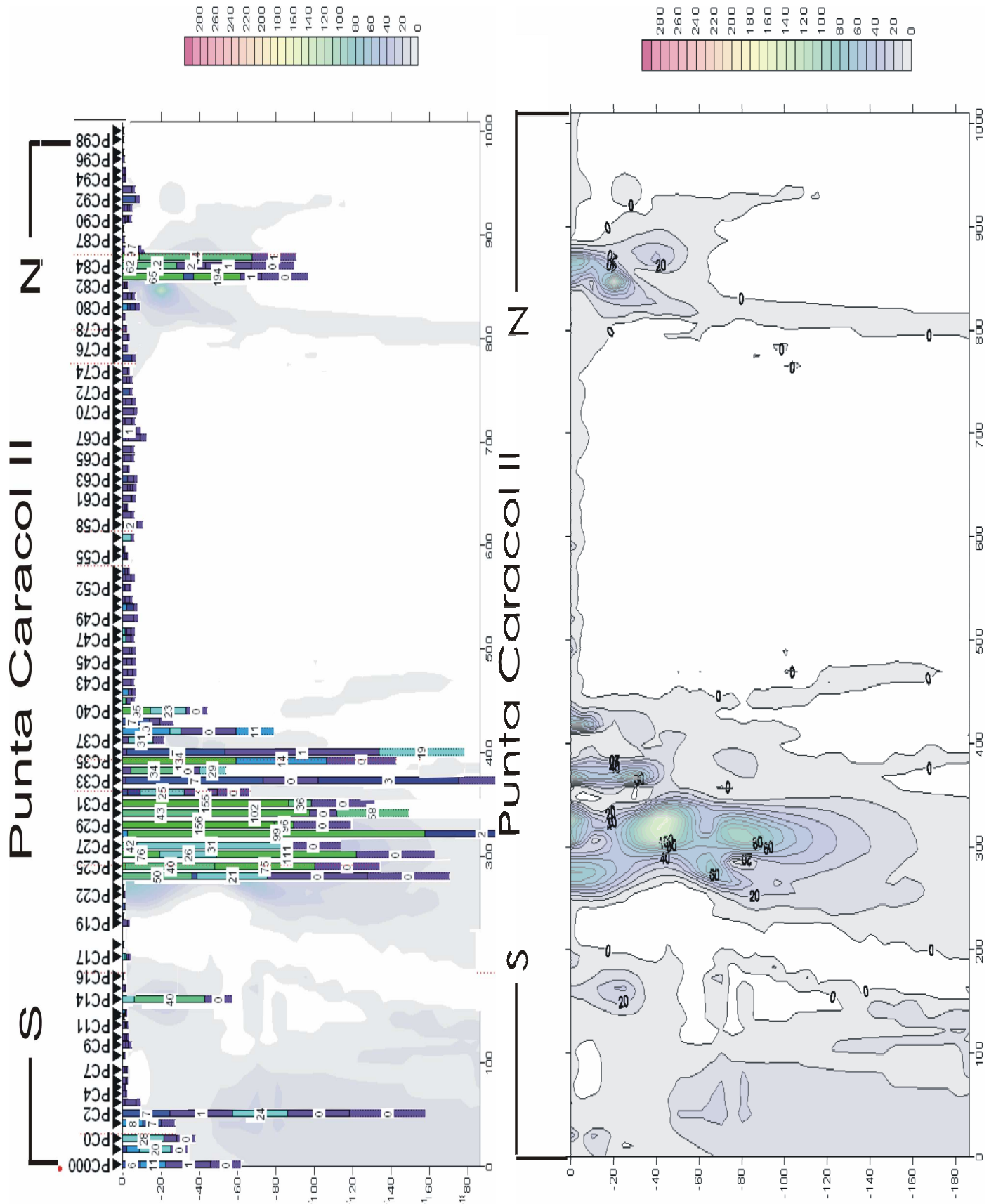


Figura 22b. Sección de Sondeos Eléctricos Verticales en la playa.

Figura 23a. Sección de Sondeos por Transitorios en la playa. Las columnas de colores representan los modelos de capas planas para cada centro de sondeo



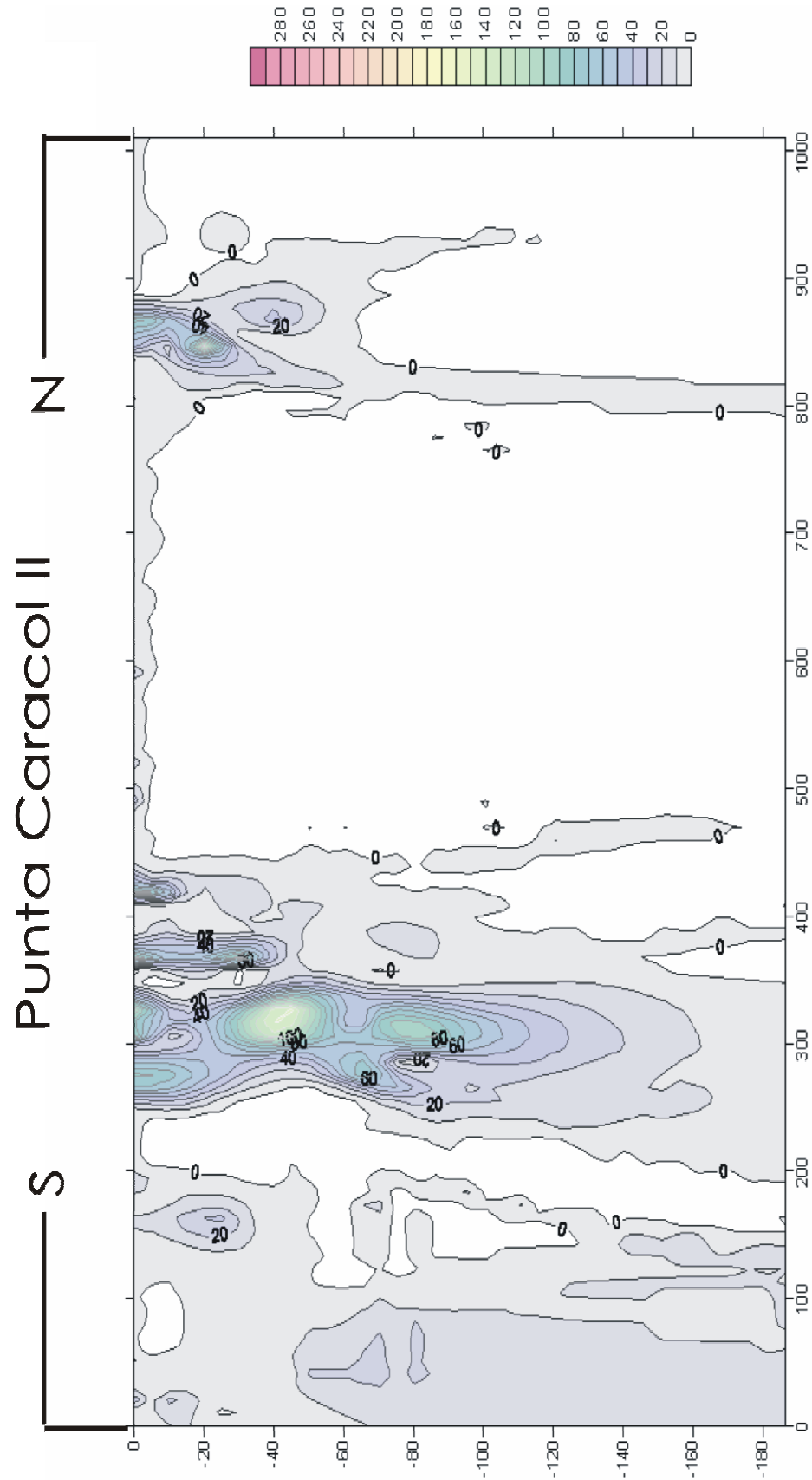


Figura 23b. Sección de Sondeos por Transitorios en la playa.

La inversión geofísica de los sondeos de la sección Punta Caracol I, mostrada en el Apéndice, muestra la presencia de la delgada capa de algas mencionada al principio de este capítulo como una primera capa altamente resistiva. Por ser ésta una capa superficial que no contiene información de interés para este trabajo, fue eliminada. Por lo tanto, el nivel cero de las secciones corresponde al nivel más bajo de la capa de algas.

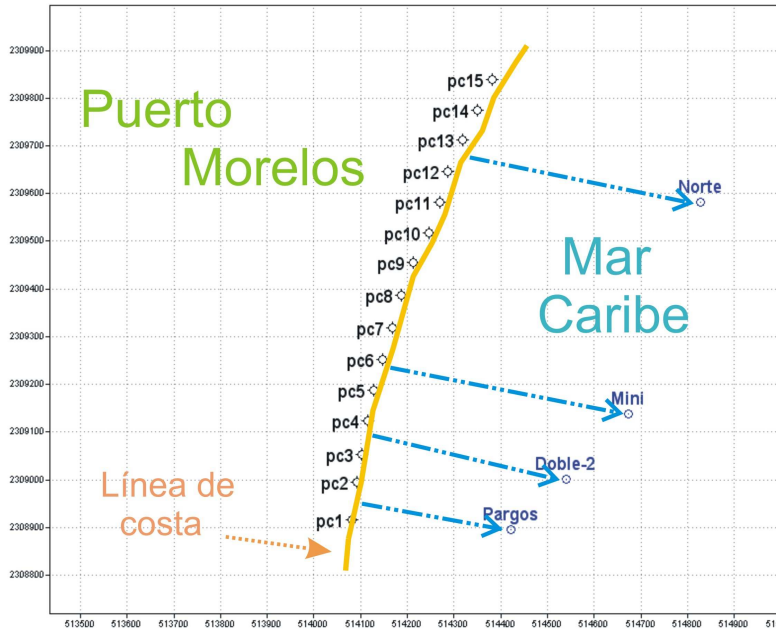
El resultado de la integración de los SEV en secciones muestra áreas alargadas con líneas que se cierran formando áreas de progresiva mayor resistividad hacia el centro de la estructura, resistividades posiblemente correspondientes con las de agua dulce. La sección integrada a partir de los TEM muestran una configuración más detallada, pues se contó un mayor número de datos para su conformación; al igual que en la sección realizada con los SEV se presentan líneas que se cierran formando áreas de mayor resistividad, sin embargo, buena parte de esta sección carece de datos, debido a la baja penetración de la herramienta causada por la presencia somera de agua de mar.

A partir las Figuras 22 y 23, tomando como antecedente los rangos de resistividad para acuíferos recién comentados y el informe de MORO - CIGSA como guía, la distribución de resistividad en las secciones puede agruparse en tres unidades principales:

Unidad	Resistividad	Descripción
1	$\rho \geq 20$	Agua dulce
2	$10 \leq \rho < 20$	Caliza saturada de Agua Salobre
3	$\rho < 10$	Caliza saturada con Agua Salada

Tabla 2. Unidades resistivas del área de estudio

Ya hemos identificado las zonas de alta resistividad, lo que sigue es saber si hay relación con la ubicación las desembocaduras a los manantiales. Por medio de los croquis siguientes intentamos tener una idea de donde estarían dichas desembocaduras de agua dulce en dirección a los manantiales en el contexto de los sondeos realizados en la playa.

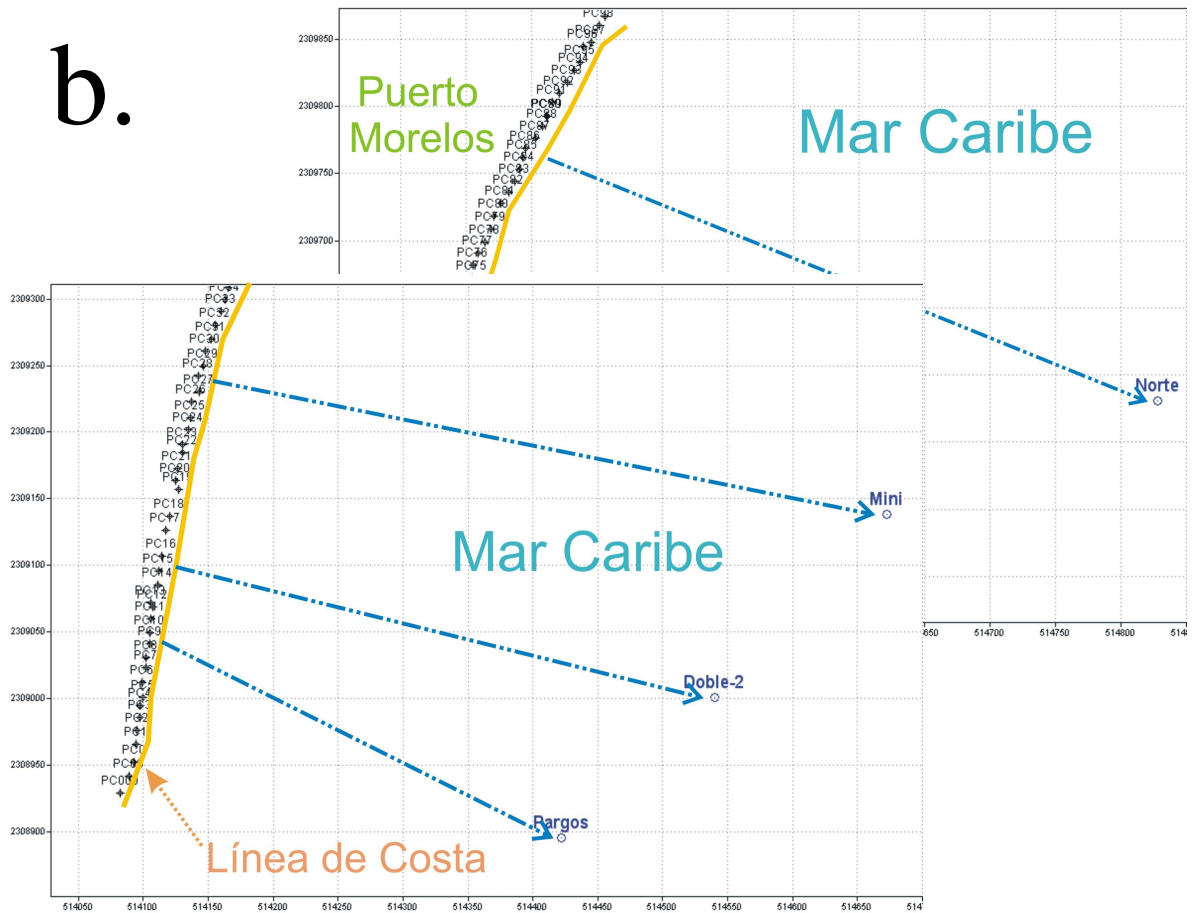


a.

Manantial	Ubicación de manantial (frente a los centros de sondeo...)
Pargos	pc1 - pc2
Doble - 2	pc3 - pc4
Mini	pc5 - pc6
Norte	pc12 - pc13

*Los números en negritas indican el centro de sondeo más cercano a la ubicación del manantial.

b.



Manantial	Ubicación de manantial (frente a los centros de sondeo...)
Pargos	PC7 – PC9
Doble – 2	PC14
Mini	PC25 – PC31
Norte	PC83 – PC86

Figura 24. Ubicación contextual de los manantiales submarinos, a. sondeos eléctricos verticales, b. sondeos por transitorios

Según lo esperado, las resistividades más altas (Unidad 1 descrita como Agua Dulce -Figura 25-) en las secciones Punta Caracol I y II se concentran en áreas consistentes con la ubicación esperada de los manantiales según la Figura 24. Sólo alrededor de estas áreas la resistividad va disminuyendo gradualmente lo que se relaciona directamente con la variación de la salinidad del agua, resultado de la mezcla de agua dulce y agua salada filtradas a través de las paredes del conducto hasta formar agua salobre y finalmente agua salada, misma que parece llenar de manera muy homogénea todos los huecos en su avance hacia el continente. De esta última observación se infiere un alto grado de porosidad terciaria.

En las secciones de la Figura 25 no hay ninguna característica que sugiera la presencia de un lente de agua dulce, por lo tanto, tampoco se puede hablar de haloclina. Así mismo se puede ver que las anomalías eléctricas en la sección Punta Caracol I son consistentes en su localización y valores de resistividad con las electromagnéticas en la sección Punta Caracol II, sin embargo las anomalías electromagnéticas tienen dos diferencias importantes respecto a las eléctricas: una consiste en mayor detalle consecuencia de una menor distancia entre centros de sondeo; la otra es la profundidad de penetración en zonas relativamente resistivas, ambas son consecuencia del método electromagnético en si mismo.

Comentamos que no se puede hablar de un lente de agua dulce pues todo lo ocupa el agua salada, la cual según la inversión realizada con ayuda de Wing Link representa un medio conductor perfecto pues su resistividad llega hasta los $0 \Omega \text{ m}$, en este caso, debe presentarse una corriente a una distancia infinitesimal de la interfase, por lo tanto los campos \mathbf{H} y \mathbf{E} desaparecen pues no hay derivada temporal del campo \mathbf{H} (ver ecuaciones 25 y 26) y el campo EM no puede penetrar más. Es por esta

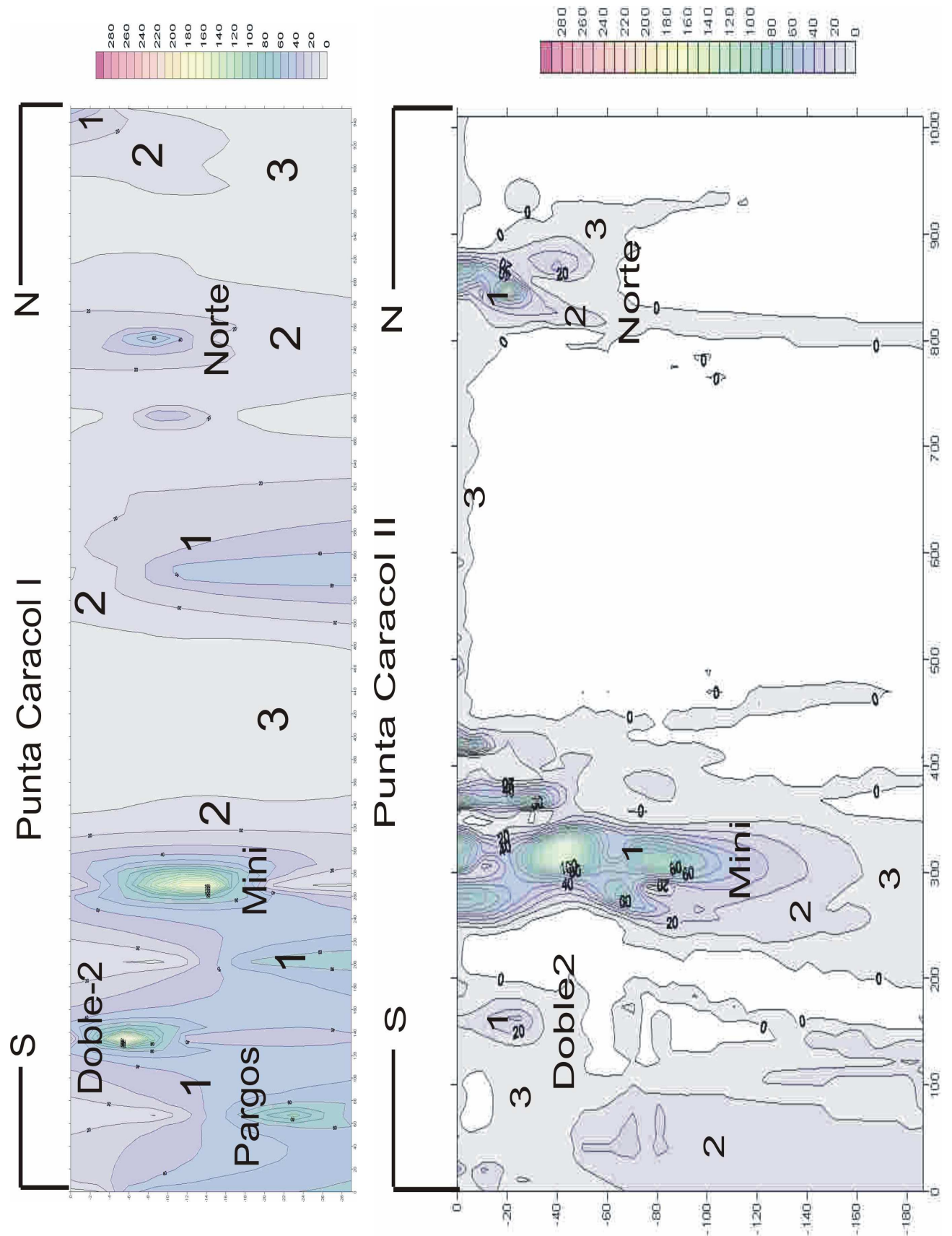


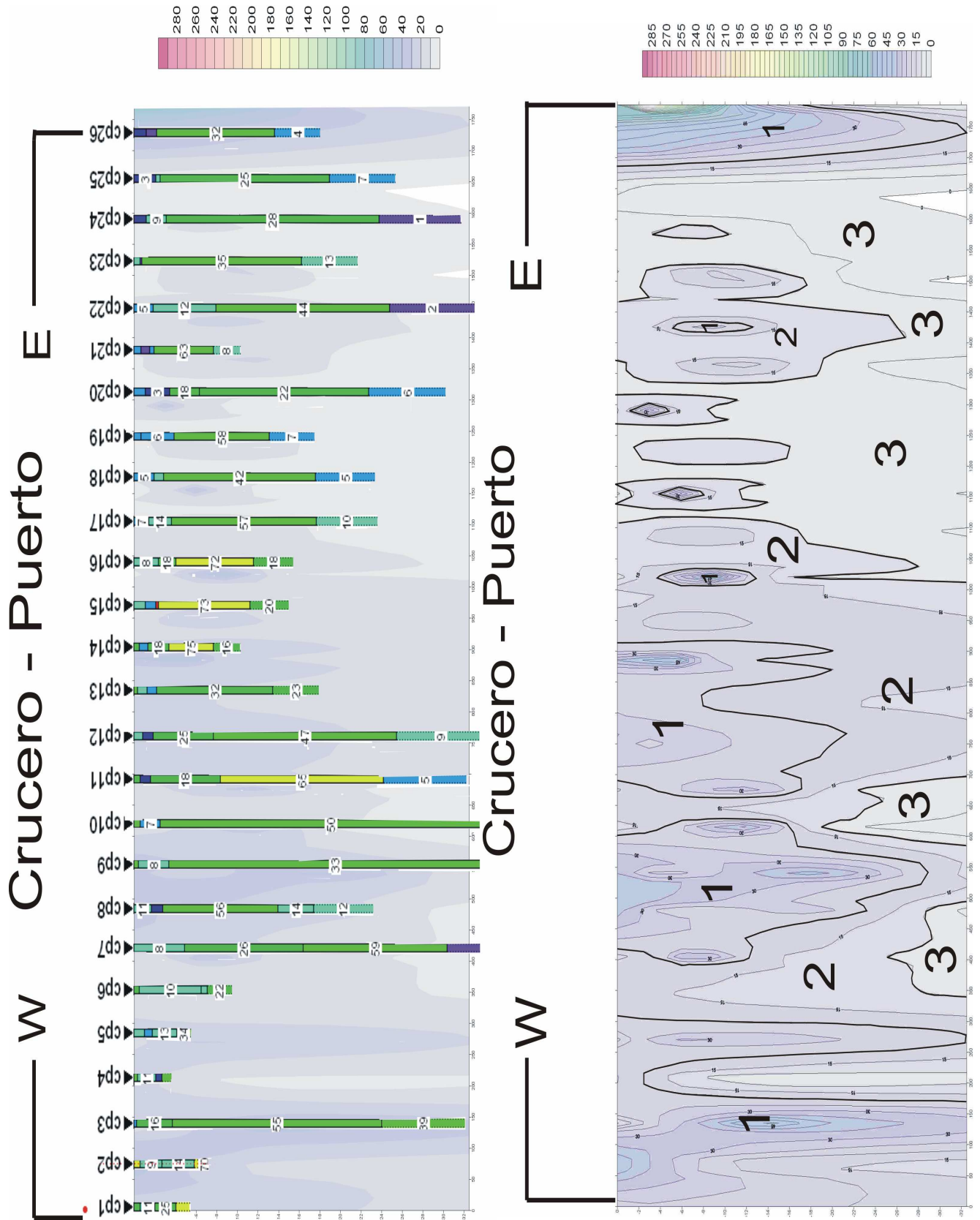
Figura 25. Ubicación de las salidas de agua dulce en dirección a los manantiales submarinos.

razón que la profundidad de penetración en zonas de alta conductividad se vio seriamente afectada y la integración de estos sondeos a la sección fue difícil.

Tierra adentro, las curvas de sondeo de la sección Crucero-Puerto (Figura 26) muestran una tendencia más regular cuya interpolación da como resultado las mismas tres unidades antes descritas, pero con una geometría obviamente diferente. Aquí tampoco se puede hablar de un lente de agua dulce. La distribución de agua dulce, salobre y salada es en este perfil prácticamente vertical situación posiblemente favorecida por el manglar a tan corta distancia del mar.

Llama la atención que hacia el este, es decir, conforme nos acercamos al pueblo, el agua salada es más somera, situación que podría explicarse por la resequedad de los humedales durante los meses de abril y mayo. A lo largo de este tiempo los humedales permanecieron al nivel más bajo del que se haya tenido noticia en por lo menos los últimos diez años, favoreciendo la concentración de sales, sobre todo en la zona más cercana al pueblo y por lo tanto más vulnerable. Para cuando los datos fueron tomados, las primeras lluvias de junio ya habían caído, lo que probablemente comenzó a dispersar las sales. Podría ser así mismo intrusión marina, sin embargo la ausencia de información de niveles estáticos en pozos impide asegurarlo.

Figura 26a. Sección de Sondeos Eléctricos Verticales en la carretera que entra al pueblo. Las columnas de colores representan los modelos de capas planas para cada centro de sondeo



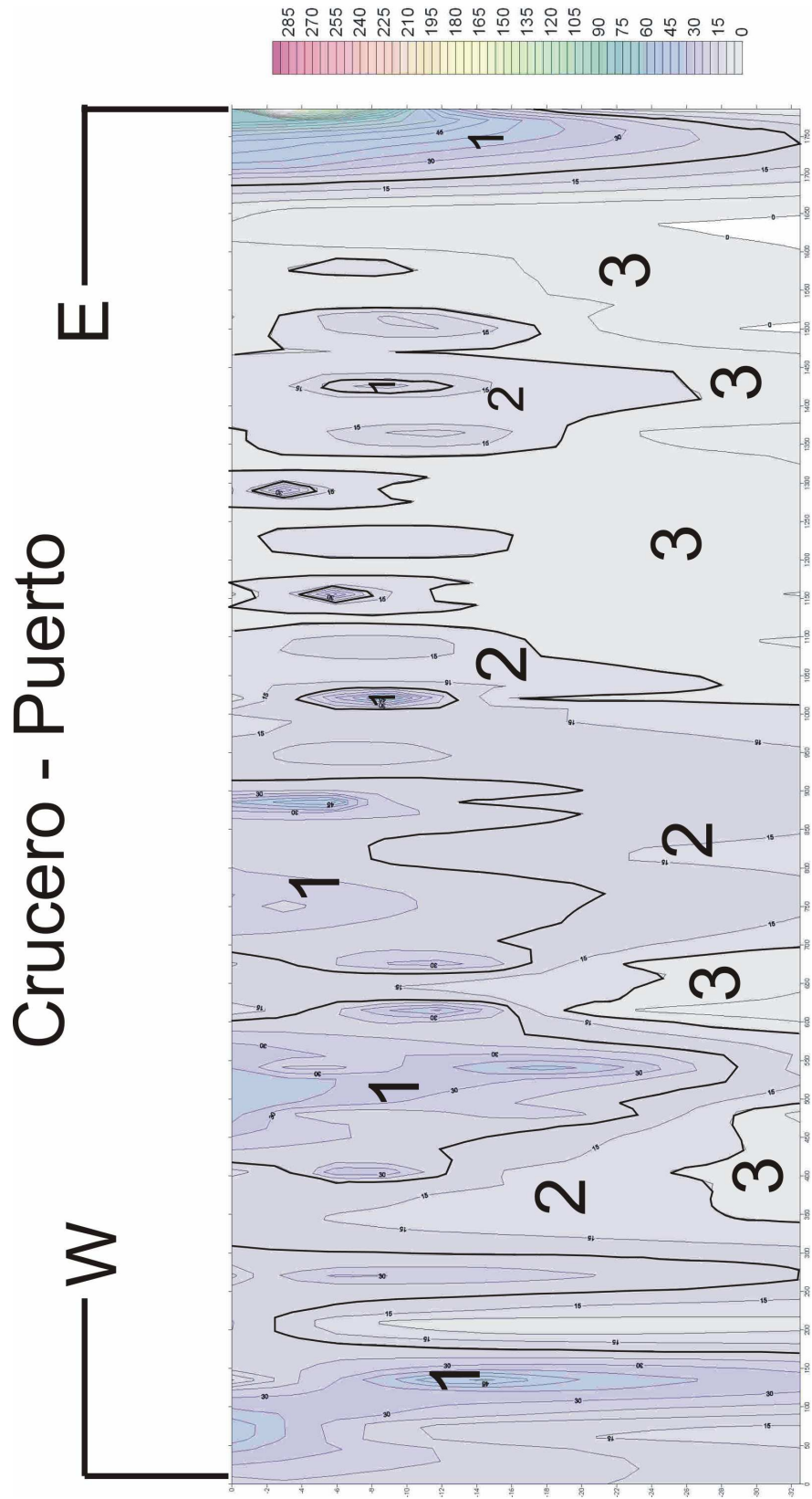


Figura 26b. Sección de Sondeos Eléctricos Verticales en la carretera que entra al pueblo Las columnas de colores representan los modelos de capas planas para cada centro de sondeo.

