

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



TESIS

**MODELADO 1D DE MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS DE
FUENTE CONTROLADA USANDO UN DIPOLO ELÉCTRICO
HORIZONTAL COMO FUENTE**

PRESENTA

ING. GELDER ÉNEO CÁMARA BEAUREGARD

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL GRADO DE MAestrÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

JULIO, 2014



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



**LA TESIS
MODELADO 1D DE MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS DE FUENTE
CONTROLADA USANDO UN DIPOLO ELÉCTRICO HORIZONTAL
COMO FUENTE**

QUE PRESENTA

ING. GELDER ÉNEO CÁMARA BEAUREGARD

**HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
DE MAestrÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

Vo. Bo. DEL COMITÉ

DR. SÓSTENES MÉNDEZ DELGADO
DIRECTOR DE TESIS

DR. ROSBEL CHAPA GUERRERO
CO-DIRECTOR DE TESIS

M.C. DANIEL GARZA ROCHA
CO-DIRECTOR DE TESIS

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

JULIO DE 2014



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



LA TESIS

**MODELADO 1D DE MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS DE FUENTE
CONTROLADA USANDO UN DIPOLO ELÉCTRICO HORIZONTAL COMO
FUENTE**

QUE PRESENTA

ING. GELDER ÉNEO CÁMARA BEAUREGARD

**HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

Vo. Bo. DEL DIRECTOR DE TESIS

DR. SÓSTENES MÉNDEZ DELGADO

Por este medio declaro bajo protesta, haber realizado esta tesis de manera personal y haber utilizado únicamente los medios, procedimientos, y asesorías descritas en la misma.

Gelder Eneo Cámara Beauregard
Julio 13 2014

Dedicatoria

A ti que cada mañana me despiertas con una cálida sonrisa en forma de rayo de sol, como promesa de que me guiarás y proveerás de las herramientas necesarias para construir mi camino diario dentro de tu perfecta voluntad, incondicional amor, e infinita misericordia.

Gracias Papá

Todavía no naces

Y ya cambiaste mi mundo

Todavía no abres tus ojos

Y ya iluminas mi vida

Aun no conozco tu cara y ya sueño contigo

Aun no veo tus manitas y ya siento tus caricias

Tu llegada a mi vida es la bendición

Más grande que Dios me pudo otorgar

Eres la ilusión que mueve mi corazón

Y el amor que jamás pensé sentir.

Te Amo Bebe Hermosa

Enero de 2013

5 Meses Esperándote y Toda Una Vida Deseándote

A Don José Cámara Zavala. Donde quiera que te encuentres quiero agradecerte por la semilla que sembraste en mí, porque todos mis logros son producto de tus enseñanzas, no sabes cómo te extraño, y como me sirvieron esas tardes que me escapaba de casa a verte. Porque tú tuviste el Don.

Dios te tenga con él.

A mis Padres José Héctor Cámara García y Lucita Beauregard Ramos, por darme la vida, cuidarme y guiarme durante mi crecimiento, a mis hermanos Geyger, Gely, y Lucita, mis logros y lo que soy se lo debo al tiempo que compartí con ustedes.

A ti Mujer, por ser mi amiga, mi acompañante, mi cómplice en este viaje tan largo que se llama vida, gracias por llenar mis horas con tu cariño, por confiar en mí y sobre todo por darme ese pedacito de ti, ese pujipollo hermoso que ilumina mi vida cuando sus ojos me ven. Dios te de larga vida y Bendiga cada día de esos; gracias mi Dulce María.

A mi hermana Gely que durante mi estancia en Linares, siempre te hiciste presente con una llamada, para no dejar que me sintiera solo en la distancia. Te quiero mucho hermanita, cuida a esa bebe, les amo.

Agradecimientos

A la gente de mi México querido que con sus impuestos contribuyeron para que el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología tuviera fondos para otorgarme una beca dentro del Programa Nacional de Posgrados de Calidad, con la que me fue posible costear el presente trabajo y mi estancia en Linares Nuevo León durante la duración de mis estudios.

Al Dr. Sóstenes Méndez Delgado, por su dirección no solo en este trabajo sino durante toda mi estancia en la Facultad de Ciencias de La Tierra, el cual traspaso las fronteras de un profesor hasta convertirse en un gran amigo y guía. Gracias por sus consejos, conocimientos y su tiempo.

Al Dr. Rosbel Chapa Guerrero, y al M.C. Daniel Garza Rocha por su apoyo en la realización de este trabajo de investigación. Por sus enseñanzas, consejos y sobre todo ánimos cuando lo necesite muchas gracias.

Al Ing. Marco Vázquez García, Gerente de Estudios Geofísicos de Petróleos Mexicanos y al Ing. Rodolfo Rocha Ruiz, por el apoyo recibido y las facilidades para realizar las prácticas necesarias para mi formación.

A Petróleos Mexicanos, al Instituto Mexicano del Petróleo y al equipo de emgs, por el apoyo y distinción para asistir al curso de verano "The Marine Controlled Source Electromagnetic (mCSEM) Method, Mexican Summer School 2011" el cual contribuyo en gran manera para la realización de este trabajo.

A la gente del Centro de Geociencias de la UNAM campus Juriquillas, Querétaro, México, en especial al Dr. Jorge Aranda Gómez y al Dr. Mariano Cerca Martínez por las prácticas de campo en Rincón de Parangueo Guanajuato, México; una gran experiencia, de mucho aprendizaje.

Al Dr. Francisco Medina Barrera, Mi Profesor y Director de la FCT, gracias por sus enseñanzas, que me formaron y que lo grabaron para siempre en mi, no solo como catedrático sino como persona, siempre muy profesional y muy propio en todas sus acciones; Gracias.

Al Dr. Héctor de León, y al Dr. Juan Alonso Ramírez Fernández, por su confianza al facilitar mi ingreso a la UANL, gestionar mi financiamiento, y porque siempre encontré en ellos una sonrisa y un "Sí se puede" cuando necesité su apoyo durante el tiempo que duro su gestión a cargo de la dirección de la FCT.

AL Dr. Fernando Velazco Tapia, Subdirector de Posgrado. Gracias por estar siempre tan pendiente de nosotros, preocuparse y ocuparse por nuestra situación académica, se le aprecia muchísimo y en especial no olvidare el regreso de la salida a campo en Galeana con los compañeros de posgrado. Por sus enseñanzas, Gracias Doc.

A mis profesores en la Facultad de Ciencias de la Tierra, Dr. Vsevolod Yutsis Von Brinken, Dr. Cosme Pola Simuta, Dr. Dirk Masuch Oesterreich, Dr. Sóstenes Méndez Delgado, Dr. Rosbel Chapa Guerrero, Juan Carlos Montalvo Arrieta, Mc. Federico Viera, Mc. Adalberto Treviño, Mc. Tomas Cossio, Mc. Roberto Soto Villalobos, La Maestra Manuelita, y Dr. Gabriel Chávez Cabello. Gracias por su tiempo dedicación y Sabiduría.

A todo el personal Administrativo de la Facultad de Ciencias de la Tierra en especial a las secretarías Juany, Betty, Betty, y Karla, gracias por estar siempre pendiente de nuestros trámites de forma eficaz y eficiente.

A Fernando Álvarez San Román y familia; por brindarme siempre tu amistad y apoyo más que como amigo, como un hermano, gracias porque sin ti, tal vez este sueño no se hubiera materializado.

A Elías Bautista Montero y familia; gracias por ser una siempre una palabra de aliento y un consejo para mí y los míos, lamento mucho no haber estado lejos en esos momentos tan difíciles que viviste, te quiero hermano.

A mis Compañeros de Maestría: A la Magocha, Yamzul Ernesto y al HunaHuna (que también iba a la escuela con nosotros) gracias a los dos por los momentos tan padres, sus enseñanzas y hasta los jalones de oreja, fue una bonita parte de mi vida a su lado, les quiero y no les olvidare jamás. A la carnalita Yoana Vargas, A las chow's Lupita, Ale Santana, Mary, Adriana, a los sobrinos de macpato Hugo, Toño y Luis, El Doc, El Che, Igorh Ishi, Victor Infante, Chago, los Poletos, a Josué del SGM. Gracias por su ayuda, compañerismo amistad y en ocasiones complicidad, de corazón gracias.

A mis amigos de Licenciatura y Linares: Jerry, Mony, Rocha, Ramón, Conchi, Omar, Dalila, Amy, La Prima, Katy Porras, Sandra, Viky, Naye, Katy Villareal, Pollo, Pita Tovar, Carolina, Adolfo, Fabián, Freddy, Pakito, Chucho, Faby, Ale Zúñiga, kike, Nelly coco, Bob, Pumba, Winy, Monrroy, Cazonas, Humberto y Carlitos Villareal, Lili.

A Temo Alvarado y familia, muchas gracias por aceptarme en su casa como un miembro más, por esas tardes de renovación en las que espiritualmente me hacían sentir en casa, y por tantos consejos y ayuda, Dios los Bendiga.

A las Familias Bravo, Alvarado, Ocampo Martínez, Elizondo, Cavazos, Guerrero, Rocha Treviño, Sampayo Guerrero, Zúñiga Pérez, Villareal, Alvarado y demás amigos y vecinos que hicieron que mi estancia lejos de casa no me sintiera solo, al adoptarme como un miembro más de su familia, Dios los Bendiga trayendo paz y abundancia a sus hogares.

Y a todos los no mencionados no por olvido sino porque faltaría espacio para mencionar a tanta gente tan agradable a la cual estoy, muy agradecido, muy agradecido.

A todos gracias.

Gelder Cámara

Cuando soñamos solos

Se trata de tan solo un sueño

Pero...

Cuando soñamos junto con los demás

Ese sueño se transforma

En el comienzo de una gran realidad.

Helder Cámara

ÍNDICE

	Página
Lista de figuras	<i>iv</i>
Lista de tablas	<i>ix</i>
Resumen	<i>x</i>
Abstract	<i>xi</i>
Capítulo I Generalidades	
I.1 Introducción.....	1
I.2 Justificación.....	2
I.3 Objetivos.....	5
I.4 Hipótesis.....	6
I.5 Metodología.....	6
Capítulo II Marco teórico	
II.1 Introducción.....	8
II.2 Evolución de los mCSEM en el contexto de la industria de la exploración petrolera.....	8
II.3 Evolución académica de los mCSEM.....	11
II.4 Las ecuaciones de Maxwell.....	14
II.5 La resistividad eléctrica como propiedad física de las rocas.....	16
II.6 Ley de Archie.....	17
II.7 Rango de resistividad de las rocas.....	19
II.8 Resumen.....	19
Capítulo III Metodología	
III.1 Introducción.....	21
III.2 Adquisición.....	21
III.2.1 Equipo de adquisición.....	22
III.2.2 Configuración de la exploración.....	28
III.3 Procesado de datos mCSEM.....	35

III.4	Análisis, modelado e inversión de datos mCSEM.....	39
III.4.1	Modelado 1D con un dipolo eléctrico como fuente.....	43
III.4.2	Inversión 1D tipo Occam.....	47
III.5	Resumen.....	50

Capítulo IV OCCAM1DCSEM

IV.1	Introducción.....	51
IV.2	Descripción del algoritmo de inversión de datos tipo Occam.....	52
IV.3	Modelos, geometría transmisor-receptor.....	53
IV.3.1	Orientación del transmisor.....	54
IV.3.2	Orientación de los receptores.....	55
IV.4	Archivos de entrada de OCCAM1DCSEM.....	57
IV.4.1	El archivo de iteración.....	58
IV.4.2	El archivo del modelo.....	59
IV.4.3	El archivo de datos.....	62
IV.5	Ejecución de OCCAM1DCSEM.....	63
IV.5.1	Archivos de salida.....	66
IV.6	Modelado directo 1D con Dipole1D.....	67
IV.7	Resumen.....	67

Capítulo V Modelado e inversión

V.1	Introducción.....	68
V.2	Flujo de trabajo para modelado directo e inversión.....	69
V.3	Pruebas con Dipole1D y Occam1DCSEM.....	70
V.3.1	Prueba del software con datos reales.....	70
V.3.2	Prueba del software con datos sintéticos.....	75
V.4	Modelado directo e inversión de datos mCSEM.....	78
V.4.1	Planteamiento de modelos 1D.....	79
V.4.2	Respuestas del modelado directo con Dipole1D.....	84
V.4.3	Respuestas de la inversión de datos con OCCAM1DCSEM.....	91
V.5	Resumen.....	99

Capítulo VI Resultados y reinterpretación

VI.1	Introducción.....	100
VI.2	Resultados de la inversión de los datos sintéticos.....	100
VI.2.1	Resultados del modelo M1.....	101
VI.2.2	Resultados del modelo M2.....	102
VI.2.3	Resultados del modelo M3.....	103
VI.2.4	Resultados del modelo M4.....	104
VI.2.5	Resultados del modelo M5.....	105
VI.3	La herramienta Occam1DInterpreter.....	106
VI.3.1	Descripción del algoritmo Occam1DInterpreter.....	107
VI.4	Reinterpretación con la herramienta Occam1DInterpreter.....	110
VI.4.1	Reinterpretación del modelo M1a.....	110
VI.4.2	Reinterpretación del modelo M3.....	111
VI.4.3	Reinterpretación del modelo M4b.....	112
VI.5	Resumen.....	113

Capítulo VII Conclusiones y recomendaciones

VII.1	Conclusiones.....	114
VII.2	Recomendaciones.....	116

Referencias	118
-------------	-------	-----

Anexo A	.....	125
Anexo B	.....	127
Anexo C	.....	128

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1. Cuencas productoras y reservas de hidrocarburos en México (Modificada de Bazán Navarrete y Ortiz Muñiz, 2008).	3
Figura 1.2. Rangos de profundidad para usar el criterio de Aguas Profundas (PEP, 2008).	4
Figura 2.1. Transmisor electromagnético flotante (http://www.emgs.com/content/523/Source).	12
Figura 2.2. Relación de la Resistencia con la Resistividad (Modificada de EMGS, 2011).	16
Figura 2.3. Areniscas con poros saturados con solución salina y areniscas con poros saturados con hidrocarburos (Worthington, 1985).	18
Figura 2.4. Rango de Resistividad en algunos tipos de rocas que componen la corteza terrestre, las areniscas con hidrocarburos presentan una resistividad elevada que va desde 30 Ω -m hasta los 500 Ω -m, documentado por Fischer (2005).	20
Figura 3.1. Estructura básica de un sensor eléctrico (Electrodo) de plata y cloruro de plata, el cual forma parte de los receptores que son desplegados en el fondo marino para la exploración con fuente controlada (Constable y Key, 2004).	23
Figura 3.2. Recuperación en la cubierta del barco de un receptor usado para exploración mCSEM (Schlumberger, 2009b).	23
Figura 3.3. Receptor CSEM. Las antenas dipolares ortogonales del receptor miden los valores de E_x y E_y y dos magnetómetros de bobinas de inducción miden los valores de H_x y H_y (Scripps Institution of Oceanography - UC San Diego; http://www.sio.ucsd.edu).	24
Figura 3.4. Despliegue de la fuente CSEM, desde la embarcación. Tomada de http://www.emgs.com .	26
Figura 3.5. Transmisor CSEM. El transmisor comprende un remolcador pescante - la sección del cabezal que contiene la potencia y el instrumental- y una antena del cable marino con electrodos dipolares en los extremos de dos cables (Schlumberger, 2009b).	27
Figura 3.6. Exploración Marina CSEM. En esta figura se muestran los dos tipos de configuración para exploración marina con métodos electromagnéticos de fuente controlada CSEM. A la izquierda la exploración usando un Dipolo Eléctrico Horizontal [HED] (Fischer, 2005). A la derecha la exploración usando un Dipolo Eléctrico Vertical [VED] (Holten <i>et al.</i> , 2010).	28
Figura 3.7. Adquisición mCSEM con dipolo eléctrico horizontal como fuente (Hesthammer <i>et al.</i> , 2010).	29
Figura 3.8. La Respuesta Anómala Normalizada (NAR) indica la presencia de algo anómalo resistivo en el área de estudio versus la resistividad de fondo, esta obtenida a través de un receptor ubicado fuera del área de estudio,	30

	el cual recibe el nombre de receptor de referencia (Hesthammer <i>et al.</i> , 2010).	
Figura 3.9.	Gráfico NMVO. Gráfico NAR de una prospección realizada en el Mar de Barents. La NAR de la amplitud con respecto a la estimada de fondo, alcanza un valor de alrededor de 20% en la locación de la prospección mapeada. Esta respuesta se considera significativa (Hesthammer <i>et al.</i> , 2010).	31
Figura 3.10.	Se muestra una visión general de la tecnología Petromarker. Los electrodos superior e inferior que conforman el transmisor (dipolo vertical), en el fondo del mar el trípode extensible y el receptor. La escala de color representa el campo eléctrico vertical en presencia del yacimiento (Holten y Grude, 2009).	32
Figura 3.11.	Esquema de la señal generada por la fuente vertical en una exploración mCSEM (COMESA, 2009).	33
Figura 3.12.	Trípodes para receptores. Esquema de los trípodes para asegurar la verticalidad de los receptores (http://www.petromarker.com).	34
Figura 3.13.	Componentes de una onda cuadrada (Schlumberger, 2009b).	35
Figura 3.14.	Datos mCSEM en el dominio del tiempo (<i>time gather</i>) Cada receptor registra los datos para dos mediciones de los campos H y E horizontales (Schlumberger, 2009b).	36
Figura 3.15.	Datos mCSEM en el dominio de la frecuencia (Schlumberger, 2009b).	37
Figura 3.16.	Trayectoria de la señal EM Fuente - Receptor (Schlumberger, 2009b).	38
Figura 3.17.	Análisis de amplitud y fase para determinar el desplazamiento óptimo para detectar un cuerpo resistivo, trabajando con varias frecuencias y separaciones transmisor-receptor (Schlumberger, 2009b).	40
Figura 3.18.	Modelo 1D de N -capas. Cada capa i tiene una conductividad σ_i y una profundidad z_i para la cima de la capa (Key, 2009a).	44
Figura 4.1	Geometría del Modelo 1D para CSEM.	54
Figura 4.2	Parámetros de orientación del transmisor (modificada de Key, 2009b).	55
Figura 4.3	Parámetros de rotación para la orientación absoluta de los sensores del receptor a lo largo de los ejes (x'' , y'' , z''), modificada de Key (2009b).	56
Figura 5.1	Flujo de trabajo para el modelado e inversión de datos CSEM.	69
Figura 5.2	Mapa regional del Canal de San Diego donde se realizaron mediciones de CSEM, MT y gravimétricas (Constable <i>et al.</i> , 2009).	71
Figura 5.3	Resultados del cálculo de magnitud y fase del campo eléctrico E_y de los datos de Constable <i>et al.</i> (2009), obtenidos con Excel de Microsoft.	72
Figura 5.4	Respuesta de magnitud y fase del campo eléctrico E_y de los datos de Constable <i>et al.</i> (2009), obtenida con la función PlotCSEM, de Matlab provista con el software de Scripps.	73
Figura 5.5	Resultados del cálculo de la magnitud y fase del campo eléctrico E_y de los datos de Constable <i>et al.</i> (2009), obtenidos con la función	73

	CSEMGRPH.	
Figura 5.6	Inversión documentada por Constable <i>et al.</i> (2009).	74
Figura 5.7	Inversión de datos mCSEM obtenida con la versión de OCCAM1DCSEM para los datos de Constable <i>et al.</i> (2009).	74
Figura 5.8	Modelo de 5 capas: aire, agua salada, resistivo y sedimentos, tomado para probar el software (Key, 2009a).	75
Figura 5.9	Amplitud y fase del campo eléctrico E_y del modelo presentado en la figura 5.8, generada con Dipole1D.	76
Figura 5.10	Gráficas de las amplitudes de los campos magnéticos y eléctricos publicadas en el artículo de Key (2009a), obtenidas a partir del modelo de la figura 5.8.	77
Figura 5.11	Gráficas de las amplitudes de los campos magnéticos y eléctricos obtenidas con Dipole1D, CreateEMDataFile y PlotCSEM, a partir del modelo de la figura 5.8.	77
Figura 5.12	Resultado de la inversión documentada por Key (2009a), para los datos presentados en la figura 5.10.	78
Figura 5.13	Inversión obtenida con OCCAM1DCSEM para los datos de la figura 5.11 y graficada con PlotCSEM.	78
Figura 5.14	Modelo M0 que consiste de tres capas: aire, agua de mar y sedimentos.	80
Figura 5.15	Modelo M1 que consiste de cinco capas: aire, agua de mar y un reservorio entre dos capas de sedimentos. El espesor de la primera capa de sedimentos varía de 1000 (M1a), 1500 (M1b) y 2500 m (M1c).	81
Figura 5.16	Modelo M2 que consiste de cinco capas: aire, agua de mar y un reservorio entre dos capas de sedimentos. El espesor de la capa reservorio varía de 800 (M2a), 200 (M2b) y 50 m (M2c).	81
Figura 5.17	Modelo M3 que consiste de siete capas: aire, agua de mar y dos reservorios entre tres capas de sedimentos.	82
Figura 5.18	Modelo M4 que consiste de siete capas: aire, agua de mar y dos reservorios entre tres capas de sedimentos. El espesor de la capa de sedimentos entre los dos reservorios varía de 1000 (M4a), 500 (M4b) y 200 m (M4c).	83
Figura 5.19	Modelo M5 que consiste de cinco capas: aire, agua de mar y un reservorio entre dos capas de sedimentos. La resistividad del reservorio entre las dos capas de sedimentos varía de 70 (M5a), 40 (M5b) y 20 ohm-m (M5c).	83
Figura 5.20	Parámetros del modelo M0 y las respuestas en amplitud y fase del campo eléctrico E_y .	84
Figura 5.21	Parámetros del modelo M1 y las respuestas en amplitud y fase del campo eléctrico E_y .	86
Figura 5.22	Parámetros del modelo M2 y las respuestas en amplitud y fase del campo eléctrico E_y .	87
Figura 5.23	Parámetros del modelo M3 y las respuestas en amplitud y fase del campo eléctrico E_y .	88
Figura 5.24	Parámetros del modelo M4 y las respuestas en amplitud y fase del campo eléctrico E_y .	89

Figura 5.25	Parámetros del modelo M5 y las respuestas en amplitud y fase del campo eléctrico E_y .	90
Figura 5.26	Resultados de la inversión CSEM de los datos provenientes del modelo M0. Izquierda: modelo final e intermedios. Derecha: datos de amplitud del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz y respuestas del modelo inicial y final.	92
Figura 5.27	Resultados de la inversión CSEM de los datos provenientes del modelo M1, para los casos a , b y c . Izquierda: modelo final e intermedios. Derecha: datos de amplitud del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz y respuestas del modelo inicial y final.	93
Figura 5.28	Resultados de la inversión CSEM de los datos provenientes del modelo M2, para los casos a , b y c . Izquierda: modelo final e intermedios. Derecha: datos de amplitud del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz y respuestas del modelo inicial y final.	95
Figura 5.29	Resultados de la inversión CSEM de los datos provenientes del modelo M3. Izquierda: modelo final e intermedios. Derecha: datos de amplitud y fase del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz y respuestas del modelo inicial y final.	96
Figura 5.30	Resultados de la inversión CSEM de los datos provenientes del modelo M4, para los casos a , b y c . Izquierda: modelo final e intermedios. Derecha: datos de amplitud del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz y respuestas del modelo inicial y final.	97
Figura 5.31	Resultados de la inversión CSEM de los datos provenientes del modelo M5, para los casos a , b y c . Izquierda: modelo final e intermedios. Derecha: datos de amplitud del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz y respuestas del modelo inicial y final.	98
Figura 6.1	Comparación de la respuesta de E_y para un semiespacio conductor (M0) y otro con un reservorio con hidrocarburos (M1a).	101
Figura 6.2	Comparación de los resultados de la inversión para el modelo M1 en sus variantes a (1000 m), b (1500 m) y c (2500 m) para la profundidad de la parte superior del reservorio.	102
Figura 6.3	Comparación de los resultados de la inversión para el modelo M2 en sus variantes a (800 m), b (200 m) y c (50 m) de espesor del reservorio.	103
Figura 6.4	Resultados de la inversión para el modelo M3.	104
Figura 6.5	Comparación de los resultados de la inversión para el modelo M4 en sus variantes a (1000 m), b (500 m) y c (200 m) para el espesor de la capa entre dos reservorios.	105
Figura 6.6	Comparación de los resultados de la inversión para el modelo M5 en sus variantes a (70 Ohm-m), b (40 Ohm-m) y c (20 Ohm-m) para la resistividad de la capa del reservorio.	106
Figura 6.7	Reinterpretación de la geometría de la capa resistiva del modelo M1a.	111
Figura 6.8	Reinterpretación de la geometría de las capas resistivas del modelo M3.	112
Figura 6.9	Reinterpretación de la geometría de las capas resistivas del modelo	113

M4b.

Figura A.1	Resultados del cálculo de la magnitud y fase del campo eléctrico E_y de los datos de Constable <i>et al.</i> (2009), obtenidos con la función CSEMGRPH.	126
Figura C.1	Ubicación del archivo autoejecutable con el que se inicia la aplicación Occam1Diterpreter.	129
Figura C.2	Ventana Principal de la aplicación donde se cargarán los archivos necesarios y se interpretaran las zonas de interés.	129
Figura C.3	Ventana de carga del archivo que contiene los datos obtenidos con OCCAM1DCSEM.	130
Figura C.4	Ventana de interpretación que muestra el grafico de resistividad 1D.	131
Figura C.5	Ventana de carga del archivo “RUNFILE” que contiene los datos del Modelo Teórico.	131
Figura C.6	Ventana de comparación entre el Modelo Teórico y el obtenido en la inversión.	132

LISTA DE TABLAS

		Página
Tabla IV.1	Contenido del archivo de inicio o iteración (<i>IterationFile</i> o <i>Startup</i>) usado por OCCAM1DCSEM, el cual es un archivo de texto simple (Key, 2009b).	58
Tabla IV.2	Ejemplo del formato del archivo de modelo (Key, 2009b).	59
Tabla IV.3	Uso de preferencias en el archivo de modelo (Key, 2009b).	61
Tabla IV.4	Fragmento de Archivo de datos de adquisición CSEM (Key, 2009b).	62
Tabla IV.5	Códigos de datos CSEM y MT utilizados en EMDData_1.1 (Key, 2009b).	64
Tabla IV.6	Fragmento del Archivo de Salida generado por OCCAM1DCSEM (Key, 2009b).	66
Tabla VI.1	Muestreo del Vector Resistividad en búsqueda de la desviación estándar de cada muestra.	109
Tabla VI.2	Matriz que contiene los valores de resistividad y profundidad de varias zonas de interés obtenidas con el análisis de la desviación estándar.	110

RESUMEN

El sol nos provee energía de muchas maneras. Una conexión sorprendente entre la exploración de recursos energéticos y el sol está adquiriendo cada vez más importancia para la industria de la exploración y producción de energía (Hidrocarburos). Los iones emitidos por el sol experimentan un proceso complejo de interacción con el campo magnético terrestre, generando campos electromagnéticos que se propagan y penetran en el subsuelo e interactúan con sus capas conductoras. A medida que la industria intensifica la búsqueda de hidrocarburos, más Geocientíficos están utilizando estos campos electromagnéticos para examinar áreas difíciles de detectar con métodos sísmicos.

El método electromagnético de fuente controlada CSEM que se utiliza hoy para la exploración de hidrocarburos en ambientes marinos profundos, fue desarrollado por Charles Cox, de Scripps Institution of Oceanography en la década de 1970 (Cox, 1981). El primer experimento se llevó a cabo, en una cordillera en medio del océano en el Pacífico en 1979 (Spiess et al., 1980; Cox, 1981).

Con el desarrollo de la presente de investigación se pretende aportar una herramienta mas, para futuros trabajos académicos para los cuales se utilicen, Métodos Electromagnéticos de Fuente Controlada (CSEM), al facilitar el uso del software existente migrándolo a nuevas plataformas para que pueda ser usado por alumnos y profesores dentro y fuera de esta facultad. Esto a través de la implementación del algoritmo OCCAM1DCSEM (Key, 2009; Constable, 1987); así mismo realizando modelado 1-D, con datos electromagnéticos marinos de fuente controlada, obtenidos utilizando un dipolo eléctrico horizontal, y finalmente, dejando el código fuente abierto para futuras modificaciones y mejoras.

ABSTRACT

The sun provides energy in many ways. A surprising connection between the exploration of energy resources and the sun is becoming increasingly important for the exploration industry and energy production (oil). Ions emitted by the sun undergo a complex process of interaction with the Earth's magnetic field, generating electromagnetic fields that propagate and penetrate underground and interact with their conductive layers. As the industry intensifies the search for hydrocarbons, more Geoscientists are using electromagnetic fields to examine areas difficult to detect by seismic methods.

The controlled source electromagnetic method that is used today CSEM for hydrocarbon exploration in deep marine environments, was developed by Charles Cox of Scripps Institution of Oceanography in the late 1970 (Cox, 1981). The first experiment was conducted in a mid-ocean ridge in the Pacific in 1979 (Spiess et al. 1980; Cox, 1981).

With the development of this research is to provide one more tool for future academic work for which they are used, methods Controlled Source Electromagnetic (CSEM), facilitating the use of existing software to new platforms migrating so that it can be used by students and teachers inside and outside the faculty. This is through the implementation of the algorithm OCCAM1DCSEM (Key, 2009, Constable, 1987), likewise making 1-D modeling with data from controlled source marine electromagnetic, obtained using a horizontal electric dipole, and finally, leaving the open source for future modifications and improvements.

I Generalidades

I.1 Introducción

A medida que la industria intensifica la búsqueda de hidrocarburos, más Geocientíficos están utilizando los métodos electromagnéticos para complementar los estudios sísmicos y aumentar la probabilidad de éxito o para examinar áreas difíciles de detectar a través de métodos sísmicos. Los avances acaecidos recientemente en la identificación de características del subsuelo han incorporado una herramienta significativa para la búsqueda de hidrocarburos, utilizando los contrastes de resistividad. La técnica de sondeo electromagnético comprende dos tecnologías relacionadas entre sí, los levantamientos magnetotelúricos y los levantamientos electromagnéticos con fuente controlada, los cuales nos proporcionan conocimientos del subsuelo claramente diferentes. Su capacidad para esclarecer las estructuras y ayudar a identificar posibles acumulaciones de hidrocarburos antes de la perforación, ha despertado un gran interés entre la gente de exploración y producción.

El estudio de las corrientes eléctricas en la Tierra, comúnmente conocido como telúrica, no es nuevo. Conrad Schlumberger, uno de los fundadores de Schlumberger, utilizó este fenómeno en los primeros estudios superficiales que dirigió en la década de 1920, antes de iniciarse en el método de adquisición de registros con cable (Leonardon, 1928). Louis Cagniard, un profesor de la Sorbona en París, reportó por primera vez la combinación de una medición de los campos eléctricos y magnéticos, denominada magnetotelúrica (MT), para la exploración del subsuelo en el año 1952 (Cagniard, 1953). No obstante, en los últimos años, el método EM se ha convertido en una herramienta importante para la industria de exploración y producción, gracias a los avances producidos en la tecnología de adquisición, el modelado y la inversión de datos.

Ahora, los resultados MT pueden combinarse de manera más eficiente con los levantamientos sísmicos y gravimétricos, generando un modelo más calibrado del subsuelo. Si bien, Cagniard analizó también un método relacionado con las mediciones MT que utiliza un

campo electromagnético impuesto artificialmente, las técnicas de generación y detección de una señal suficientemente intensa para ser utilizada en la industria de la exploración y producción aparecieron algunas décadas más tarde: en la década de 1960, en tierra firme, y posteriormente en la década de 1980, en el ambiente marino. Al utilizar una fuente artificial, a este método se conoce ahora como método electromagnético con fuente controlada (CSEM, por sus siglas en inglés).

La interacción de la Tierra con los campos eléctricos y magnéticos incidentes es compleja. Dos factores importantes para el análisis MT son el espectro de frecuencia de los campos y la resistividad eléctrica (*o su inversa, la conductividad eléctrica*) del medio particular a través del cual se propagan los campos. El análisis de los datos del espectro de frecuencia ayuda a obtener un valor de resistividad aparente como una función de la frecuencia. Esta resistividad aparente puede relacionarse con la resistividad verdadera de la formación a diversas profundidades. Si el subsuelo es homogéneo, la resistividad aparente medida es igual a la resistividad verdadera; pero, si la resistividad cambia con la profundidad, la resistividad aparente es una combinación de los efectos de las mediciones y un promedio ponderado de las resistividades. A través del análisis de los datos, los intérpretes pueden determinar las profundidades de los cuerpos cuyas resistividades son desiguales.

I.2 Justificación

Con la aplicación del método electromagnético de fuente controlada en ambiente marino (mCSEM), se pretende aumentar la probabilidad de éxito en la búsqueda de hidrocarburos al complementarlo a la información sísmica que se tenga del área de estudio en cuestión. PEMEX ha estimado que de un total de 54 mil millones de barriles de petróleo crudo equivalente de recursos prospectivos (potenciales) que tiene el país, el 55 por ciento o cerca de 30 mil millones de barriles de crudo equivalente, se localizan en Aguas Profundas en una superficie de 575,000 km² (*ver fig. 1.1*).

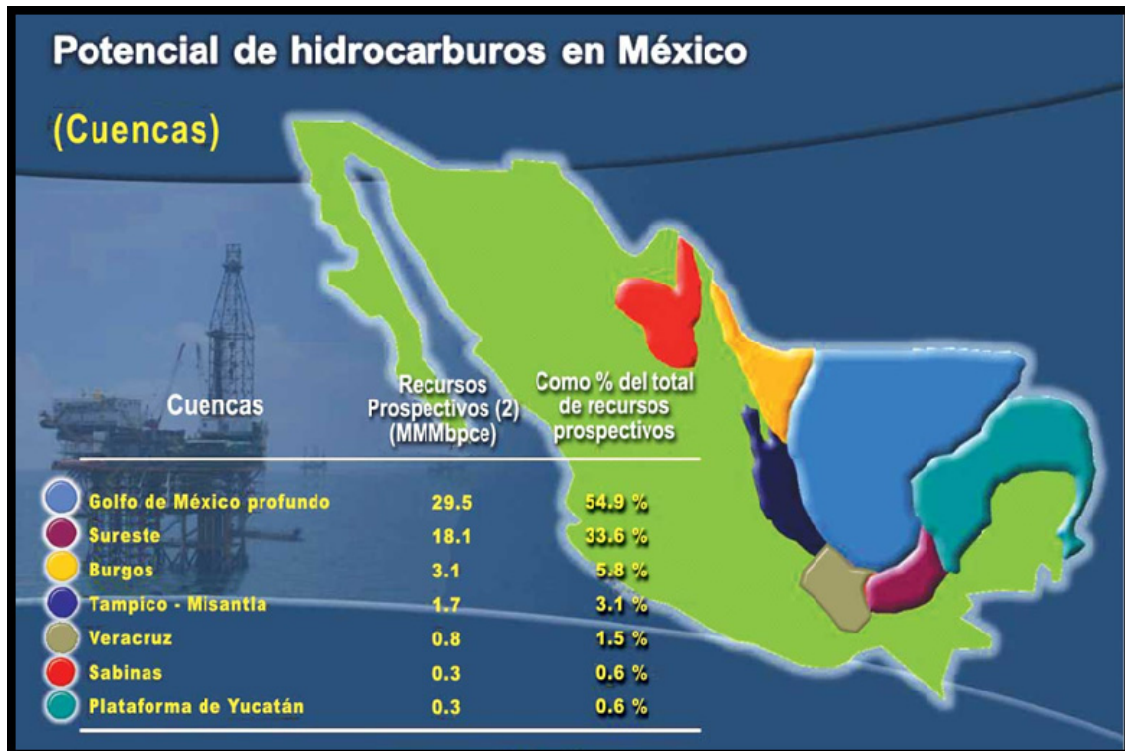


Fig. 1.1. Cuencas productoras y reservas de hidrocarburos en México (Modificada de Bazán Navarrete y Ortiz Muñiz, 2008).

Dadas las necesidades de asegurar el éxito en la búsqueda de nuevos horizontes de reservas de hidrocarburos en las aguas profundas del Golfo de México, se requiere tecnología muy especializada y los conocimientos para hacer frente a cualquier problemática que se presente durante la perforación exploratoria, la terminación y explotación de pozos. La tecnología, equipos y materiales requeridos para la exploración y explotación en aguas profundas (*ver fig. 1.2.*) significan altos costos de adquisición y operación, debido a la disponibilidad limitada de estos equipos en el mercado, donde los tiempos de entrega están en función de la demanda originada por la actividad petrolera internacional. En la actualidad la perforación de un pozo en aguas profundas oscila entre los 70 y 150 millones de dólares (PEP, 2008).

Adicionalmente, no sólo se requiere contar con la tecnología, sino que es necesario adquirir las habilidades para hacer una correcta selección de las tecnologías, así como para una utilización apropiada. Con esto surge la necesidad de implementar nuevas técnicas y métodos

de exploración que minimicen el rango de error, en dicha búsqueda y explotación de nuevos horizontes productivos y de esta manera aumentar la rentabilidad, evitando la perforación de pozos improductivos.

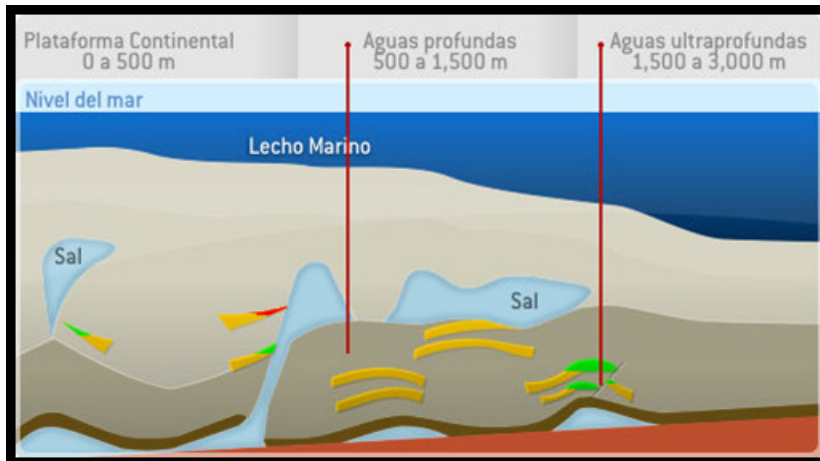


Fig. 1.2. Rangos de profundidad para usar el criterio de Aguas Profundas (PEP, 2008).

Hasta el momento, se han venido utilizando los métodos sísmicos de reflexión debido a la alta resolución que estos proporcionan; aquí es donde surge la necesidad de aumentar la factibilidad de estos estudios adicionando nuevas tecnologías tales como lo son los métodos electromagnéticos de fuente controlada (CSEM). Estos surgen como una solución complementaria mediante la cual es posible detectar la presencia de hidrocarburos, por lo que de manera integrada a los datos sísmicos es posible identificar y/o confirmar la presencia de hidrocarburos en volúmenes comerciales en los prospectos de aguas profundas. Actualmente, algunos países productores de hidrocarburos de aguas profundas han implementado esta tecnología, tales como lo son: Brasil, Nigeria, Egipto, Gran Bretaña, Noruega, y Guinea Ecuatorial; los cuales están dentro de los diez principales productores petroleros en Aguas Profundas.

En los últimos años se ha desarrollado la tecnología de los métodos electromagnéticos para su aplicación en la exploración de hidrocarburos en el mar en zonas de aguas profundas. Esta técnica nos permite obtener la distribución de los valores de la resistividad eléctrica de los materiales geológicos del subsuelo, ya sea por debajo de la superficie terrestre (onshore), o

bien por debajo del suelo oceánico (offshore). La finalidad de la aplicación de esta tecnología es sobre todo reducir el riesgo de exploración, debido a los costos tan altos de perforación, es decir disminuir la incertidumbre de las localizaciones generadas.

La resistividad eléctrica de las rocas es una propiedad física que está relacionada en gran porcentaje con la presencia de fluidos. La medición de la resistividad de las formaciones y su correcta interpretación e integración con la información geológica-geofísica existente en el área de estudio, permitiría predecir el tipo de fluido que satura la roca antes de perforar, reduciendo sustancialmente los riesgos de perforar pozos improductivos de hidrocarburos.

Por todo lo antes mencionado, es necesario estudiar a fondo los métodos electromagnéticos de fuente controlada, a fin de generar nuevas técnicas de modelado y de inversión de datos que contribuyan a mejorar la interpretación en ambientes simples y complejos.

I.3 Objetivos

General:

Realizar modelado e inversión 1-D de CSEM utilizando un Dipolo Eléctrico Horizontal (HED) como fuente.

Particulares:

- A) Implementación del Algoritmo de modelado e inversión 1-D de CSEM (Constable *et al.*, 1987 y Key, 2009a).

Específicos:

1. Instalar software de plataforma, revisar la documentación y manuales tanto del sistema operativo, como del software existente para el estudio de resistividades.
2. Implementar, el algoritmo para el procesamiento de datos electromagnéticos de fuente controlada OCCAM1DCSEM.

3. Desarrollar pruebas con datos sintéticos, a fin de corroborar que el algoritmo tenga el comportamiento correcto.

B) Explorar y determinar contrastes de resistividades, espesores de capas resistivas y en algunos casos explorar la presencia de varios resistivos.

I.4 Hipótesis

La resistividad de la capa permeable está relacionada con la presencia de Hidrocarburos. La resistividad de la capa contenedora de hidrocarburos (Roca almacén) aumenta proporcionalmente en medida que la saturación de aceite en la roca es mayor. Mediante esta propiedad (Resistividad) es posible distinguir una capa contenedora de hidrocarburos, entre otros conductores presentes como lo son las rocas rellenas de agua.

I.5 Metodología

Para llevar a cabo el cumplimiento de los objetivos antes descritos en el presente trabajo de investigación, se realizaron las siguientes tareas:

- Acondicionamiento de una estación de trabajo;
- Revisión del software existente;
- Pruebas de modelado e inversión con datos sintéticos ya publicados (Key, 2009a) y
- Modelado 1-D e inversión de datos sintéticos 1-D.

Se acondicionó una estación de trabajo, en la cual se instalaron en forma dual los sistemas operativos Windows 7TM de Microsoft Corporation, la distribución GNU Mandriva 2010 de Linux y Mac Osx Leopard 10.6.6. De igual manera se implementó el algoritmo OCCAM1DCSEM (Constable et al., 1987 y Key, 2009a), diseñado por Electromagnetic Methods Consortium y proporcionado por Scripps Institution of Oceanography de la Universidad de San Diego, California.

Con lo anterior se realizaron pruebas con los datos sintéticos para corroborar el correcto funcionamiento del software, así mismo se realizó el modelado de los datos en 1-D.

En una última etapa, ya con el software funcionando adecuadamente, se estudiaron, en primer lugar los contrastes de resistividades, buscando determinar espesores de capas resistivas, seguido a esto se procedió a identificar, en algunos casos, la presencia de varios resistivos y con ello generar modelos en 1-D, y finalmente realizar el procesado con datos reales.

En el capítulo II se presenta la historia del método marino de fuente controlada (mCSEM-marine Controlled Source ElectroMagnetic), así como sus bases teóricas. En el capítulo III se muestra el proceso de adquisición, procesado, modelado e inversión de los datos adquiridos, así como el equipo y herramientas matemáticas y de software. En el capítulo IV se describe a detalle el uso del software Occam1DCSEM y Dipole1D usado para la inversión y modelado directo de datos CSEM respectivamente. En el capítulo V se plantean los modelos para llevar a cabo el modelado e inversión de datos y posteriormente mostrar los resultados obtenidos en el capítulo VI. En el capítulo VII se presentan las conclusiones y algunas recomendaciones para futuros trabajos con Métodos Electromagnéticos de Fuente Controlada.

II Marco Teórico

II.1 Introducción

En este capítulo se presenta un breve resumen de la evolución académica de los métodos electromagnéticos de fuente controlada por sus siglas en inglés CSEM (Controlled Source Electro Magnetic), así como el impacto que tuvo desde sus inicios hasta convertirse en una herramienta de suma importancia comercial en la industria de la exploración de hidrocarburos. También se presentan las bases de la teoría física que hace posible la aplicación de este método para resolver problemas geológicos.

II.2 Evolución de los mCSEM en el contexto de la industria de la exploración petrolera

Hasta hace pocos años, la principal aplicación de los métodos EM en hidrocarburos fue el registro de pozos. El método Magnetotelúrico (MT) ha sido utilizado en tierra desde los años 50 (Vozoff, 1972) y en ambientes marinos se utilizan desde los 80 del siglo pasado para obtener una imagen de la estructura (Key *et al.*, 2006). El método de MT es particularmente utilizado para mapear yacimientos de sal, rocas volcánicas y carbonatadas. Sin embargo, a causa de que en MT las corrientes dentro de la tierra son generadas mayormente en el plano horizontal, los resistivos horizontales delgados son casi invisibles a este método (Constable y Srnka, 2007). El uso de los métodos electromagnéticos en la exploración de hidrocarburos, en continente, se remonta a principios del siglo XX (Rust, 1938), y continuó evolucionando hasta nuestros días, principalmente a través de prospecciones realizadas con métodos MT, los cuales eran utilizados para determinar límites estructurales.

El interés por el método electromagnético con fuente controlada en el mar (mCSEM) surgió en la época de la guerra fría, cuando se propuso una supuesta capa de alta resistividad

dentro de la litosfera oceánica, como medio de comunicación segura en caso de producirse una guerra nuclear (Schlumberger, 2009a). En un principio, los fondos de financiamiento para el desarrollo de instrumentos provenían de la Agencia de Investigación de Proyectos Avanzados de Defensa (DARPA) de los EE.UU., que estaba interesada en el efecto del fondo marino en las comunicaciones submarinas. El apoyo de los EE.UU. también provino de la Oficina de Investigación Naval (ONR), que quería aprender más sobre el medio ambiente del ruido del fondo marino.