Modelo Hidrológico

En la Figura 27 (Beddows, 2004) los círculos representan el lugar de medición de la Conductancia Eléctrica Específica (SEC) con respecto a la profundidad y a la distancia tierra adentro desde la costa, las líneas gris (abajo) y negra (arriba) son la profundidad de la base y la cima de la zona de mezcla, respectivamente.

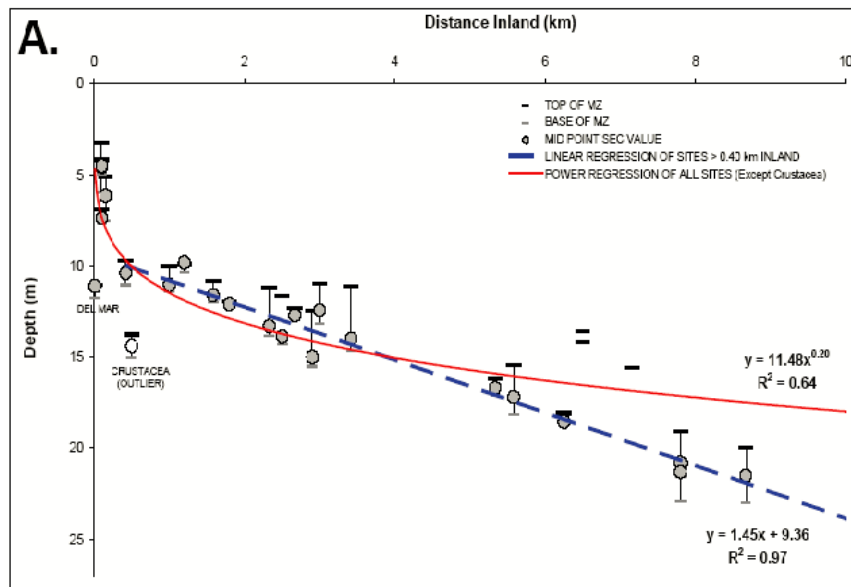


Figura 27. Mediciones de profundidad a la zona de mezcla tomado de Beddows, 2004.

De la Figura 27 se han tomado los datos de profundidad y distancia a la costa correspondientes con las mediciones de SEC Beddows (2004) y se han sobrepuesto en la sección de Crucero-Puerto. A pesar de que los datos corresponden a otra parte del caribe, hay un buen ajuste con lo obtenido mediante el método de SEV en este trabajo. Sin embargo la modelación del acuífero realizada con los parámetros presentados en el recuadro siguiente no ajusta en forma alguna con los resultados obtenidos, entre otras, la causa es la diferencia de escala de los estudios.

MAP	1325 mm/year
Recharge (R)	60% and 30% MAP
Flow Path Length to Divide (1/2 L)	100, 50, 20 km
Hydraulic Conductivity (K)	10^4 and 10^5 m/day

*MAP: Mean Annual Precipitation

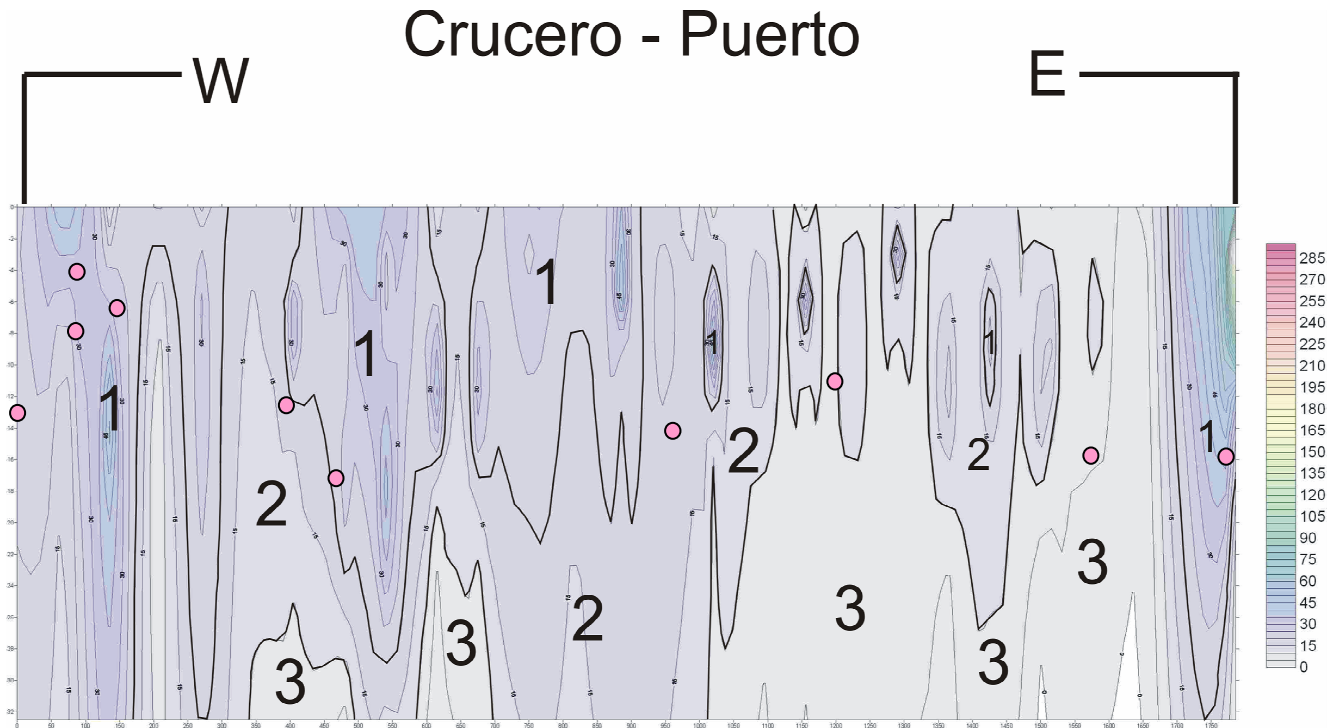


Figura 28. Sobreposición de puntos de medición de SEC (representantes de la zona de mezcla), en sección geoelectrónica. Se observa buena correspondencia puntual.

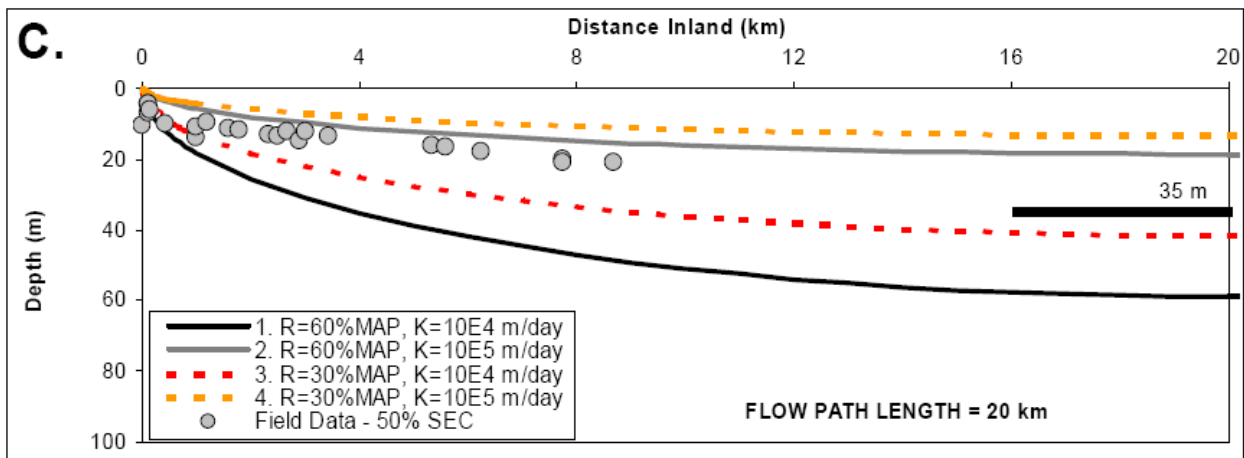


Figura 29. Modelación de un acuífero caribeño. Nótese la gran simetría de este modelo versus la gran variación vertical de la sección de la Figura 28, no existe correspondencia obvia lo cual puede deberse entre otras razones a la diferencia de escalas entre los dos estudios.

Modelo de Glover

El caso del acuífero de Puerto Morelos, hace pensar inmediatamente en la corrección que Glover hace a la ley de Ghyben Herzberg. Desafortunadamente queda para trabajos posteriores la realización de mediciones y cálculo de variables hidrogeológicas para esta área específica de Quintana Roo, sin embargo con ayuda de la conductividad hidráulica (K) y gasto hidráulico (Q) obtenidos por Beddows (2004) en zonas vecinas, las dimensiones de las desembocaduras de agua dulce al mar obtenidas en las secciones y algunas constantes conocidas (ρ_s, ρ_f) se obtendrá, según Glover, la profundidad de la interfase salina “ z ” para cada una de las distancias “ x ” de los puntos sobrepuestos en la sección Crucero-Puerto (mismos donde Beddows midió SEC para determinar la profundidad de la interfase salina) y la distancia mar adentro de los manantiales submarinos “ x_0 ”. De las ecuaciones (35) y (36) se tendrá que:

		$K=10^4[m/d]$		$\rho_f=1000[kg/m^3]$		$Q = 8.64 \times 10^4 [m^3/día]$		$\rho_s=1025[kg/m^3]$				
		$l_{Norte}=20 [m]$		$l_{Mini}=13 [m]$		$l_{Doble2}=25$		$l_{Pargos}=13$				
		$Q'_{Norte} = 4320$		$Q'_{Mini} = 2700$		$Q'_{Doble2} = 3456$		$Q'_{Pargos} = 6646$				
$x[m]$	$z_0^2[m^2]$	$z[m]$	$x_0=0.864$	z_0^2	z	$x_0=0.54$	z_0^2	z	$x_0=0.6912$	z_0^2	z	$x_0=13.2932$
86	300.201984	17.32634		186.9264	13.6721		237.5169	15.41158		464.3119	21.5479	
148	514.473984	22.68202		320.8464	17.91219		407.3969	20.18408		793.9535	28.17718	
406.2	1406.813184	37.50751		878.5584	29.64049		1114.865	33.38959		2166.751	46.54838	
468	1620.393984	40.25412		1012.0464	31.81268		1284.197	35.83569		2495.329	49.95327	
972.3	3363.254784	57.99358		2101.3344	45.84031		2665.979	51.63312		5176.592	71.94854	
1212	4191.657984	64.74301		2619.0864	51.17701		3322.757	57.64336		6451.029	80.3183	
1575	5446.185984	73.79828		3403.1664	58.33666		4317.377	65.70675		8381.027	91.54795	
1779	6151.209984	78.42965		3843.8064	61.99844		4876.337	69.83077		9465.654	97.29159	

Tabla 3. Los datos que alimentan las ecuaciones (35) y (36) del capítulo III cuyos resultados se muestran en las columnas “ z ” y “ x_0 ”(ambos en metros), se encuentran en la parte superior de la tabla. l_{Norte} , l_{Mini} , l_{Doble2} , l_{Pargos} son el ancho de las desembocaduras de agua dulce submarinas.

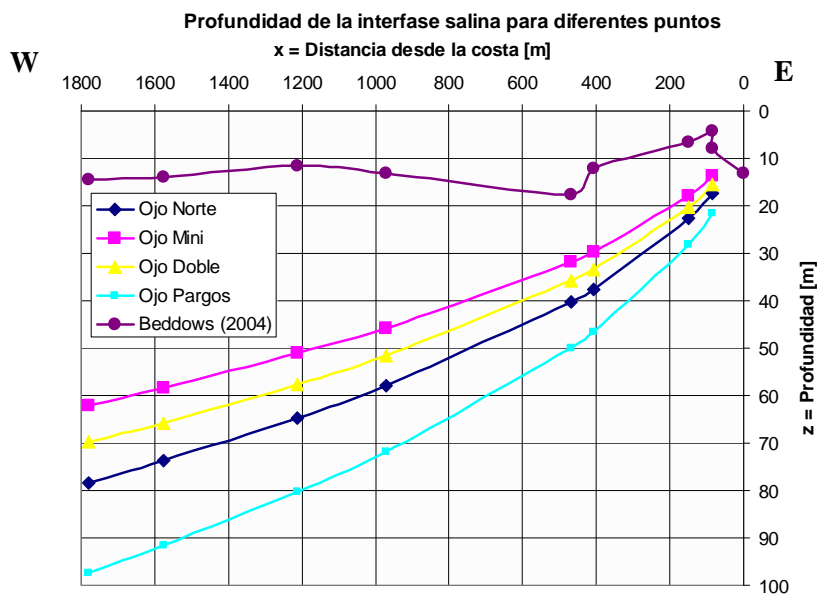


Figura 30. Profundidad de la interfase salina en “dirección de los diferentes ojos de agua” junto con las observaciones de Beddows (2004)

Las profundidades obtenidas y dibujadas en la Figura 30, no concuerdan con las medidas por Beddows, tampoco modelan el comportamiento de las masas de agua observado en las secciones geofísicas, aunque bien es cierto que los datos que alimentaron las ecuaciones no son los que reflejan las características específicas de la zona. Por otro lado, la distancia mar adentro de los manantiales submarinos es completamente errónea, situación seguramente debida a un Q muy diferente al real y/o a dimensiones incorrectas de las desembocaduras de agua dulce.

Conductancia Eléctrica Específica

Si sabemos que $1\text{mS/cm} = 0.1\text{S/m}$, entonces cada valor de SEC mostrado en las figuras siguientes (Beddows, 2004), deberá ser multiplicado por este factor para poder comparar directamente estos valores con los obtenidos por medio de la prospección geofísica.

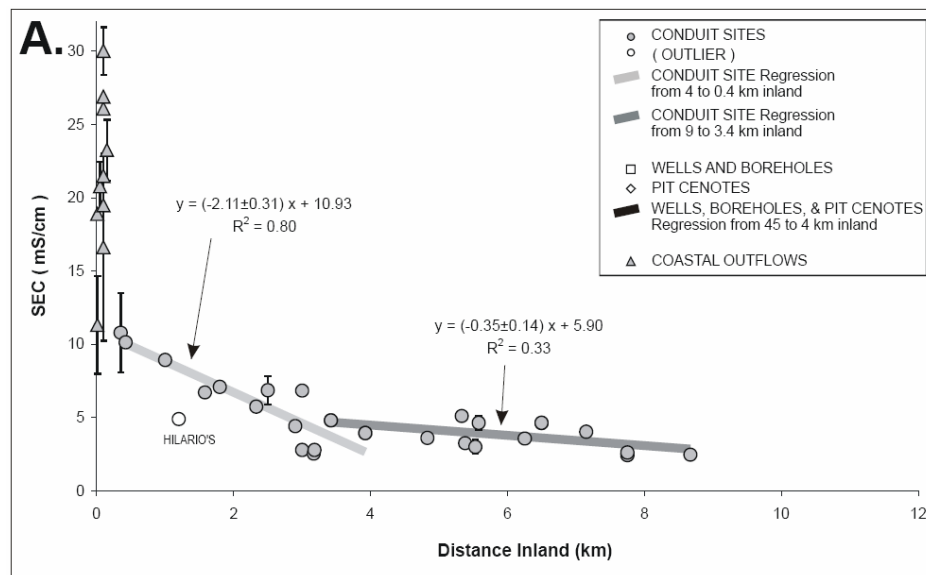


Figura 30. SEC del agua dulce, según Beddows (2004)

La Figura 30 representa la SEC del **agua dulce** con respecto a la distancia desde la costa, medida en conductos y salidas al mar. Las barras representan la desviación estándar para lugares donde se realizó más de una medición. En el área de interés para este trabajo (distancia cero a la costa), el rango de variación de la conductividad es de: $0.75\text{-}3.10\text{ S/m}$ ($0.32\text{-}1.33\ \Omega\text{m}$).

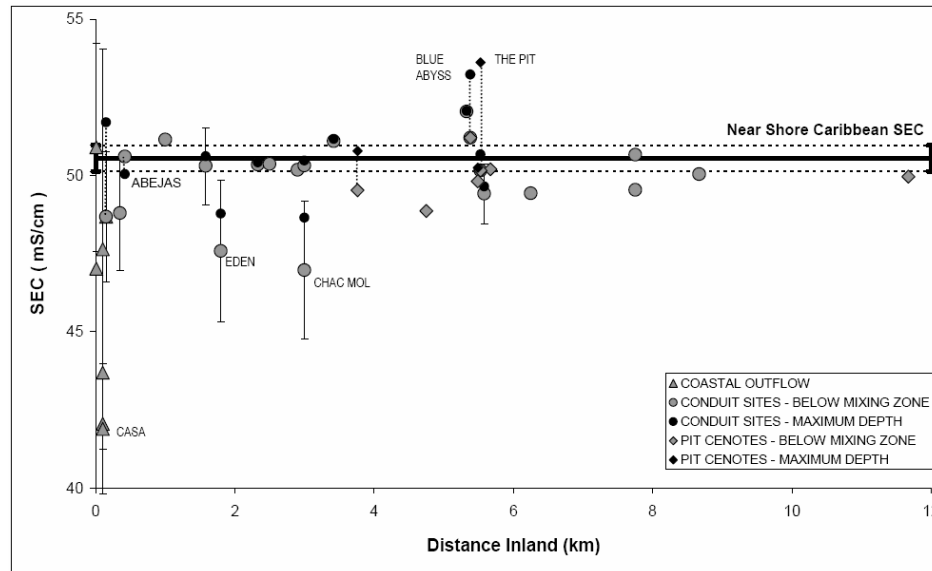


Figura 29. SEC del agua dulce, según Beddows (2004)

Esta otra figura representa los valores de SEC medida en cenotes, conductos y salidas al mar de la zona de **agua salada** vs la distancia tierra adentro desde la costa. Las barras representan la desviación estándar para lugares donde se realizaron varias mediciones. Para una distancia cero a la costa, el rango de variación en la conductividad para el agua salada es de: 4-5.5S/m ($0.18-0.25 \Omega m$). Al recordar el resultado de la interpretación geofísica:

Unidad	Resistividad	Descripción
1	$\rho \geq 20$	Agua dulce
2	$10 \leq \rho < 20$	Caliza saturada de Agua Salobre
3	$\rho < 10$	Caliza saturada con Agua Salada

resulta evidente que la comparación directa no es posible, pues las mediciones en pozos, cenotes y salidas al mar son puntuales y no involucran la masa rocosa. Las mediciones geofísicas, en cambio, obtienen la conductividad de los fluidos en el subsuelo junto con la aportación de la conductividad de la roca que los contiene, además el radio de influencia de cada medición geoelectrica es bastante amplio con respecto a una medición de SEC.

V. Resultados y Conclusiones

Resultados

- ✓ Se encontró una buena correspondencia entre las localizaciones esperadas de las salidas de agua dulce al mar y las anomalías resistivas obtenidas mediante ambos métodos, con dimensiones de entre 20m y 10m. Sin embargo, la correlación directa entre las conductividades obtenidas a partir de la inversión geofísica y las hidrológicas no pudo ser llevada a cabo.
- ✓ Los efectos de PI fueron corregidos de manera satisfactoria en casi todos los sondeos que presentaron el problema.
- ✓ Gran parte de los sondeos electromagnéticos profundizaron muy poco, a causa de una capa somera de alta conductividad, por lo que se podría asumir que el agua salada ocupa todo el espacio restante, circunstancia que sugiere un alto desarrollo de porosidad terciaria.
- ✓ Las secciones realizadas con los resultados de la inversión de los SEVs muestran estructuras alargadas en contraste con la buena escala de detalle obtenida con los TEMs.
- ✓ La cantidad de datos no fue suficiente para elaborar mapas de resistividad sin los cuales sólo es posible caracterizar la región en un área muy restringida.
- ✓ La disposición de las masas de agua en las dos localizaciones muestreadas no existe alguna característica que sugiera la presencia de interfase salina. Por esta razón además de las diferentes escalas de estudio, la comparación de la sección Crucero-Puerto con el modelo de Beddows para el espesor del lente de agua dulce no fue posible.

Conclusiones

Etapa de Adquisición:

- Conocer y probar el arreglo más conveniente de acuerdo a nuestro objetivo es la tarea primaria en la planeación de la campaña de campo.
- El modelado directo es una herramienta muy poderosa de predicción y control de la respuesta de las curvas de campo, por lo mismo después de la elección del arreglo, éste es esencial a lo largo de toda la etapa de adquisición.
- La realización de un cronograma de trabajo considerando el clima y la cantidad de gente necesaria y/o disponible, es de vital importancia para obtener los resultados más satisfactorios al final de la campaña.
- Confeccionar una hoja de campo a manera de bitácora con un “check list” incluido facilita en gran medida el trabajo de gabinete*.

Etapa de procesamiento

- Aunque el error cometido en los SEVs al dejar de considerar la condición de que $AB=5MN$ es pequeño, tenerlo en cuenta y hacer el ajuste correspondiente evitará la sobreestimación de la resistividad.
- Las respuestas positivas en tiempos tempranos de las curvas de decaimiento del campo magnético, seguidas por respuestas negativas en tiempos tardíos, indican que la fuente es un cuerpo *conductor* polarizable. Evidentemente para que el efecto por PI sea significativo, el material conductor debe estar presente inmediatamente debajo del loop del transmisor de tal manera que las corrientes de inducción sean suficientemente fuertes y permanezcan suficiente tiempo para polarizar el cuerpo. Estos fuertes efectos de PI ocurren dentro o muy cerca del loop transmisor.
- Ambos métodos son sensibles a la heterogeneidad del medio, lo que se pone de manifiesto en la falta de una tendencia regional en las curvas de campo. Bajo estas circunstancias el análisis de cada curva de sondeo por separado se vuelve imprescindible.

* Al final de este capítulo se presenta una sugerencia de hoja de campo para los sondeos electromagnéticos.

- La elección de un método de interpolación no es trivial, la mejor decisión será aquella que tome en cuenta la naturaleza del medio, la cantidad de datos disponibles y acentúe o respete las características que necesitemos observar.

Etapa de Interpretación.

- El agua dulce proveniente del continente llega a los manantiales a través de conductos con un diámetro de entre 10 y 40m. La estructura rocosa aparece completamente saturada de agua salada, evidencia de un alto desarrollo de porosidad terciaria.
- Tierra adentro, la distribución de las masas de agua aparece en la sección Crucero-Puerto como preferentemente vertical y de geometría bastante irregular, con zonas especialmente salinas en la cercanía al pueblo de Puerto Morelos.
- En cuanto a la comparación de las técnicas, se puede destacar la profundidad media de penetración de los TEMs en zonas relativamente resistivas, ya que con un loop transmisor de 10x10m se alcanzaron 60m con respecto a los 28m alcanzados por los SEVs con una abertura de $AB=136m$.
- La inducción de corriente en la técnica de TEM es a través de un volumen de roca más restringido en comparación con el volumen de roca involucrado por la conducción de corriente en la técnica de SEV, en el momento de la medición, razón por la cual los datos de la primera son más puntuales.
- La desventaja de los TEMs en este medio es que, al haber encontrado una capa de alta conductividad, la inducción de corrientes a mayor profundidad se vio seriamente limitada, razón por la cual la integración de buena parte de los sondeos a las secciones fue deficiente.
- Los datos de SEC tomados de Beddows (2004) son puntuales y muestreados dentro de una masa únicamente acuosa. Por el contrario, un dato de diferencia de potencial obtenido con la técnica de SEV o TEM se asigna a un punto de atribución, sin embargo es el resultado de la caída de voltaje a través de un volumen, de tal forma que la resistividad muestreada tendrá

aportaciones de la roca y los fluidos, por lo tanto la comparación de mediciones de SEC y resistividad no es directamente aplicable. La modelación del lente de agua dulce realizada por la misma autora no se cumple en esta pequeña porción del área de estudio.

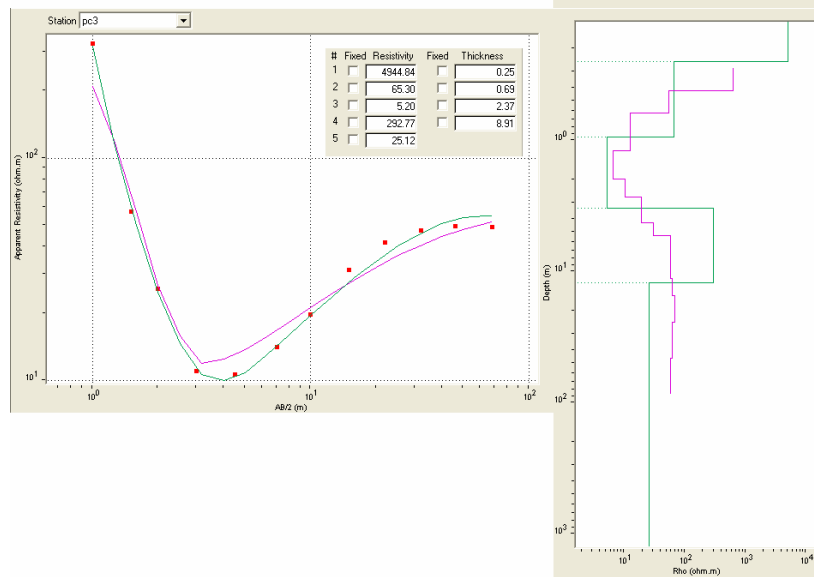
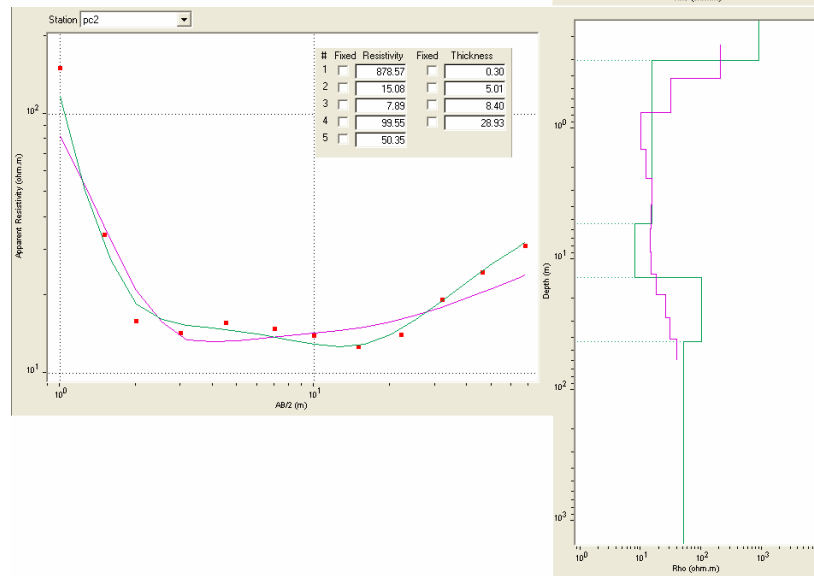
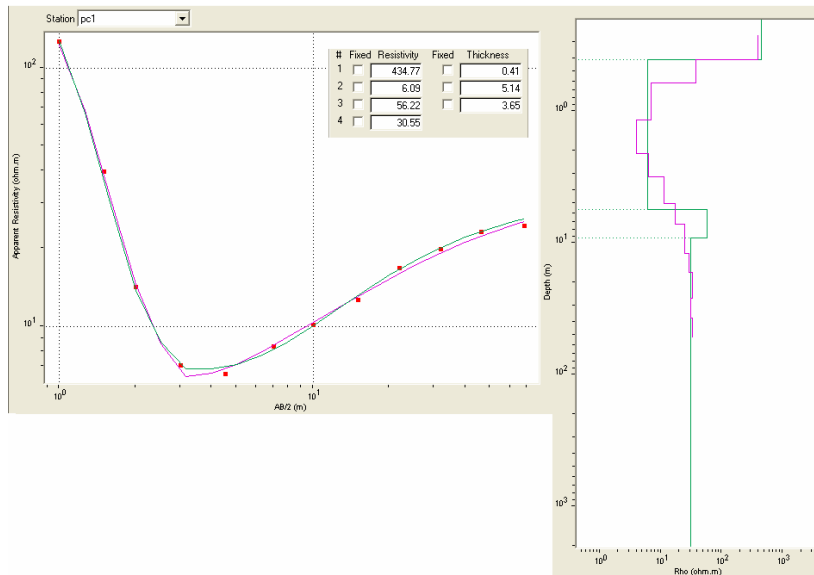
- Los valores de profundidad obtenidos por medio de la corrección de Glover a la ley de Ghyben-Herzberg no coinciden con los observados por Beddows ni con las secciones geoelectricas obtenidas en este trabajo. Lo anterior es a causa de que los datos que alimentan las ecuaciones no son los de la zona de estudio y probablemente tampoco correspondan con la temporada del año en la que fueron realizadas las mediciones geoelectricas.
- La información de pozos en la zona (niveles estáticos, profundidad de la interfase salina), es indispensable pues con ella sería posible fijar la profundidad y/o el espesor de una capa o varias capas en el proceso de inversión geofísica del o los sondeos cercanos al pozo.
- Un estudio simultáneo de PI y SEV puede resultar de gran ayuda para trabajos posteriores.
- La heterogeneidad de un medio kárstico aunado a la existencia de un medio costero, obliga a extremar el cuidado del trabajo de campo y a obtener la mayor cantidad de información posible, en consideración con el detalle que quiera proporcionarse a la interpretación, para respaldar y corroborar los resultados de la misma.