En un sentido más práctico, el método mCSEM se hizo realidad porque las mediciones iniciales efectuadas por Charles Cox y sus colegas del Instituto Oceanográfico de Scripps en la década de los 70 del siglo pasado, indicaron que el nivel de ruido del campo eléctrico natural, con frecuencias de aproximadamente 1 Hz, es extremadamente bajo (~ 1 pV/m). Cox (1981) observó que los campos débiles, inducidos en el subsuelo por una fuente dipolar eléctrica horizontal, cercana al fondo marino, podían ser detectados a muchos kilómetros de distancia. Además, interpretó que el método mCSEM era preferentemente sensible a las zonas relativamente resistivas que se encuentran por debajo del lecho marino. Por el contrario, el método magnetoteléurico, ampliamente utilizado, detecta el material conductor. En consecuencia, el método mCSEM permitió estudiar la Tierra de una manera diferente.

Posteriormente, Cox y sus colegas diseñaron y construyeron un instrumento para efectuar levantamientos mCSEM en el océano profundo. Aplicado por primera vez en el año 1979, siguió siendo utilizado durante la década de los 90 del siglo pasado. Además se desarrollaron otros programas mCSEM en la Universidad de Toronto, Canadá, a comienzos de la década de los 80 y en la Universidad de Cambridge, Reino Unido, a fines de la década de 1980. El primero se enfocó fundamentalmente en los objetivos someros de interés geotécnico; mientras que los grupos de Scripps y Cambridge utilizaron el método mCSEM para el estudio académico de las dorsales oceánicas y los rasgos relacionados con las mismas.

En 1980, Alan D. Chave se asoció con Charles Cox, como investigadores posdoctorales, y sus investigaciones dejaron en claro que el método mCSEM poseía aplicaciones industriales potenciales en las plataformas continentales. En particular, como

muchos otros, observaron que las formaciones petrolíferas eran típicamente resistivas en comparación con el sustrato, lo cual ponía de relieve los beneficios del método mCSEM sobre los enfoques magnetoteléuticos para los levantamientos aplicados a la exploración de hidrocarburos. Concomitantemente, en Len Srnka de Exxon se despertó el interés y realizó investigaciones con el método. Luego de una breve oleada de interés, la atracción del método mCSEM a nivel industrial tuvo un descenso a partir de mediados de la década de los 80. Esto como resultado de una combinación de bajos precios del petróleo, y el surgimiento de la tecnología sísmica de reflexión 3D.

El interés resurgió a fines de la década de los 90, lo que condujo a demostraciones de campo que fueron llevadas a cabo durante los años 2000–2002 en los campos productores situados frente a las costas de Angola y África Occidental por Statoil y Exxon-Mobil, respectivamente. Las evaluaciones demostraron la viabilidad del método mCSEM para la detección directa de hidrocarburos a causa de su baja resistividad, y las compañías creadas para proveer los servicios mCSEM a la industria petrolera, como EMGS, OHM y AOA Geomarine, por citar algunas comenzaron a aumentar. Esta última fue adquirida por Schlumberger en el año 2004. Lamentablemente, el resurgimiento del interés también precipitó la formulación de reclamos exagerados con respecto a la efectividad del método mCSEM y el elevado consumo de recursos económicos destinados a esta tecnología.

No obstante, hay que considerar que al método mCSEM le aguarda un futuro brillante como una de las diversas herramientas que emplearán quienes están dedicados a la exploración petrolera marina. El método permite discriminar claramente los pozos productivos de los pozos secos. Así, el método mCSEM se está convirtiendo en un componente de un enfoque de exploración integrado que incluye la sísmica de reflexión y otras tecnologías. Esta asociación de tecnologías se volverá particularmente importante conforme la exploración se desplace hacia aguas más profundas, donde el costo de perforación es extremo. En consecuencia, las compañías petroleras que realizan gran parte del proceso de análisis e interpretación de datos internamente, tales como Exxon-Mobil, y las compañías de servicios integrados, tales como Schlumberger, poseerán una ventaja comercial respecto de las compañías de servicios especiales que proveen solamente el servicio de obtención de datos

mCSEM y su análisis e interpretación (Slumberger, 2009).

II.3 Evolución académica de los mCSEM

Los Métodos Electromagnéticos en ambiente marino inician con estudios de resistividad usando corriente directa (DC) los cuales fueron llevados a cabo sobre el agua, a tan sólo unos pocos años de la creación del método (Schlumberger *et al.*, 1934). Para métodos que usan corriente directa, la resistencia del piso oceánico debe ser inferior a la resistividad del tirante de agua del océano (cuya resistividad anda alrededor de los 0,25 a 0,3 Ω -m, está en función de la salinidad y temperatura), debido a esto su principal demanda fue en la prospección de minerales de sulfuro.

El método electromagnético de fuente controlada que se utiliza hoy para la exploración de hidrocarburos en ambientes marinos profundos, fue desarrollado por Charles Cox, de Scripps Institution of Oceanography en la década de los 70 del siglo anterior (Cox, 1981). El primer experimento se llevó a cabo, en una cordillera en medio del océano en el Pacífico en 1979 (Spiess y McDonald, 1980; Cox, 1981). Cox había estado trabajando con métodos magnetotéluricos en el fondo marino, desarrollando metodologías y equipo (Cox *et al.*, 1971). La motivación original para sus experimentos de CSEM, fue la de estudiar la resistividad de las partes poco profundas de la litosfera oceánica, mediante la sustitución de las frecuencias relativamente altas, despedidas por los campos magnetotéluricos con un trasmisor (fuente) artificial en profundidad.

Varios experimentos iniciales (e.g. Webb y Constable, 1986), contribuyeron en implementaciones combinadas que dieron origen a un variómetro de banda ancha, sensible a la presión, conocido como el medidor de presión diferencial, o DPG, (Cox *et al.*, 1984) y grabadores sensibles de campo eléctrico (Webb *et al.*, 1985). Debido al interés de los organismos de financiamiento, solo por la resistividad de la litosfera oceánica, los siguientes experimentos fueron limitados a solo los rasgos representativos de la corteza oceánica (Cox *et al.*, 1986; Constable y Cox, 1996).

Se ha demostrado que la litosfera oceánica es notablemente resistiva; la parte inferior de la corteza y la superior del manto tienen una resistividad alrededor de los $10^5 \Omega\text{-m}$ y la resistividad de la litosfera excede a $10^9 \Omega\text{-m}$. Combinado con la alta conductividad del océano (10^4 S), el efecto de dicha litosfera resistiva es una trampa horizontal de corrientes eléctricas asociadas con los campos MT. Esta información sobre el fondo marino es útil, ya que el interés geológico entonces (y ahora) está dirigido hacia las áreas tectónicamente activas, como lo son las dorsales oceánicas las cuales forman un punto importante de interés para realizar estudios de CSEM (Constable y Srnka, 2007).

A mediados de la década de los 80 del siglo pasado, Martin Sinha y colaboradores en la Universidad de Cambridge comenzaron a desarrollar un sistema de electromagnéticos de fuente controlada (CSEM) para uso marino (Sinha *et al.*, 1990). Su equipo se basaba en gran medida en el sistema de Scripps, pero con una mejora muy importante, el uso de una antena transmisora neutralmente flotante (*ver figura 2.1.*) que permitió que el transmisor fuera arrastrado en profundidad a unos 100 m por encima del fondo marino. Este enfoque fue necesario para trabajar sobre terreno áspero, además demostró ser más efectivo en la exploración de hidrocarburos.

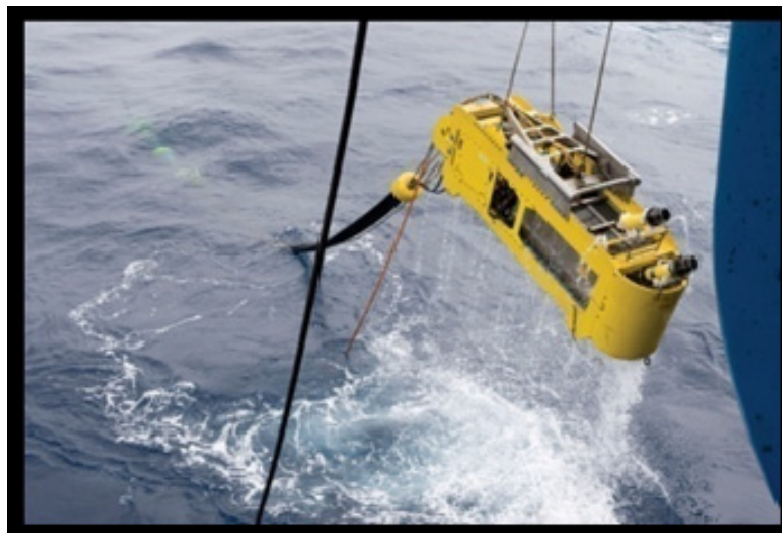


Fig. 2.1. Transmisor electromagnético boyante (<http://www.emgs.com/content/523/Source>).

Los primeros experimentos con el sistema de Cambridge se llevaron a cabo entre los años 1987 y 1988, y fueron seguidos de experimentos realizados entre Cambridge y Scripps en la Dorsal del Pacífico Oriental (Evans *et al.*, 1991), en la Cordillera de Reykjanes (McGregor *et al.*, 1998), y en la Dorsal de Valu Fa (McGregor *et al.*, 2001). A mediados del 2000, el grupo de Cambridge se trasladó a la Universidad de Southampton. Aunque en aguas profundas, un sistema eléctrico dipolo-dipolo horizontal en el dominio de la frecuencia parece ser la herramienta más adecuada para la exploración, se han realizado pruebas con otras técnicas marinas de electromagnéticos de fuente controlada (CSEM), en particular por la Universidad de Toronto.

Cheesman implementó un sistema magnético, dipolo-dipolo horizontal en el dominio del tiempo (Cheesman *et al.*, 1988), y Edwards puso a prueba una variación de su técnica de resistividad magnetométrica de tierra en el mar, mediante el uso de bajas frecuencias generadas con transmisor eléctrico vertical que cuelga de la nave al fondo del mar (Edwards *et al.*, 1985). Ambas técnicas se utilizan actualmente para estudios geofísicos (Evans *et al.*, 2000; Evans y Webb, 2002). Yuan y Edwards (2000) desarrollaron una compensación (short-offset) en el dominio del tiempo de un sistema eléctrico dipolo-dipolo para la caracterización de hidratos de gas. Ahora bien, la colección de conjuntos de datos por sí sola no puede seguir adelante sin soporte de teoría y modelado de algoritmos numéricos. Los primeros trabajos dependieron de las soluciones asintóticas de Kraichman (1970) y Bannister (1968 y 1984). El primer modelado de capas en el dominio de la frecuencia disponible para dipolos eléctricos fue publicado por Chave y Cox (1982).

Soluciones 1-D en el dominio del tiempo fueron desarrolladas por el grupo de Toronto (Edwards y Chave, 1986; Cheesman *et al.*, 1987). Flosadottir y Constable (1996) implementaron la transformada rápida de Hankel junto con el algoritmo de inversión de OCCAM en el algoritmo de Chave y Cox para generar un código de inversión 1D (Constable *et al.*, 1987).

Unsworth y Oldenburg (1995) documentaron un método de inversión para el subespacio usando un código en el dominio de la frecuencia, pero se sabe que, este método no

ha sido probado en datos reales. La primera inversión en 2D con datos reales fue publicada por McGregor *et al.* (2001), quien modificó el código de modelado directo de Unsworth y Oldenburg (1995) para manejar geometrías experimentales e implementó el algoritmo de inversión de OCCAM.

Nada de las aplicaciones y éxito actuales en la industria de la exploración y producción del petróleo habría sido posible en la década de los 80 del siglo anterior. Si bien el instrumento que utiliza actualmente la industria es en esencia el desarrollado por el sector académico hace 20 años, con la evolución de la tecnología se han incorporado mejoras en los instrumentos. La mayor diferencia es en la escala: la cantidad de receptores que pueden ser desplegados se ha incrementado sustancialmente, y las fuentes son significativamente más potentes.

No obstante, las mejoras técnicas más importantes han tenido lugar en el proceso de interpretación. En la década de los años 80 del siglo pasado, el modelado se limitaba a las estructuras 1D, y el análisis 2D era una técnica de vanguardia. Hoy en día, el modelado 3D se está convirtiendo en un proceso de rutina y está avanzando rápidamente en cuanto a su sofisticación. El modelado 3D cuidadoso es esencial para la interpretación del método mCSEM en las aplicaciones asociadas con los hidrocarburos. Sumadas a otras mediciones de exploración, las capacidades 3D en proceso de crecimiento desplazarán los servicios mCSEM hacia el núcleo de las actividades de exploración de hidrocarburos.

II.4 Las ecuaciones de Maxwell

Todo campo magnético se asocia a uno eléctrico. Las cantidades que se relacionan con un campo electromagnético son: **B**, inducción magnética o también la fuerza magnética; **H**, intensidad del campo magnético; **E**, intensidad del campo eléctrico; **D**, desplazamiento eléctrico; y **J**, densidad de corriente. Las ecuaciones de Maxwell que relacionan estas cantidades son:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \text{Ley de Faraday;} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = -\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}, \quad \text{Ley de Ampere;} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q, \quad \text{Ley de Gauss campo eléctrico;} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \text{Ley de Gauss campo magnético;} \quad (2.4)$$

donde q es la densidad de carga eléctrica libre. Para un medio isótropo tenemos además las siguientes relaciones, llamadas constitutivas:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad (2.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (2.6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad \text{Ley de Ohm,} \quad (2.7)$$

donde ε es la constante dieléctrica; μ , la permeabilidad magnética del medio, y σ , la conductividad eléctrica. En términos de ε_0 y μ_0 la constante dieléctrica y permeabilidad magnética del vacío, ε y μ vienen dadas por:

$$\varepsilon = k_e \varepsilon_0, \quad (2.8)$$

$$\mu = k_m \mu_0, \quad (2.9)$$

donde: k_e y k_m son la permitividad eléctrica relativa y la permeabilidad magnética relativa, respectivamente.

Para un campo magnetostático, \mathbf{H} es constante con el tiempo y por lo tanto $\partial \mathbf{B} / \partial t = 0$; de esto se sigue que $\nabla \times \mathbf{E} = 0$. Si al mismo tiempo $\partial \mathbf{D} / \partial t$ es despreciable frente a \mathbf{J} , $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$. El campo eléctrico puede deducirse de un potencial escalar ψ y \mathbf{H} de uno vectorial \mathbf{A} ,

$$\mathbf{E} = -\nabla \psi, \quad (2.10)$$

$$\mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad (2.11)$$

siendo $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$.

Si la región de espacio que se considera está libre de corrientes, $\mathbf{J} = \mathbf{0}$ y $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{0}$; en ella la inducción magnética puede deducirse de un potencial escalar φ ,

$$\mathbf{B} = -\nabla \varphi. \quad (2.12)$$

Como en muchos problemas de Geomagnetismo, se supone que la región de interés, generalmente, la región cerca de la superficie de la Tierra está prácticamente libre de

corrientes eléctricas, en ellos el campo magnético se puede estudiar a partir de este potencial escalar (Udías y Mezcuca, 1997).

II.5 La Resistividad eléctrica como propiedad física de las rocas

La resistividad de las rocas es una propiedad que varía entre límites muy amplios; desde alrededor de $10^{-8} \Omega\text{-m}$ para minerales como el grafito, a más de $10^{12} \Omega\text{-m}$ para rocas cuarcíticas secas. La mayoría de las rocas y minerales son aislantes en estado de sequedad. En su estado natural, casi siempre contienen algún agua intersticial con sales disueltas, y adquieren por lo tanto, una conductividad iónica que depende del grado de humedad, de la naturaleza y concentración de los electrolitos (Parasnis y Orellana, 1970).

La resistividad específica ρ es la resistencia R de una losa de roca con una longitud unitaria L y una dimensión unitaria de su sección transversal A (Fig. 2.2). La unidad de la resistividad específica ρ es Ohm metro ($\Omega\text{-m}$). La densidad de la corriente \mathbf{J} está relacionada con el campo eléctrico \mathbf{E} y con la resistividad específica ρ según la ley de Ohm.

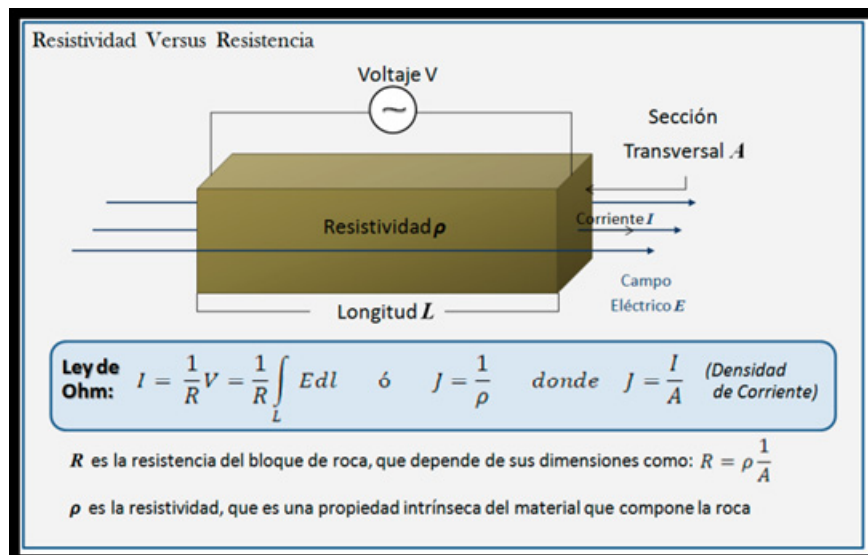


Fig. 2.2. Relación de la Resistencia con la Resistividad (Modificada de EMGS, 2011).

II.6 Ley de Archie

Los factores, que determinan la resistividad eléctrica de una roca, son los siguientes:

- Porosidad,
- Composición química de la solución acuosa que llena los espacios porosos de la roca, como su salinidad por ejemplo y
- Conductividad de los minerales que componen la roca, aún en la mayoría de los casos este es un factor mucho menos importante en comparación a los dos factores anteriores.

En el caso de las rocas, cuyos espacios porosos están saturados con fluidos, la resistividad de la roca depende, en primer lugar, de la resistividad de los fluidos y de la conectividad de los poros. El mecanismo conductivo principal es electrolítico.

Existe una relación empírica llamada “ley de Archie”, la cual describe cómo la resistividad eléctrica ρ , la porosidad ϕ y la resistividad del fluido ρ_w dependen entre sí. Esta ley sugiere que la conductividad de una roca saturada de agua salada (salmuera) es proporcional a la conductividad del agua salada y también que la resistividad específica de una roca ρ_0 saturada de agua es proporcional a la resistividad eléctrica específica del agua salada ρ_w . Esta proporcionalidad indica que la conducción de la salmuera (conducción electrolítica) es el único mecanismo conductivo. Como resultado de esta proporcionalidad, Archie introdujo el "factor de resistividad de formación F " (Archie, 1942). La figura 2.3 muestra la relación existente entre la ley de Archie y el comportamiento de la curva de resistividad con la presencia de Hidrocarburos, en la cual se observa el aumento de la resistividad a medida que la saturación de aceite en la roca es mayor (Worthington, 1985).

Ley empírica propuesta por Gus Archie de Shell Oil en 1942:

$$\rho_0 = F\rho_w \text{ o } \sigma_0 = \frac{\sigma_w}{F}. \quad (2.13)$$

Factor de formación para describir la geometría de los poros:

$$F = \frac{a}{\phi^m}. \quad (2.14)$$

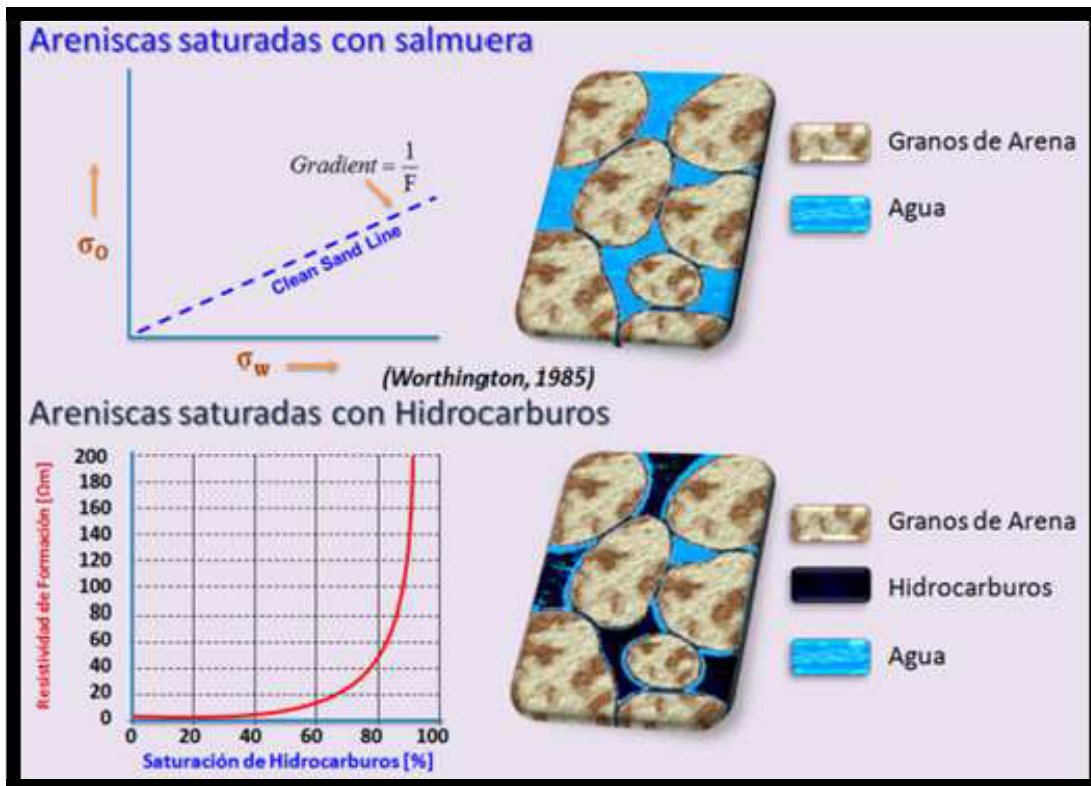


Fig.2.3. Areniscas con poros saturados con solución salina y areniscas con poros saturados con hidrocarburos (Worthington, 1985).

Donde:

ρ_0, σ_0 : Resistividad/Conductividad de formación (*Saturada de salmuera*).

ρ_w, σ_w : Resistividad/Conductividad del agua de formación.

ϕ : Porosidad.

m : Exponente de cementación (1.3 – 2.5).

a : Constante empírica (-1).

Ecuación de saturación de Archie:

$$\rho_t = \frac{F\rho_w}{S_w^n} \quad \text{o} \quad \sigma_t = \frac{\sigma_w}{F} S_w^n \quad (2.15)$$

Donde:

ρ_t, σ_t : Resistividad/Conductividad real de formación.

S_w : Saturación de agua (*fracción del espacio de los poros rellenos con agua*).

n : Exponente de saturación (2 ± 0.5).

En términos de resistividad/conductividad de formación saturada de salmuera

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{(1-S_{HC})^n} \quad \text{o} \quad \sigma_t = \sigma_0(1 - S_{HC})^n, \quad (2.16)$$

donde:

S_w o S_{HC} : Saturación de Hidrocarburos.

(Fracción del espacio de los poros rellenos con agua).

II.7 Rango de Resistividad de las Rocas

En la corteza terrestre, la magnitud de la resistividad tiende a ser variada, esto es debido a la heterogeneidad de los materiales que la componen, lo anterior es de gran utilidad a la hora de buscar yacimientos productores de hidrocarburos.

La resistividad de la roca del yacimiento, dependerá en gran medida de su porosidad y la composición de la solución contenida en el espacio de sus poros. A continuación mostramos un gráfico comparativo (Figura 2.4) del rango de resistividad de algunos materiales de la corteza terrestre, incluyendo hidrocarburos y el agua de mar.

II.8 Resumen

En este capítulo se presentó la evolución académica de los CSEM y la importancia en la industria de exploración, también se mostraron las ecuaciones usadas como base del método. Se mostró que la resistividad es una propiedad física de las rocas que puede ser medida por el método además de las respuestas que se obtienen cuando las rocas se encuentran saturadas de agua e hidrocarburos, relación que es explicada a través de la ley de Archie.

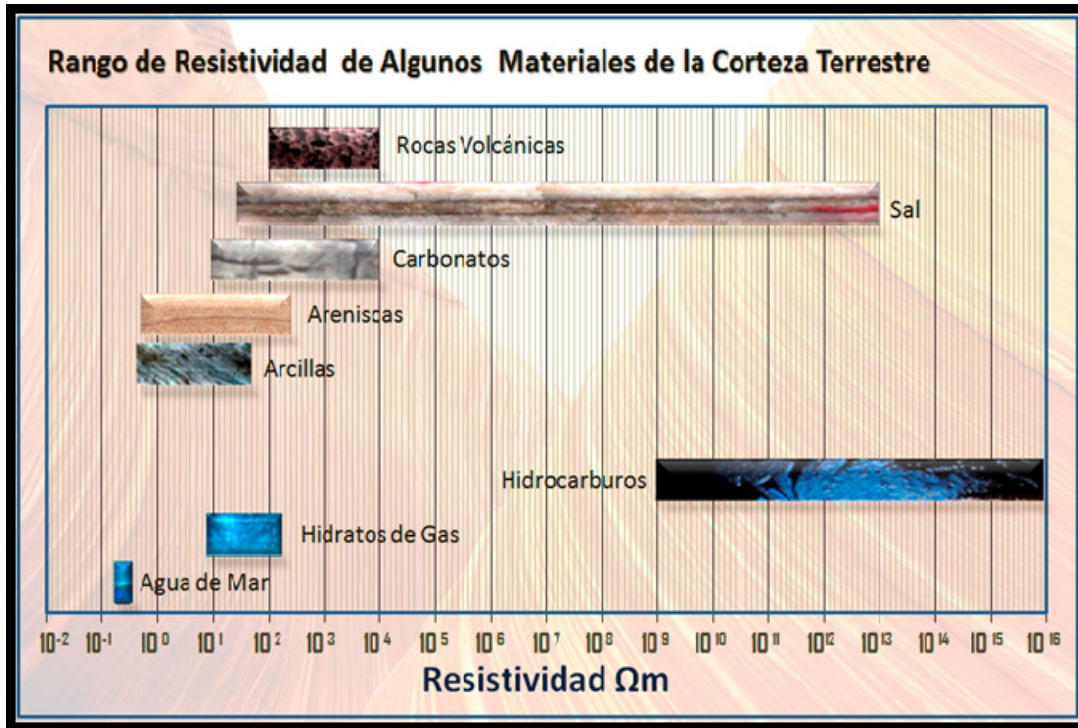


Fig. 2.4. Rango de Resistividad en algunos tipos de rocas que componen la corteza terrestre, las areniscas con hidrocarburos presentan una resistividad elevada que va desde 30 $\Omega\text{-m}$ hasta los 500 $\Omega\text{-m}$, documentado por Fischer (2005).

III Metodología

III.1 Introducción

Durante los últimos años, hemos visto un creciente interés en el uso de la tecnología CSEM para la exploración de hidrocarburos en ambientes marinos. La tecnología ha demostrado ser útil para ayudar en la detección y delimitación de capas rellenas de hidrocarburos. El éxito de cualquier nueva tecnología en la industria de la exploración, resulta muy difícil de evaluar ya que la mayoría de datos son propiedad de particulares. Los datos CSEM para uso en la exploración de hidrocarburos en ambiente marino, han sido adquiridos por casi 10 años (Hesthammer *et al.*, 2010).

III.2 Adquisición

El método CSEM utiliza una señal EM poderosa, generada artificialmente. La fuente es un dipolo eléctrico localizado a unos 100 m del fondo marino, con una señal controlada que se extiende sobre un estrecho ancho de banda, incluyendo, a menudo sólo algunas frecuencias fundamentales y sus armónicas. Los campos EM generados por este tipo de fuente no son ondas planas. La composición y la geometría de la señal se escogen de manera tal de hacerla más sensible para la detección de formaciones de poco espesor en una localización hipotética determinada, y con un valor de resistividad que contrasta con el de las formaciones adyacentes (Hesthammer *et al.*, 2010).

Este capítulo pretende mostrar los equipos utilizados en la adquisición de datos con equipo electromagnético de fuente controlada en ambiente marino, así como las configuraciones de exploración disponibles en la actualidad, utilizadas por compañías tales como EMGS, OHM y WesternGeco, por solo mencionar algunos proveedores del servicio.

III.2.1 Equipo de Adquisición

Los dispositivos básicos para medir los campos EM son un par de electrodos para detectar una diferencia de potencial en el fondo marino y dos magnetómetros, para detectar las variaciones del campo magnético. El par de electrodos forma un dipolo eléctrico, que permite la medición de la diferencia de potencial o voltaje entre los mismos. Un magnetómetro es una bobina de cable conductor que genera una corriente cuantificable sobre la base del flujo magnético cambiante a través de la bobina.

Recientemente, el interés principal de la industria de exploración y producción se ha centrado en las aguas profundas, en la última década se han realizado esfuerzos considerables con el fin de desarrollar un sensor para uso marino. El Instituto Oceanográfico de Scripps en La Jolla, California, EUA, desarrolló el sensor básico de campo eléctrico utilizado hoy por WesternGeco. Los magnetómetros fueron desarrollados por Electromagnetic Instruments Inc., una compañía adquirida por Schlumberger en el año 2001 (Schlumberger, 2009a).

Receptores mCSEM

En el dispositivo de WesternGeco se forman dos dipolos eléctricos horizontales con electrodos de plata/cloruro de plata, colocados en los extremos de cuatro tubos largos de fibra de vidrio que se extienden desde cada uno de los cuatro lados de la estructura del receptor (figura 3.1 y figura 3.2).

Para detectar el flujo magnético se utilizan los magnetómetros; bobinas de múltiples vueltas instaladas en un alojamiento no metálico. Los tubos del magnetómetro se fijan horizontalmente en los orificios de la estructura (ver figura 3.2). El rango de operación oscila entre 0.0001 y 100 Hz. Cada tubo que contiene una antena posee una longitud de 3.6 m; sumada a la dimensión de la estructura, la longitud del dipolo eléctrico formado por un par que señala direcciones opuestas es de 10 m (ver figura 3.3).

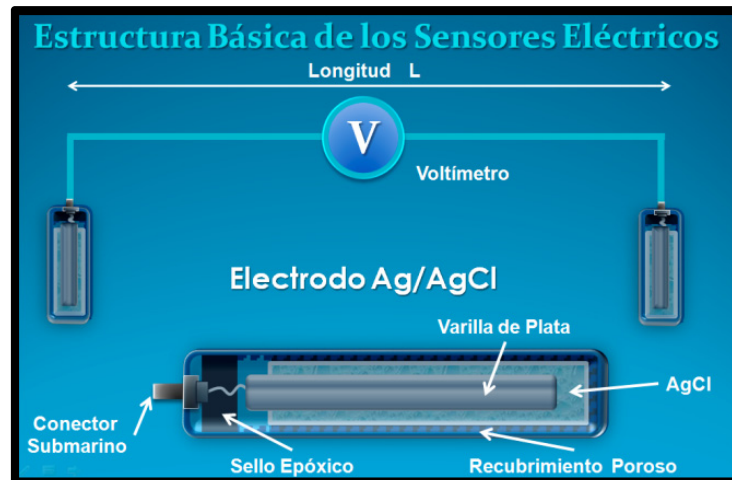


Fig. 3.1. Estructura básica de un sensor eléctrico (Electrodo) de plata y cloruro de plata, el cual forma parte de los receptores que son desplegados en el fondo marino para la exploración con fuente controlada (Constable y Key, 2004).



Fig. 3.2. Recuperación en la cubierta del barco de un receptor usado para exploración mCSEM (Schlumberger, 2009b).

La calibración de ambos tipos de sensores es crítica. Los sensores y los amplificadores de WesternGeco son calibrados por separado, lejos de la presencia de ruido electromagnético. Además, la calidad de los datos requiere la observación estricta de los procedimientos de despliegue a bordo de la embarcación de levantamiento.

Un bloque de hormigón, adosado a la porción inferior de la estructura del receptor, proporciona el peso para llevarlo hasta el fondo oceánico. Esta ancla de hormigón ayuda además a estabilizar el instrumento frente a las fuerzas de las corrientes marinas; la rotación de la antena de tan sólo $1 \mu\text{rad}$ puede detectarse fácilmente con la bobina de inducción magnética

que se mueve en el campo magnético terrestre. Al finalizar el levantamiento, una señal acústica proveniente de la superficie dispara el mecanismo de liberación del bloque y, mediante esferas de vidrio llenas de aire se lleva el receptor a la superficie para su recuperación.

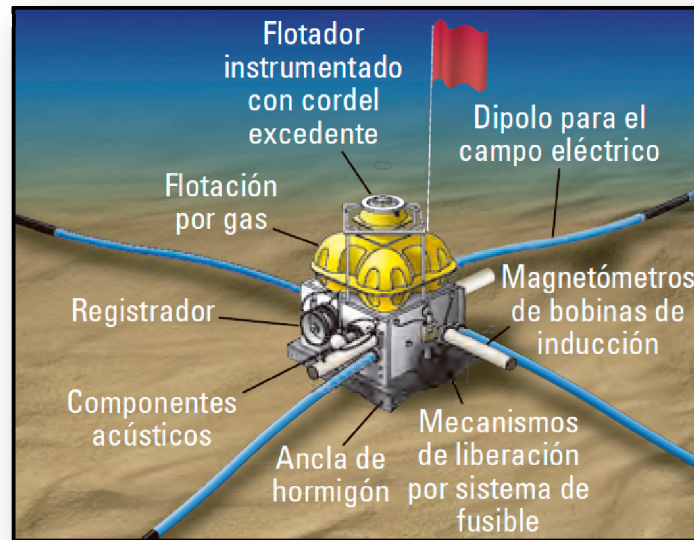


Fig. 3.3. Receptor CSEM. Las antenas dipolares ortogonales del receptor miden los valores de E_x y E_y y dos magnetómetros de bobinas de inducción miden los valores de H_x y H_y (Scripps Institution of Oceanography - UC San Diego; <http://www.sio.ucsd.edu>).

El costo y la logística que implica establecer conexiones eléctricas con múltiples receptores colocados en el fondo marino, en aguas profundas, son prohibitivos, de manera que los ingenieros diseñaron el receptor para que operara en forma independiente y pudiera ser recuperado al final de la prueba. Cada receptor porta un registrador de datos que controla la operación y registra las señales en una tarjeta compacta de memoria flash. Los datos de alta resolución de los dipolos y los magnetómetros provienen de conversores analógicos-digitales de 24 bits, los cuales registran el tiempo con precisión de modo que las señales pueden ser sincronizadas posteriormente con el registro fuente y entre sí.

La unidad posee diversos paquetes de baterías independientes. Uno provee la potencia para los componentes electrónicos del registrador de datos. Una batería independiente

suministra la potencia para los dispositivos de liberación del ancla, y otra provee la potencia para una baliza de posicionamiento acústico que indica la ubicación de la unidad en el fondo marino. El paquete de baterías que suministra la potencia para el registrador de datos dura hasta 40 días; la larga vida útil de las baterías proporciona tiempo suficiente para desplegar los sensores y luego adquirir los datos. El paquete de baterías utilizado para soltar el ancla dura más de un año. En caso de que las circunstancias impidan la remoción inmediata del dispositivo después del levantamiento, tal duración del paquete de baterías es muy ventajoso. La orientación de los sensores horizontales en el fondo del mar es aleatoria. Las direcciones de las mediciones se resuelven en función de una orientación deseada durante el procesamiento. Los dispositivos más nuevos poseen una brújula; sin embargo, en el pasado, la orientación para cada receptor se obtenía mediante la comparación con los sensores terrestres o mediante la orientación basada en la dirección de una fuente remolcada en un levantamiento CSEM.

Dado que los mismos receptores funcionan tanto para las mediciones CSEM como para las mediciones MT, es posible registrar ambas respuestas durante un levantamiento. La técnica CSEM se centra en la medición e interpretación de la respuesta proveniente de la fuente controlada, mientras que, entre esas mediciones, se registran los datos MT. Los datos MT procesados e interpretados establecen un modelo básico para la interpretación o la inversión CSEM (Schlumberger, 2009b).

Transmisor o Fuente mCSEM

Una fuente marina o transmisor CSEM es habitualmente un dipolo horizontal largo. Dicha fuente comprende dos cables de antena neutralmente flotantes, cada uno de los cuales termina en un electrodo, formando de ese modo un dipolo. Los electrodos son arrastrados a través del agua, detrás de una plataforma de sensores aerodinámicos denominada remolcador pescante (towfish), que es remolcado por la embarcación (figuras 3.4 y 3.5) a una velocidad nominal de entre 2.8 y 3.7 km/h [1.5 y 2.0 nudos] a una altura de 50 a 100 m por encima del fondo marino. Para proporcionar valores precisos para el procesamiento, el remolcador pescante mide la conductividad del agua de mar, la velocidad de la onda sonora local y la altura por encima del fondo marino.

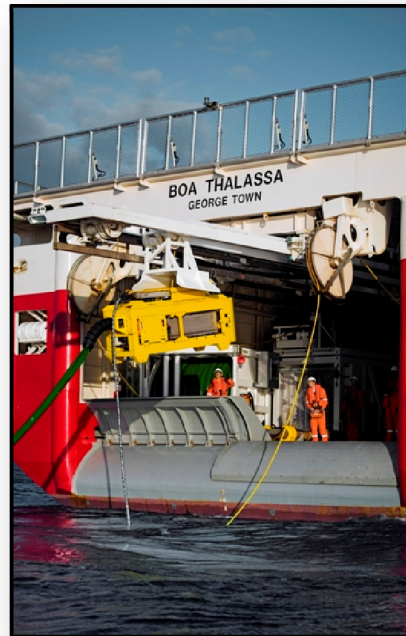


Fig. 3.4. Despliegue de la fuente CSEM, desde la embarcación. Tomada de <http://www.emgs.com>.

La intensidad de la fuente dipolar está dada por su momento dipolar. Este valor es el producto de la magnitud de la corriente eléctrica que fluye a través de los electrodos - dada por la intensidad de la primera armónica de la señal de salida- por la distancia entre los electrodos.

La potencia para generar una señal de fuente de alta corriente y bajo voltaje y propagarla a lo largo de varios kilómetros de cable, es suministrada habitualmente por un sistema de 250 kV.A instalado en la embarcación. Los transformadores convierten esta señal en una señal de baja corriente y alto voltaje que se envía a lo largo del cable.

En el remolcador pescante, la señal es transformada nuevamente en la señal de alta corriente y bajo voltaje. El remolcador pescante genera una forma de onda diseñada sobre la base de los comandos provenientes de la embarcación. La forma de onda real de la corriente transmitida por los electrodos de la fuente es medida y registrada con un instrumento que registra datos, instalado en el remolcador pescante, transmitiéndose a la embarcación en

tiempo real para el control de calidad por medio de un sistema de telemetría de alta velocidad. Dado que la forma de onda transmitida por la antena es afectada por la impedancia y el desgaste de la antena y por la salinidad del agua, se requiere el monitoreo preciso de la forma de onda real para resolver correctamente los datos del levantamiento. Si bien la potencia emitida en la fuente es considerable, nominalmente 50 kW, la señal decae rápidamente con la distancia. En un receptor colocado a 10 km de distancia, la magnitud del campo eléctrico es pequeña, inferior a 1 nV/m. Para el intervalo típico de 10 m de un dipolo receptor de fondo marino, el valor de 10 nV medido es aproximadamente 80 millones de veces más pequeño que el valor de 1.2 V de una batería AAA. La magnitud del campo magnético de respuesta, a esa distancia de la fuente, es aproximadamente 0.0001 nT, lo cual corresponde a alrededor de 2 partes en mil millones del campo magnético terrestre (Schlumberger, 2009b).

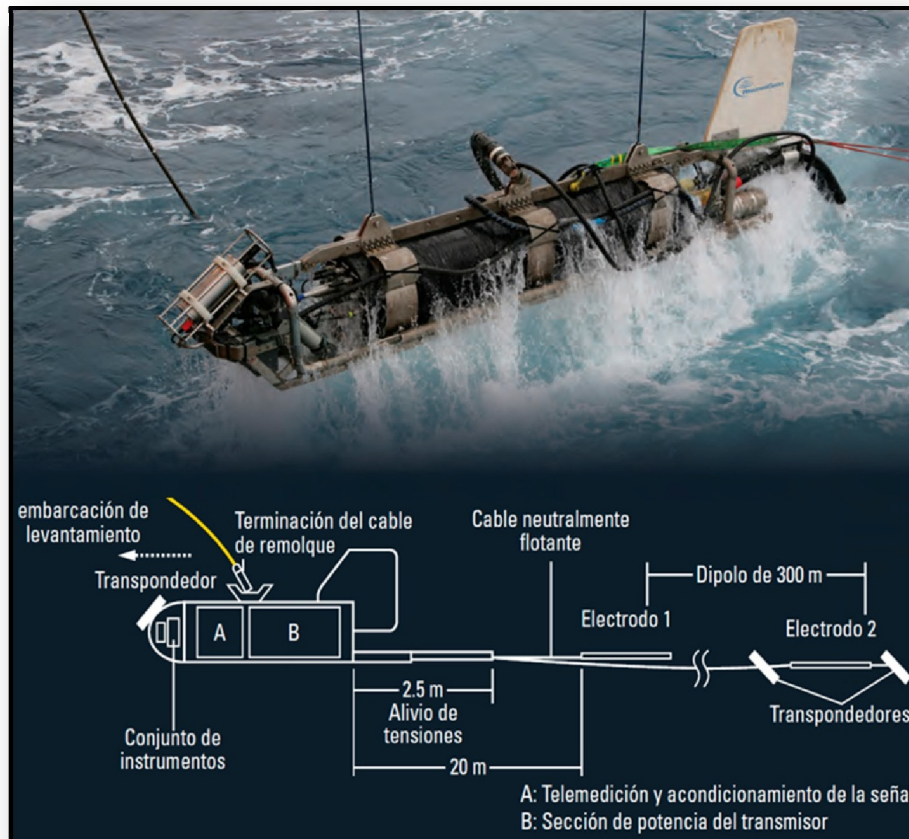


Fig. 3.5. Transmisor CSEM. El transmisor comprende un remolcador pescante -la sección del cabezal que contiene la potencia y el instrumental- y una antena del cable marino con electrodos dipolares en los extremos de dos cables (Schlumberger, 2009b).

III.2.2 Configuración de la Exploración

El concepto de los estudios de resistividad, se basa en el conocimiento de la propagación de un campo electromagnético (EM), en una sub-superficie que es principalmente afectada por una distribución espacial de resistividad (suponiendo materiales no-magnéticos e impolarizables). En ambientes marinos, capas de sedimentos rellenas de agua salada, representan buenos conductores, mientras que capas de sedimentos rellenas de hidrocarburos, representan ejemplos de inclusiones resistivas, que dispersan el campo electromagnético. El campo electromagnético es dispersado por inhomogeneidades del subsuelo y registrado por los receptores situados en el fondo marino (figura 3.6). La información obtenida puede ser utilizada para estimar la verdadera distribución de la resistividad del subsuelo, esto mediante la aplicación de técnicas de inversión y migración, así como otros numerosos tipos de análisis.

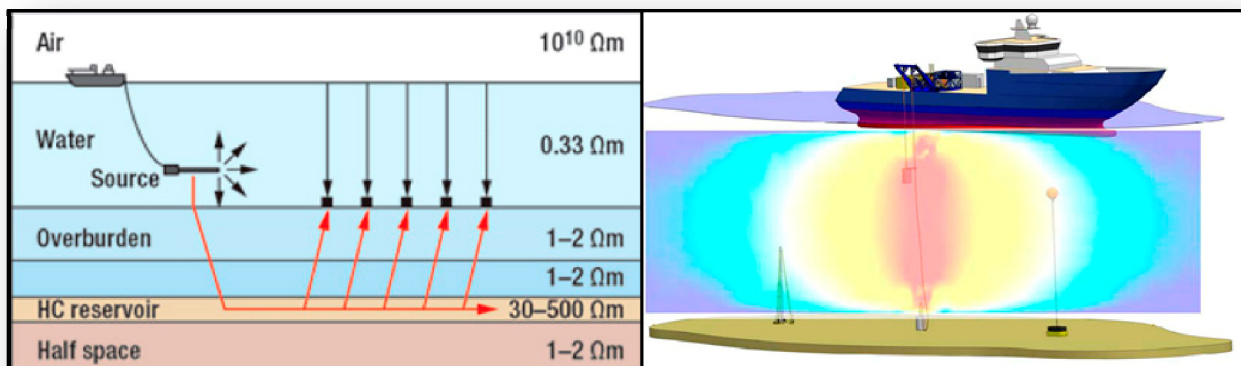


Fig. 3.6. Exploración Marina CSEM. En esta figura se muestran los dos tipos de configuración para exploración marina con métodos electromagnéticos de fuente controlada CSEM. A la izquierda la exploración usando un Dipolo Eléctrico Horizontal [HED] (Fischer, 2005). A la derecha la exploración usando un Dipolo Eléctrico Vertical [VED] (Holten *et al*, 2010).