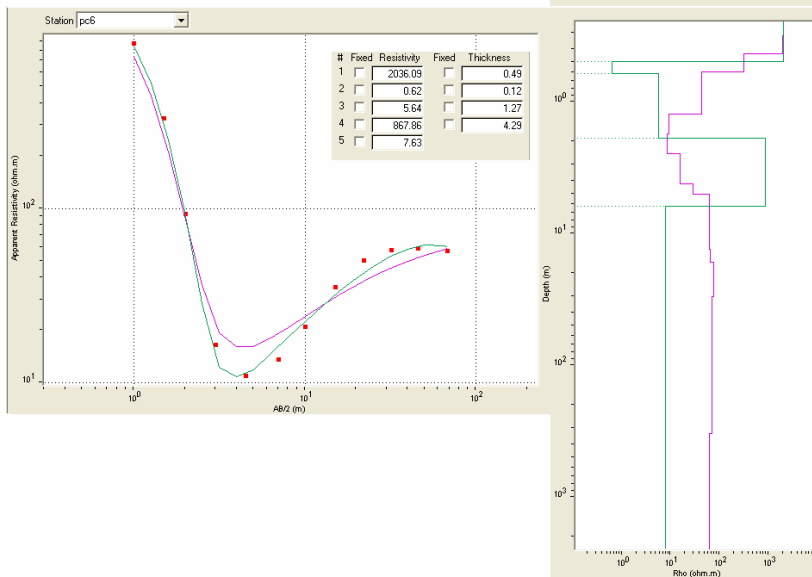
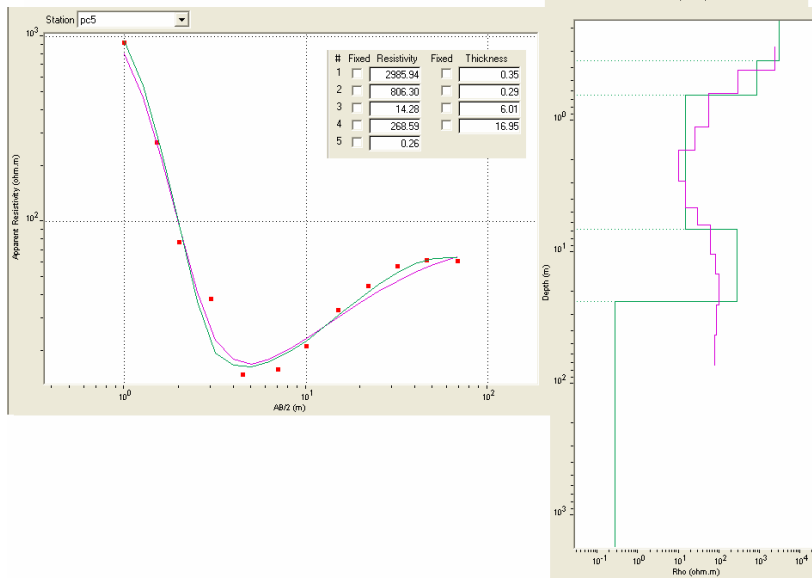
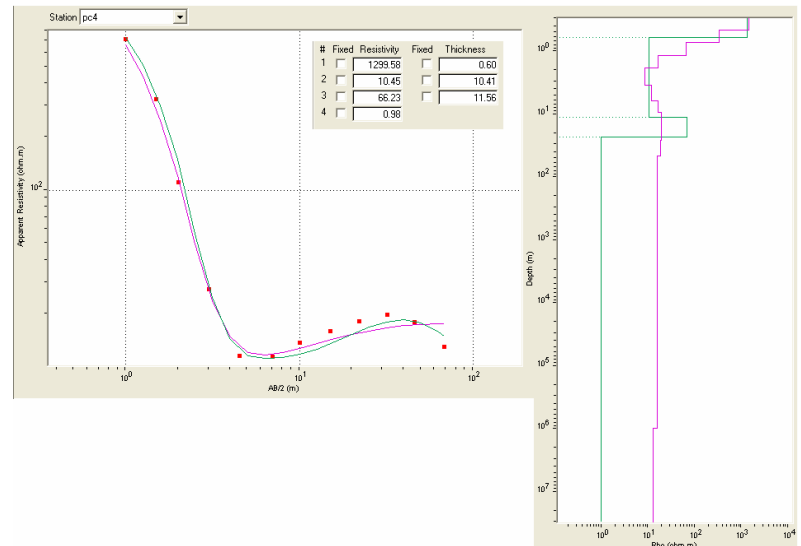
Bibliografía

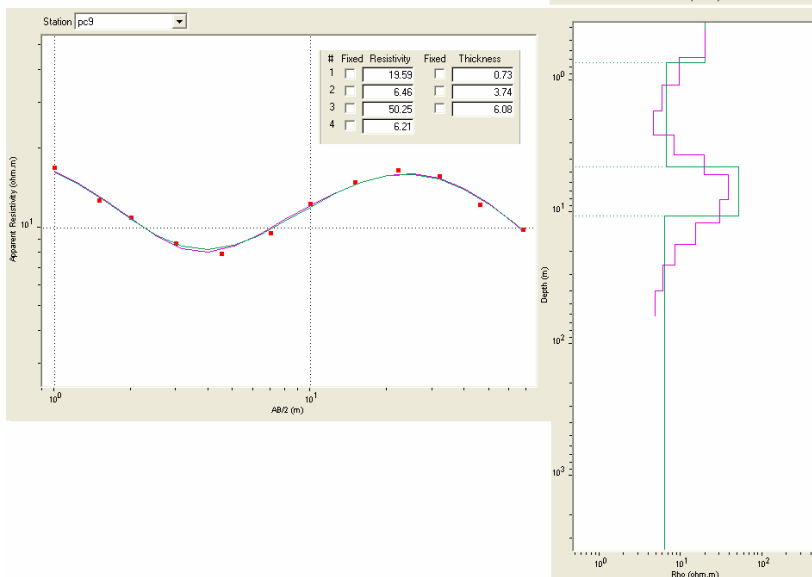
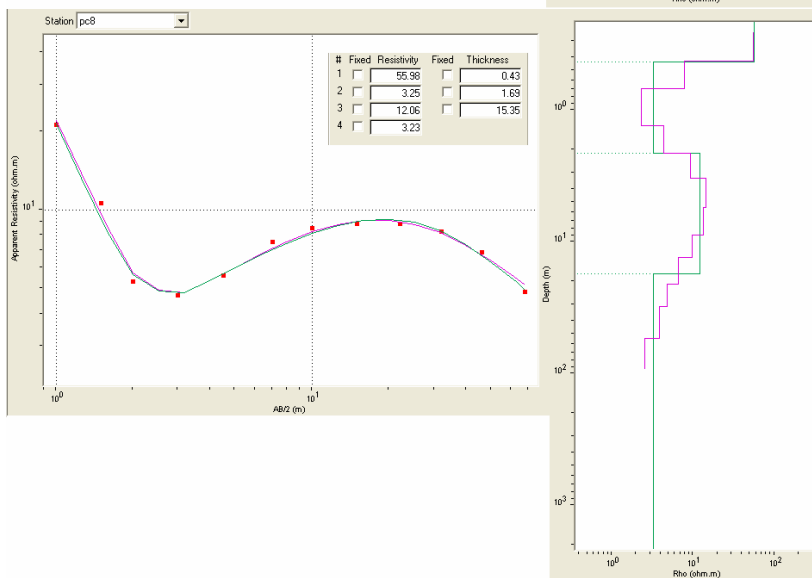
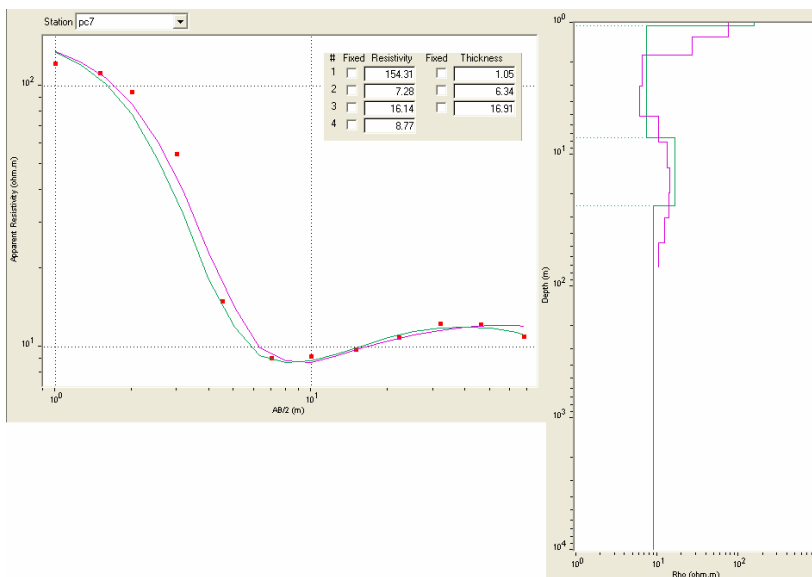
1. Batllori, E. & Febles, J. (2002) El Agua Subterránea en el desarrollo regional de la península de Yucatán. *Avance y Perspectiva*, **21**, Cinvestav Mérida, México
2. Beddows, P. P. L. Smart, et al.; 2002. Density stratified ground water circulation on the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula, Mexico: Hydrogeology and Biology of Post-Paleozoic Carbonate Aquifers Karst Waters Institute.
3. Domenico, P. & Schwars, F. (1990) Physical and Chemical Hidrogeology: John Wiley & Sons, USA.
4. Fittterman, D & Stewart, M. (1986) Transient electromagnetic sounding for groundwater: *Geophysics*, **51**, 995-1005
5. Ford, D. & Williams, P. (1994) Karst Geomorphology and Hydrology: Chapman & Hall, Great Britain
6. Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Exploración Geohidrológica, Jefatura de Proyecto de Evaluación Preliminar (1990) Síntesis de las condiciones Geohidrológicas del área de Cancún – Tulum en el estado de Quintana Roo: *Comisión nacional del Agua (CNA)*, México.
7. Grant & West (1965) Interpretation theory in applied geophysics: Mc Graw Hill, USA
Homman, G. & Newman, A. (1990) Transientelectromagnetic responses of surficial, polarizable patches. *Geophysics*, **55**, 1098-1100.
8. Koefoed, O. (1979) Geosounding principles 1. Resistivity Sounding Measurements: Elsevier, Holanda.
9. Lopez Ramos, E. (1976) Geología General: UNAM México, D.F.

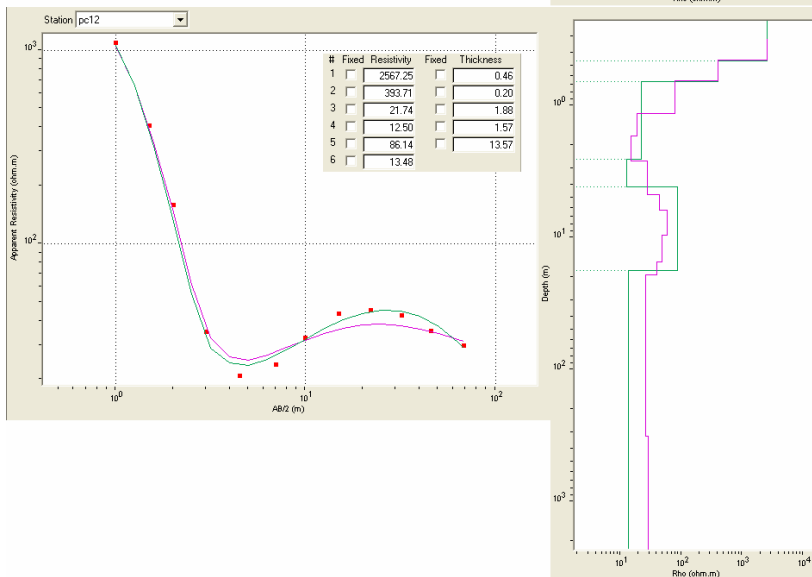
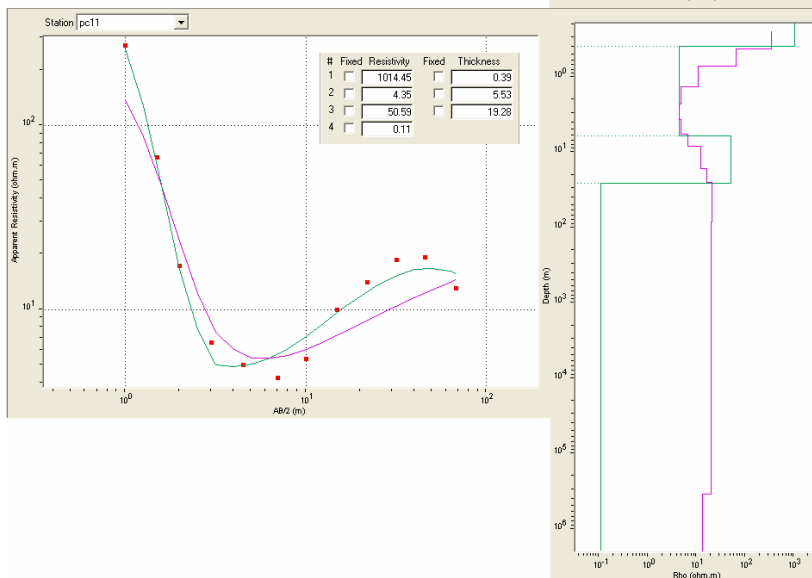
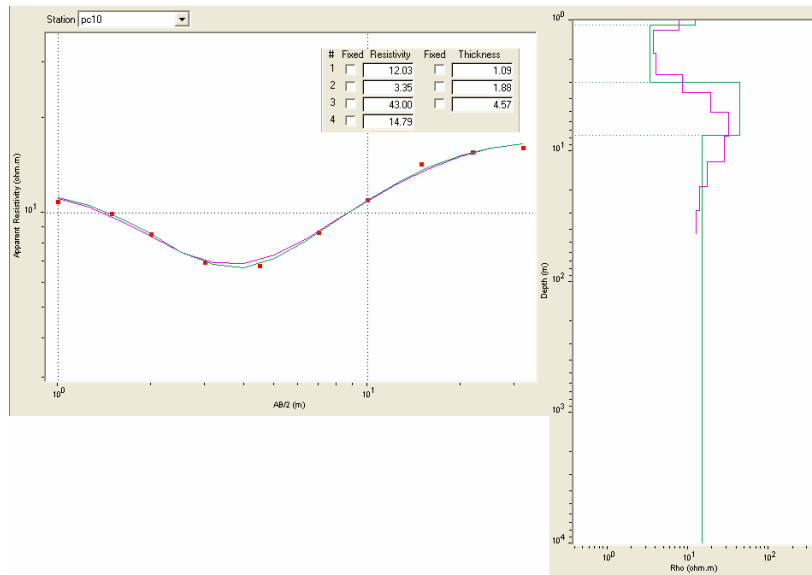
10. Martínez, A. & Martínez, C. Características geográficas similares de los territorios Kársticos del Caribe. – Estudio comparativo de Yucatán (México) y Zapata (Cuba)-: *Serie de documentos Sian Ka'an*, 5 69-98.
11. Moran, D. (1994). Geology of the Mexican Republic. The American Association of Petroleum No. 39 (AAPG)
12. New Orleans Geological Society (1962). Guide book, field trip to Peninsula de Yucatan. E.U.A.
13. Orellana, E. (1974) Prospección eléctrica por campos variables: Paraninfo, Madrid.
14. Orellana, E. (1974) Prospección eléctrica por campos estacionarios: Paraninfo, Madrid.
15. Parasnis, D. (1996) The principles of applied geophysics, 5th ed. Chapman and Hall, New York.
16. Pita, C. & Ruiz, J. (1998) Estudio Comparativo de Resistividad Utilizando Métodos de Corriente Directa (SEV) y de Inducción Electromagnética (TEM): CIGSA, México.
17. Rebolledo, M. (2005) Groundwater and Nutrient impact on the Puerto Morelos Reef: CEA, México.
18. Steinich, B. & Marín, L. (1997) Determination of flow characteristics in the aquifer of the Northwestern Peninsula of Yucatan, Mexico: *Journal of Hydrology* , **191**, 315 – 331
19. Sheriff, R. (2002) Enciclopedia Dictionary of applied Geophysics, cuarta edición: Society of Exploration Geophysicist, USA.
20. Subdirección General de Administración del Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas (1989) Sinopsis Hidrogeológica del Estado de Quintana Roo: SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos) & CNA (Comisión Nacional del Agua), México.

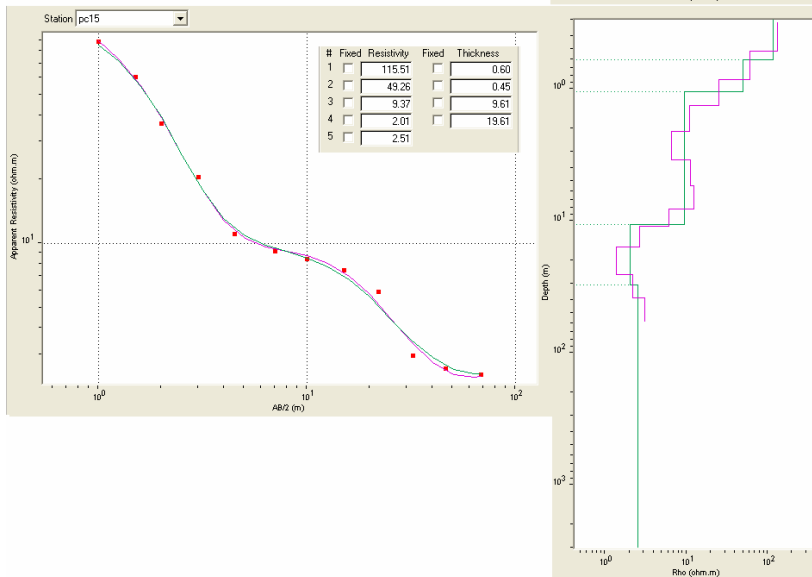
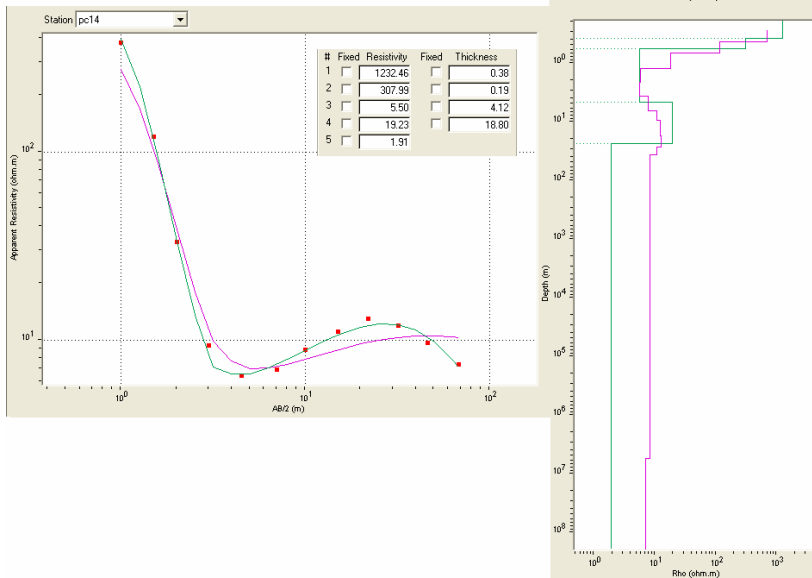
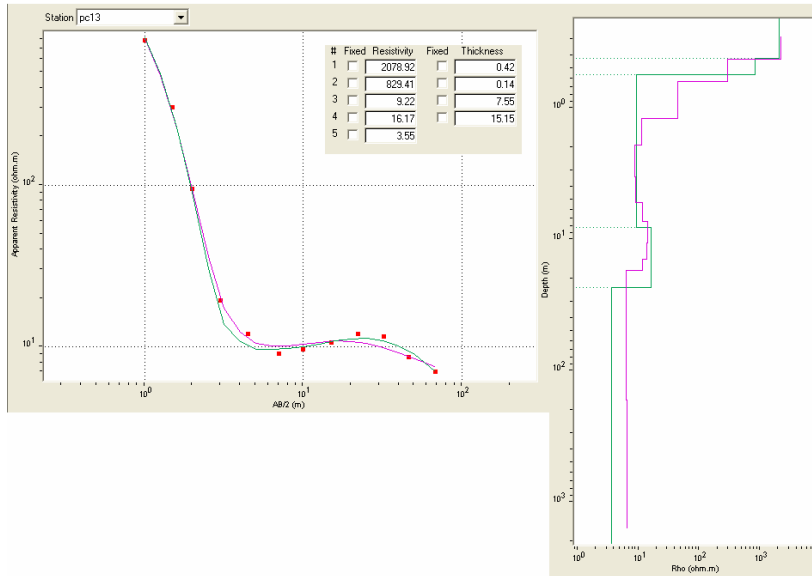
Punta Caracol I



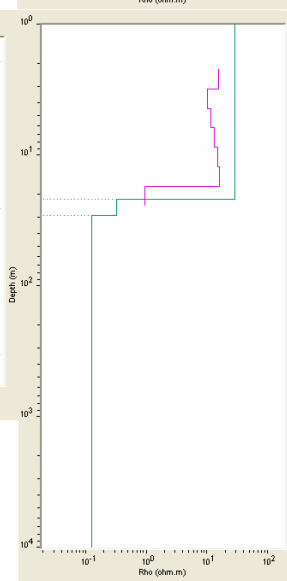
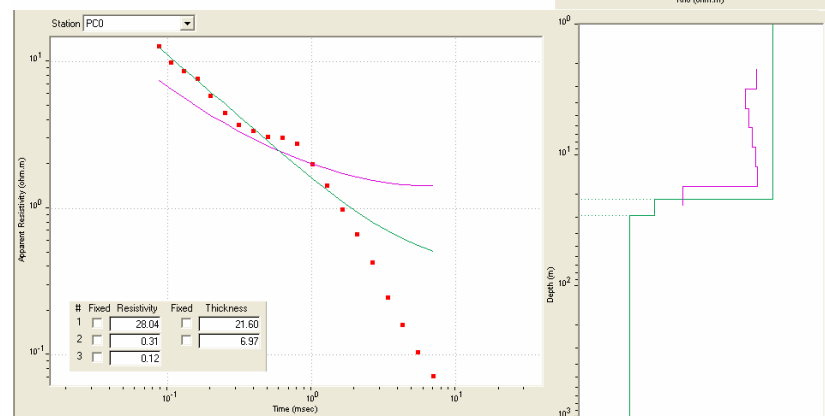
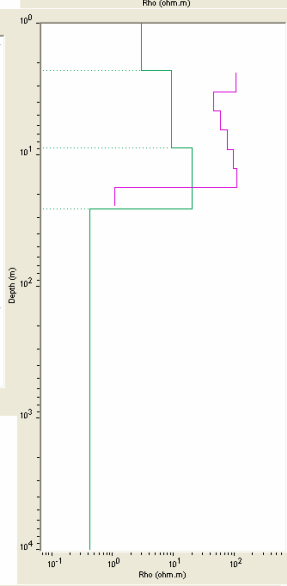
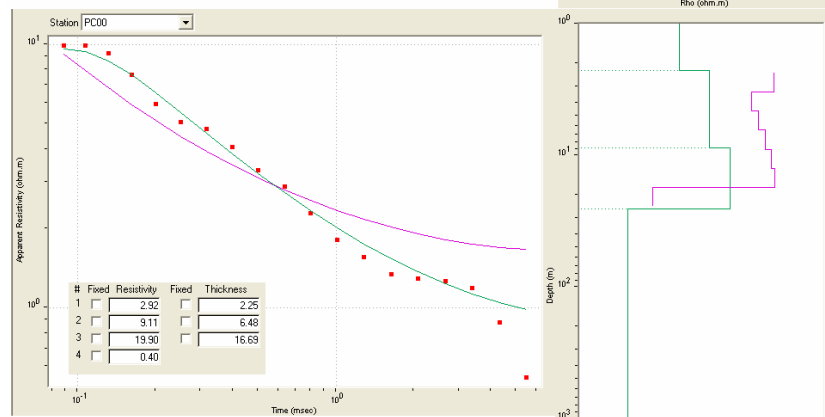
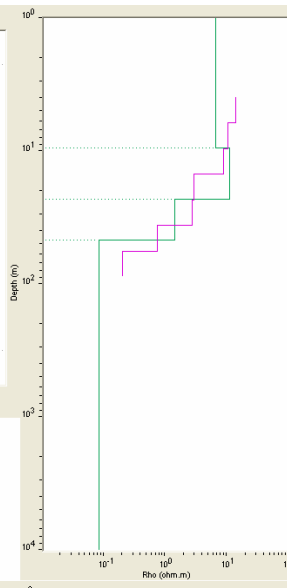
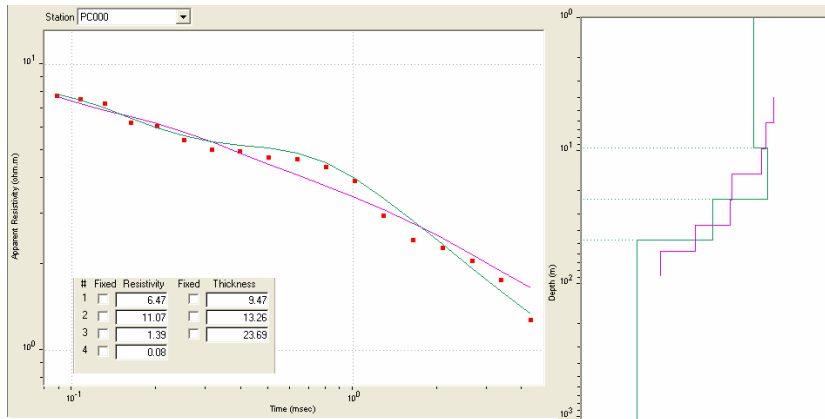


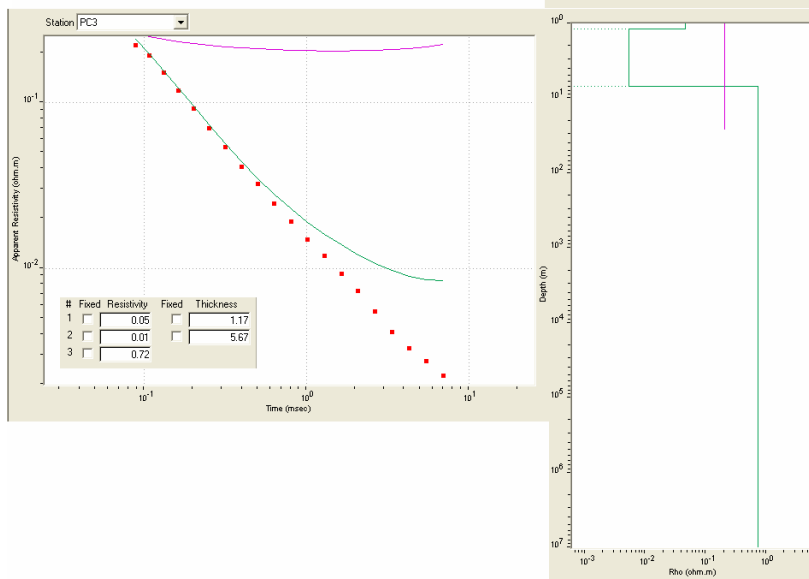
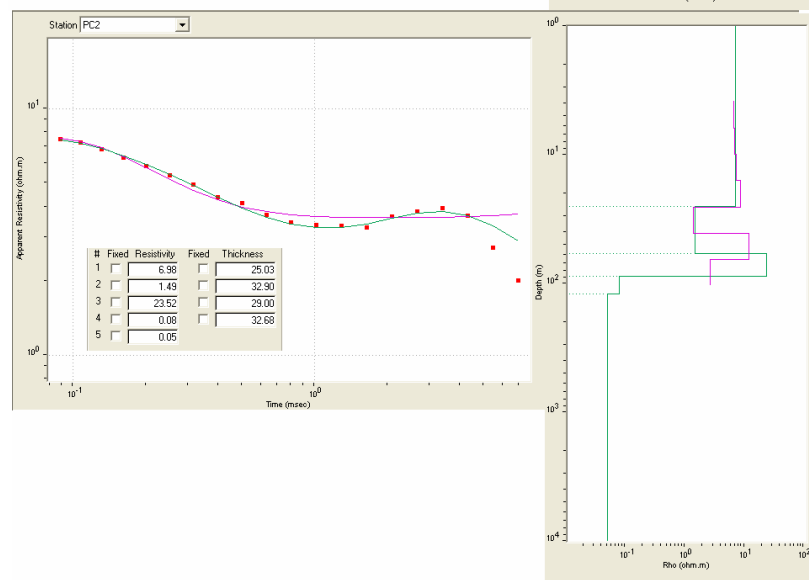
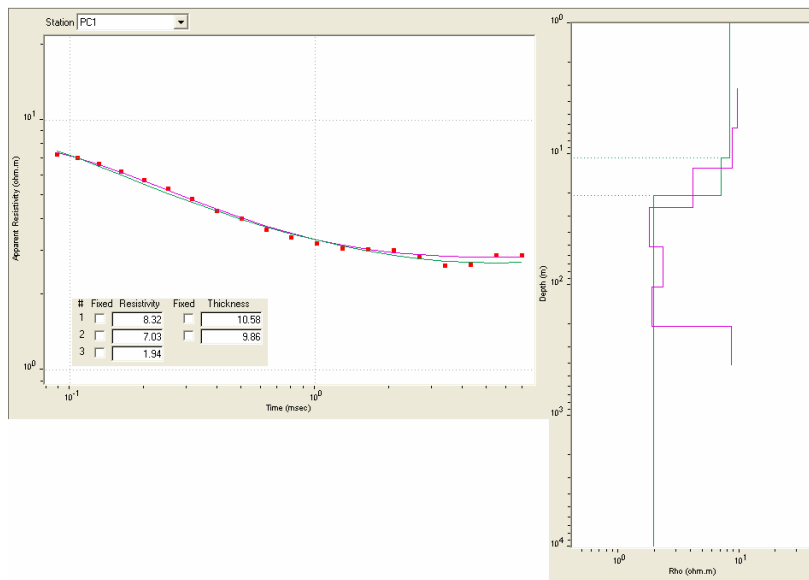