Adquisición Usando Dipolo Eléctrico Horizontal

Durante una típica prospección marina, con electromagnéticos de fuente controlada (CSEM), los receptores electromagnéticos son desplegados en el fondo marino. Una fuente móvil, que es un dipolo eléctrico horizontal, es arrastrada de 20 a 40 m sobre el fondo del mar y emite continuamente un campo electromagnético en el subsuelo, los receptores electromagnéticos continuamente registran los campos magnético y eléctrico (figura 3.7). La atenuación del campo electromagnético en el subsuelo, depende principalmente de la frecuencia de la señal fuente y la resistividad del subsuelo.

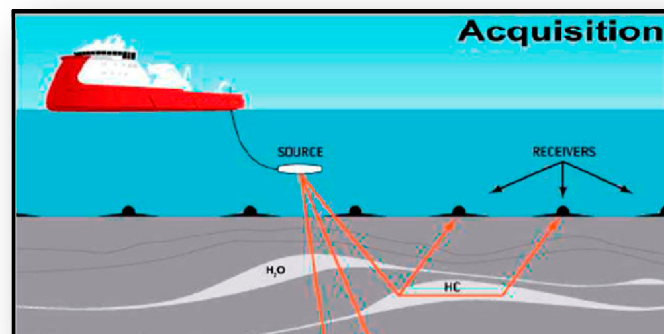


Fig. 3.7. Adquisición mCSEM con dipolo eléctrico horizontal como fuente (Hesthammer *et al.*, 2010).

La fuente emite un campo electromagnético que se propaga en el subsuelo (para simplificar la comprensión, la propagación de esta energía se muestra como rayos en la figura 3.7; aunque realmente la energía de las bajas frecuencias utilizadas se propaga principalmente por difusión). La presencia de sedimentos rellenos de hidrocarburos provoca que el campo electromagnético sea esparcido y parte del campo disperso se propague de nuevo al fondo del mar, donde los receptores equipados con sensores eléctricos y magnéticos registran la señal.

De acuerdo al mapa de objetivos en profundidad, la intensidad del campo dispersado en el fondo marino debe estar por encima del nivel de ruido existente. Para esto se requiere que la fuente emita corriente con la intensidad, frecuencia y forma de onda adecuada. Las amplitudes de la corriente emitida por el dipolo fuente están típicamente arriba de 1300 A, y

las longitudes oscilan de los 150 a 350 m. La forma de onda fuente, determina la distribución de frecuencia resultante y la magnitud relativa de los armónicos que se pueden estudiar. La experiencia registra que, un rango de frecuencias de 0.1 a 3 Hz, son necesarias para registrar objetivos de hasta 3000 m, por debajo del fondo marino. Esto es importante para cubrir eficientemente, un amplio rango de frecuencias para mejorar la resolución en profundidad. La resolución espacial de los datos electromagnéticos está limitada, principalmente, por la intensidad de la señal, la frecuencia, el espaciamiento fuente-receptor, y en la práctica, el nivel de ruido.

Un método simple y objetivo para analizar los datos CSEM es, el generar graficas de magnitudes normalizadas de la fase. Una respuesta anómala normalizada, considera la respuesta resistiva de algo anómalo resistivo en el subsuelo con respecto a la resistividad de fondo (Figura 3.8). Esto se realiza mediante la comparación con un receptor fuera de la región de estudio, el cual representará la resistividad general de fondo. Este receptor se conoce como un receptor de referencia.

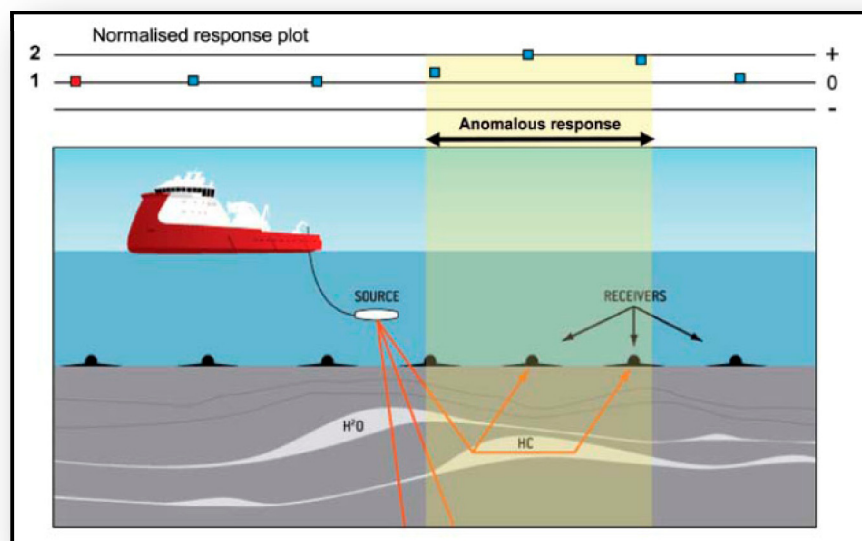


Fig. 3.8. La Respuesta Anómala Normalizada (NAR) indica la presencia de algo anómalo resistivo en el área de estudio versus la resistividad de fondo, esta obtenida a través de un receptor ubicado fuera del área de estudio, el cual recibe el nombre de receptor de referencia (Hesthammer *et al.*, 2010).

Durante la adquisición, la fuente será remolcada por encima de los receptores, emitiendo energía electromagnética por la alternancia de la corriente entre los dos electrodos. La frecuencia de la corriente alterna y la amplitud puede ser variada para ofrecer unas frecuencias fundamentales y armónicos múltiples de la frecuencia fundamental, en los diferentes puntos de fuerte interés. En este estudio son consideradas, sólo las variaciones de amplitud del campo eléctrico de la frecuencia fundamental.

Para cada línea de CSEM, se elige un receptor de referencia y una compensación entre la fuente y el receptor de referencia. A continuación, todos los otros receptores son normalizados contra el receptor de referencia para elegir el offset y la frecuencia, y se muestra en una gráfica de respuesta de amplitud normalizada (también llamada "magnitud normalizada versus offset" o gráfico NMVO; Figura 3.9). Esto permite la identificación de áreas con una respuesta anómala en comparación con la tendencia de fondo en general, la máxima variación es conocida como la amplitud de la respuesta anómala normalizada (NAR).

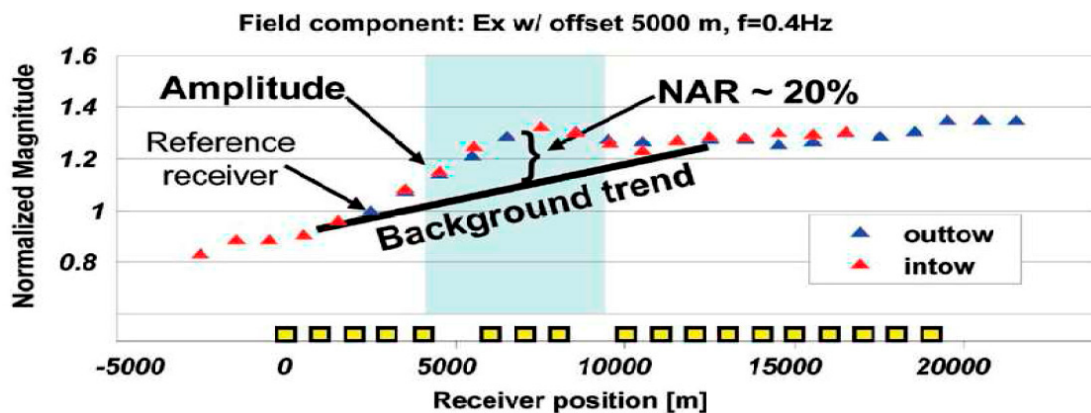


Fig. 3.9. Gráfico NMVO. Gráfico NAR de una prospección realizada en el Mar de Barents. La NAR de la amplitud con respecto a la estimada de fondo, alcanza un valor de alrededor de 20% en la locación de la prospección mapeada. Esta respuesta se considera significativa (Hesthammer *et al.*, 2010).

Un valor de respuesta normalizado de 1 indica que el receptor elegido tiene exactamente la misma magnitud del campo eléctrico para el offset que el receptor de referencia. Un valor de 1.5 indica que el receptor observado tiene una respuesta normalizada

50% más alto que el receptor de referencia. Esto indica que algo en el subsuelo tiene mayor resistividad que la observada en el receptor de referencia. Esto podría ser potencialmente un depósito lleno de hidrocarburos o algo más resistivo (areniscas cementadas, rocas volcánicas, esquistos ricos en materia orgánica, carbonatos, sal, etc.) También puede estar relacionado con aspectos como los efectos de la geometría del área de prospección, los efectos de la capa de aire, los efectos batimétricos, etc.

La experiencia demuestra que cuando la NAR es menor del 15%, frecuentemente es difícil diferenciar claramente una anomalía en el subsuelo debida a variaciones laterales y verticales de la resistividad de formaciones rellenas de algo distinto a los hidrocarburos en el subsuelo (Hesthammer *et al.*, 2010).

Adquisición Usando Dipolo Eléctrico Vertical

El método consiste en generar un campo electromagnético mediante dipolos eléctricos (Tx) que se distribuye desde la superficie hasta el fondo marino. Este campo electromagnético se propaga en el subsuelo así como en la capa de agua. Los receptores (Rx) ubicados en el fondo marino miden la respuesta del medio (figura 3.10).

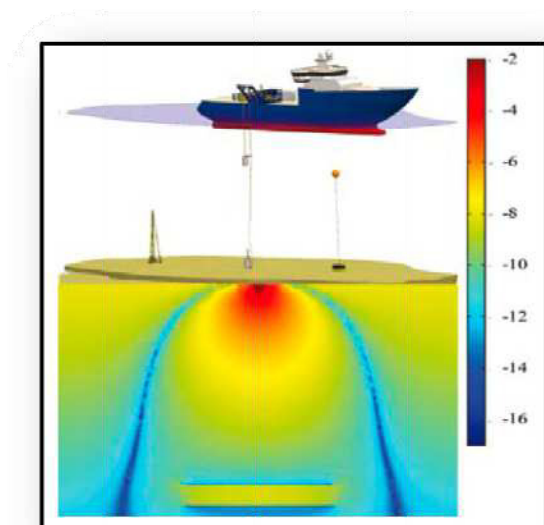


Fig. 3.10. Se muestra una visión general de la tecnología Pctromarker. Los electrodos superior e inferior que conforman el transmisor (dipolo vertical), en el fondo del mar el trípode extensible y el receptor. La escala de color representa el campo eléctrico vertical en presencia del yacimiento (Holten y Grude, 2009).

El transmisor (dipolo eléctrico) genera un campo magnético trasversal (TM), esto es que las líneas de campo son verticales. El pulso transmitido es un pulso cuadrado de pocos segundos (0.1-30 s; figura 3.11) que se transmiten en espacios menores a 50 segundos, periodo en el cual miden los receptores, evitando así la onda directa de aire (del agua) y recibiendo solamente la respuesta del medio.

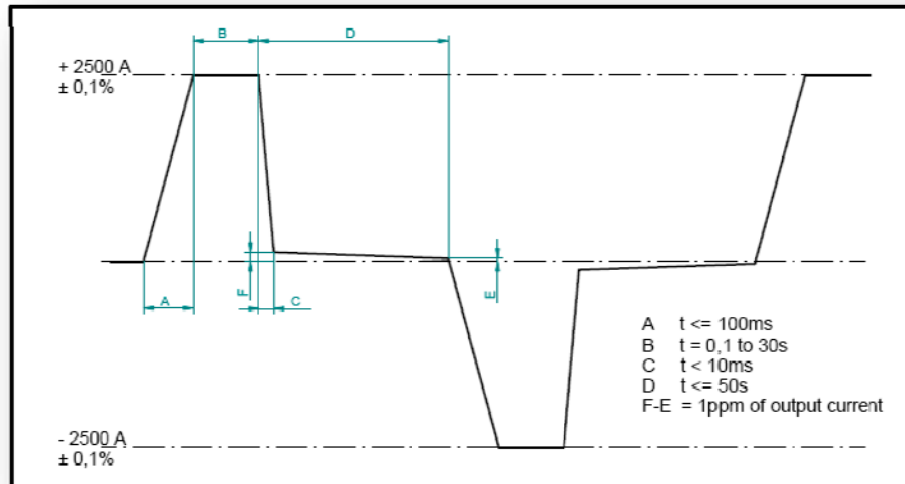


Fig. 3.11. Esquema de la señal generada por la fuente vertical en una exploración mCSEM (COMESA, 2009).

En una exploración marina con fuente controlada con *VED* tanto el transmisor como los receptores son bobinas eléctricas posicionadas verticalmente, en las que solo se miden las componentes verticales del campo electromagnético. Esto conlleva que la verticalidad de los instrumentos sea un aspecto de suma importancia para el funcionamiento del método, pues de lo contrario se medirían parte de las componentes horizontales de este mismo campo. La tecnología que ofrece Petromarker garantiza la verticalidad de los receptores mediante un sistema de trípodes, capaces de mantener la vertical en 0.1 grados (figura 3.12).

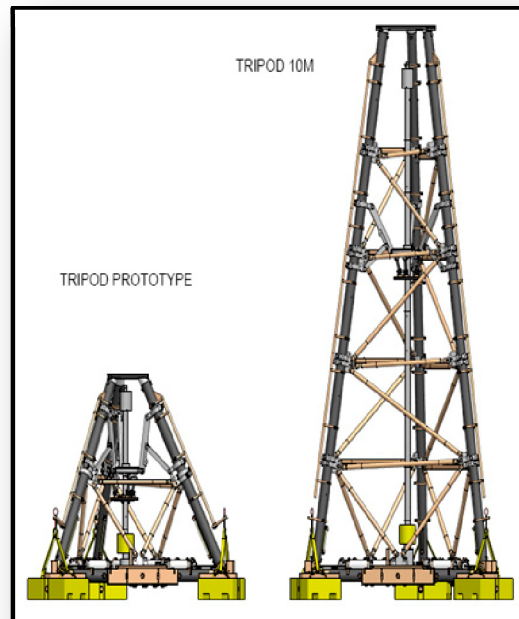


Fig. 3.12. Trípodes para receptores. Esquema de los trípodes para asegurar la verticalidad de los receptores (<http://www.petromarker.com>).

Para el caso de los transmisores, la verticalidad se logra mediante un sistema de GPS y de un sistema de estabilidad Dynamic Positioning (DP) instalado en el barco. El sistema de estabilidad controla el ángulo del transmisor respecto a la horizontal, para asegurar la longitud del transmisor. Tradicionalmente en los métodos electromagnéticos se pueden variar las frecuencias o el arreglo transmisor-receptor para lograr los objetivos de profundidad y resolución requeridos. La elección del arreglo requerido deberá ser en base a las necesidades y objetivos de cada proyecto específico. Los puntos de asignación de la medición siempre son los puntos intermedios entre transmisores y receptores. Para estos tipos de arreglos se tienen, en el mejor de los casos, hasta 4 mediciones por cada disparo. Los tiempos de adquisición de datos dependen de la capacidad para poder desplegar el arreglo de 6 receptores y poder posicionarse con el transmisor, lo cual depende a su vez del tirante de agua. Por ejemplo, para cubrir un área de 25 km^2 en 2D ó 17 km^2 para el caso de un 3D, los tiempos de adquisición serían de 6 a 8 días, para tirantes de agua entre 500 y 1500 m. Los receptores miden las componentes verticales del campo electromagnético (eléctrico y magnético) obtenidas por la

respuesta del terreno al ser excitado por el transmisor. Mediante estas mediciones se obtienen unas curvas de respuesta en función del tiempo, de unos cuantos segundos (0.001-100s). Si el medio está saturado en hidrocarburos esta respuesta será la de un resistivo. Mientras más contraste resistivo exista entre el medio saturado y el medio encajonante más notoria será la respuesta (COMESA, 2009).

III.3 Procesado de Datos mCSEM

La fuente controlada genera habitualmente ondas cuadradas o secuencias de ondas cuadradas, en las frecuencias fundamentales definidas por el usuario. La transformada de Fourier resuelve la onda cuadrada como ondas sinusoidales de muchas frecuencias (Figura 3.13). Una onda cuadrada (magenta) puede ser dividida en una serie infinita de ondas sinusoidales mediante la utilización de la transformada de Fourier (ecuación). La frecuencia fundamental, ω_0 , exhibe la amplitud más alta; cada armónica impar subsiguiente posee una amplitud más baja. Las armónicas pares no se incluyen debido a la simetría de la onda cuadrada (figura 3.13) (Schlumberger, 2009).

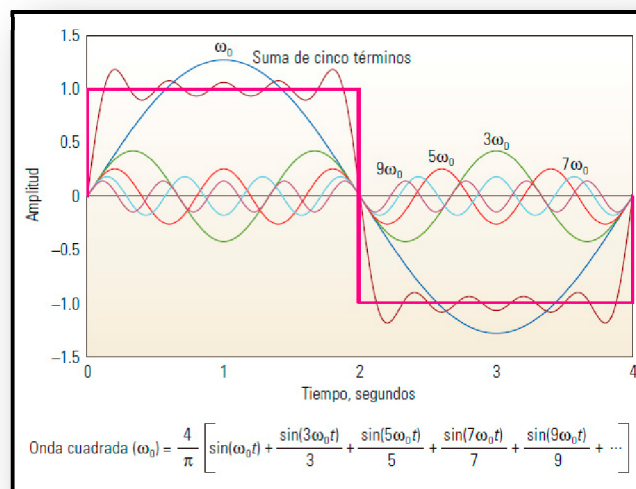


Fig. 3.13. Componentes de una onda cuadrada (Schlumberger, 2009b).

Los componentes de más intensidad son la frecuencia primaria ω_0 , en las armónicas impares $3\omega_0$, $5\omega_0$ y $7\omega_0$, cada una posee magnitudes que se reducen en forma secuencial. La combinación de la relación entre la profundidad de penetración y la frecuencia y el empleo de múltiples frecuencias, significa que este proceso obtiene muestras a diversas profundidades y con diversas resoluciones.

Los datos de los receptores son recolectados como datos de series de tiempo (Figura 3.14), pero para el método CSEM, deben ser sincronizados con la señal de onda cuadrada de la fuente a través de una medición precisa del tiempo. Por consiguiente, además de la sincronización del sistema de posicionamiento global (GPS) de la fuente, cada receptor posee un reloj de alta precisión, que es sincronizado por GPS, en el momento del despliegue y la recuperación. La posición y orientación instantáneas de la fuente dipolar también deben captarse para lograr un proceso de inversión preciso. Los transpondedores acústicos, en diversos puntos de la antena, proveen esta información mediante la transmisión de sus posiciones a intervalos de 1 a 4 segundos. La medición precisa de la desviación o la inclinación de la antena es importante para un procesamiento correcto.

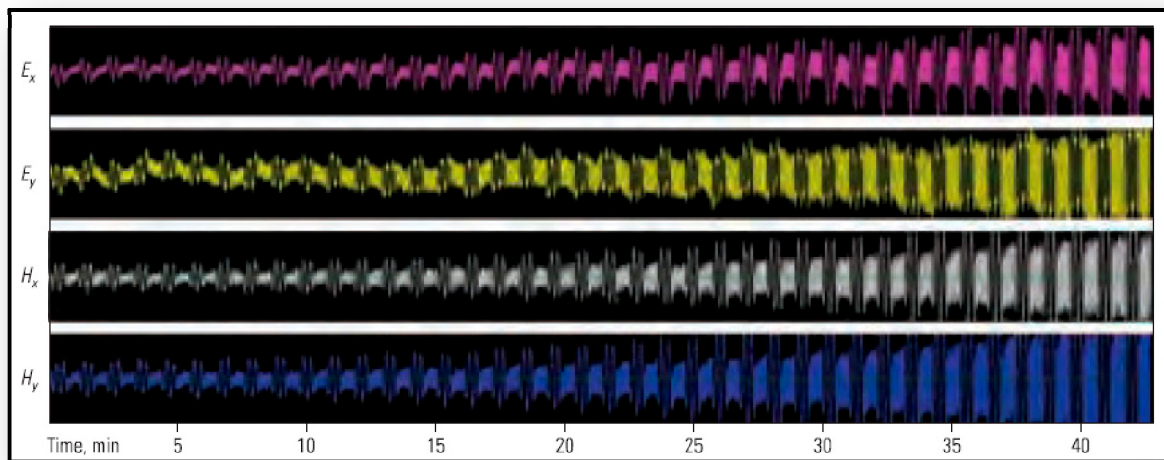


Fig. 3.14. Datos mCSEM en el dominio del tiempo (*time gather*) Cada receptor registra los datos para dos mediciones de los campos H y E horizontales (Schlumberger, 2009b).

Las mediciones de los campos son datos adquiridos en el dominio del tiempo; sin embargo, habitualmente se convierten al dominio de la frecuencia utilizando una transformada de Fourier (Figura 3.15). Los datos se apilan mediante la superposición de las respuestas provenientes de series múltiples y secuenciales de ondas cuadradas, conocido como colección de trazos en el dominio del tiempo (*time gather*), para mejorar la relación señal-ruido. La ventana para la colección de trazos debe ser suficientemente corta para que el movimiento de la fuente no altere significativamente el volumen muestreado del subsuelo. Las conversiones de Fourier de mediciones similares, en las diversas posiciones de los receptores, permiten el desarrollo de una relación de amplitud vs desplazamiento, dependiente de la frecuencia (extremo inferior). Esto puede desarrollarse para cada componente medida del campo eléctrico (sólo se muestra una) y del campo magnético. La resistividad del subsuelo afecta la forma de estas curvas.

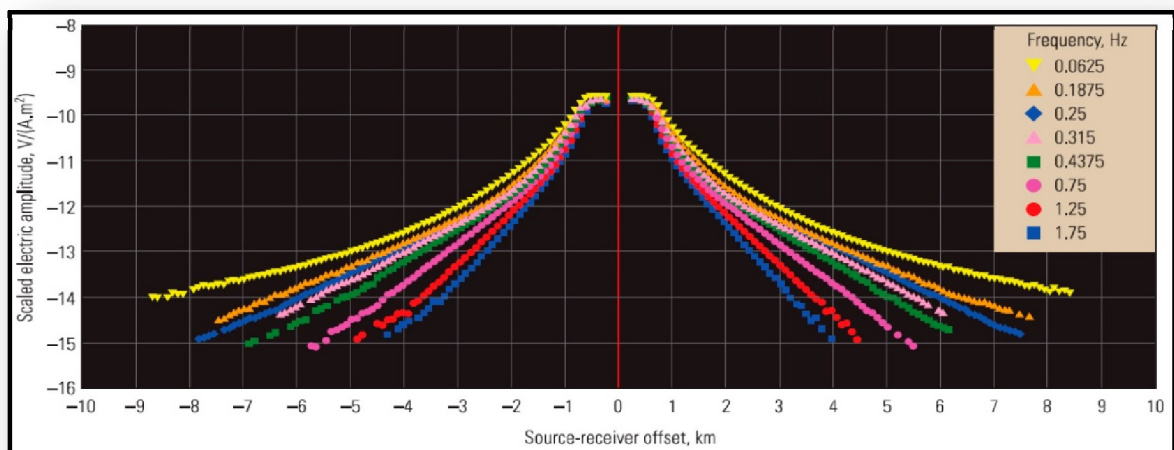


Fig. 3.15. Datos mCSEM en el dominio de la frecuencia (Slumberger, 2009).

Dado que el objetivo de las técnicas de prospección de las compañías de exploración y producción consiste en detectar hidrocarburos, la señal de la fuente CSEM se optimiza para descubrir capas no conductoras delgadas (posibles formaciones con hidrocarburos) en un fondo conductor (formaciones acuíferas). El rango de frecuencia típico de la señal CSEM oscila entre 0.05 y 5 Hz; 1 Hz es el límite superior efectivo para los estudios marinos.

Como una aproximación de primer orden para el caso de dipolo eléctrico horizontal, la señal puede tomar tres trayectos generales entre la fuente y los receptores (Figura 3.16).

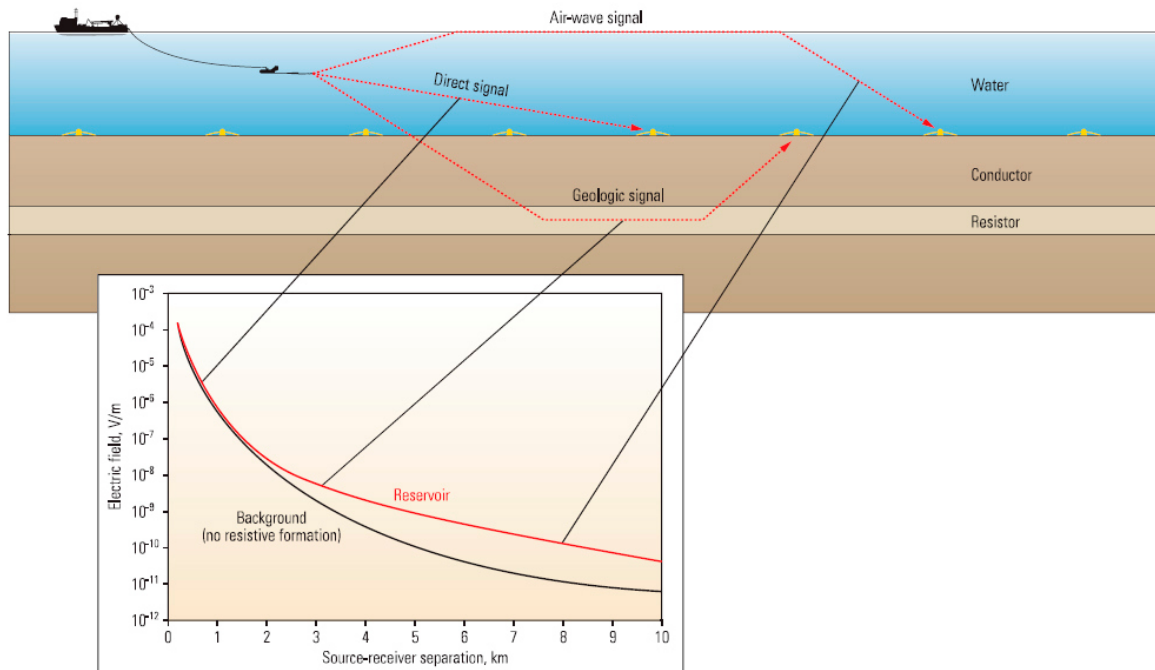


Fig. 3.16. Trayectoria de la señal EM Fuente - Receptor (Schlumberger, 2009b).

Como se puede observar en la figura 3.16, cuando la distancia de desplazamiento entre la fuente y el receptor es corta, el trayecto directo a través del agua domina la señal. La intensidad de la señal se reduce rápidamente con la distancia debido a su atenuación en el agua conductiva. Una segunda contribución proviene de la interfaz agua aire. El campo electromagnético viaja hacia la superficie del agua, donde se encuentra con el aire que es altamente resistivo. El contraste de resistencia hace que la propagación de la onda siga la interfaz existente entre el aire y el agua. En aguas profundas, la señal de la onda aérea predomina solamente con desplazamientos largos, normalmente de más de 10 km, porque a diferencia de las señales que siguen los otros dos trayectos, la señal en la interfaz entre el aire y el agua posee poca atenuación. La tercera porción de la señal viaja a través del subsuelo. Bajo condiciones adecuadas de frecuencia, profundidad del agua y conductividad del subsuelo, existe un rango de desplazamientos para los cuales el tercer trayecto domina la señal. Para este trayecto, las ondas se propagan penetrando en el subsuelo, donde interactúan

con las formaciones resistivas y generan un campo de respuesta; parte de esa energía viaja nuevamente hacia los receptores del fondo marino. Esta señal de respuesta aparece en los receptores, con distancias de desplazamiento que habitualmente son mayores que la profundidad del yacimiento por debajo del fondo marino; sin embargo, con desplazamientos aún mayores, se atenúa tanto que la señal de la capa de aire la abate.

Dado que las ondas se propagan más fácilmente a través de una formación resistiva que a través de una formación conductiva, la presencia de un yacimiento mejora la señal recibida en comparación con un subsuelo uniforme que carece de una capa resistiva. Los Geocientíficos pueden identificar las anomalías de resistividad y, por consiguiente, inferir la información geológica por medios analíticos comparando los datos observados con los modelos predictivos, o por medios numéricos, mediante el proceso de inversión.

A una cierta distancia de desplazamiento, la limitación del receptor en cuanto al ruido natural excede la intensidad de la señal que se originó en el transmisor, planteando un límite efectivo para la profundidad de investigación del subsuelo. Esta limitación, o nivel de ruido, varía con la frecuencia y depende de las características del receptor y su ambiente; tal como lo hace el ruido mecánico generado por las olas de agua que mueven las antenas. El nivel de ruido puede reducirse a través del mejoramiento del instrumental, tal como la inclusión de componentes electrónicos más silenciosos o componentes mecánicos más estables, o a través del procesamiento de señales inteligentes para remover el ruido generado por el movimiento o el ruido coherente a través del levantamiento.

III.4 Análisis, Modelado e Inversión de Datos mCSEM

Las características de la fuente, el receptor y el ambiente pueden incorporarse en un análisis previo al levantamiento para determinar si es posible detectar un objetivo resistivo a una cierta profundidad (Figura 3.17). Los carbonatos, que son resistivos, presentan un problema: puede suceder que una trampa con baja saturación de petróleo, alojada en una estructura carbonatada resistiva, posea insuficiente contraste detectable.

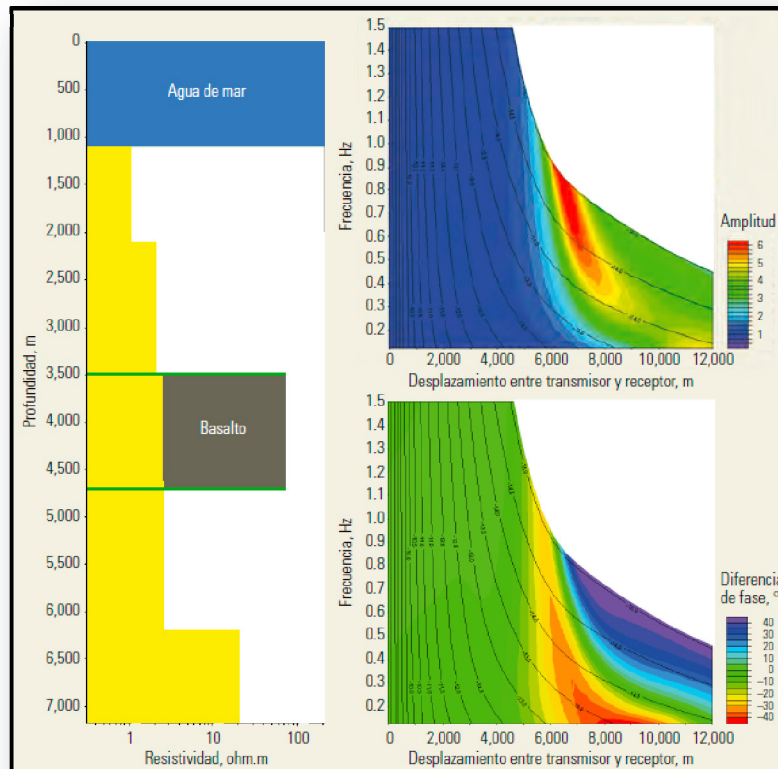


Fig. 3.17. Análisis de amplitud y fase para determinar el desplazamiento óptimo para detectar un cuerpo resistivo, trabajando con varias frecuencias y separaciones transmisor-receptor (Schlumberger, 2009b).

La Figura 3.17 muestra un modelo que incorpora una capa de basalto altamente resistivo (gris) en un medio más conductor (amarillo); el otro modelo le asigna a esa capa un valor de resistividad más bajo (amarillo solamente). Los dos modelos poseen respuestas de fase y amplitud diferentes ante un impulso CSEM simulado. La relación de amplitud entre los modelos (extremo superior derecho) muestra un valor máximo (rojo) con un desplazamiento (distancia fuente- receptor) de aproximadamente 7,000 m y una frecuencia de alrededor de 0.7 Hz.

La diferencia de fase (extremo inferior derecho) exhibe un valor máximo (rojo) con 8,500 m aproximadamente y una frecuencia de menos de 0.1 Hz, y otro valor máximo

(violeta) con un desplazamiento largo y una frecuencia alta. En base a la información que figura en ambas gráficas, los Geocientíficos determinaron que el desplazamiento óptimo para maximizar la posibilidad de detectar esta anomalía es de aproximadamente 8,000 m, con frecuencias de 0.5 y 0.125 Hz. Las líneas de contorno indican diversos niveles de pisos de ruido de los receptores (indicados por la potencia de 10), que dependen de los sensores, los componentes electrónicos y el ambiente. Si bien en ciertos ambientes el nivel de ruido puede ser de tan sólo 10^{-14} , estas gráficas se extienden hasta un nivel de ruido de 10^{-15} , que usualmente puede lograrse (Schlumberger, 2009b).

Los datos del receptor pueden presentarse como amplitudes y fases del campo eléctrico o magnético, que son funciones de la distancia de desplazamiento entre la fuente y el receptor. El efecto de una anomalía resistiva puede ponerse de manifiesto aplicando diversos métodos: métodos analíticos que utilizan sólo los datos medidos, métodos basados en modelos, derivados durante la planeación del levantamiento, y procesos de inversión.

Uno de los métodos analíticos normaliza la respuesta de las variaciones de amplitud con el desplazamiento de los campos eléctricos y magnéticos a través de la anomalía, tomando como referencia la respuesta de un receptor lejano que no detecta la anomalía ampliamente descrito en el apartado III.2.2.

Un segundo método analítico compara la respuesta normalizada de la medición efectuada en la dirección paralela a la dirección de adquisición (*inline*) con la medición efectuada en la dirección perpendicular a la dirección de adquisición (*crossline*), cotejando básicamente las dos componentes horizontales del campo eléctrico, E_x y E_y . La presencia de una estructura resistiva infrayacente, tal como una formación con hidrocarburos, posee un efecto mayor sobre la respuesta *inline* debido a la polarización de la señal.

Un tercer método analítico convierte los datos de campo en resistividad aparente en una pseudo-sección 2D o 3D, representada gráficamente como una función del desplazamiento entre fuente y receptor y de la frecuencia de la señal (una pseudo-sección utiliza coordenadas aproximadas o pseudo-espaciales y constituye una forma semi-cuantitativa de considerar los

datos espaciales). Cuando el conjunto de datos es normalizado con respecto a un espacio de la sección que no contiene ninguna anomalía, los valores anómalos de resistividad aparente aparecen como desviaciones respecto de la unidad.

Como alternativa, es posible construir modelos previos al levantamiento cuando se dispone de datos sísmicos o datos de pozos cercanos. De los modelos 3D se extraen las curvas de respuesta para cada combinación de ubicación del receptor y cable de remolque. Una vez adquiridos los datos, es posible normalizar las observaciones con respecto a cada uno de los modelos para determinar cuál proporciona el mejor ajuste.

Más allá de estos métodos analíticos y sobre la base de modelos, el proceso de inversión CSEM constituye una forma poderosa de obtener el perfil de resistividad del subsuelo a partir de los datos observados. No obstante, como con la mayoría de los métodos de inversión, la solución no es única. Los códigos del modelado directo se corren iterativamente con los parámetros perturbados del modelo hasta que el resultado se ajusta a los datos dentro de un rango aceptable. La inversión conjunta de todos los canales y frecuencias significativos que sea viable restringe el rango de soluciones posibles, pero a expensas de un tiempo de procesamiento más largo. A veces se introducen restricciones adicionales, tales como la ubicación de estructuras geológicas conocidas. Los datos de registros y los datos sísmicos proveen un modelo inicial para ayudar a restringir el proceso de inversión.

Los datos MT también poseen un grado de resolución limitado, de modo que el paso de modelado utiliza la información basada en otros tipos de mediciones. Las interpretaciones sísmicas a menudo sirven como restricciones. Los levantamientos gravimétricos proveen una restricción independiente, al igual que los registros de pozos. La técnica de generación de imágenes restringidas por múltiples mediciones MMCI de WesternGeco proveedor de servicios mCSEM, utiliza un enfoque iterativo con datos gravimétricos, MT y sísmicos, para mejorar los resultados de la inversión. Esto se traduce en una imagen final más restringida en escala de profundidad.

Si bien los receptores MT y CSEM marinos han sido utilizados en diversos estudios desde la década de 1990, el interés de la industria ha crecido rápidamente en los últimos años, promoviendo un rápido incremento del total de sitios evaluados. Un gran estudio de múltiples fases, efectuado recientemente en el Golfo de México, incluyó más receptores MT marinos que el total desplegado en todo el mundo hasta esa fecha (Schlumberger, 2009b).

III.4.1 Modelado 1D con un dipolo eléctrico como fuente

En esta sección se presenta la metodología de modelado directo e inverso utilizado para la inversión de datos sintéticos. Los métodos para calcular las respuestas de dipolos en medios estratificados multicapa ya han sido documentados (e.g., Stoyer, 1977; Chave y Cox, 1982; Ward y Hohmann, 1988, y otros autores). El enfoque utilizado aquí, sigue la formulación del potencial magnético vectorial descrita por Wait (1982), pero esta formulación es generalizada para permitir múltiples capas por encima del transmisor (incluyendo múltiples capas inferiores), y utiliza formas exponenciales para las recursiones en lugar de las funciones hiperbólicas.

Consideremos el modelo que se muestra en la figura 3.18, el cual consiste de N capas con conductividad isotrópica de σ_i donde $i=1, \dots, N$, y en el cual se utiliza un sistema de coordenadas derecho con el eje z (profundidad) apuntando hacia abajo. Asumiremos que la fuente es armónica en el dominio del tiempo con una variación $e^{-i\omega t}$, con insignificantes variaciones de permeabilidad magnética μ , y frecuencias angulares ω lo suficientemente bajas como para que las corrientes de desplazamiento se puedan despreciar, es decir se trabaja en el caso cuasi-estático; las ecuaciones de Maxwell son:

$$\nabla \times \mathbf{E} = i\omega\mathbf{B}, \quad (3.1)$$

y

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu\sigma\mathbf{E} + \mu\mathbf{J}_s. \quad (3.2)$$

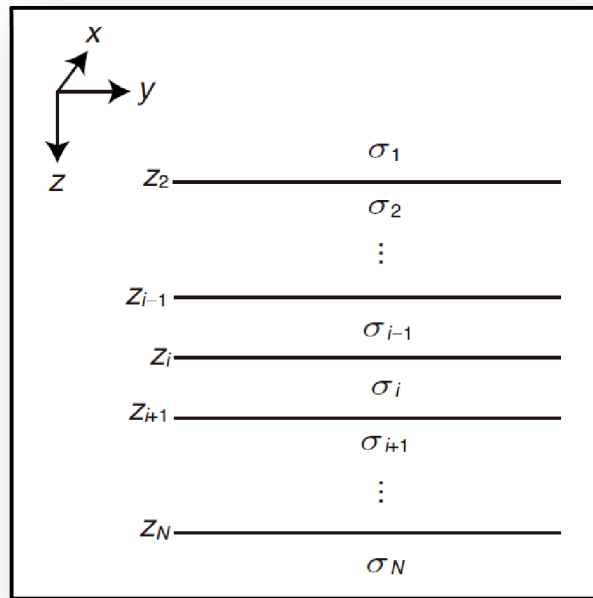


Fig. 3.18. Modelo 1D de N -capas. Cada capa i tiene una conductividad σ_i y una profundidad z_i para la cima de la capa (Key, 2009a).

La expresión $\mathbf{J}_s = \mathbf{I}\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_0)$ es la fuente dipolar eléctrica en la posición \mathbf{r}_0 y restringida a ser un pequeño dipolo infinitesimal con momento unitario \mathbf{I} . Usando el potencial magnético vectorial \mathbf{A} , el campo magnético \mathbf{B} es especificado como:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}. \quad (3.3)$$

De las ecuaciones 3.1-3.3, el campo eléctrico \mathbf{E} se puede encontrar como

$$\mathbf{E} = i\omega\mathbf{A} + \frac{1}{\mu\sigma}\nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}). \quad (3.4)$$

El potencial vectorial puede obtenerse a partir de la solución de la ecuación de la transformada de Hankel

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \hat{\mathbf{A}}(\lambda, z) J_0(\lambda r) \lambda d\lambda, \quad (3.5)$$

donde J_0 es la función de Bessel de primera clase, de orden cero y r es el rango horizontal (Key, 2009a).

La ecuación diferencial ordinaria para el núcleo de la transformada de Hankel se obtiene mediante la inserción de las ecuaciones 3.3 y 3.4 en la ecuación 3.2, y tomando la transformada de Fourier 2D con respecto a las direcciones en x e y , dando

$$-\frac{d^2\hat{\mathbf{A}}}{dz^2} + \gamma^2\hat{\mathbf{A}} = \mu\hat{\mathbf{J}}_s, \quad (3.6)$$

donde $\hat{\mathbf{A}}$ es la transformada de Fourier del potencial vectorial, $\gamma^2 = \lambda^2 - i\omega\mu\sigma$, $\lambda^2 = k_x^2 + k_y^2$, y k_x y k_y son las variables espaciales de número de onda de la transformada de Fourier. Una vez que una solución analítica de la ecuación 3.6 se ha obtenido, la solución en el dominio espacial se obtiene por la evaluación de la transformada de Hankel en la ecuación 3.5.

Para un dipolo eléctrico horizontal apuntando en la dirección del eje y , la transformada de Fourier del potencial vectorial tiene la forma $\hat{\mathbf{A}} = (0, \hat{A}_y, \hat{A}_z) = (0, \hat{A}_y, \partial/\partial y \hat{\Lambda}_z$, con expresiones de transformada de Hankel

$$A_y(\mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \hat{A}_y(\lambda, z) J_0(\lambda r) \lambda d\lambda, \quad (3.7)$$

$$A_z(\mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial y} \int_0^\infty \hat{\Lambda}_z(\lambda, z) J_0(\lambda r) \lambda d\lambda. \quad (3.8)$$

Los potenciales \hat{A}_y y $\hat{\Lambda}_z$ son cilíndricamente simétricos. En la capa i , los potenciales tienen la forma

$$\hat{A}_{y,i} = a_i e^{\gamma_i(z-z_{i+1})} + b_i e^{-\gamma_i(z-z_i)} + \delta_{ij} \frac{\mu}{2\gamma_j} e^{-\gamma_j|z-z_s|}, \quad (3.9)$$

$$\hat{\Lambda}_{z,i} = c_i e^{\gamma_i(z-z_{i+1})} + d_i e^{-\gamma_i(z-z_i)} - \frac{\gamma_i}{\lambda^2} (a_i e^{\gamma_i(z-z_{i+1})} - b_i e^{-\gamma_i(z-z_i)}), \quad (3.10)$$

donde z_i es la profundidad de la parte superior de la capa i y $\gamma_i^2 = \lambda^2 - i\omega\mu\sigma_i$. El dipolo reside en la capa j en la profundidad z_s y es añadido al potencial acorde a la delta de Kronecker δ_{ij} en la ecuación 3.9.

Hay que tener en cuenta que en la atenuación hacia arriba los coeficientes a_i y c_i se definen en la base de la capa, y en la atenuación hacia abajo los coeficientes b_i y d_i se definen en la parte superior de la capa; así, el potencial se representa en términos de exponenciales negativos. La ventaja de este enfoque es que evita exponentes positivos, que pueden exceder la representación numérica en capas excesivamente gruesas o conductivas.

Expresiones recursivas pueden ser obtenidas para los cocientes de coeficientes $R_i^- = b_i/a_i$ y $S_i^- = d_i/c_i$ para capas sobre el transmisor; y $R_i^+ = a_i/b_i$ y $S_i^+ = c_i/d_i$ para capas por debajo del transmisor. Las expresiones R_i y S_i representan los coeficientes de reflexión transversal eléctrico y magnético (e.g., Ward y Hohmann, 1988), aunque su definición es sutilmente diferente debido a la profundidad del offset de los coeficientes a_i , b_i , c_i , y d_i . Las expresiones recursivas se obtienen aplicando las condiciones de continuidad en las interfaces para las componentes tangenciales de \mathbf{E} y \mathbf{B} a las ecuaciones 3.9 y 3.10, obteniendo así

$$R_i^\pm = \frac{(r_i^\pm + R_{i\pm 1}^\pm e^{-\gamma_{i\pm 1} h_{i\pm 1}}) e^{-\gamma_i h_i}}{1 + r_i^\pm R_{i\pm 1}^\pm e^{-\gamma_{i\pm 1} h_{i\pm 1}}}, \quad (3.11)$$

donde

$$r_i^\pm = \frac{\gamma_i - \gamma_{i\pm 1}}{\gamma_i + \gamma_{i\pm 1}}, \quad (3.12)$$

y

$$S_i^\pm = \frac{(s_i^\pm + S_{i\pm 1}^\pm e^{-\gamma_{i\pm 1} h_{i\pm 1}}) e^{-\gamma_i h_i}}{1 + s_i^\pm S_{i\pm 1}^\pm e^{-\gamma_{i\pm 1} h_{i\pm 1}}}, \quad (3.13)$$

donde

$$s_i^\pm = \frac{\gamma_i \sigma_{i\pm 1} - \gamma_{i\pm 1} \sigma_i}{\gamma_i \sigma_{i\pm 1} + \gamma_{i\pm 1} \sigma_i}, \quad (3.14)$$

y $h_i = z_{i+1} - z_i$ es el espesor de la capa i . El símbolo $+$ es usado para capas por debajo del transmisor (i.e., $i > j$), y el símbolo $-$ se usa para capas ubicadas sobre la posición del transmisor (i.e., $i < j$).