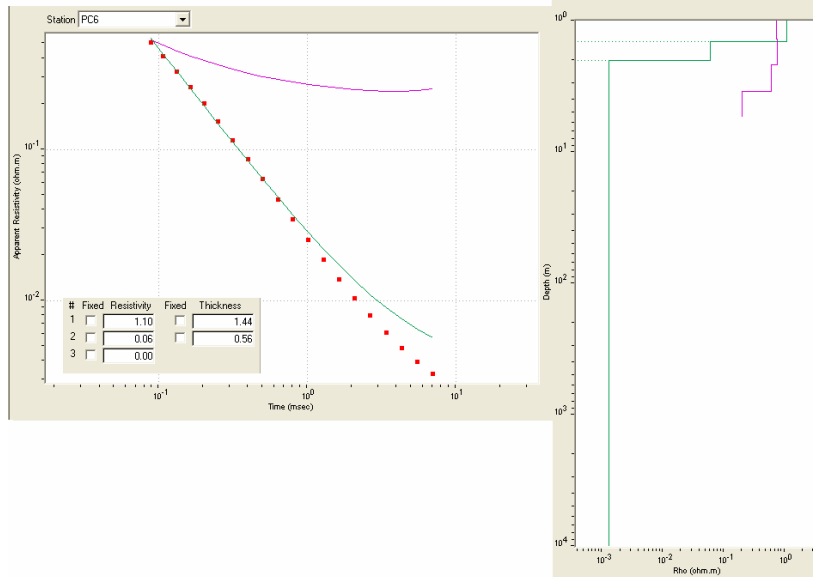
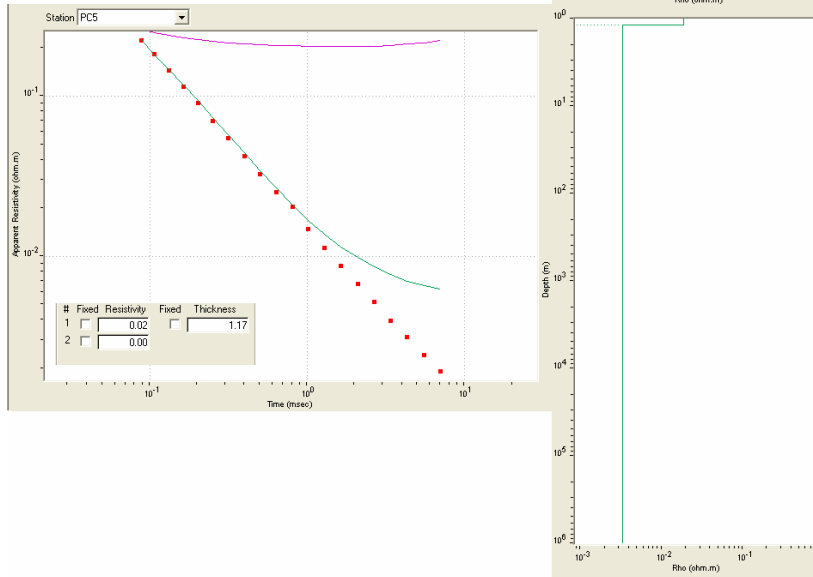
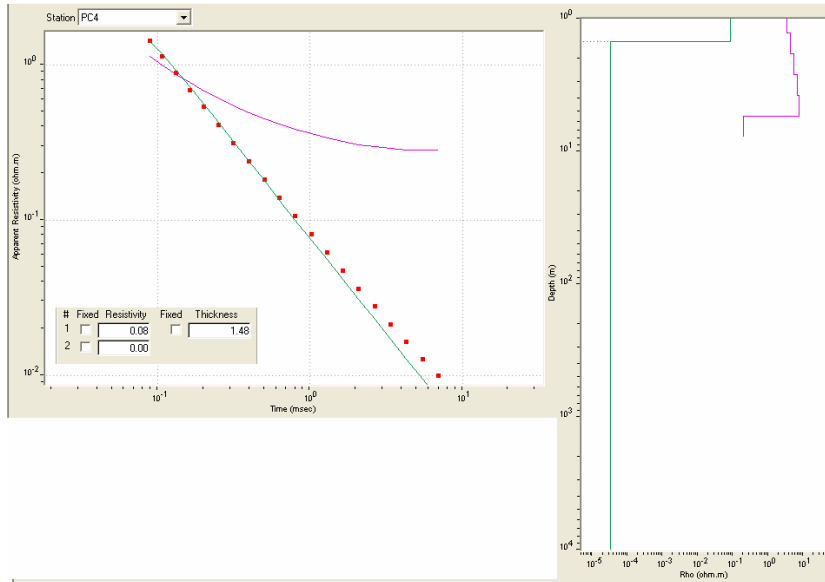


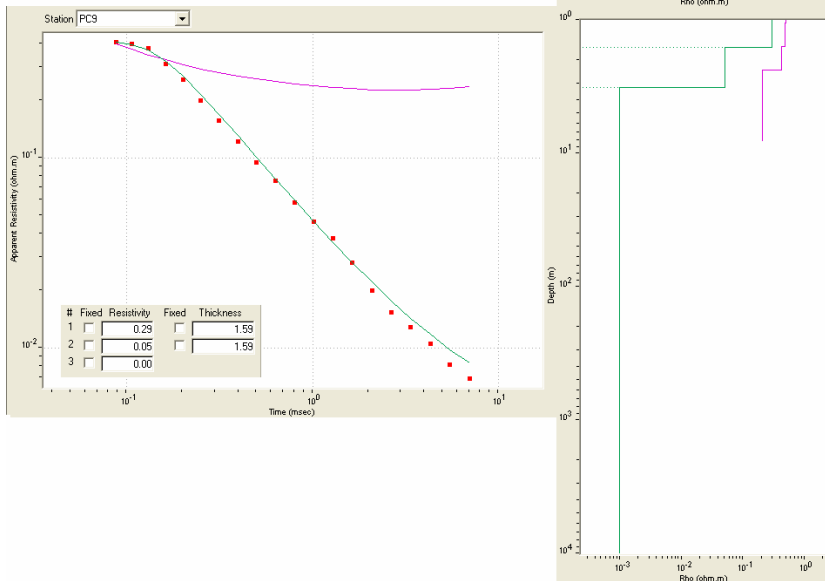
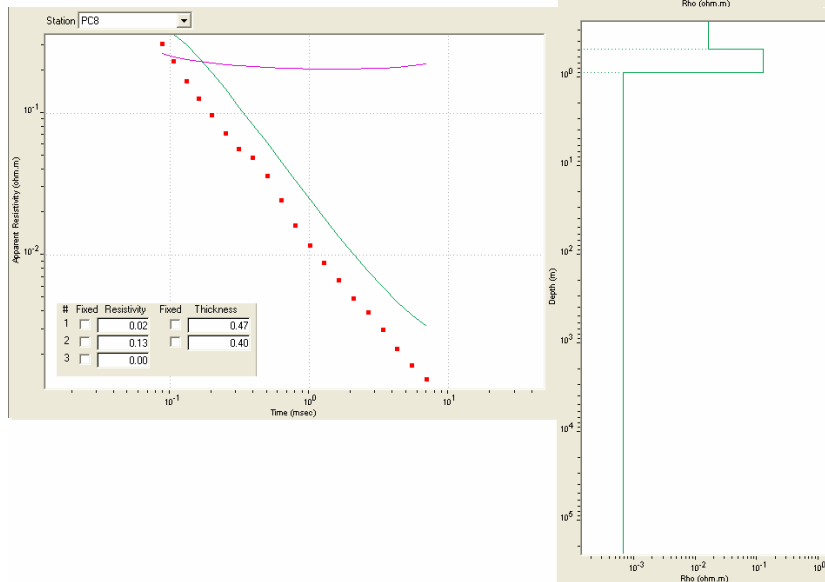
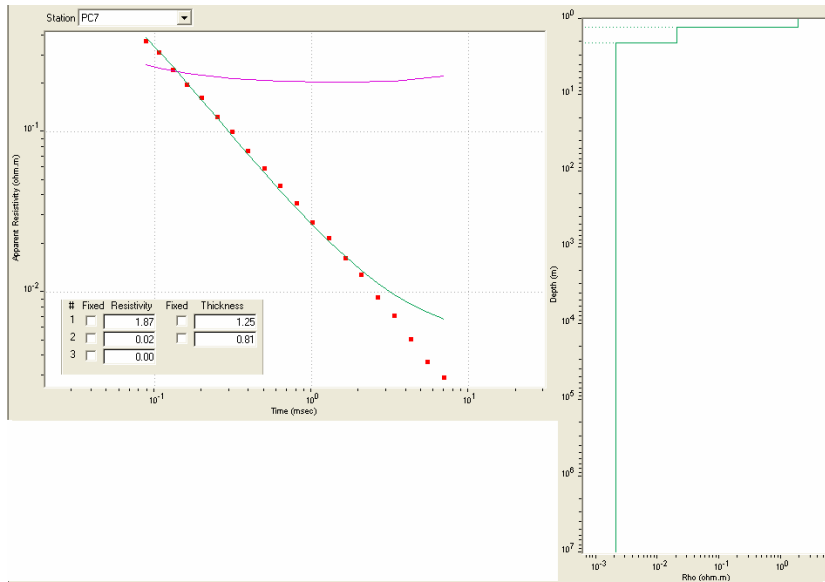


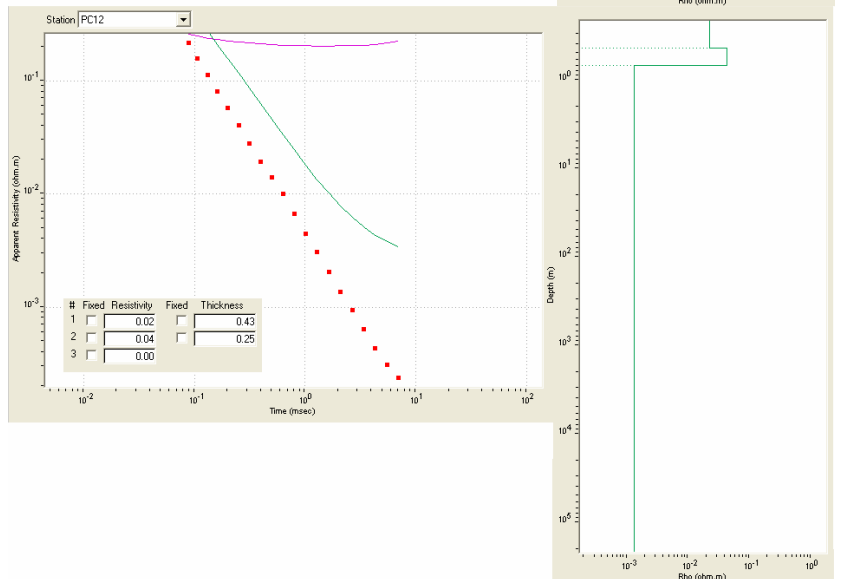
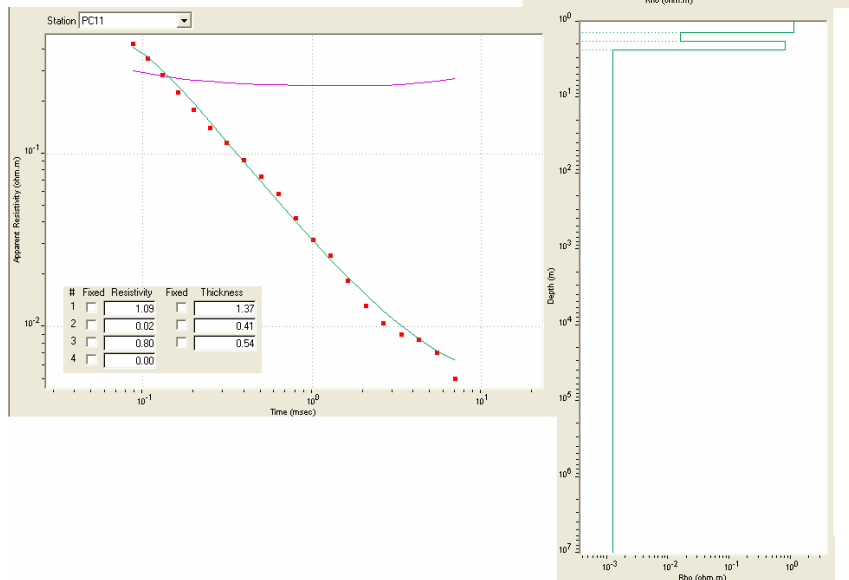
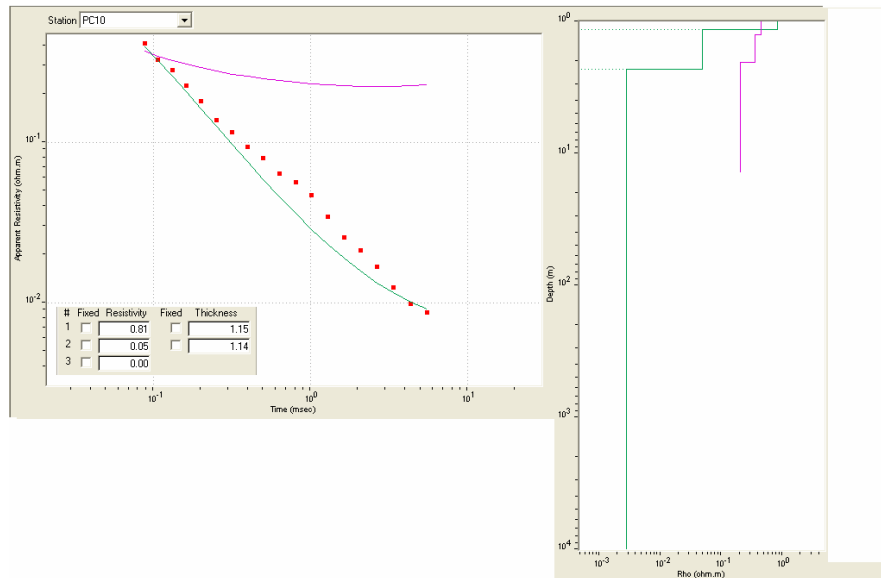
Punta Caracol II

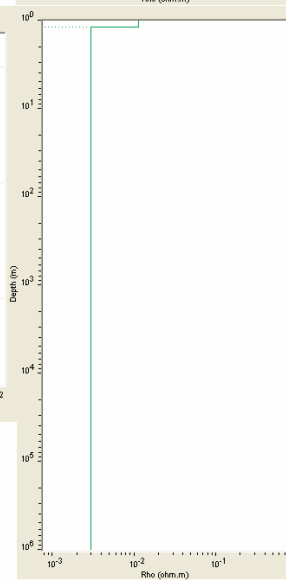
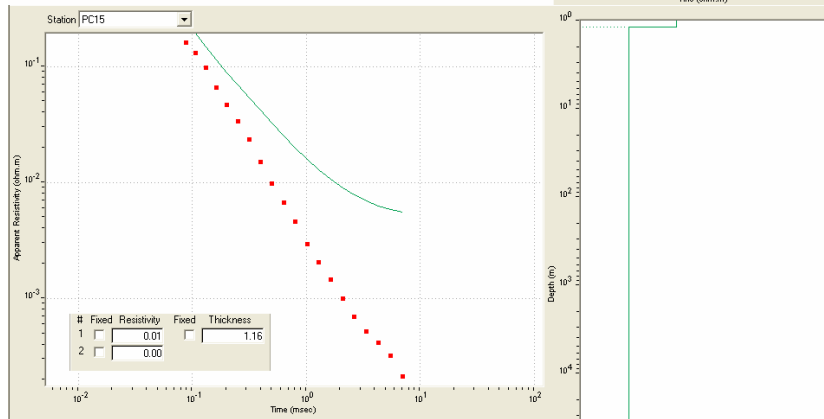
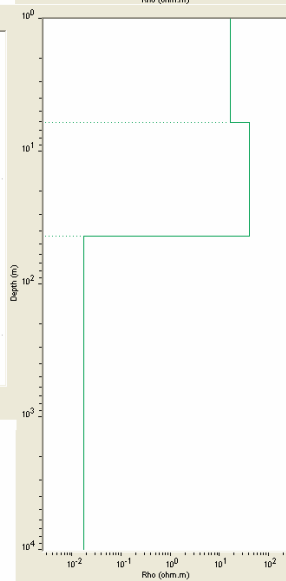
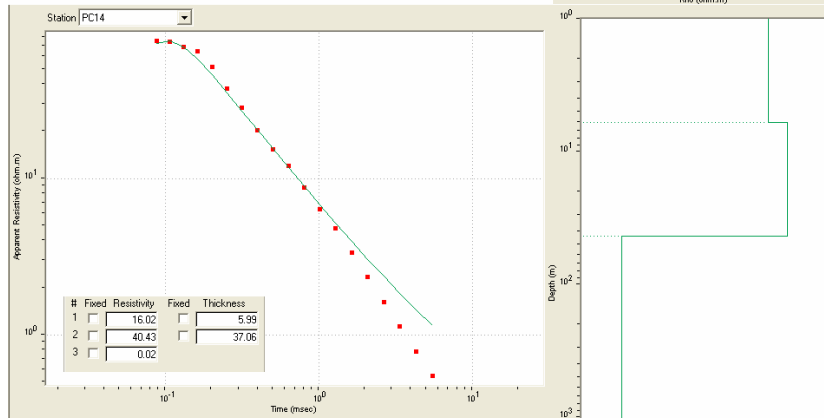
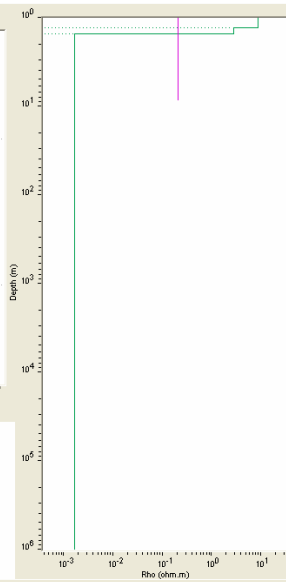
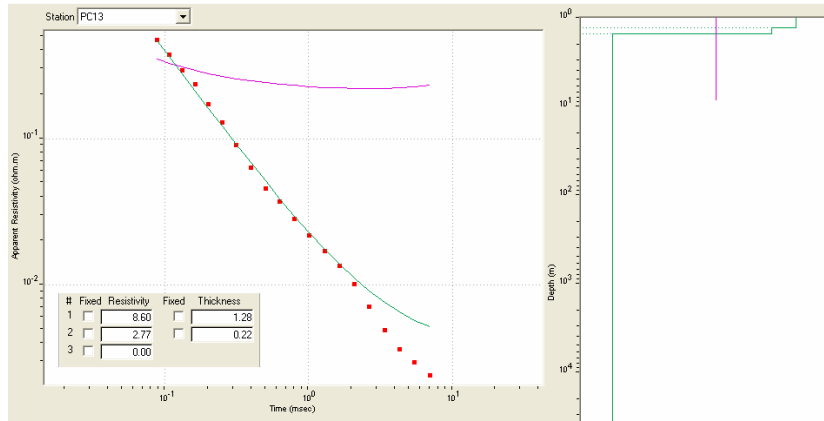


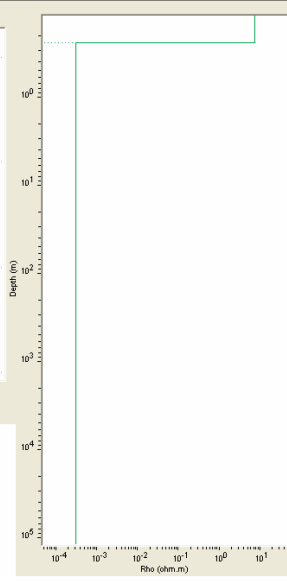
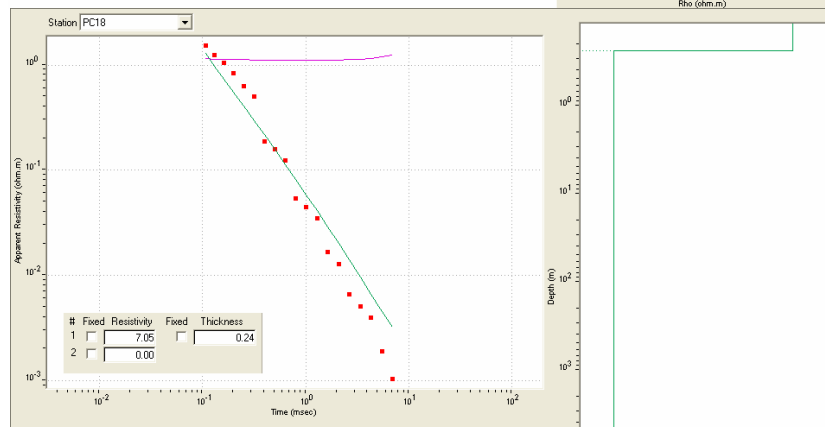
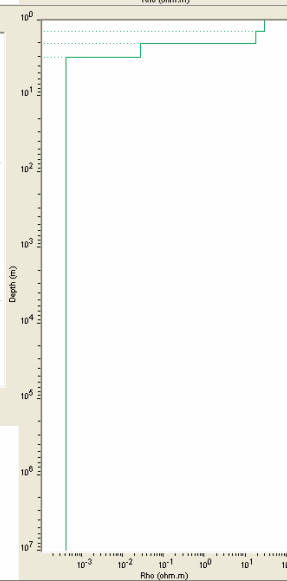
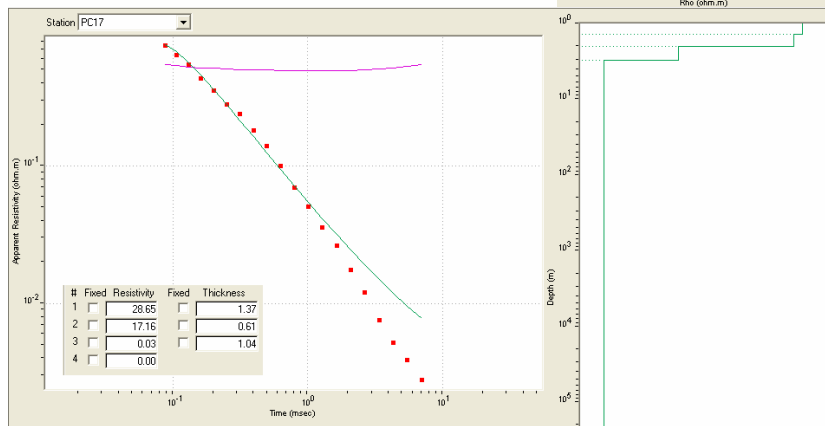
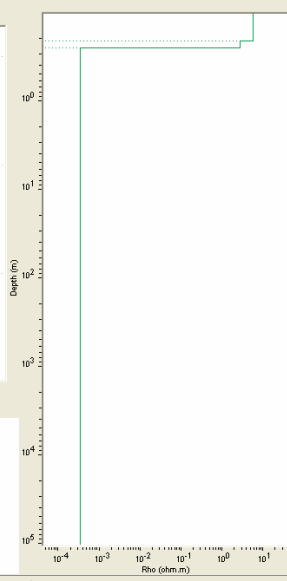
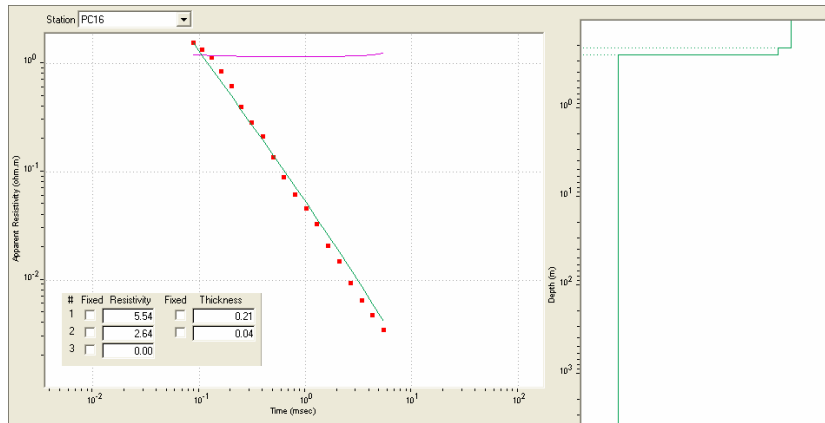


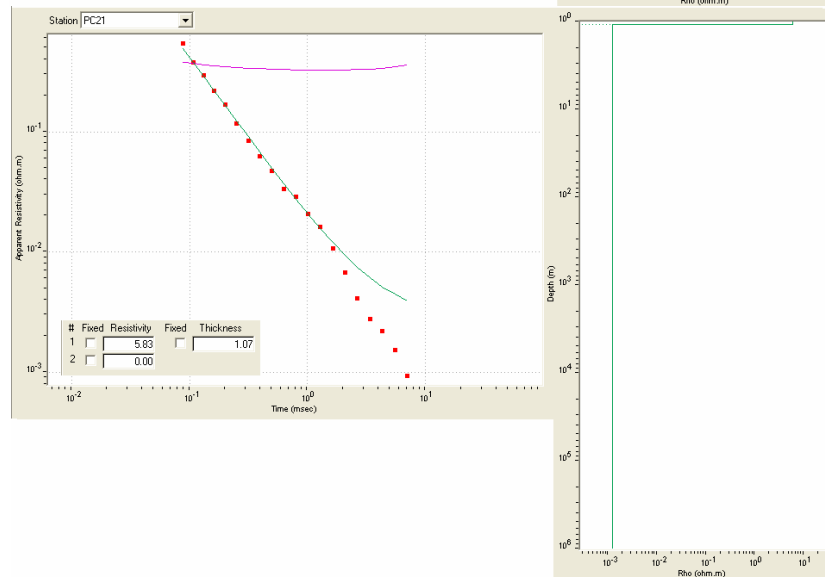
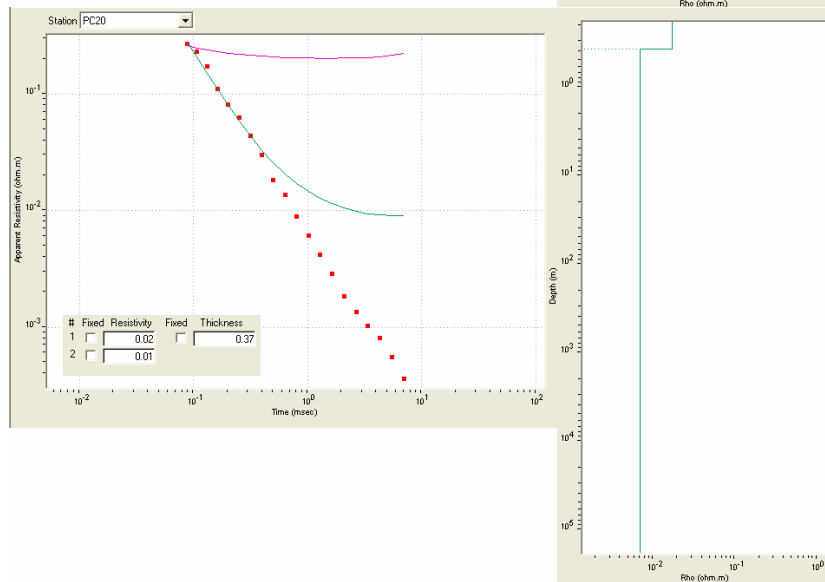
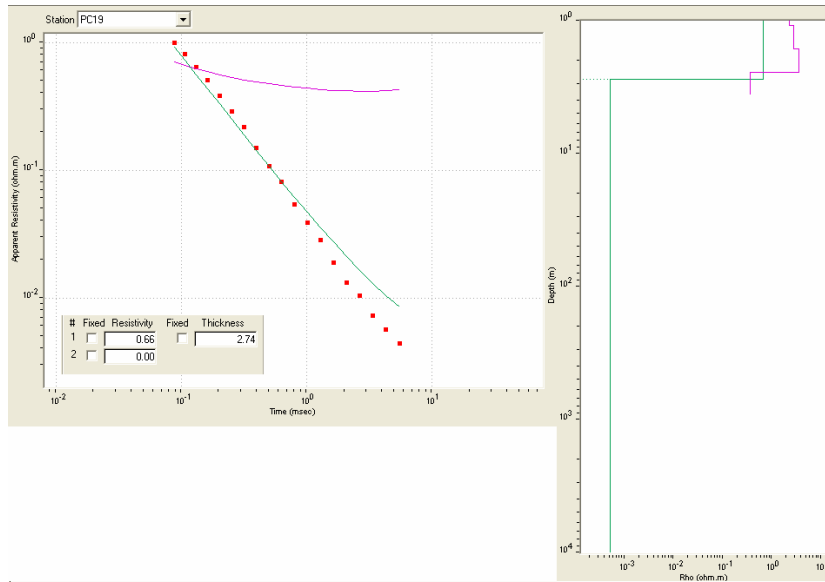