A partir de la condición de frontera de que sólo puede haber energía saliente en las capas superior e inferior, $R_1^- = S_1^- = 0$ y $R_N^+ = S_N^+ = 0$. Las recursiones son calculadas a partir de las capas más externas hacia la capa interna j que contiene la fuente. Mediante la aplicación de las condiciones de frontera en la parte superior e inferior de la capa, los coeficientes de potencial en la capa origen son

$$a_j = (e^{-\gamma_j |z_{j+1}-z_s|} + R_j^- e^{-\gamma_j |z_j-z_s|}) \frac{R_j^+ e^{\gamma_j h_j} \mu}{1-R_j^- R_j^+ 2\gamma_j}, \quad (3.15)$$

$$b_j = (R_j^+ e^{-\gamma_j |z_{j+1}-z_s|} + e^{-\gamma_j |z_j-z_s|}) \frac{R_j^- e^{\gamma_j h_j} \mu}{1-R_j^- R_j^+ 2\gamma_j}, \quad (3.16)$$

$$c_j = (-e^{-\gamma_j |z_{j+1}-z_s|} + S_j^- e^{-\gamma_j |z_j-z_s|}) \frac{S_j^+ e^{\gamma_j h_j} \mu}{1-S_j^- S_j^+ 2\lambda^2}, \quad (3.17)$$

$$d_j = (-S_j^+ e^{-\gamma_j |z_{j+1}-z_s|} + e^{-\gamma_j |z_j-z_s|}) \frac{S_j^- e^{\gamma_j h_j} \mu}{1-S_j^- S_j^+ 2\lambda^2}, \quad (3.18)$$

Nótese que el exponente positivo en estas fórmulas se cancela con los exponentes negativos en las recurrencias de R_j y S_j y por lo tanto están ausentes en la formulación numérica. Cuando un receptor es ubicado en una capa distinta de la capa de origen, los coeficientes de los potenciales se encuentran simplemente mediante el uso de cualquiera de los potenciales definidos en las ecuaciones 3.9 y 3.10, junto con la sustitución adecuada de R_i y S_i (Key, 2009a).

III.4.2 Inversión 1D tipo Occam

El problema inverso consiste en encontrar un modelo de conductividad compatible con un conjunto dado de datos y soluciones a este problema son descritas a través de la literatura geofísica electromagnética (e.g., Parker, 1994; Zhdanov, 2002, y referencias allí citadas). Debido a que un conjunto dado de datos es finito e impreciso, para el problema inverso existe un número infinito de soluciones. Un método estándar para el manejo de esta no unicidad es restringir el conjunto de soluciones aceptables para aquellos que cumplen con algunas restricciones a priori sobre la estructura del modelo, también conocido como el problema inverso regularizado. El modelo estudiado aquí usa el método de Inversión de Occam (Constable et al., 1987), que resuelve el problema de regularización mediante la búsqueda del modelo más suavizado que se ajuste a los datos. La utilidad de este método es que generalmente produce picos suavizados en el modelo, lo cual corresponde a características que son bien delimitadas por los datos; mientras que las características no delimitadas por los datos serán suavizadas o totalmente omitidas en el modelo. A continuación una breve revisión del enfoque de inversión de Occam:

El problema inverso regularizado busca minimizar el funcional

$$U = \|\mathbf{\partial m}\|^2 + \|\mathbf{P}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_*)\|^2 + \mu^{-1} \times \left[\|\mathbf{W}(\mathbf{d} - F(\mathbf{m}))\|^2 - \chi_*^2 \right]. \quad (3.19)$$

El primer término es una norma de la rugosidad de modelo y se calcula mediante la aplicación del operador diferencial $\mathbf{\partial}$ a los elementos del vector de modelo \mathbf{m} . Para los modelos 1D aquí considerados, \mathbf{m} es un vector $\log_{10} \sigma$ para cada capa, y $\mathbf{\partial}$ se elige para ser una matriz de primeras derivadas de modo que $\mathbf{\partial m}$ se aproxima a la derivada vertical de $\log_{10} \sigma$. La parametrización con respecto a $\log_{10} \sigma$, asegura que la conductividad siga siendo positiva durante la inversión. Si se desean saltos en la conductividad en ciertas profundidades, los elementos correspondientes de $\mathbf{\partial}$ se pueden establecer en cero.

El segundo término es una medición de la diferencia de \mathbf{m} con respecto a un modelo de preferencia \mathbf{m}_* . La matriz diagonal \mathbf{P} contiene los parámetros de escalamiento que determinan la ponderación relativa entre la preferencia y la rugosidad del modelo. Los valores de preferencia del modelo, si se usan, típicamente contienen sólo unas pocas capas, y los elementos correspondientes de la diagonal de \mathbf{P} serán distintos de cero.

El tercer término es una medición del desajuste de la respuesta directa del modelo $F(\mathbf{m})$ (esto es, los campos eléctricos y magnéticos para el modelo \mathbf{m}) a los datos \mathbf{d} . No hay ninguna restricción en el vector de datos \mathbf{d} . Por ejemplo, puede contener datos de múltiples transmisores, receptores, y frecuencias. La expresión \mathbf{W} es una función de ponderación de covarianza de datos y es seleccionada de una matriz diagonal con los elementos correspondientes a los valores inversos de los errores estándar de los datos. Por lo tanto, los datos con grandes errores se escalan para limitar su influencia, mientras que los datos con errores pequeños tendrán una mayor influencia.

La expresión χ_*^2 es el desajuste del objetivo, y su inclusión ilustra que minimizar U no es necesariamente encontrar el modelo que mejor se ajusta, sino más bien un modelo suavizado que se encuentra dentro del desajuste del objetivo especificado. El multiplicador de

Lagrange μ sirve para equilibrar la compensación entre el ajuste de los datos, la rugosidad del modelo y el modelo de preferencia.

El método estándar para minimizar U en la ecuación 19 es tomar la derivada con respecto a \mathbf{m} e igualarla a cero. Debido a que la derivada de $F(\mathbf{m})$ es no lineal en electromagnéticos, la ecuación resultante se resuelve iterativamente mediante la creación de una secuencia de modelos, cada uno de los cuales gradualmente proporciona un mejor ajuste a los datos. Después de linealizar sobre un modelo inicial \mathbf{m}_k , la ecuación para el modelo siguiente en la secuencia \mathbf{m}_{k+1} es

$$\mathbf{m}_{k+1} = [\mu(\partial^T \partial + \mathbf{P}\mathbf{P} + (\mathbf{W}\mathbf{J}_k)^T \mathbf{W}\mathbf{J}_k)]^{-1} \times [(\mathbf{W}\mathbf{J}_k)^T \mathbf{W}\hat{\mathbf{d}} + \mu\mathbf{P}\mathbf{m}_*], \quad (3.20)$$

donde

$$\hat{\mathbf{d}} = \mathbf{d} - F(\mathbf{m}_k) + \mathbf{J}_k \mathbf{m}_k. \quad (3.21)$$

La expresión \mathbf{J}_k es el gradiente de la respuesta del modelo linearizado o Matriz Jacobiana

$$\mathbf{J}_k = \nabla_{\mathbf{m}} F(\mathbf{m}_k), \quad (3.22)$$

con elementos

$$J_{ij} = \frac{\partial F_i(\mathbf{m}_k)}{\partial \log_{10} \sigma_j}, \quad (3.23)$$

donde $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$ y n es el número de datos y m el número de capas del modelo. En otras palabras, \mathbf{J} es una matriz de sensibilidad que contiene la derivada de cada componente de campo con respecto a $\log_{10} \sigma$ en cada capa. Key (2009a) presenta un método para calcular \mathbf{J} de una manera eficiente para el problema de CSEM en 1D.

Para resolver la ecuación 3.20, se debe elegir un valor del multiplicador de Lagrange μ . El enfoque utilizado por el método de Occam (Constable *et al.*, 1987) consiste en realizar una búsqueda a través de μ para encontrar el modelo $\mathbf{m}_{k+1}(\mu)$ con el mejor ajuste a los datos, que inicialmente será probablemente mayor que el desajuste del objetivo. La actualización del modelo en las iteraciones continúa hasta que el desajuste objetivo χ_*^2 sea alcanzado, el método de punto de Brent se utiliza para encontrar las intersecciones. Puede haber más de una intersección de χ_*^2 a lo largo de μ , y el modelo con la mayor μ se elige porque tenderá a ser el

modelo más suave. En la práctica, el desajuste del objetivo χ^2 generalmente se elige de manera que la raíz cuadrada media (rms) de desajuste x_{rms} es igual a la unidad,

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{\chi^2}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{d_i - F_i(\mathbf{m}_{k+1}(\mu))}{s_i} \right]^2}, \quad (3.24)$$

donde n es el número de datos y s_i es el error estándar del i -ésimo dato (Key, 2009a).

III.5 Resumen

En este capítulo se mostró de manera general cómo se realiza la adquisición de los datos de CSEM y el procesado de los mismos. También se presentaron las bases para el modelado e inversión de datos 1D de CSEM. A continuación se realiza una descripción del software utilizado para el modelado y la inversión de datos 1D de CSEM.

IV OCCAM1DCSEM

IV.1 Introducción

El software OCCAM1DCSEM es un programa de inversión de datos de MT y CSEM, para la generación de modelos 1D suavizados. En el presente capítulo se describen las características y funciones de este código de inversión, así como las instrucciones básicas para su funcionamiento; se listan los parámetros más comunes con su respectiva definición. También se describirá el uso del software de modelado directo Dipole1D. OCCAM1DCSEM y Dipole1D, serán utilizados para realizar la inversión de datos y la generación de modelos del capítulo siguiente.

OCCAM1DCSEM es un paquete en lenguaje Fortran creado para generar modelos suavizados unidimensionales desde datos CSEM y MT. El paquete se basa en un código de modelado de datos 1D de CSEM llamado Dipole1D, que ha sido diseñado para manejar una diversa cantidad de escenarios 1D. Este paquete también viene con rutinas de Matlab para la edición de los archivos de datos adquisición, los cuales son requeridos por OCCAM1DCSEM y para graficar los modelos resultantes de la inversión CSEM y las respuestas. A continuación se presenta una lista de características soportadas actualmente por la versión 3.9.1 de OCCAM1DCSEM, la cual utilizamos en este trabajo:

- Utiliza un sistema de coordenadas cartesianas;
- Se pueden utilizar las 3 componentes del campo (x , y , z), tanto de los campos eléctricos como de los magnéticos;
- Trabaja con datos complejos (parte real e imaginaria), amplitud y fase, y datos de polarización elíptica;
- Los receptores pueden localizarse en cualquier parte del modelo;
- Los ejes del receptor se pueden rotar de manera manual (soporta rotación 3D);
- Opción para encontrar las orientaciones del receptor (compatible con la solución para la rotación 3D, si hay datos disponibles de la componente z);
- Los transmisores se pueden ubicar en cualquier parte del modelo;

- La antena transmisora se puede girar horizontal y verticalmente;
- El modelo de capas es parametrizado en profundidad absoluta;
- No hay supuestos de capas fijo (se tiene la entrada para las capas de aire y mar);
- Manejo estratificado de capas conductivas del agua de mar;
- Se pueden invertir capas conductivas por encima y por debajo de los receptores y transmisores;
- Se incluye la inversión de datos MT 1D (solo o junto con los datos de CSEM); y
- Sólo maneja conductividad isotrópica en cada capa.

OCCAM1DCSEM y Dipole1D son software de uso libre; se permite su redistribución y modificación según las condiciones establecidas en la licencia pública general de GNU (GNU, General Public License) publicada por la fundación del software libre (Free Software Foundation). Copyright (C) 1986-2009 Steven Constable, Kerry Key, David Myer, Catherine deGroot-Hedlin Scripps Institution of Oceanography de la Universidad de California en San Diego.

IV.2 Descripción del algoritmo de inversión de datos tipo Occam

Esta es una breve descripción de la inversión tipo Occam. Esto puede ser útil para la comprensión de los parámetros en los archivos de entrada. La Inversión de Occam busca minimizar el siguiente funcional:

$$U = \|\partial \mathbf{m}\|^2 + \|\mathbf{P}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_*)\|^2 + \mu^{-1} \times \left[\|\mathbf{W}(\mathbf{d} - F(\mathbf{m}))\|^2 - \chi_*^2 \right]. \quad (4.1)$$

El primer término es la norma de la rugosidad del modelo y se calcula mediante la aplicación de un operador de diferenciación ∂ a los elementos del vector del modelo \mathbf{m} . El segundo término es una medición de la diferencia de \mathbf{m} con respecto a un modelo \mathbf{m}_* preferente establecido a priori. La matriz diagonal \mathbf{P} contiene los parámetros de escala que determinan el peso relativo entre la preferencia y la rugosidad del modelo. La rugosidad y las condiciones de preferencia en la ecuación anterior se regularizan para estabilizar la inversión y evitar que se produzca una estructura de resistividad exageradamente oscilante (Constable *et al.*, 1987).

El tercer término es una medida del desajuste de la respuesta del modelo $F(\mathbf{m})$, es decir, los campos eléctricos y magnéticos para el modelo \mathbf{m} a los datos \mathbf{d} . No hay ninguna restricción en el vector de datos \mathbf{d} . Por ejemplo, puede contener datos de varios transmisores, receptores y frecuencias, y puede incluir datos MT. \mathbf{W} es una función de ponderación de covarianza de datos y se selecciona en una matriz diagonal con los elementos correspondientes a la inversa de los errores estándar de los datos.

El desajuste objetivo χ_*^2 y su inclusión ilustra que la minimización U no encuentra necesariamente el mejor modelo, sino más bien un modelo suavizado que se encuentra dentro del desajuste objetivo especificado. El desajuste objetivo χ_*^2 suele ser elegido de modo que la raíz cuadrada media x_{rms} es igual a la unidad:

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{\chi_*^2}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{d_i - F_i(m)}{s_i} \right]^2}, \quad (4.2)$$

donde n es el número de datos y s_i es el error estándar del i -ésimo dato. El multiplicador de Lagrange μ sirve para equilibrar la compensación entre el ajuste de los datos, la rugosidad del modelo y el modelo de preferencia.

IV.3 Modelos, geometría Transmisor-Receptor

El modelado 1D utiliza la geometría cartesiana con el criterio de la mano derecha, con el eje z apuntando hacia lo profundo (Figura 4.1). Todas las posiciones están en unidades de metros y los ángulos en grados. Hay N -capas con una resistividad ρ_i en unidades de $ohm\text{-}m$, y cada posición de la capa se define en términos de la profundidad de la parte superior de la capa. Los receptores y transmisores pueden ser ubicados en cualquier lugar de la secuencia de capas. Pero cuando se realiza el modelado con datos reales es necesario decidir a cual eje, x o y , corresponden los datos. Por ejemplo, puede utilizar las coordenadas UTM entonces se tiene $[x = Norte]$, $[y = Este]$. O puede tener coordenadas de adquisición local, donde $[x = Inline]$, $[y = Crossline]$, o $[y = Inline]$, $[x = Crossline]$. La elección, debe ser coherente entre los transmisores y receptores; los ángulos serán definidos a continuación. Es necesario revisar y

luego volver a comprobar que se ha hecho las transformaciones correctas.

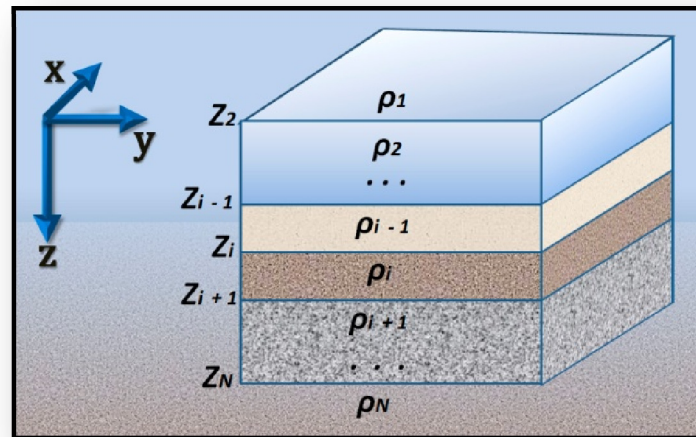


Fig. 4.1. Geometría del Modelo 1D para CSEM.

IV.3.1 Orientación del Transmisor

Los parámetros de orientación del transmisor son mostrados en la Figura 4.2 El azimut del transmisor es definido como la rotación horizontal de la antena transmisora desde el eje x , positivo hacia y . Por lo tanto un ángulo de 0° significa que la antena está alineada a lo largo del eje x , mientras que un ángulo de 90° quiere decir que antena está orientada a lo largo del eje y . Si x es la dirección en la que el transmisor es remolcado (*townline*), el azimut es equivalente a la antena *yaw*. El ángulo de inmersión del transmisor es el ángulo positivo hacia abajo desde el ángulo del azimut. Una inmersión de 0° grados de este ángulo indica que la antena está en posición horizontal. Una caída de 90° significaría que la antena está apuntando hacia abajo. Si la cola de la antena se está hundiendo, el ángulo de inclinación será negativo. Si la inmersión de la cola de la antena es mayor que la de la cabeza, el ángulo de inclinación será positivo. Puesto que Dipole1D utiliza un punto para colocar el dipolo, las coordenadas (x , y , z) de la posición de la antena debe dar como resultado el punto medio de una antena de longitud finita. Por último, se debe tener en cuenta que aquí el término azimut se usa para hacer referencia a la orientación de la antena, no al azimut fuente-receptor utilizado en

coordenadas cilíndricas.

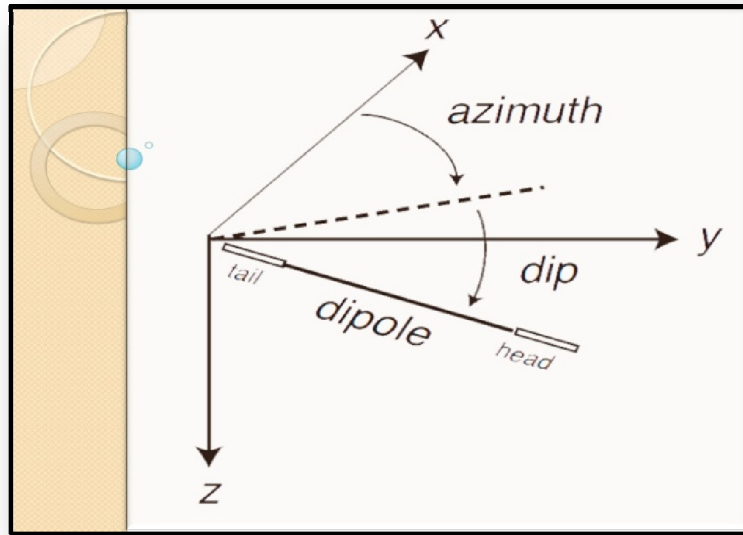


Fig. 4.2. Parámetros de orientación del transmisor (modificada de Key, 2009b).

IV.3.2 Orientación de los Receptores

El software OCCAM1DCSEM puede recibir datos de exploración en donde los ejes (x , y , z) estén previamente rotados, o que se hallan colectado a lo largo de ejes arbitrarios (x'' , y'' , z''). Para ello, la rotación en 3D del receptor tiene que ser especificada utilizando tres ángulos. La orientación de los ejes (x'' , y'' , z'') del sensor a partir de los ejes de la adquisición (x , y , z) puede ser descrita por tres ángulos θ , α y β (figura 4.3).

La rotación en el plano horizontal puede ser descrita por el ángulo θ , que es la rotación alrededor del eje z en los ejes de adquisición (x , y) en (x' , y'). La inclinación del receptor, se puede especificar con los ángulos α y β , que describen las rotaciones para los ejes y' , x'' , respectivamente. Tomando en cuenta que α describe la inclinación en un plano de orientación vertical a lo largo de θ , mientras que el ángulo β describe la inclinación a lo largo de un plano de inmersión cuando $\alpha \neq 0$. El círculo denota el plano horizontal (Key, 2009b).

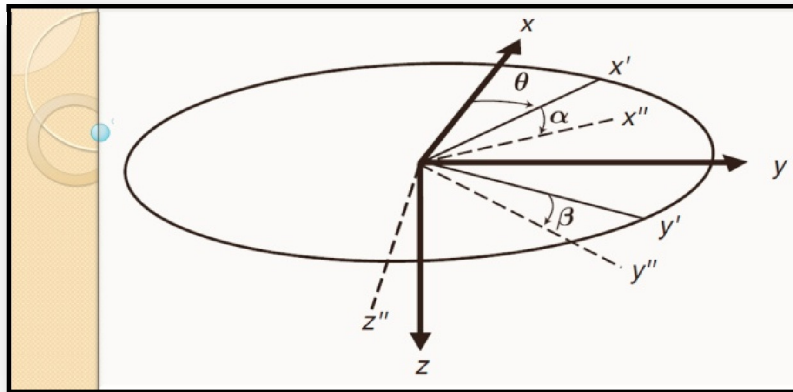


Fig. 4.3. Parámetros de rotación para la orientación absoluta de los sensores del receptor a lo largo de los ejes (x'', y'', z'') , modificada de Key (2009b).

Los valores complejos del vector de datos de campo eléctrico y magnético \mathbf{F}'' , registrados en el sistema de coordenadas de receptores rotados son relacionados con los campos de \mathbf{F} en el sistema de coordenadas del levantamiento por una matriz ortonormal de rotación \mathbf{R} de 3×3 que es:

$$\mathbf{F}'' = \mathbf{R}\mathbf{F}. \quad (4.3)$$

Para n Offsets fuente-receptor discretos, \mathbf{F} y \mathbf{F}'' se pueden escribir como una matriz de $2n \times 3$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \text{Re}(F_{x,1}) & \text{Re}(F_{y,1}) & \text{Re}(F_{z,1}) \\ \text{Im}(F_{x,1}) & \text{Im}(F_{y,1}) & \text{Im}(F_{z,1}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{Re}(F_{x,n}) & \text{Re}(F_{y,n}) & \text{Re}(F_{z,n}) \\ \text{Im}(F_{x,n}) & \text{Im}(F_{y,n}) & \text{Im}(F_{z,n}) \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

donde $F_{x,i}$ especifica la componente x del i -ésimo dato y las partes real e imaginaria de los datos complejos que han sido separadas en filas alternas. La matriz de rotación \mathbf{R} se puede escribir como un producto de rotaciones alrededor de ejes individuales:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z \mathbf{R}_y \mathbf{R}_x, \quad (4.5)$$

donde:

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) & 0 \\ \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.6)$$

$$\mathbf{R}_{y'} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & -\text{sen}(\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{bmatrix}, \quad (4.7)$$

y

$$\mathbf{R}_{x''} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta) & -\text{sen}(\beta) \\ 0 & \text{sen}(\beta) & \cos(\beta) \end{bmatrix}. \quad (4.8)$$

La matriz \mathbf{R}_z es una rotación de θ sobre el eje z , dando nuevos ejes de coordenadas (x' , y' , z). $\mathbf{R}_{y'}$ es una rotación de α sobre el eje y' , obteniendo nuevos ejes de coordenadas (x'' , y' , z'). $\mathbf{R}_{x''}$ es una rotación de β alrededor del eje x'' , obteniendo finalmente los ejes (x'' , y'' , z''). Si se especifican parámetros de rotación distintos de cero para un receptor determinado, entonces OCCAM1DCSEM rotará el modelo de respuesta a la orientación de los datos mediante la ecuación 4.3.