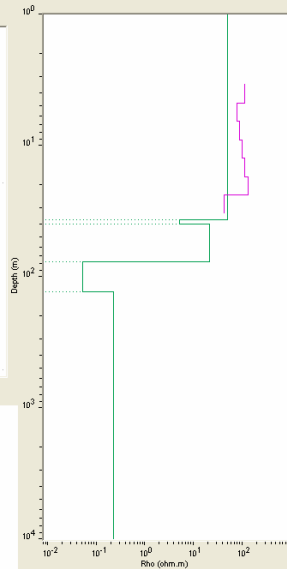
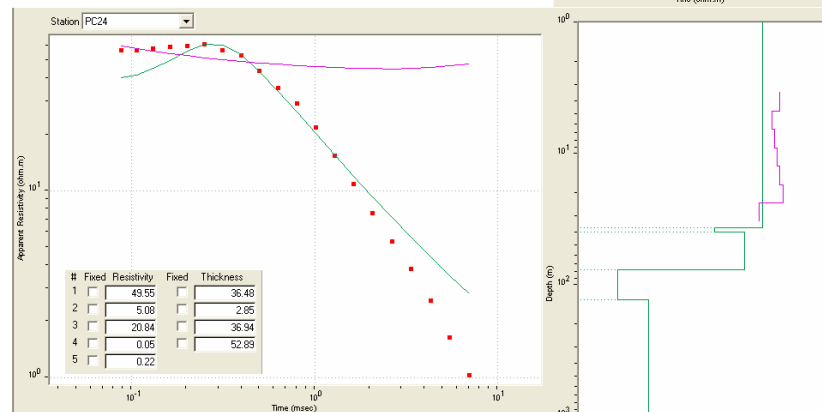
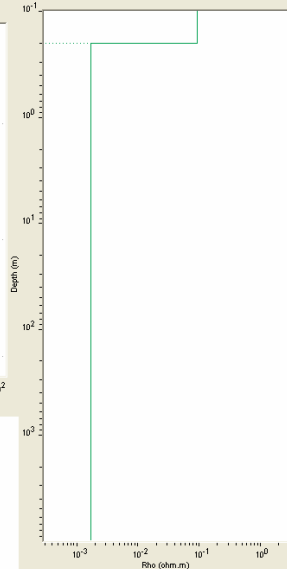
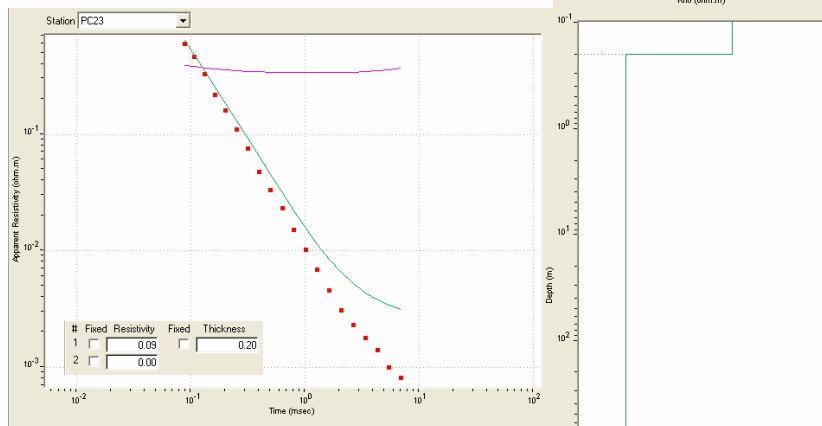
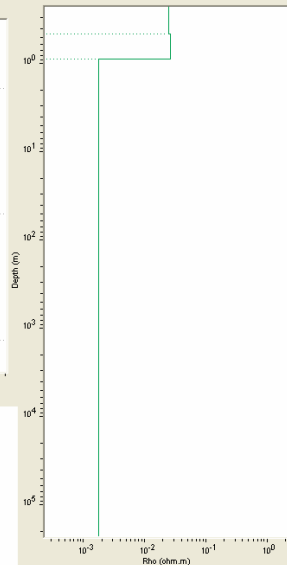
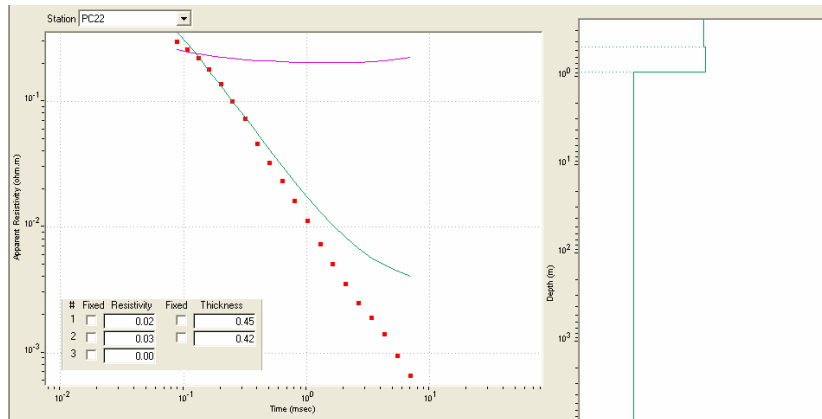


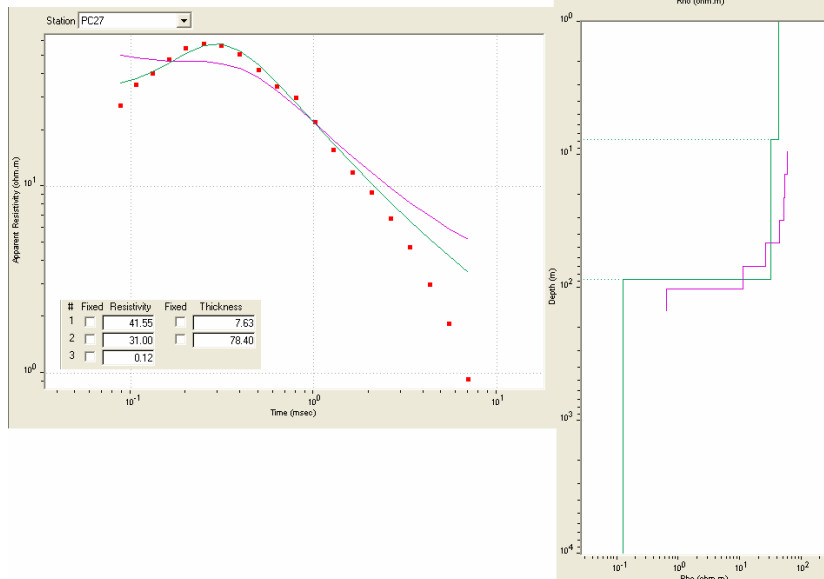
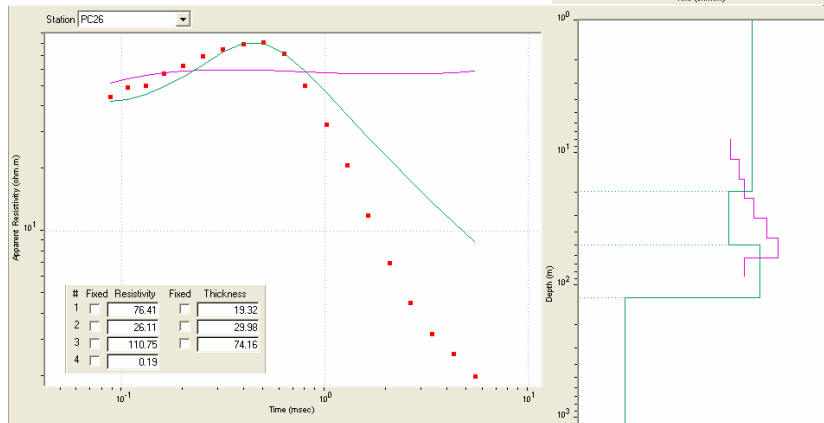
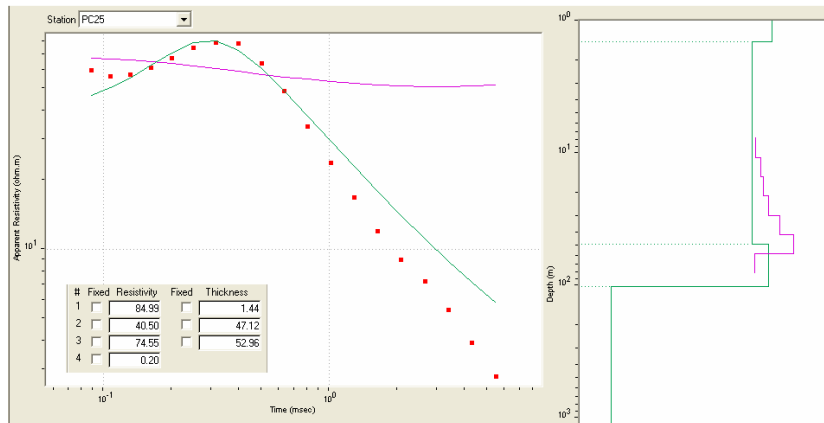


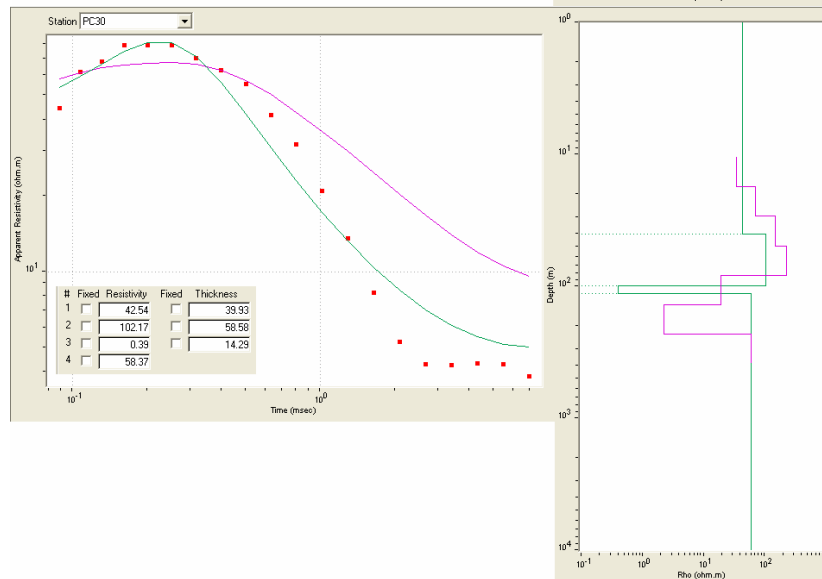
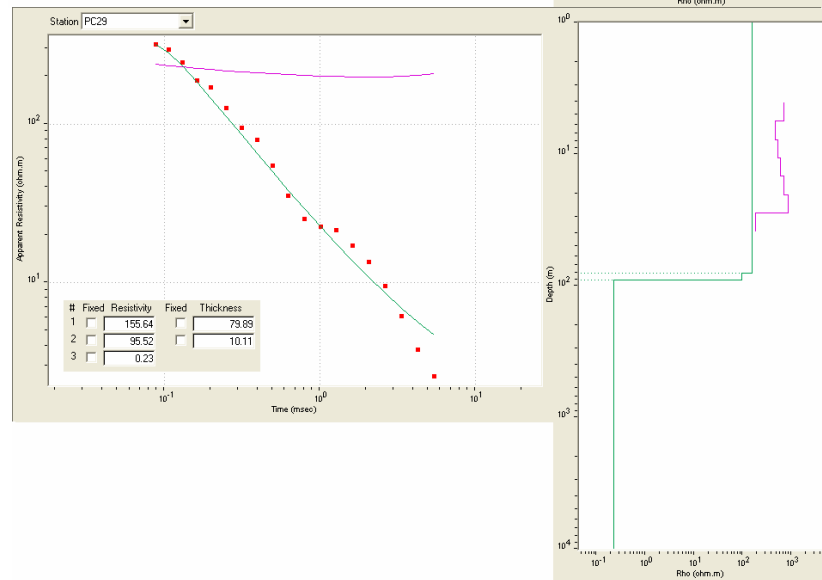
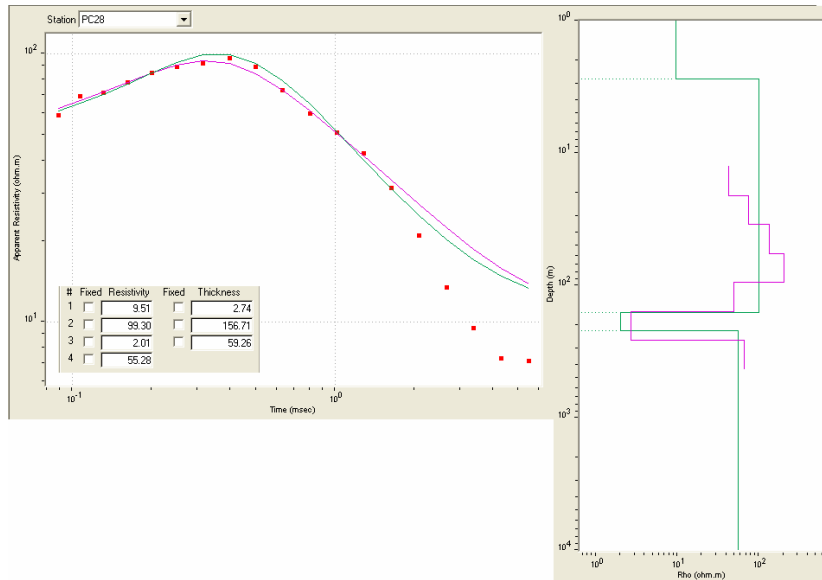


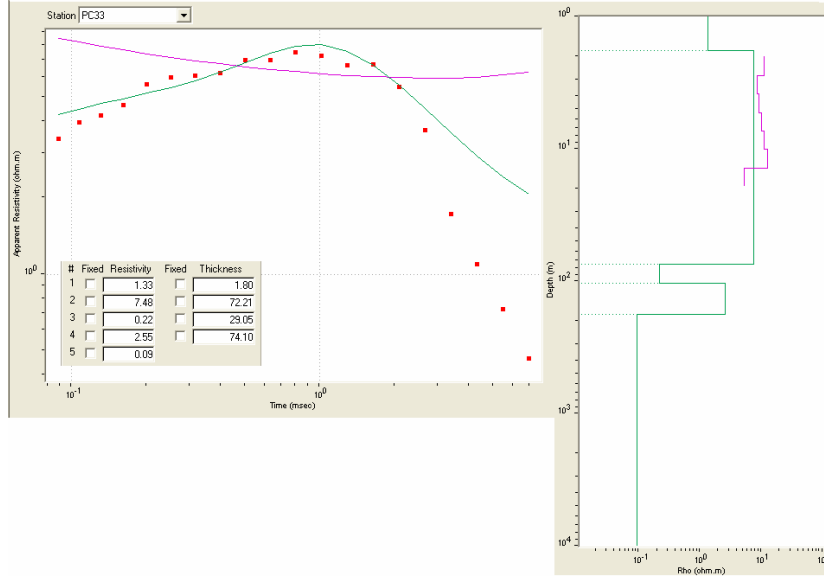
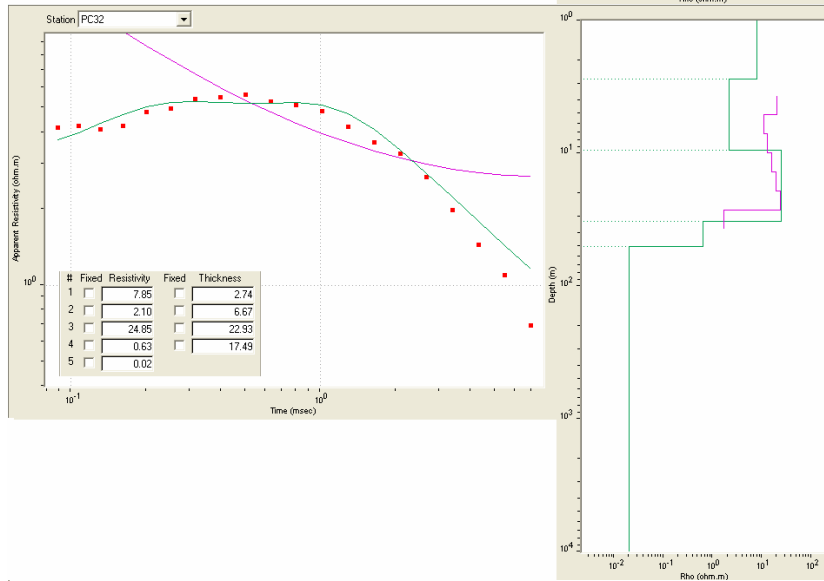
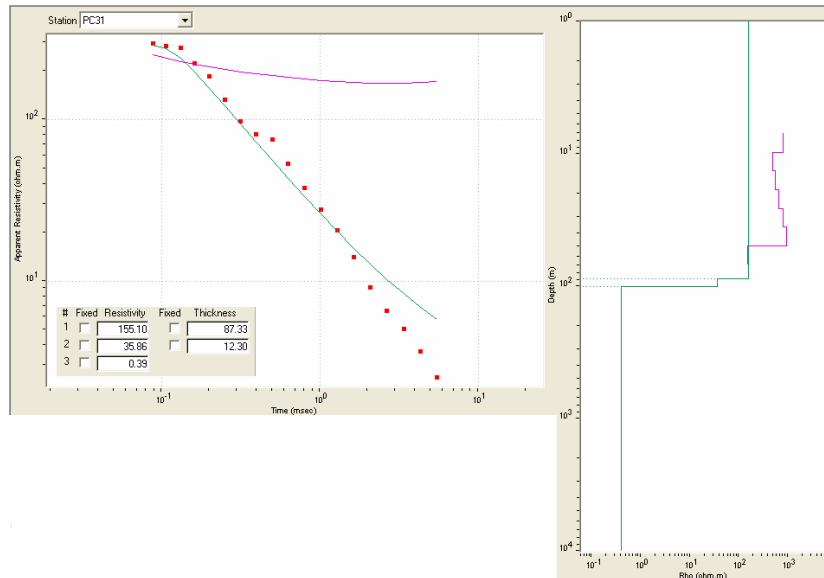


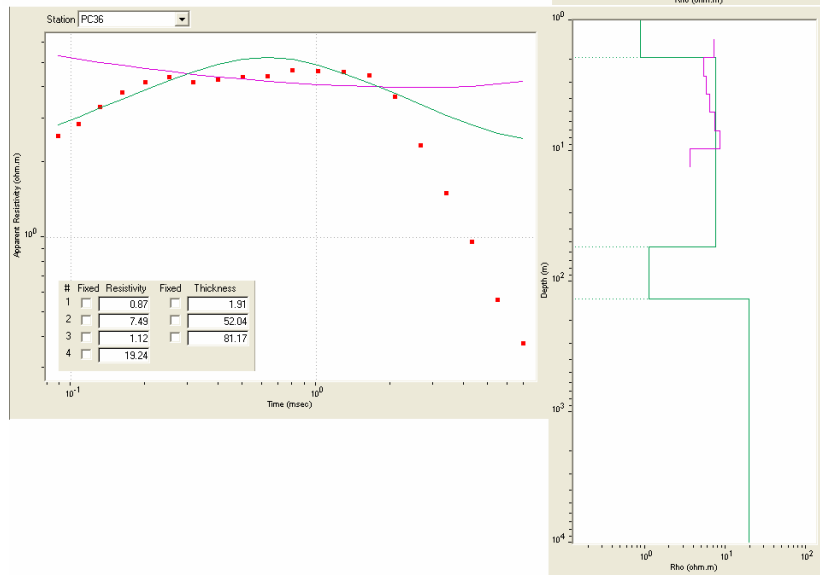
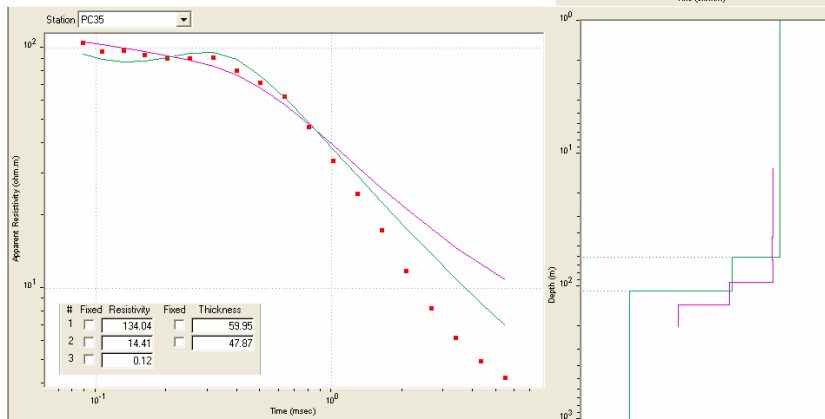
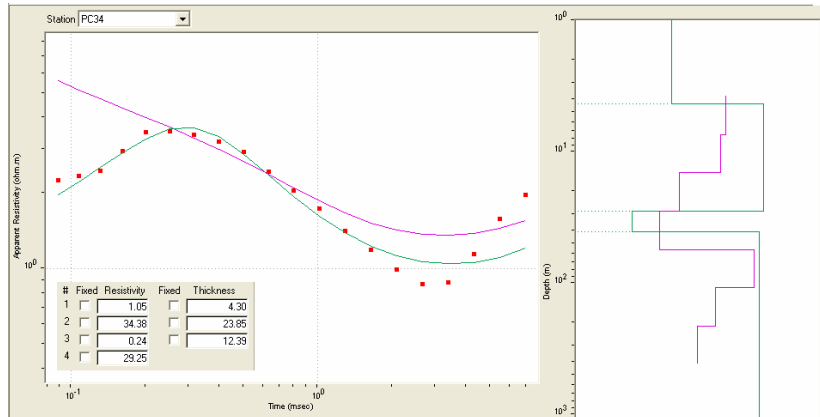


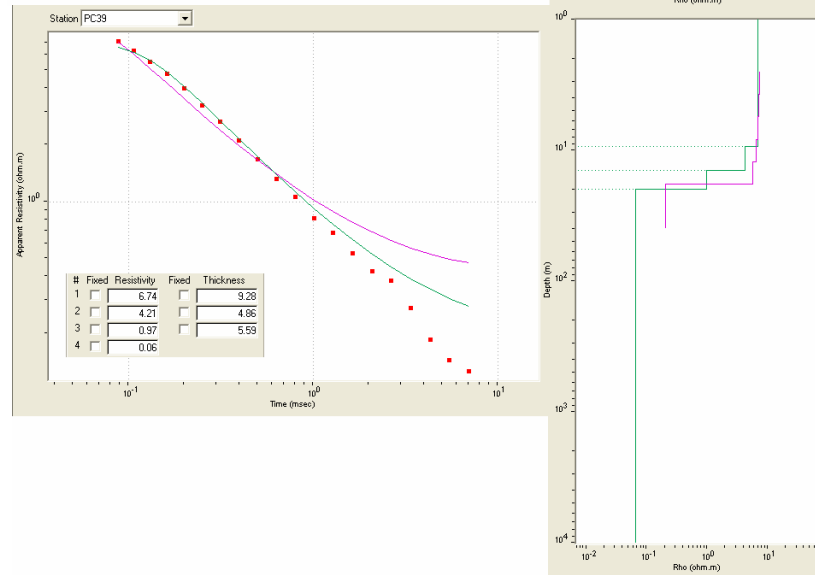
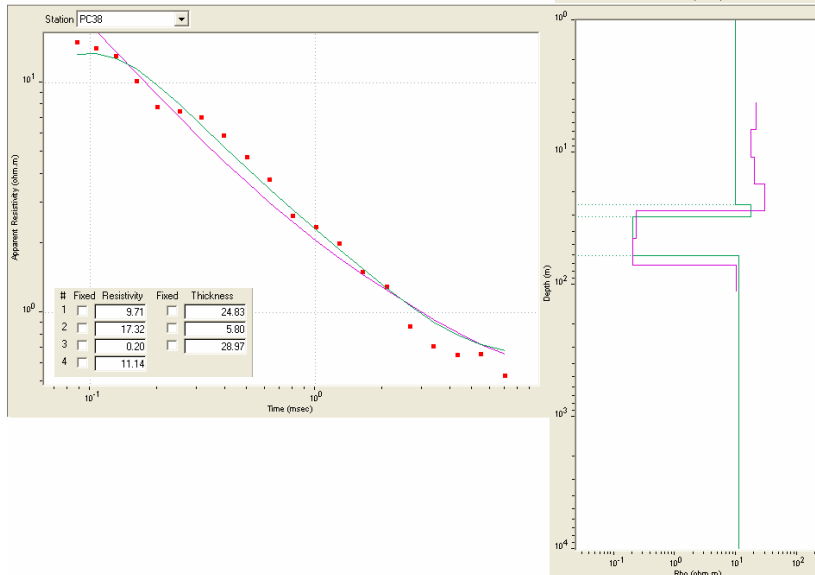
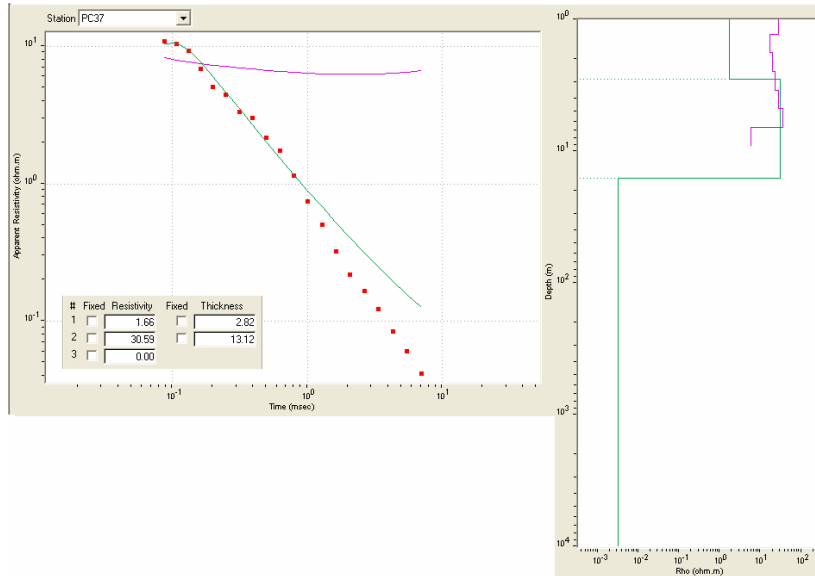


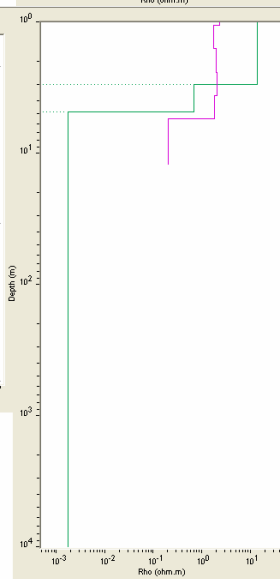
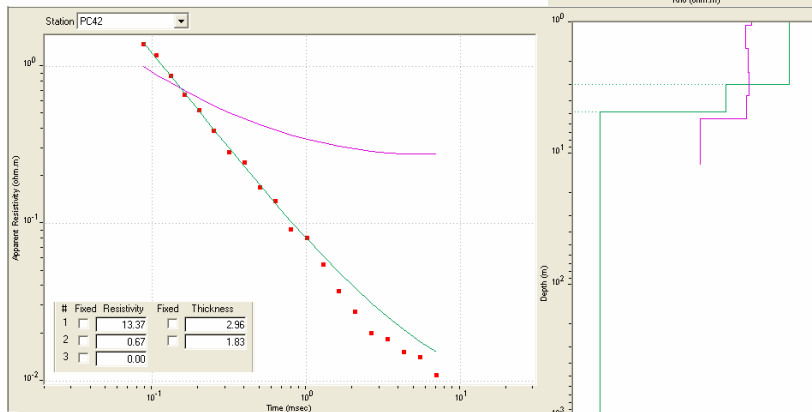
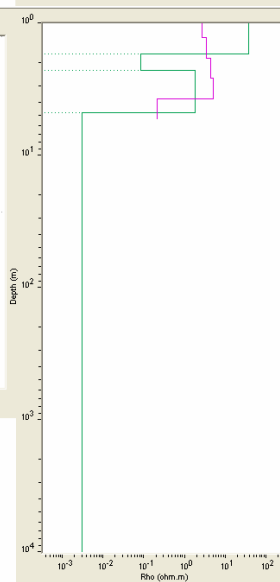
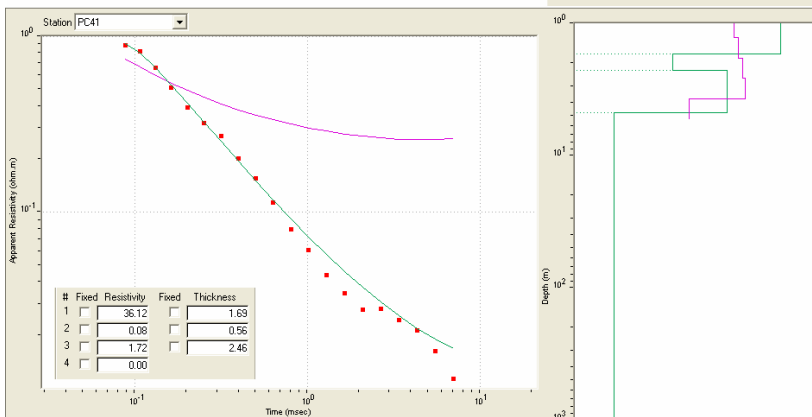
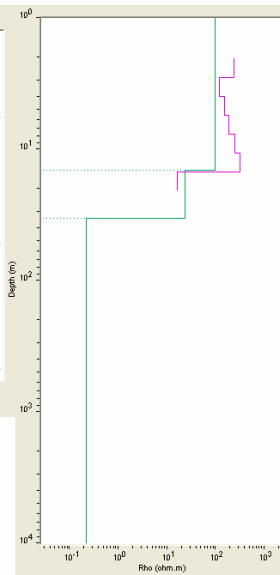
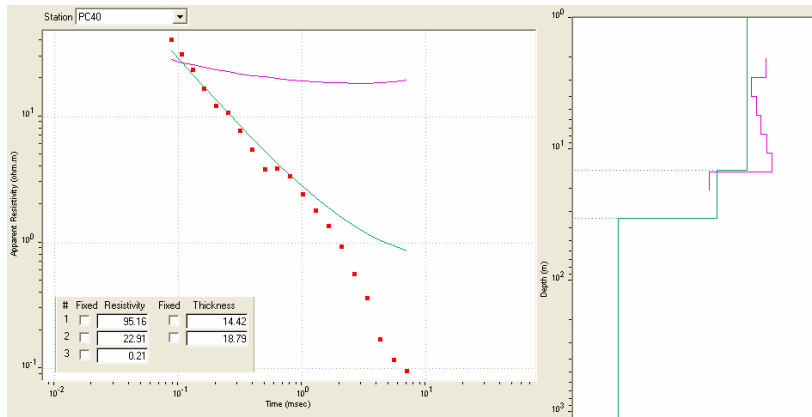


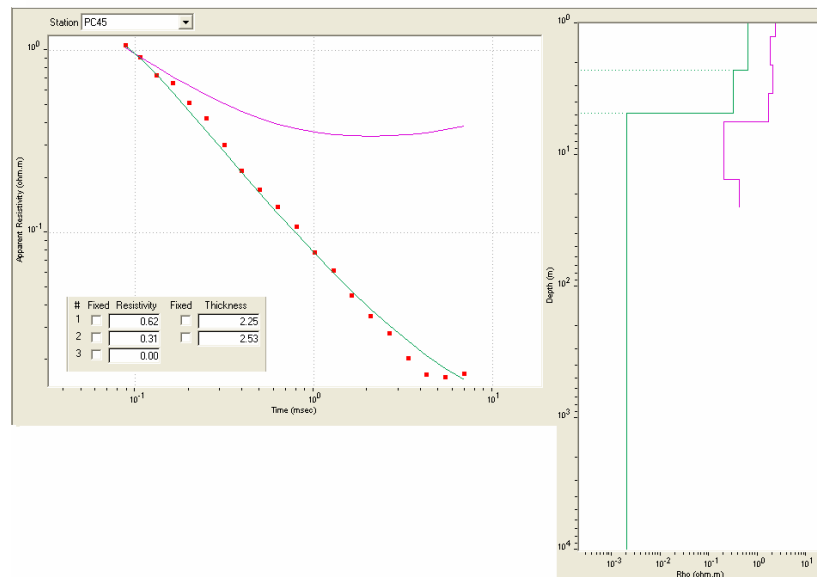
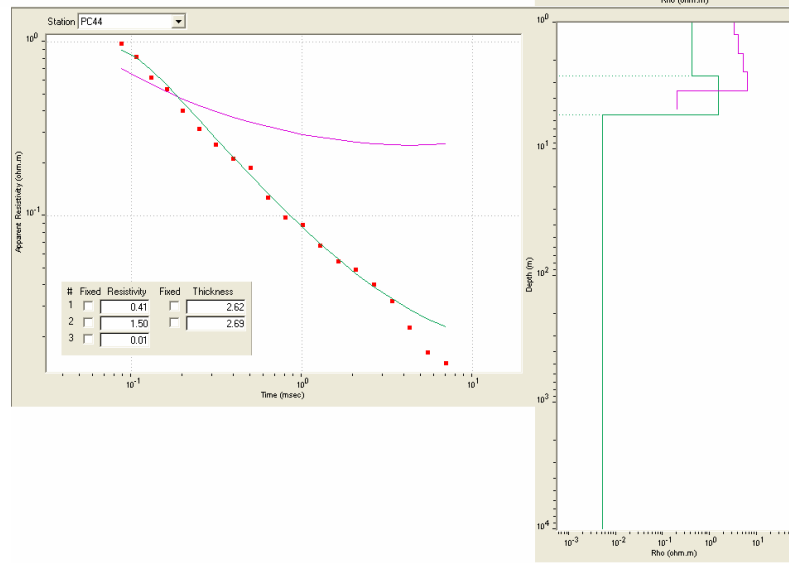
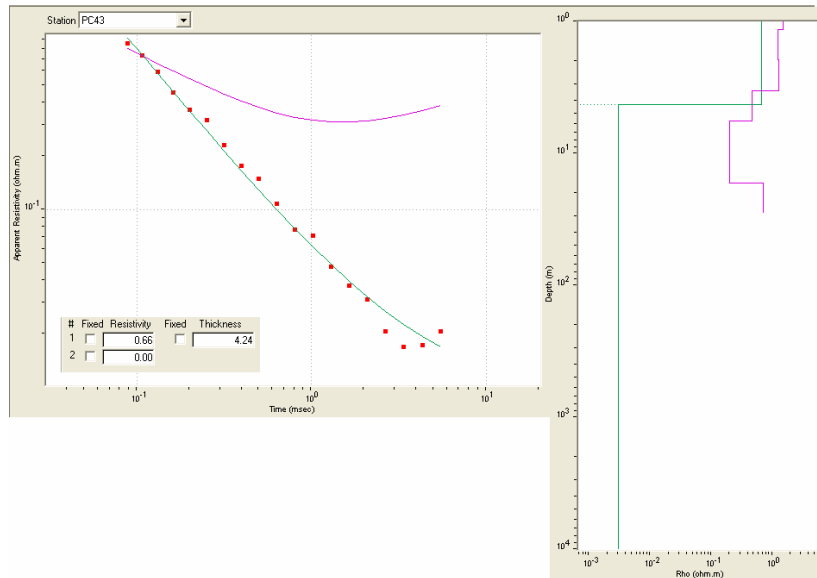


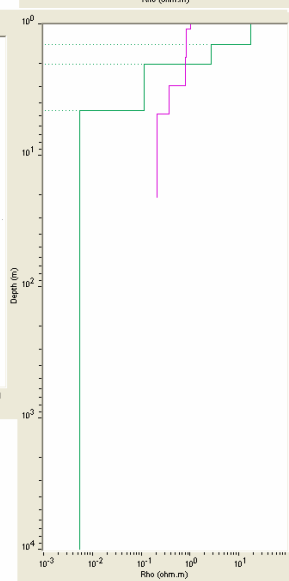
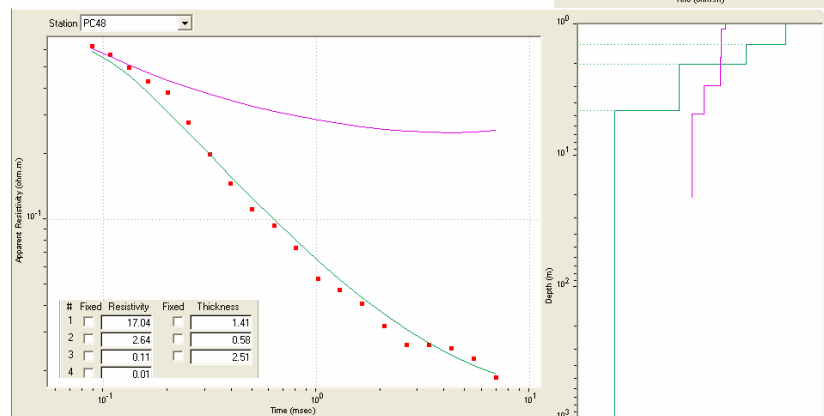
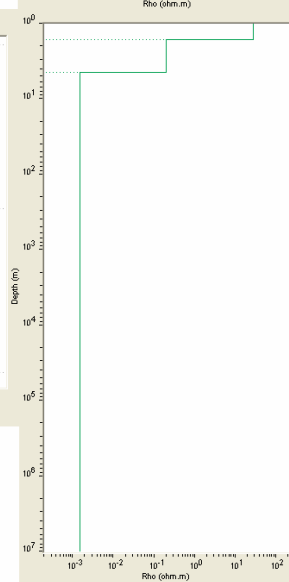
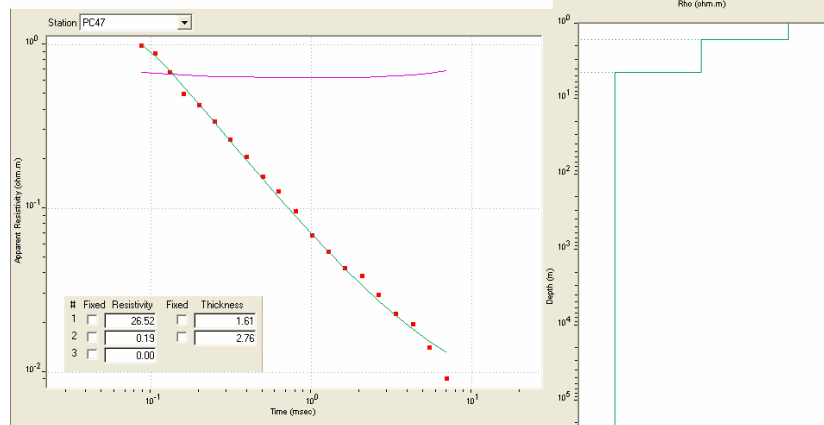
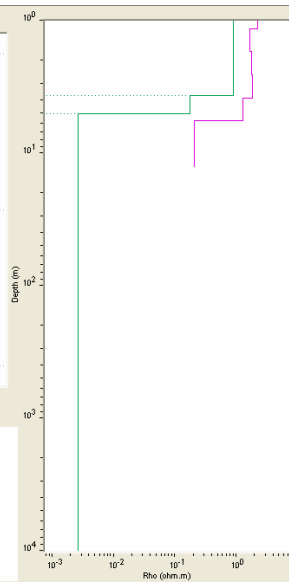
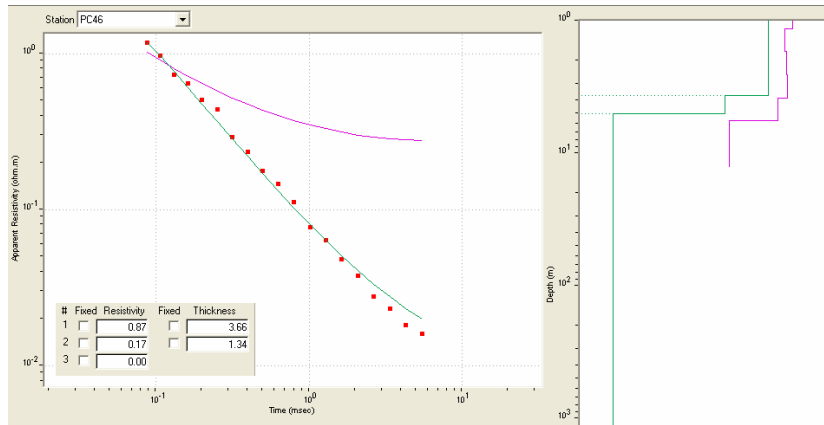


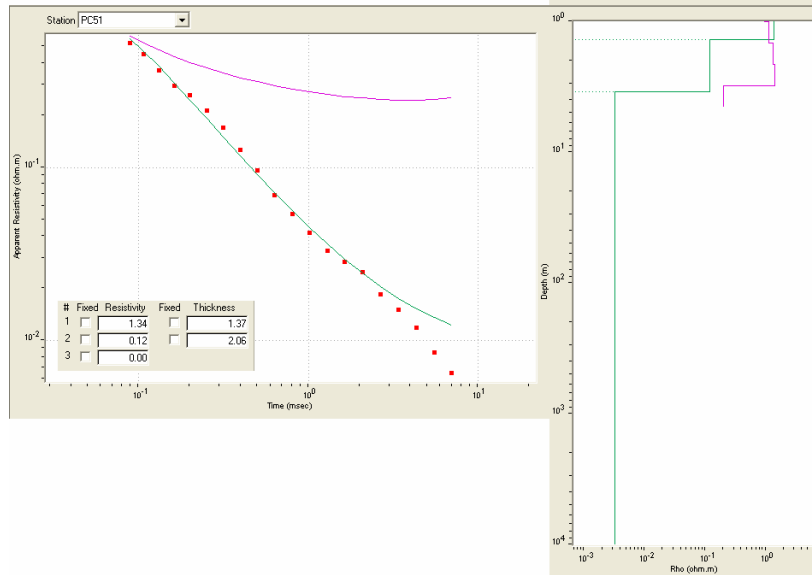
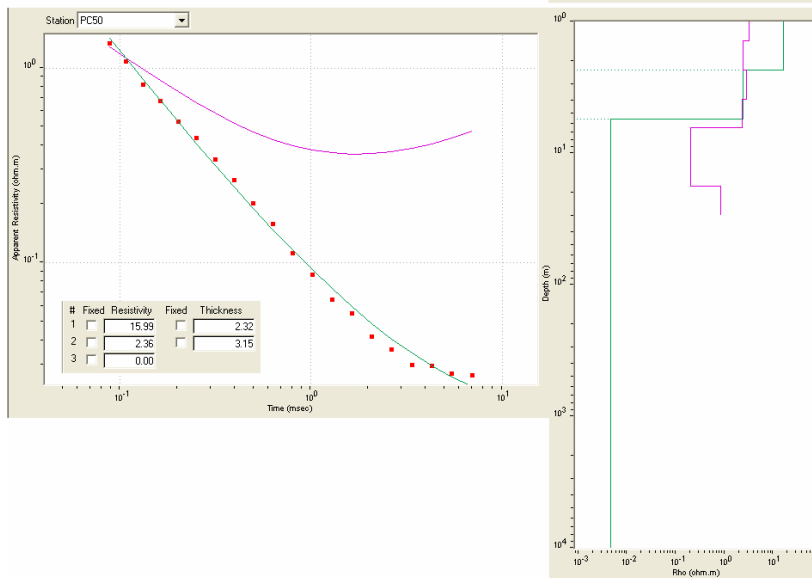
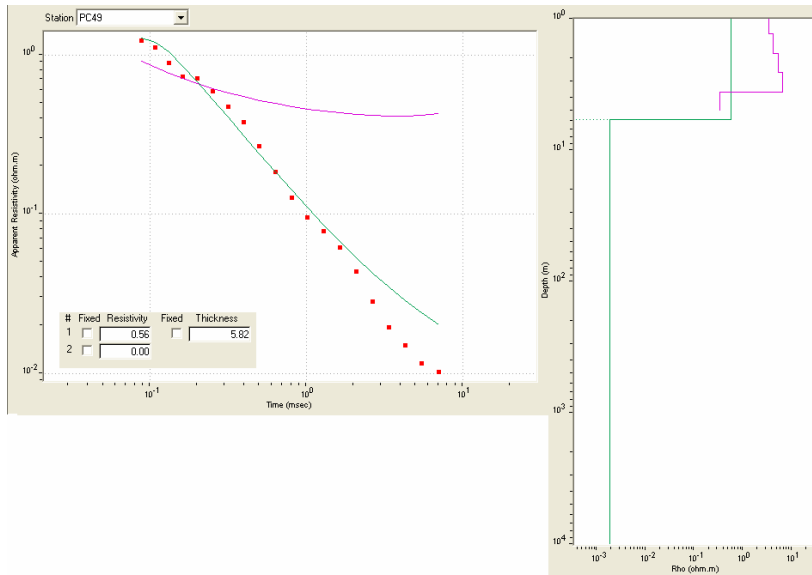


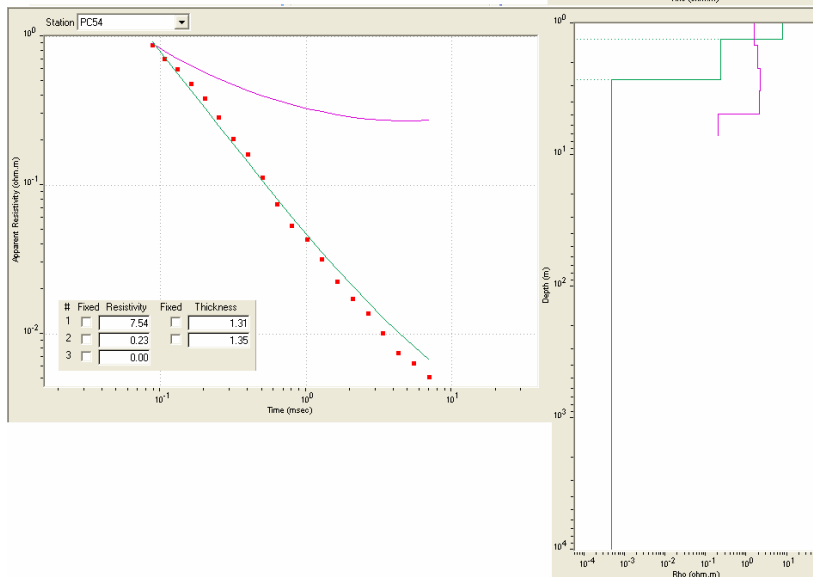
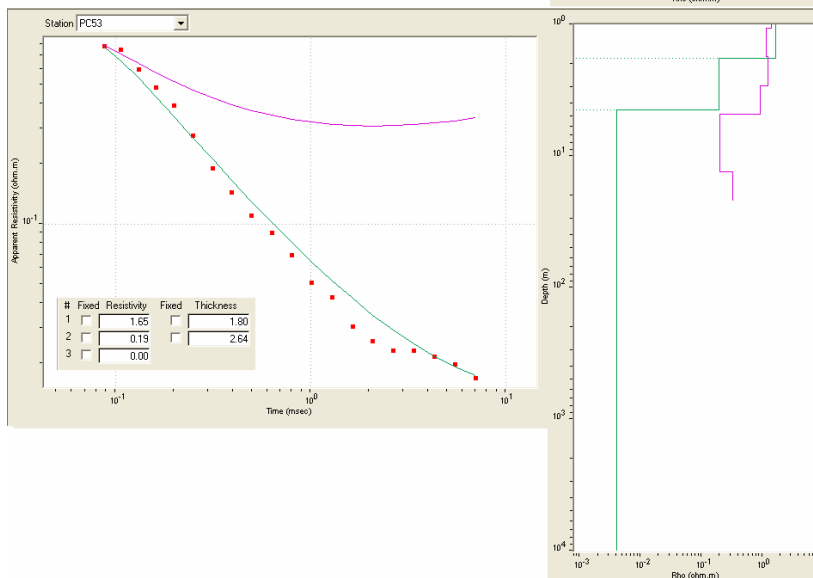
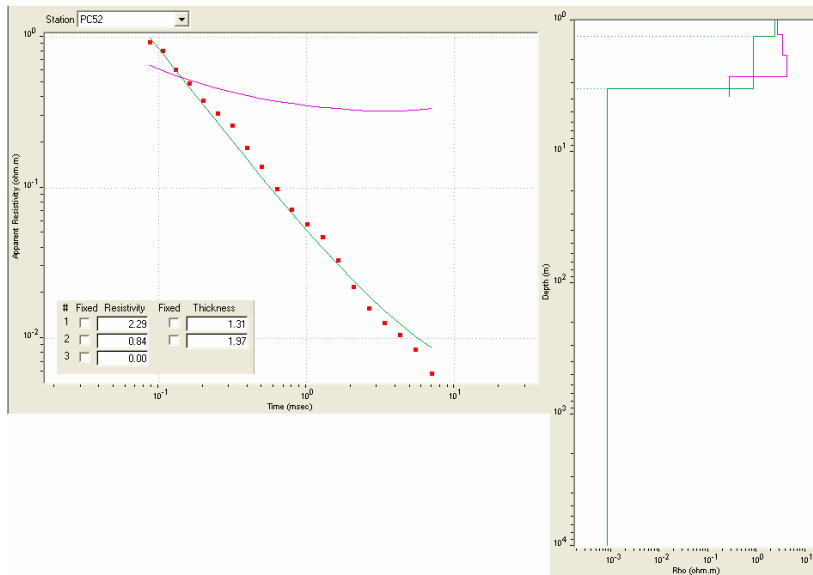


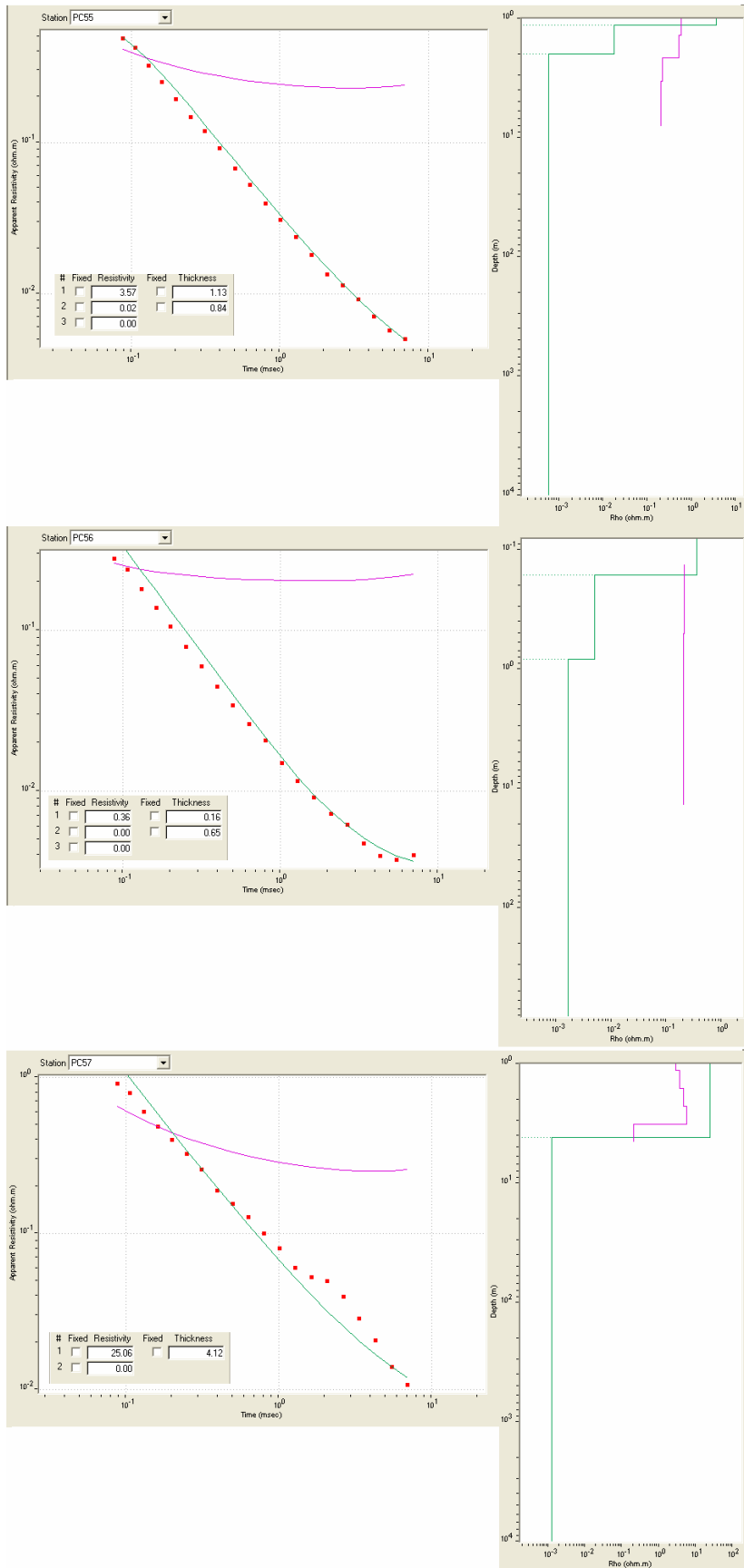


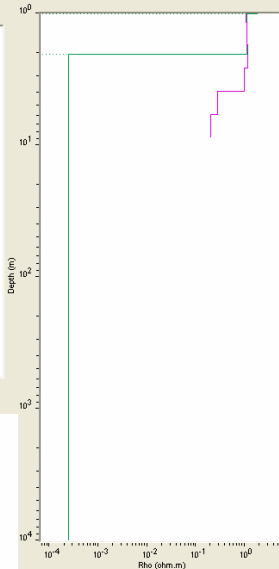
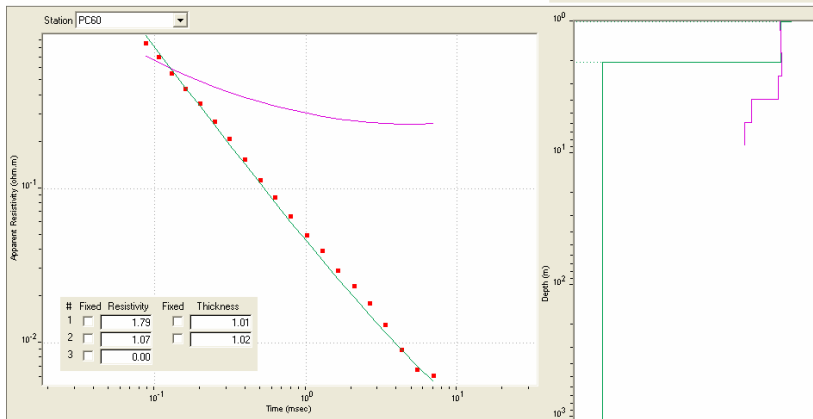
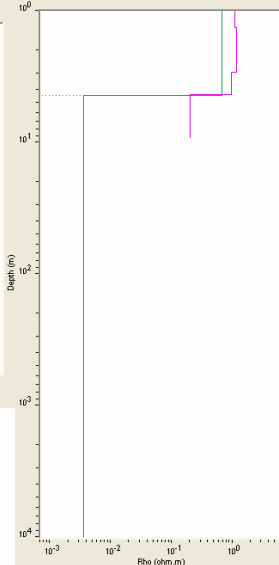
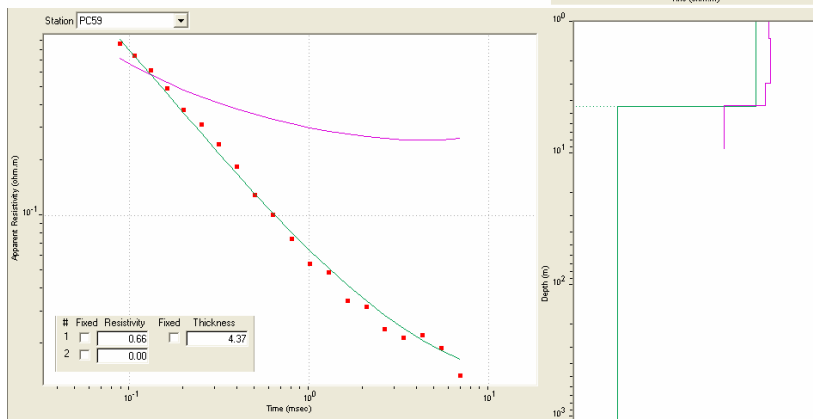
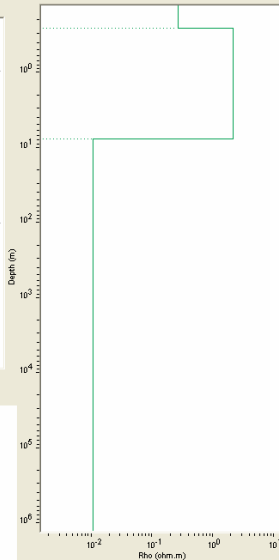
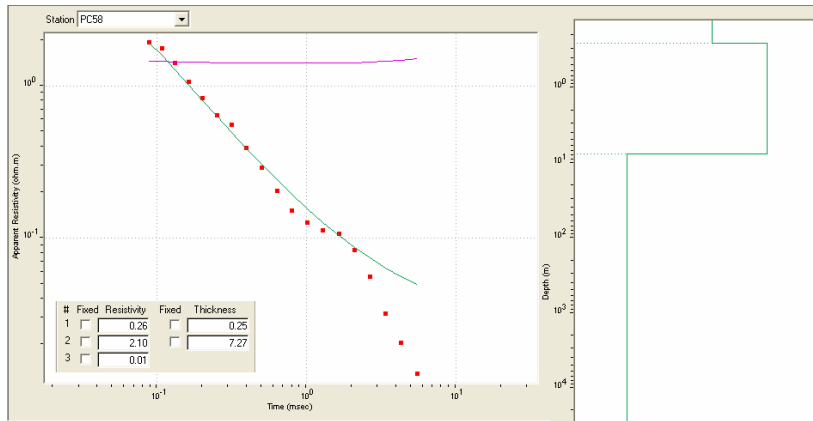


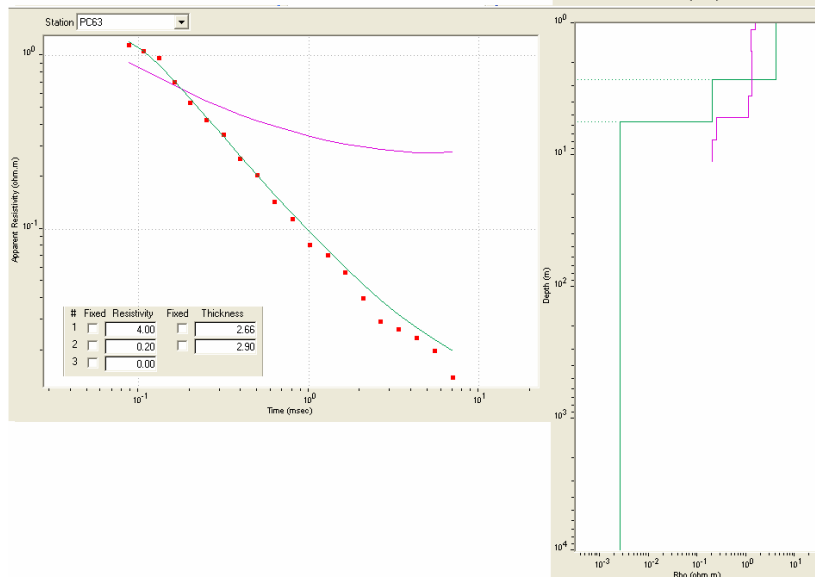
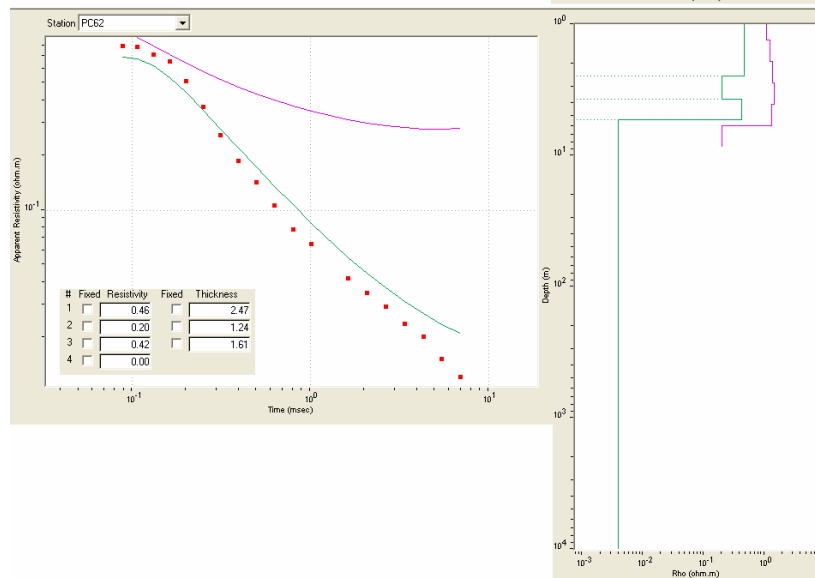
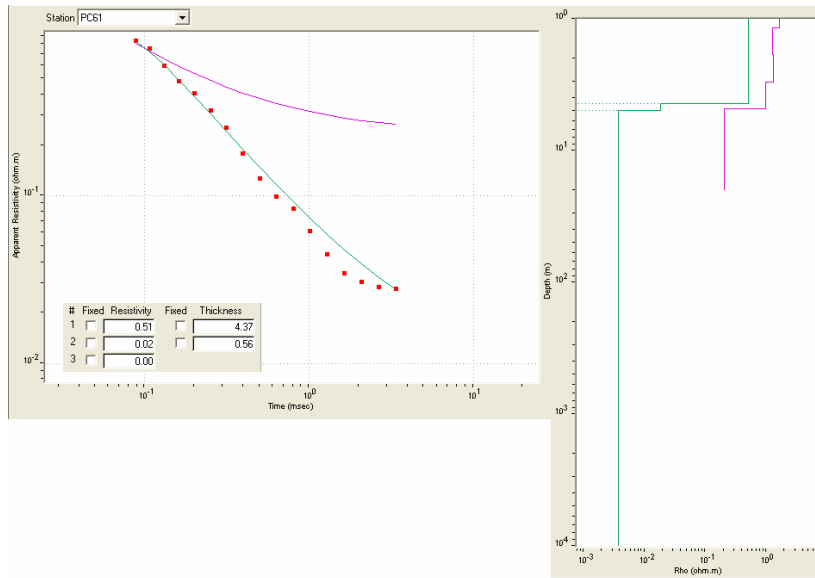


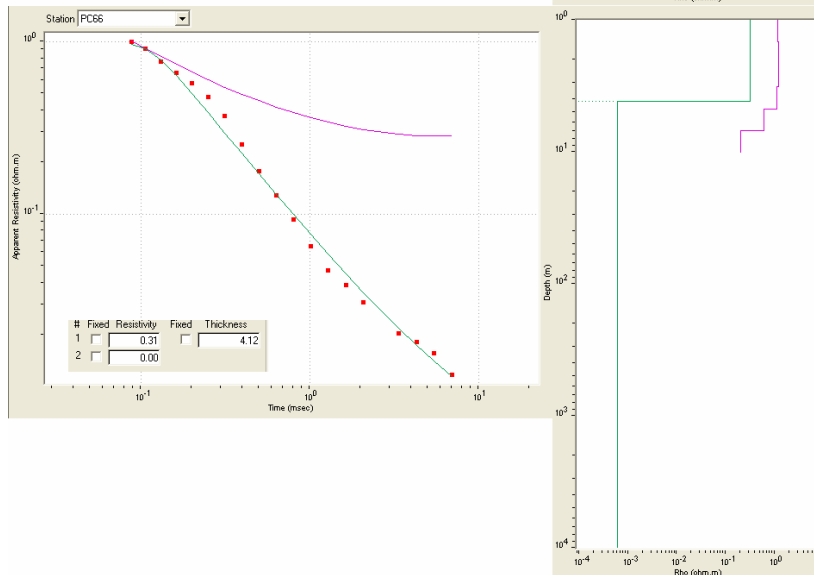
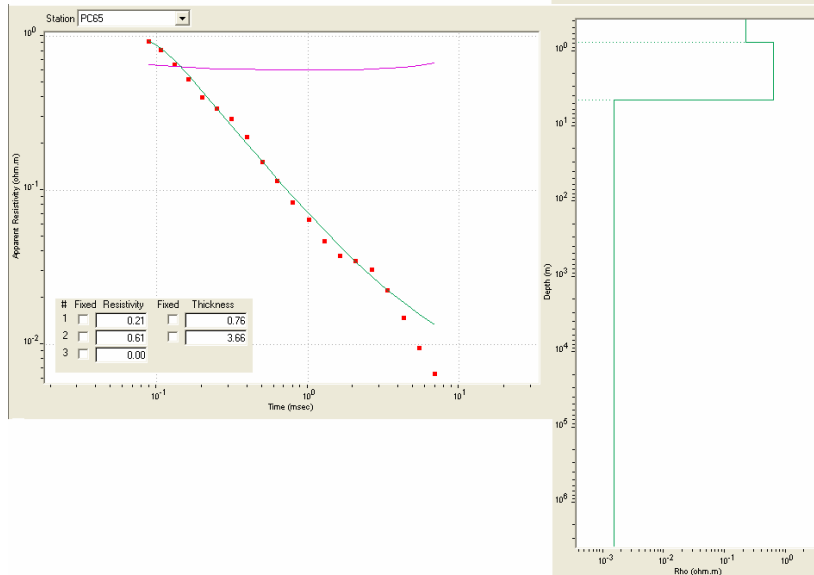
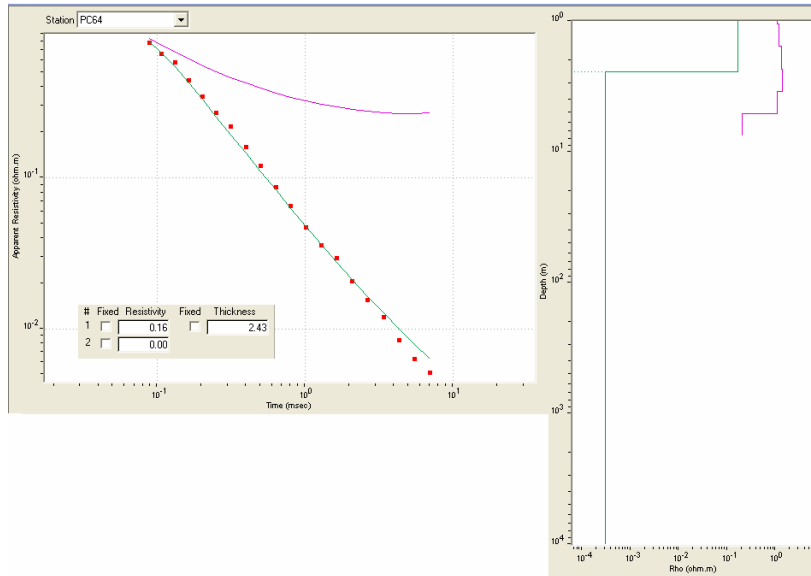


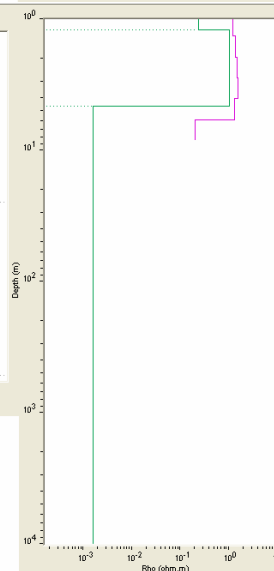
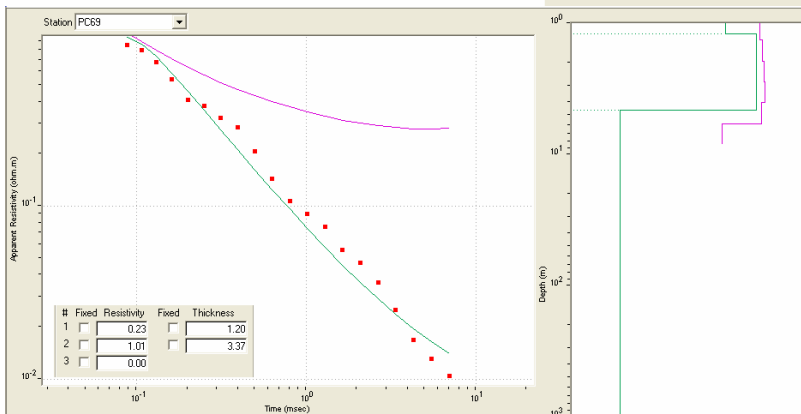
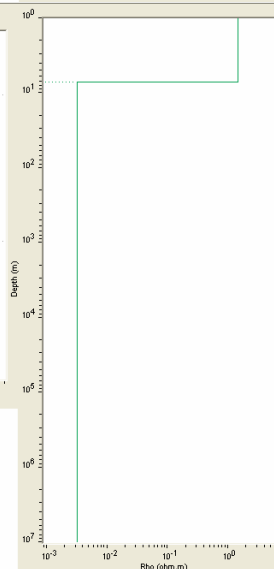
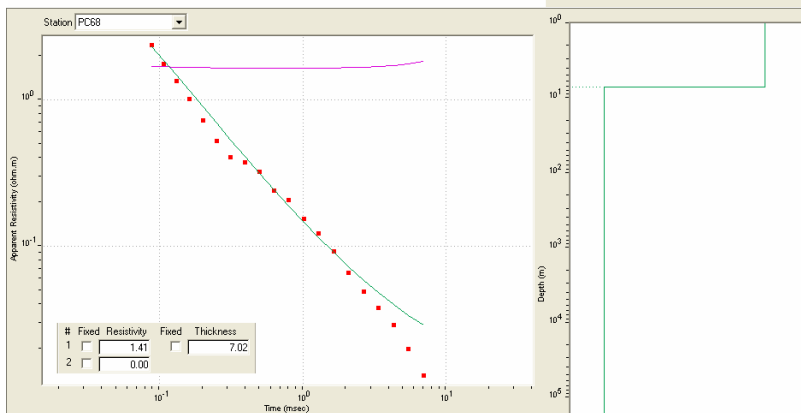
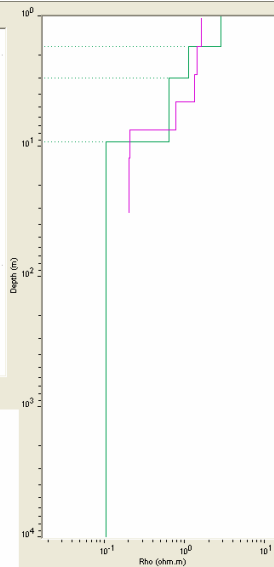
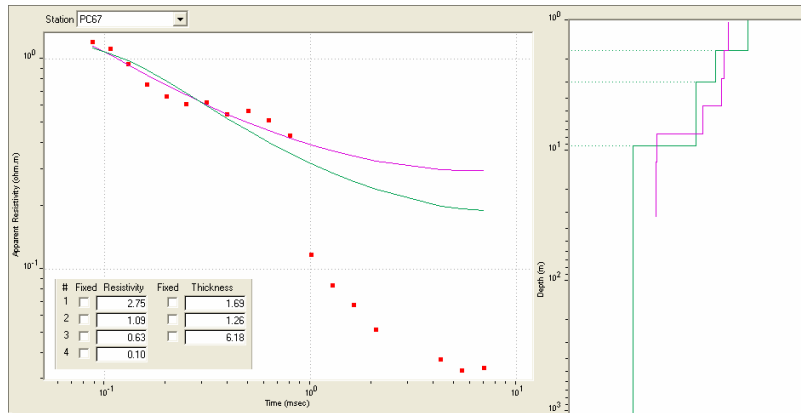


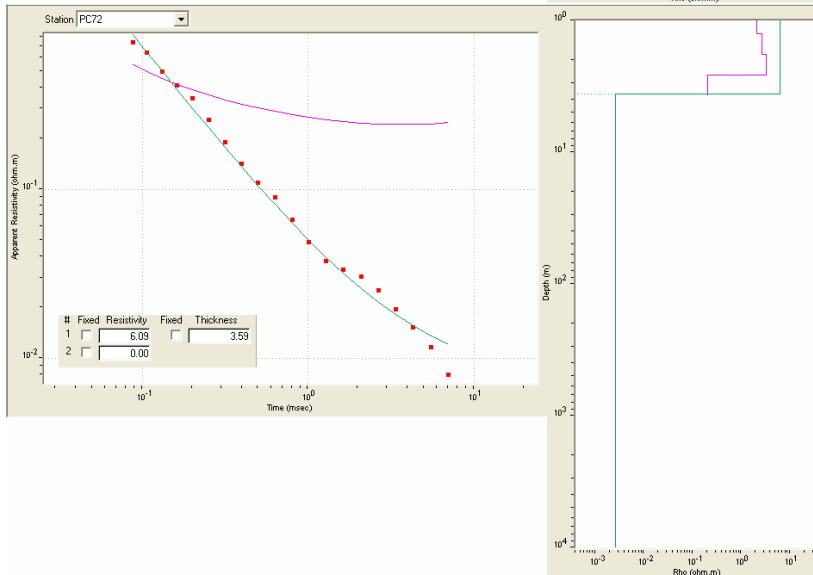
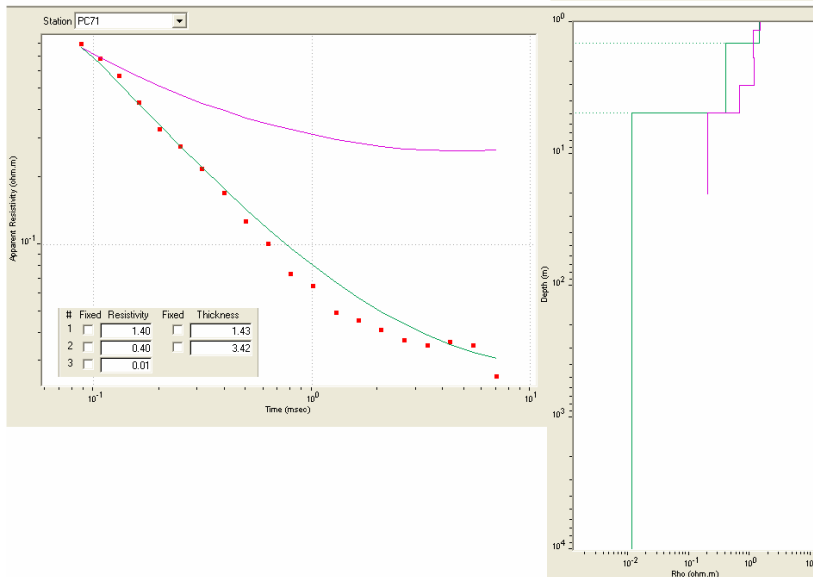
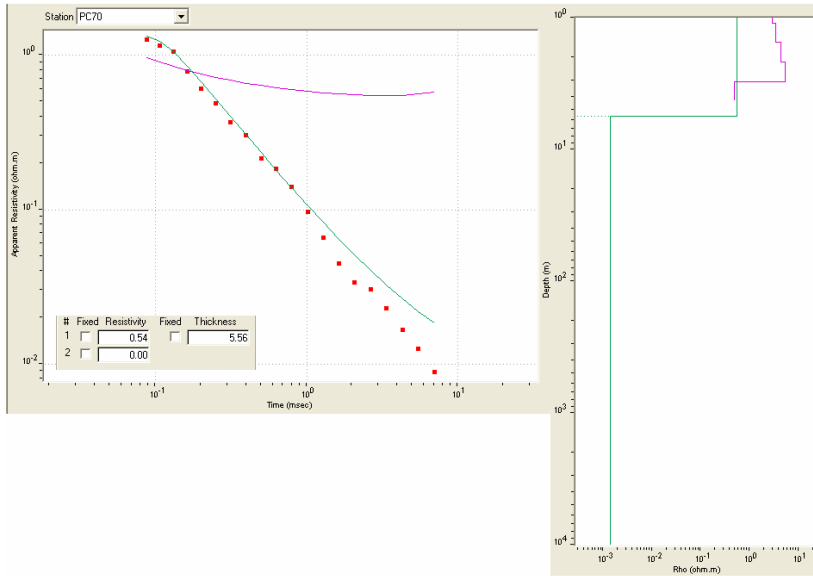


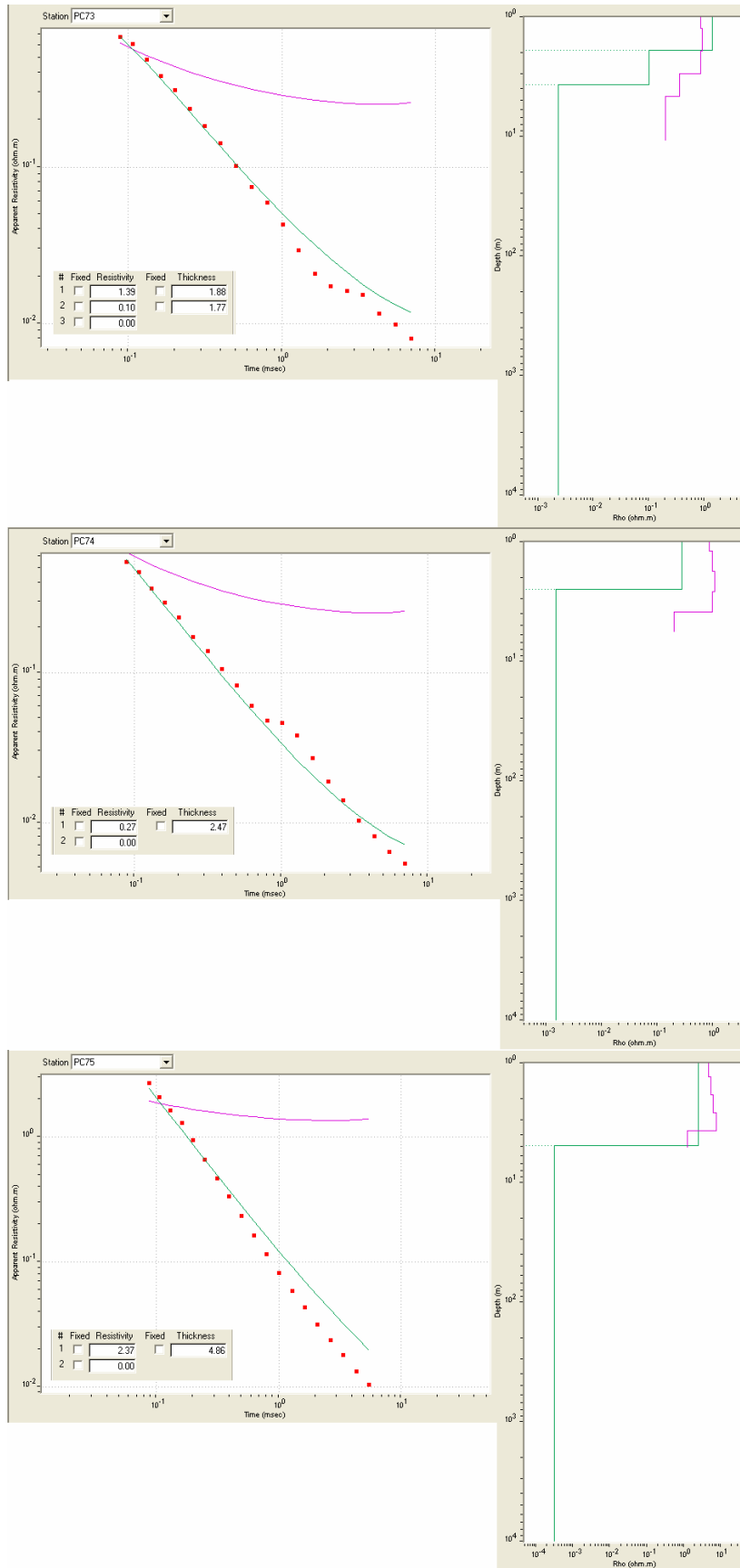


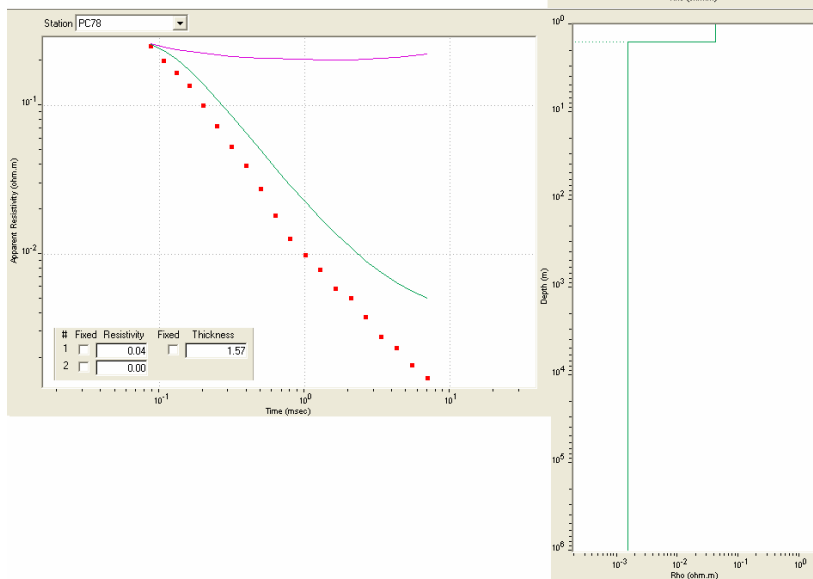
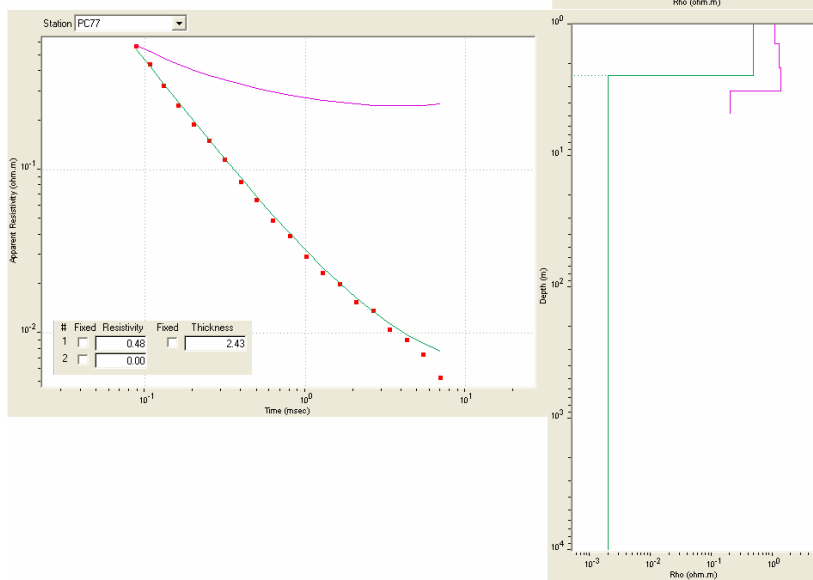
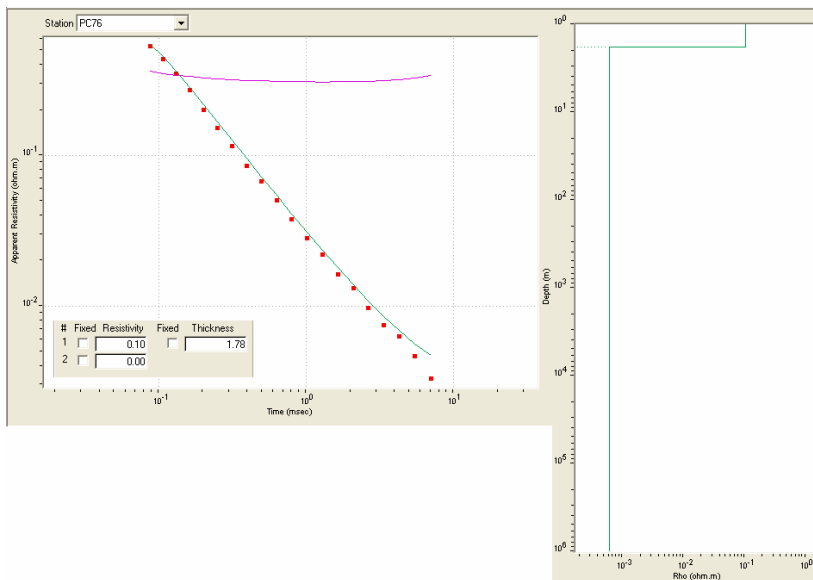


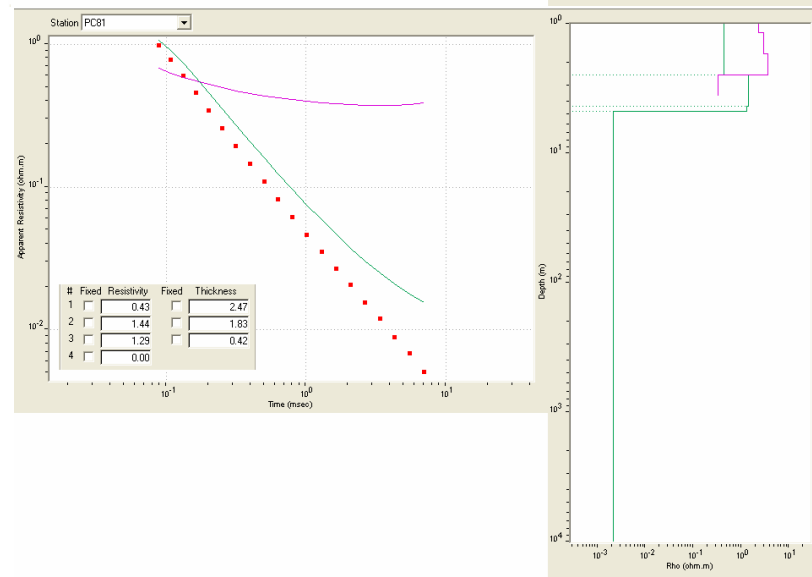
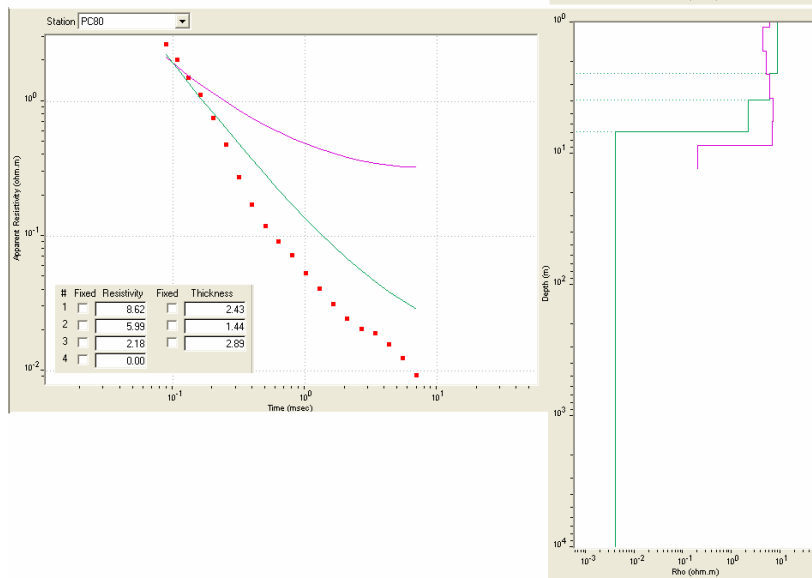
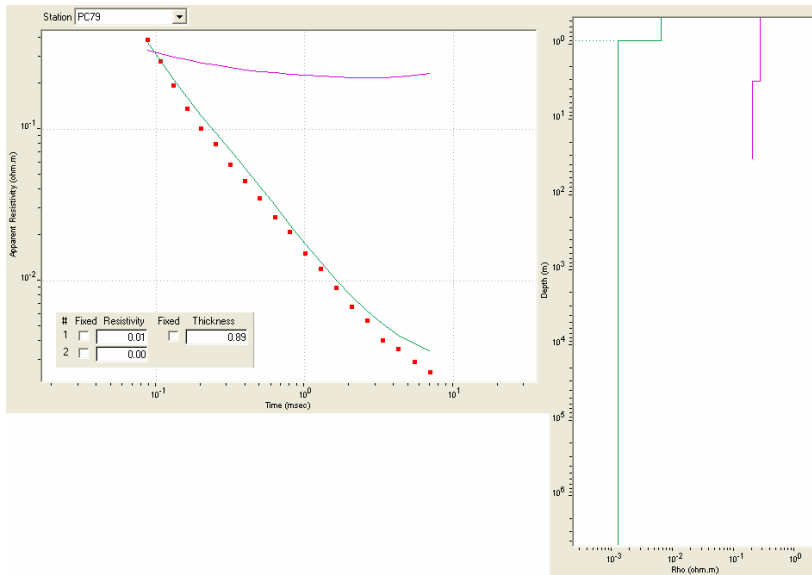


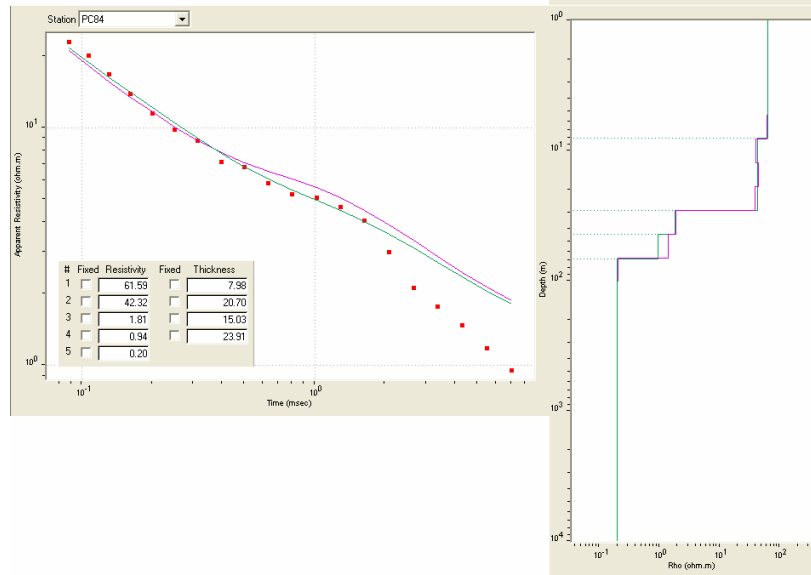
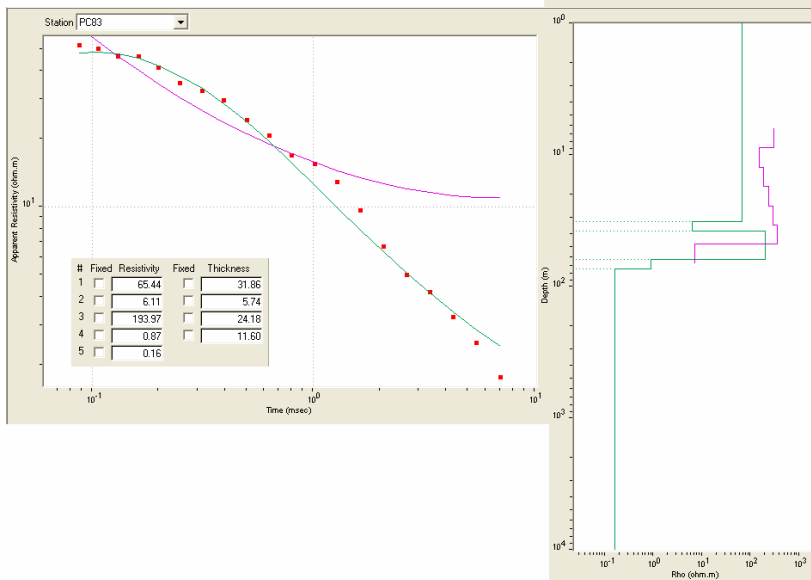
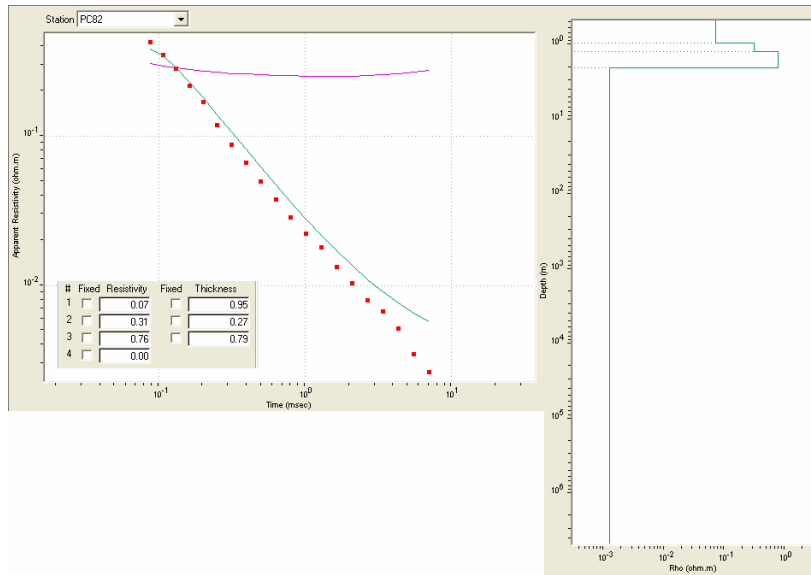


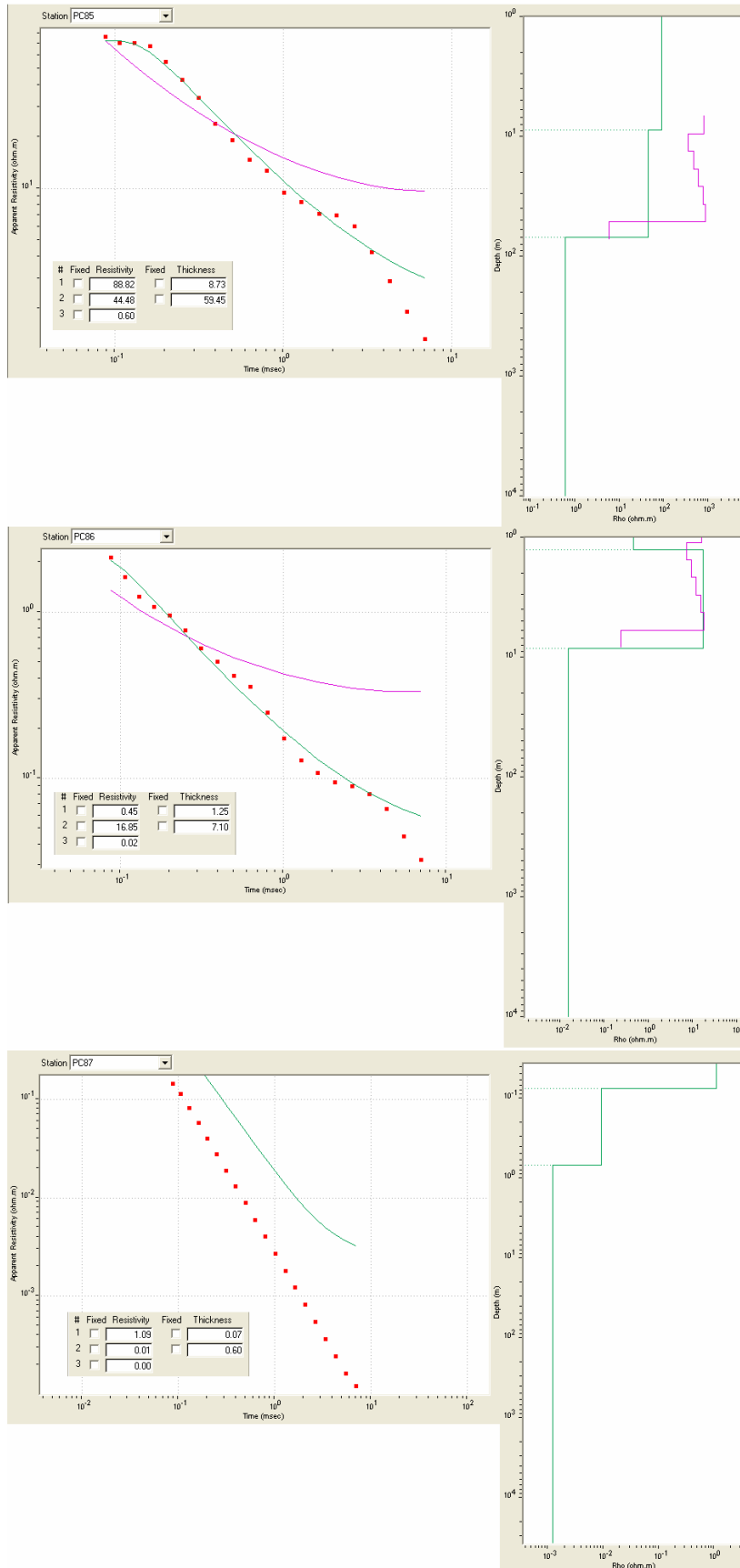


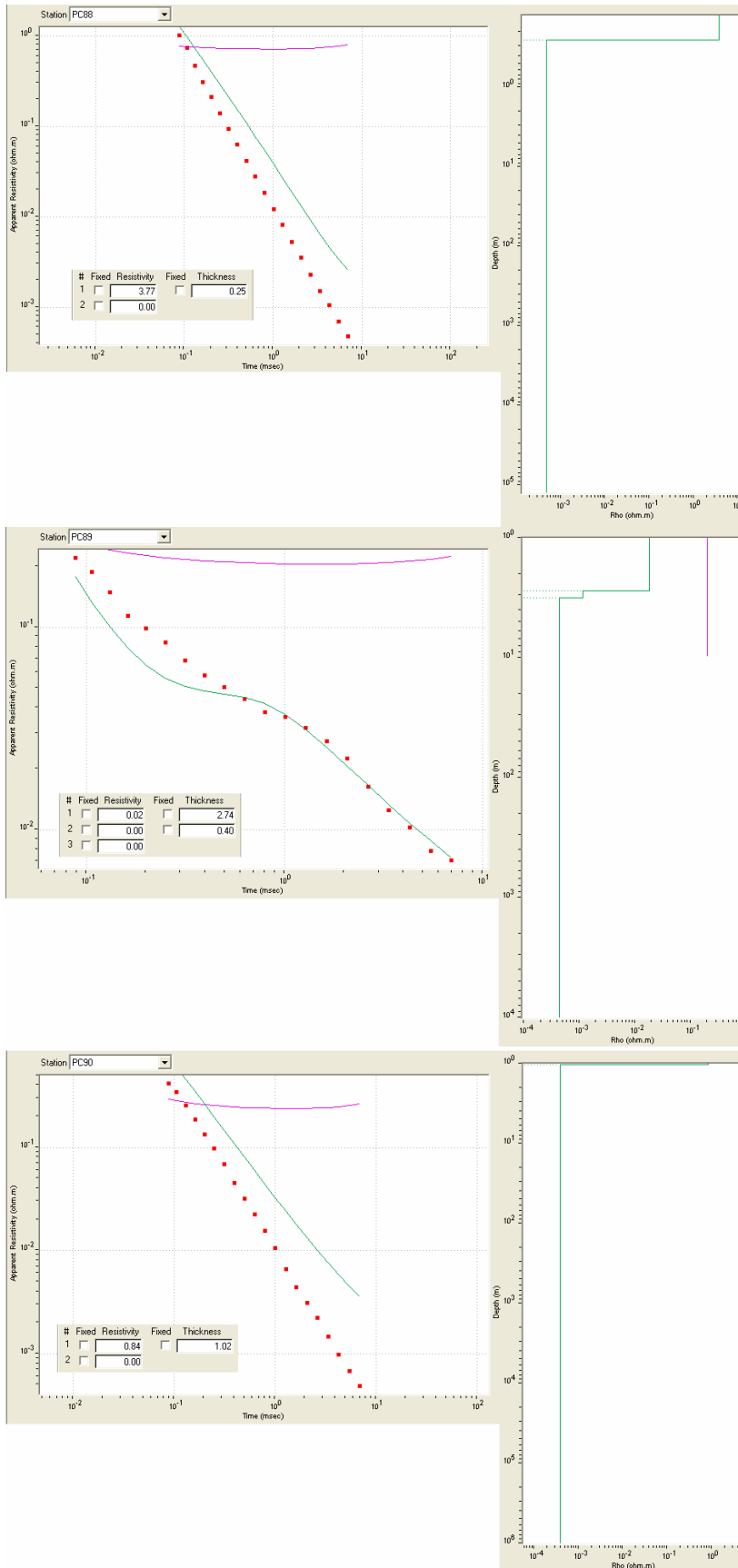


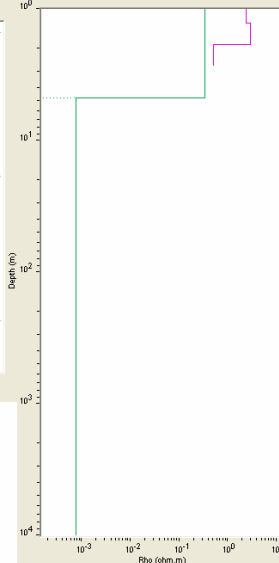
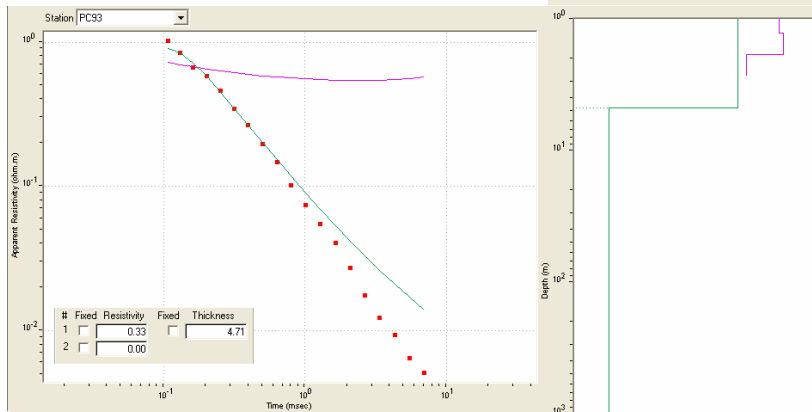
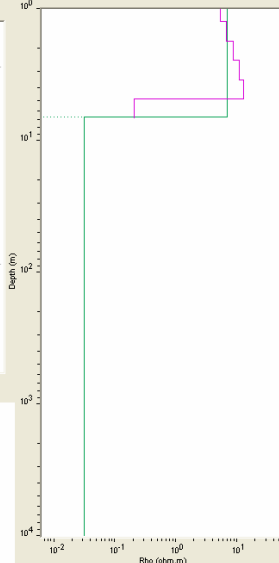
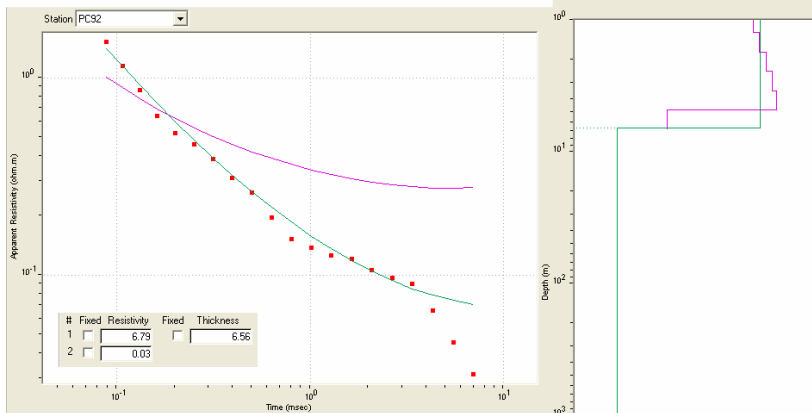
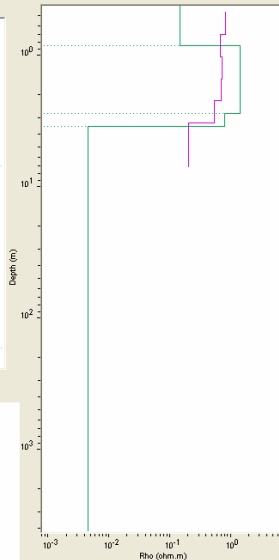
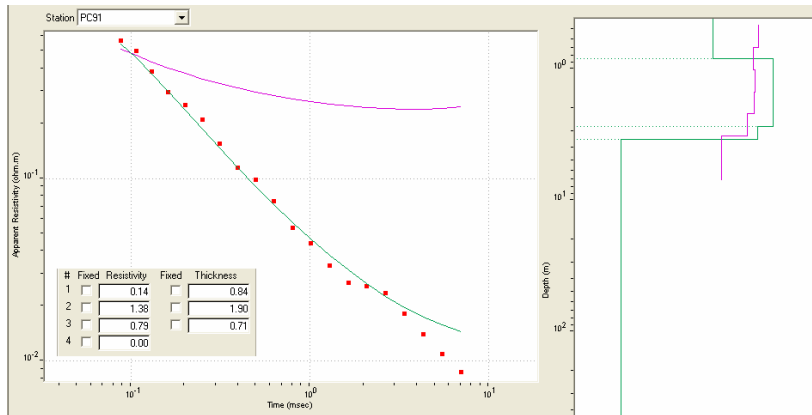


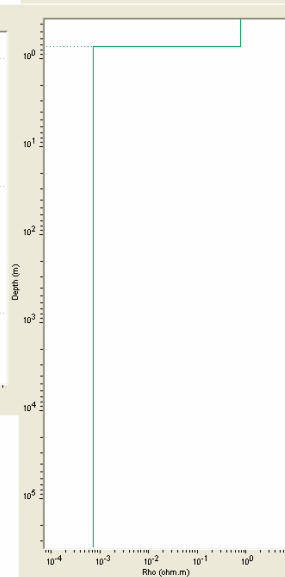
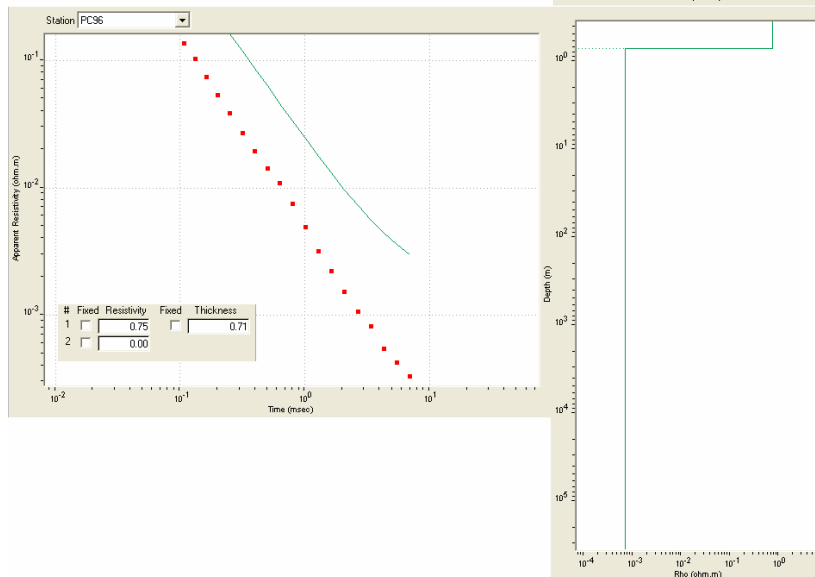
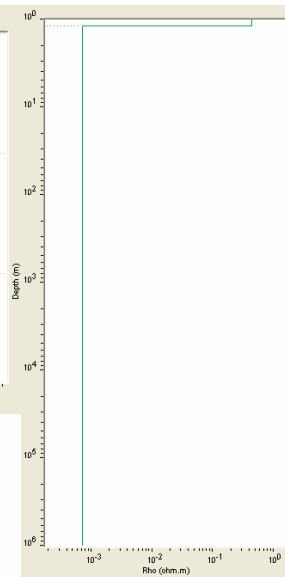
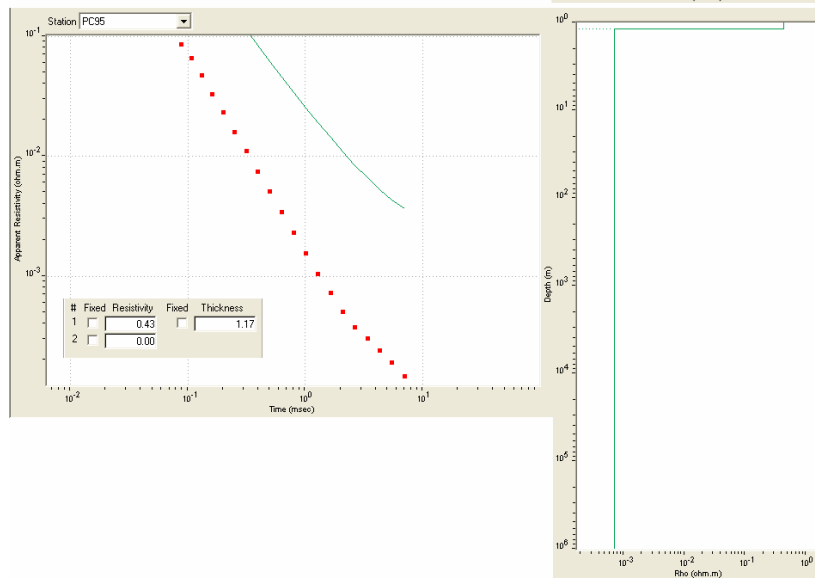
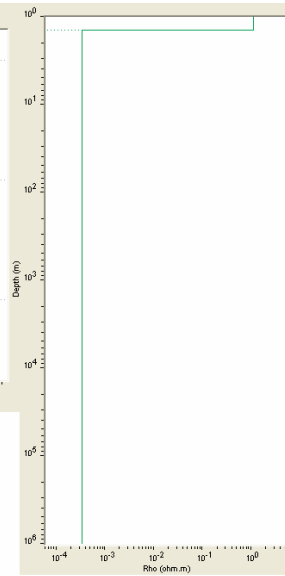
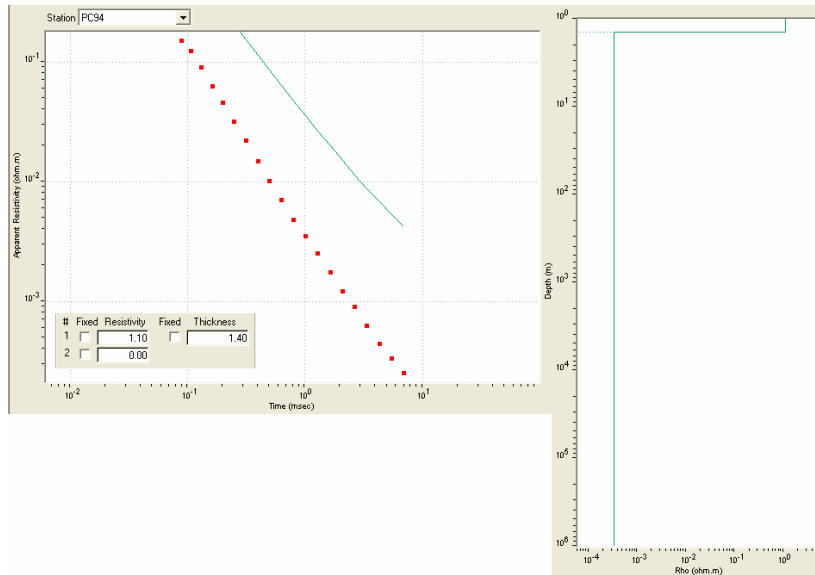


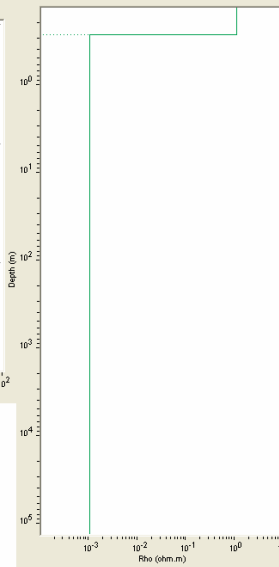
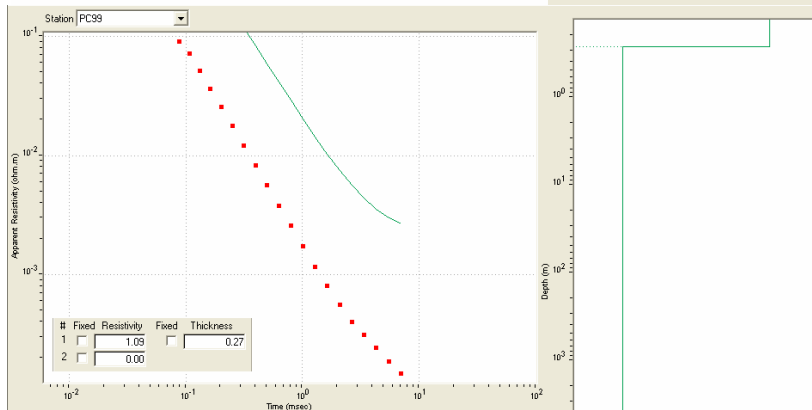
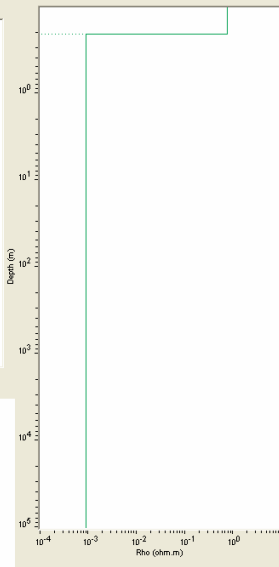
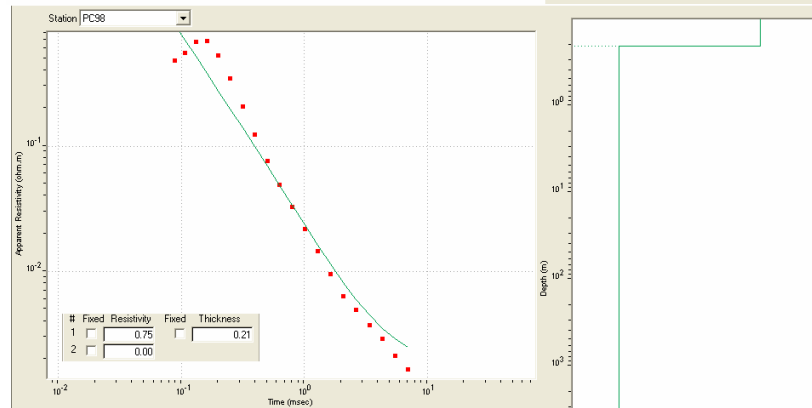
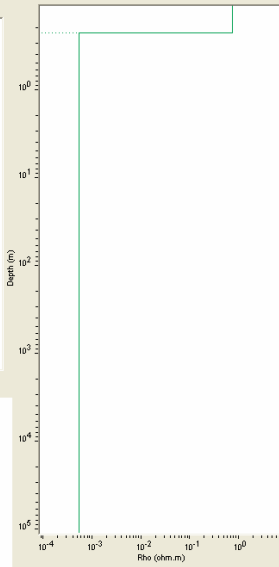
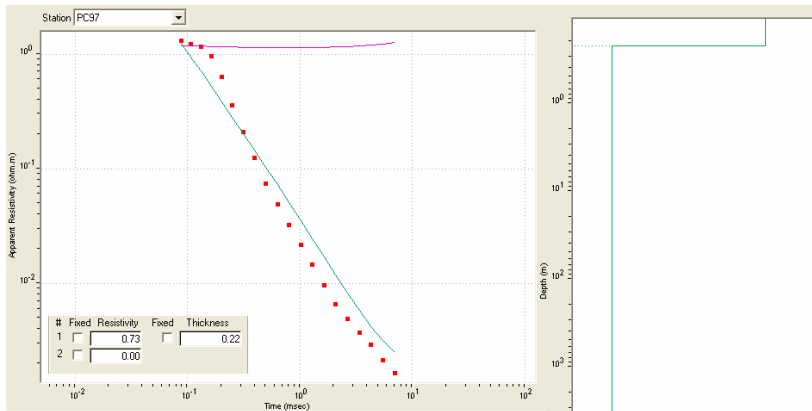












Crucero-Puerto