IV.4 Archivos de Entrada de OCCAM1DCSEM

Para el funcionamiento de OCCAM1DCSEM es necesario contar con tres archivos de entrada: un archivo de inicio también llamado de iteración (*IterationFile*), un archivo de modelo (*ModelFile*), y uno con los datos de la adquisición (*DataFile*), que también puede ser de datos sintéticos. Estos son archivos de texto y usan un formato flexible que permite líneas en blanco y comentarios (todo texto escrito después de los signos ! y %, es considerado como comentario y es ignorado para los procesos de cálculo del software). La estructura básica de muchas de las líneas de estos archivos es <palabra clave, *keyword*>: <valor, *value*>, donde la palabra clave especifica un parámetro para establecer y valor es el valor de uso o de medición separados por dos puntos. Todos los campos de texto son insensibles al uso de mayúsculas y minúsculas, a excepción de los nombres de archivo, determinadas palabras clave. Los pares de valores *keyword: value* son seguidos con matrices de números (posiciones de receptores o transmisor, etc.)

IV.4.1 El Archivo de Iteración

El archivo de texto *IterationFile* es el primer archivo leído por OCCAM1DCSEM y especifica los parámetros que la inversión Occam utilizará para iniciar la búsqueda del modelo más suave que se ajuste a los datos. De manera predeterminada, este archivo se denomina *startup* (inicio) en la primera iteración de Occam, pero también puede usarse otro nombre de archivo, el cual puede especificarse utilizando un argumento de línea de comando. El código es compatible con el formato antiguo OCCAMITER_1.0, pero se recomienda utilizar el formato OCCAMITER_FLEX que es más reciente, además de ser flexible. En la Tabla IV.1 se muestra un ejemplo de un archivo *IterationFile*, con una breve descripción de cada línea después del símbolo “!”.

Tabla IV.1. Contenido del archivo de inicio o iteración (*IterationFile* o *Startup*) usado por OCCAM1DCSEM, el cual es un archivo de texto simple (Key, 2009b).

Parámetros	Valor	Comentario
Format:	OCCAMITER_FLEX	! Flexible format
Description:	test	! Not used by Occam, but you can use this for your own notes.
Model File:	model	! Name of the Model File. Case sensitive.
Data File:	data	! Name of the Data File. Case sensitive.
Date/Time:	11/25/2008 16:46:39	! On output, date and time stamp placed here.
Max Iter:	100	! Maximum number of Occam iterations to compute.
Target Misfit:	1.0	! Target RMS misfit, see equation 2.
Roughness Type:	1	! Deprecated, should move to ModelFile since model dependent.
Model Limits:	min,max	! Optional, places hard limits on log10(rho) values.
Model Value Steps:	stepsize	! Optional, forces model into discrete steps of stepsize.
Debug Level:	1	! Console output. 0: minimal, 1: default, 2: detailed
Iteration:	0	! Iteration number, use 0 for starting from scratch.
Lagrange Value:	5.000000	! log10(lagrange multiplier), starting value.
Roughness Value:	0.1000000E+08	! Roughness of last model, ignored on startup
Misfit Value:	100.0000	! Misfit of model listed below. Ignored on startup
Misfit Reached:	0	! 0: not reached, 1: reached. Useful when restarting.
Param Count:	75	! Number of free inversion parameters.
0		! A listing of the free inversion parameter values in log10(resistivity).
0		! Here the 0's correspond to log10(1 ohm-m).
0		! Since this is iteration 0, the inversion will thus be started with a
0		! 1 ohm-m halfspace.
...		

IV.4.2 El Archivo del Modelo

El archivo de modelo describe el modelo 1D en capas y denota si una determinada capa tiene una resistividad fija o es un parámetro libre en la inversión. También especifica el criterio de suavizado aplicado a cada capa. Mientras que la iteración (*IterationFile* o *Startup*) utiliza \log_{10} de la resistividad para los parámetros de inversión, el archivo del modelo usa resistividad lineal para todas las capas fijas o cualquier capa preferente. En la Tabla IV.2 se muestra un ejemplo de archivo de modelo, el formato sólo admite actualmente, Resistivity1DMod_1.0.

Tabla IV.2. Ejemplo del formato del archivo de modelo (Key, 2009b).

Archivo de Modelo					
Format:	Resistivity1DMod_1.0				
#Layers:	77				
! Layer block listing is:					
! top_depth	resistivity	penalty	preference	pref_penalty	Coments
-100000	1d12	0	0	0	! Air, fixed layer of 10 ¹² ohm-m
0	0.3	0	0	0	! Sea, fixed layer of 0.3 ohm-m
1000	-1	1	0	0	! First free layer, the seafloor @ 1000 m
1025	-1	1	0	0	! use -1 or ? to denote free layer resistivity
1050	-1	1	0	0	
1075	-1	1	0	0	
1100	-1	1	0	0	
1125	-1	1	0	0	
1150	-1	1	0	0	
1175	-1	1	0	0	
1200	-1	1	0	0	
1225	-1	1	0	0	
1250	-1	1	0	0	
1275	-1	1	0	0	
...					

A la capa superior se le asigna la profundidad en unidades absolutas (*metros*) y la profundidad de la parte superior de la primera capa es ignorada por Dipole1D. Las resistividades fijas se dan en unidades de resistividad lineal (*ohm-m*). El archivo de modelo anterior tiene dos capas fijas, el aire (1d12 ohm-m, ó 10¹² ohm-m) y una sola capa de agua de mar (0.3 ohm-m). Sin embargo, también el perfil de resistividad podría incluir una estratificación del agua de mar (Key, 2009b).

Para capas de inversión libre, el valor de la resistividad es etiquetado como parámetro libre usando un -1 o el signo ?. El valor penalti es el peso del operador aplicado al suavizado de la resistividad a través de cada capa, donde la resistividad de ambas capas son parámetros libres. Por lo general, esto sólo será un 1. Sí se desea permitir un salto en la conductividad a una determinada profundidad, se definirá el peso del criterio a 0 a la capa en esa profundidad. A continuación se muestra en una matriz la representación de cómo el criterio (w_i) se aplica al operador de rugosidad (matriz de 1 y -1's) y el vector del modelo \mathbf{m} , para un modelo de 5 capas:

$$\partial \mathbf{m} = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & w_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & w_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & w_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \\ m_5 \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

La forma de los pesos w_i es flexible. Usualmente basta utilizar un 1. Sin embargo, se pueden utilizar pesos w_i que se incrementen con la profundidad si existe una buena razón geológica para un modelo suavizado con la profundidad. También se podrían escalar con el espesor de la capa si se quiere que la penalización de la rugosidad se aproxime a la derivada vertical.

El valor de preferencia es la resistividad lineal ($\Omega\text{-m}$) que se prefiere para ciertas capas, aunque esta característica no es de uso común. Por ejemplo, si se tiene información a priori que una capa geológica determinada es resistiva, se puede señalar esta preferencia en Occam especificando el valor. Un buen ejemplo para el uso de un valor de preferencia es cuando se quiere poner a prueba una hipótesis de si una cierta capa es resistiva o por lo contrario conductiva. Se pueden invertir los datos con el valor de preferencia y observar qué tan bien Occam es capaz de ajustar los datos. Si la inversión no es capaz de adaptarse bien a los datos, o la resistividad invertida está muy lejos de la preferencia, se puede descartar la presencia de ciertas estructuras.

Si se desea un valor de preferencia, es necesario establecer un valor $pref\text{-penalty} \neq 0$ (1 es el valor nominal), de lo contrario se ignorará cuando se establezca $pref\text{-penalty} = 0$. La

representación de la matriz de preferencia para un modelo de 5 capas será:

$$\mathbf{P}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_*) = \begin{bmatrix} p_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 - m_{*1} \\ m_2 - m_{*2} \\ m_3 - m_{*3} \\ m_4 - m_{*4} \\ m_5 - m_{*5} \end{bmatrix}. \quad (4.10)$$

Al establecer el peso de preferencia $p_i > 0$ y la resistividad de preferencia m_{*i} significa que la diferencia $m_i - m_{*i}$ será minimizada por la inversión, sujeto a la restricción de que los datos todavía tienen que ser ajustados. Hay que tener en cuenta que el valor de preferencia se presenta como resistividad lineal, pero internamente este se convierte en \log_{10} (resistividad). La Tabla IV.3 presenta un archivo de modelo (*ModelFile*) que incluye dos cortes en el criterio de rugosidad, una capa de resistiva preferida y el uso del signo ? en lugar de -1 para referirse a los parámetros libres de las capas.

Tabla IV.3. Uso de preferencias en el archivo de modelo (Key, 2009b).

Archivo de Modelo					
Format:	Resistivity1DMod_1.0				
#Layers:	77				
! Layer block listing is:					
! top_depth	resistivity	penalty	preference	pref_penalty	Coments
-100000	1d12	0	0	0	! Air, fixed layer of 10 ¹² ohm-m
0	0.3	0	0	0	! Sea, fixed layer of 0.3 ohm-m
1000	?	1	0	0	! First free layer, the seafloor @ 1000 m
1025	?	1	0	0	! use -1 or ? to denote free layer resistivity
1050	?	1	0	0	
1075	?	1	0	0	
1100	?	0	0	0	! Allows a resistivity jump at 1100 m
1125	?	1	0	0	
1150	?	0	0	0	! Allows a resistivity jump at 1150 m
1175	?	1	0	0	
1200	?	1	55	1	! A 55 ohm-m preferred layer, spanning
1225	?	1	55	1	! from 1200-1250 m depth
1250	?	1	0	0	
1275	?	1	0	0	
...					

IV.4.3 El Archivo de Datos

En el archivo de datos se incluye la lista de los transmisores, receptores y frecuencias, y tiene una tabla de parámetros de datos, los valores y los errores estándar. El archivo de datos compatible es llamado EMDData_1.1. Este formato está diseñado para ser compatible con los códigos de inversión en 2D y 3D y por lo tanto es muy general. Al igual que el archivo de iteración y modelo, el formato del archivo de datos pueden incluir líneas de comentarios (usando ! ó %) y líneas en blanco. La Tabla IV.4 presenta un archivo de datos *DataFile*.

Tabla IV.4. Fragmento de Archivo de datos de adquisición CSEM (Key, 2009b).

Archivo de Datos						
Format:	EMData_1.1					
# Transmitters:	41					
!	X	Y	Z	AZIMUTH	DIP	
	0	0	950	90	0	
	0	500	950	90	0	
	0	1000	950	90	0	
	...					
# Frequencies:	2					
	0.1					
	1					
# Receivers:	20					
!	X	Y	Z	Theta	Alpha	Beta
	0	0	1000	0	0	0
	0	1000	1000	0	0	0
	0	2000	1000	0	0	0
	...					
# Data:	714					
!	TYPE	FREQ#	TX#	RX#	DATA	SD_ERROR
	RealEy	1	1	1	-2.9422E-07	5.86785E-09
	ImagEy	1	1	1	4.7196E-10	5.86785E-09
	RealEz	1	1	1	6.9592E-09	5.86785E-09
	ImagEz	1	1	1	-1.3543E-09	5.86785E-09
	RealBx	1	1	1	2.8989E-11	5.84098E-13
	ImagBx	1	1	1	-1.8291E-13	5.84098E-13
	RealEy	1	2	1	5.3593E-10	1.08866E-11
	ImagEy	1	2	1	7.5094E-11	1.08866E-11
	RealEz	1	2	1	-4.8938E-11	1.08866E-11
	...					

En el bloque de los transmisores se muestra el número de transmisores, su ubicación en metros (x, y, z), su ángulo de rotación (grados a la derecha de x) y el ángulo de buzamiento (grados positivos hacia abajo). En el bloque de frecuencias se muestra el número de frecuencias y los valores en Hz. En el bloque de los receptores se muestra el número de receptores, las posiciones x, y, z en metros, así como los ángulos de rotación de cada receptor.

El bloque de datos contiene el número de datos, además de una tabla de parámetros de los datos y sus errores estándar. La primera columna de la Tabla IV.4 de datos especifica el tipo de datos. Actualmente los tipos de datos soportados son: datos CSEM y MT, los cuales se muestran en la Tabla IV.5 donde se enlistan los códigos. Los tipos de datos se pueden especificar utilizando los códigos de serie o los códigos numéricos de la tabla antes mencionada. Estos valores no distinguen entre mayúsculas y minúsculas.

En la parte inferior de la Tabla IV.4., la segunda columna de la tabla de datos es el índice de frecuencia de cada dato. La tercera columna es el número de transmisor y la cuarta columna da el número de receptor. La quinta y sexta columna son los datos y los errores estándar. Los campos eléctricos deben proporcionarse en las unidades de V/Am^2 y los campos magnéticos en unidades de T/Am . Para los datos de MT, las impedancias están en unidades de ohms, las resistividades aparentes en unidades de Ω -m lineales y las fases en grados. Las fases de la impedancia (para Z_{YX}) deben ser trasladadas al primer cuadrante (nominalmente 45° , no -135°).

IV.5 Ejecución de OCCAM1DCSEM

OCCAM1DCSEM se puede ejecutar con algunos parámetros adicionales en línea de comando para especificar las opciones de ejecución. Para ejecutar OCCAM1DCSEM, utilice la siguiente sintaxis:

OCCAM1DCSEM [-F] [<IterationFileName> [<OutputFileNameRoot>]]

Tabla IV.5. Códigos de datos CSEM y MT utilizados en EMDData_1.1 (Kcy, 2009b).

Tabla De Códigos De Datos Usados Por El Formato EMDData_1.1		
Códigos para Datos Electromagneticos de Fuente Controlada CSEM		
Integer Code	String Code	Description
1	RealEx	Real Ex
2	ImagEx	Imaginary Ex
3	RealEy	Real Ey
4	ImagEy	Imaginary Ey
5	RealEz	Real Ez
6	ImagEz	Imaginary Ez
11	RealBx	Real Bx
12	ImagBx	Imaginary Bx
13	RealBy	Real By
14	ImagBy	Imaginary By
15	RealBz	Real Bz
16	ImagBz	Imaginary Bz
21	AmpEx	Amplitude Ex
22	PhsEx	Phase Ex
23	AmpEy	Amplitude Ey
24	PhsEy	Phase Ey
25	AmpEz	Amplitude Ez
26	PhsEz	Phase Ez
31	AmpBx	Amplitude Bx
32	PhsBx	Phase Bx
33	AmpBy	Amplitude By
34	PhsBy	Phase By
35	AmpBz	Amplitude Bz
36	PhsBz	Phase Bz
41	PEmax	Electric horizontal polarization ellipse maximum
42	PEmin	Electric horizontal polarization ellipse minimum
43	PBmax	Magnetic horizontal polarization ellipse maximum
44	PBmin	Magnetic horizontal polarization ellipse minimum
Códigos para Datos Magneto Teluricos MT		
Integer Code	String Code	Description
101	RhoZxx	Apparent Resistivity Zxx, ignored in 1D
102	PhsZxx	Phase Zxx, ignored in 1D
103	RhoZxy	Apparent Resistivity Zxy
104	PhsZxy	Phase Zxy
105	RhoZyx	Apparent Resistivity Zyx
106	PhsZyx	Phase Zyx
107	RhoZyy	Apparent Resistivity Zyy, ignored in 1D
108	PhsZyy	Phase Zyy, ignored in 1D
111	RealZxx	Real Zxx, ignored in 1D
112	ImagZxx	Imaginary Zxx, ignored in 1D
113	RealZxy	Real Zxy

donde todas las cantidades entre [] son opcionales.

Opciones de ejecución:

-F Calcula la respuesta directa del archivo de iteración *IterationFile* de partida. La respuesta es escrita en un archivo *.resp*.

IterationFileName Especifica cuál es el nombre del archivo *IterationFile* para comenzar con la inversión tipo Occam. Si este parámetro no es especificado, entonces por defecto Occam asume que el nombre del archivo de iteración es *startup*.

OutputFileNameRoot Especifica el nombre del directorio raíz en donde estarán todos los archivos de salida durante la inversión de Occam.

Algunos ejemplos:

\$ OCCAM1DCSEM

Occam lee en el archivo *\startup* de inicio y para cada iteración; Occam emitirá archivos de la forma: *X.iter* para la iteración, *X.resp*, para la respuesta del modelo y un archivo de registro *logfile.log*, donde *X* es el número de iteración.

\$ OCCAM1DCSEM Trough.iter

Occam leerá el archivo *\Trough.iter* y en cada repetición, genera un archivo de registro con la respuesta del modelo *Trough_X.iter*, *Trough_X.resp* y *Trough.logfile*.

\$ OCCAM1DCSEM Trough_20.iter

Occam se iniciará con el archivo de iteración *\Trough_20.iter*, que presuntamente es la iteración 20 de una ejecución Occam anterior.

\$ OCCAM1DCSEM -F MyHypothesisModel

Occam inicia leyendo el archivo *\MyHypothesisModel* y calcula la respuesta directa y el desajuste de *MyHypothesisModel*, y luego escribe la respuesta en el archivo *\MyHypothesis-Model.resp*.

Cuando OCCAM1DCSEM inicia, se imprime la información contenida en los archivos de datos y de modelo y luego se procede con las iteraciones de Occam. Durante cada iteración, el desajuste que es función del multiplicador de Lagrange y de la rugosidad del modelo, se muestra en la consola terminal. Al final de cada iteración, el mejor valor de desajuste del modelo, la rugosidad y del multiplicador de Lagrange son enviados a la consola. Mucha de esta información también se escribe en el archivo *.logfile*.

IV.5.1 Archivos de salida

Al final de cada iteración Occam genera un archivo *IterationFile* con los parámetros del mejor modelo encontrados durante esa iteración. Este archivo tiene el mismo formato que el *IterationFile* de entrada. Además, la respuesta de los parámetros del modelo se escribe a un archivo *.resp*. El archivo *.resp* es básicamente el mismo que el archivo de datos, pero incluye la respuesta del modelo (la Tabla IV.6 muestra un ejemplo). Las seis primeras columnas son una copia de los parámetros de los datos, los datos y los errores estándar son agregados en la tabla de datos, las columnas séptima y octava son la respuesta del modelo y la residual normalizada (es decir, el número de desviaciones estándar para el ajuste de ese dato):

$$\text{residual} = \frac{d_i - F_i(m)}{s_i} \quad (4.11)$$

Tabla IV.6. Fragmento del Archivo de Salida generado por OCCAM1DCSEM (Key, 2009b).

!	Type	Freq#	Tx#	Rx#	Data	StdError	Response	Residual
3		1	1	1	-2.99E-07	5.87E-09	-2.90E-07	-1.39
4		1	1	1	-1.01E-09	5.87E-09	4.99E-10	-0.26
5		1	1	1	-2.40E-09	5.87E-09	5.46E-09	-1.34
6		1	1	1	-5.02E-09	5.87E-09	4.43E-12	-0.86
11		1	1	1	2.97E-11	5.84E-13	2.95E-11	0.39
12		1	1	1	5.50E-13	5.84E-13	1.07E-13	0.76
3		1	2	1	5.28E-10	1.09E-11	5.37E-10	-0.84
4		1	2	1	8.28E-11	1.09E-11	8.06E-11	0.2
5		1	2	1	-3.28E-11	1.09E-11	-2.94E-11	-0.32
6		1	2	1	1.79E-11	1.09E-11	8.66E-12	0.85
...								

IV.6 Modelado Directo 1D con Dipole1D

El programa Dipole1D puede ser utilizado para un modelado directo de una forma rápida. Dipole1D requiere un solo archivo de entrada llamado *RunFile* para calcular las respuestas CSEM. El archivo de respuesta de salida *.csem* generado por Dipole1D puede ser graficado usando *plotCSEM.m* y también se puede utilizar para agregar ruido a los datos sintéticos con la interfaz de usuario *createEMDataFile.m*. Para calcular la respuesta (modelado directo) CSEM de varios modelos Dipole1D funciona de manera más simple que Occam.

IV.7 Resumen

En el presente capítulo se presentó un panorama general de las bases y los archivos de entrada y salida necesarios y/o generados por OCCAM1DCSEM. En el siguiente capítulo se presentan las pruebas realizadas con el software Dipole1D y OCCAM1DCSEM para comprobar su buen funcionamiento una vez que los programas fueron instalados.

V Modelado e Inversión

V.1 Introducción

La generación de los modelos planteados en esta investigación, los cuales se describen a detalle a lo largo del presente capítulo, fue realizada con el siguiente software: Dipole1D para generar las respuestas directas, OCCAM1DCSEM para la inversión de datos; así como funciones con interfaz gráfica para la creación y modificación de los archivos necesarios en el funcionamiento de Dipole1D, OCCAM1DCSEM y el graficado de las repuestas. Estas funciones son diseñadas en el lenguaje de programación Matlab para plataforma UNIX. Todo lo anterior es propiedad de Scripps Institution of Oceanography, Universidad de San Diego California, y está disponible la licencia para su libre uso, como se describió ya en capítulos anteriores.

En el presente capítulo se presentan las pruebas realizadas con el software Dipole1D y OCCAM1DCSEM para comprobar su buen funcionamiento una vez que los programas fueron instalados. Las pruebas se realizaron con datos ya publicados. Una vez probado su funcionamiento, se proponen una serie de modelos con la finalidad de explorar varios escenarios, como son:

- a) Capas de sedimentos sin ningún resistivo presente;
- b) La presencia de una capa resistiva a diferentes profundidades;
- c) Capas resistivas simulando reservorios de diferentes espesores;
- d) Una capa resistiva delgada con una resistividad menor que la del reservorio objetivo en profundidad;
- e) Dos capas simulando dos reservorios, separados por un conductor; y
- f) Modelos con una capa resistiva en los que se varía la resistividad del objetivo.

V.2 Flujo de Trabajo para Modelado Directo e Inversión

El flujo de trabajo para la realización de la presente investigación se ilustra en la figura 5.1. Para ello se hizo uso de todo el software mencionado anteriormente. Las partes del mismo son:

- a) Planteamiento del modelo y variantes del mismo;
- b) Creación del RUNFILE, con los parámetros del modelo planteado;
- c) Generación del archivo X.CSEM, con Dipole1D;
- d) Graficado de la respuesta del Modelo con la función: PlotCSEM de Matlab;
- e) Generación de los archivos de Datos, Modelo e Inicio ó Iteración con la función: CreateEMDataFile de Matlab, archivos requeridos para la inversión. En este punto se adiciona ruido a los datos con la finalidad de simular condiciones reales;
- f) Inversión de los datos con OCCAM1DCSEM y dándole como parámetros los archivos de Datos, Modelo, e Inicio, obteniendo así, un archivo *.Iter y *.Resp en cada iteración;
- g) Graficado de las respuestas de la inversión con la función PlotOccam1DCSEM de Matlab;
- h) Graficado del modelo obtenido de la inversión con *PlotCSEM* de Matlab; y
- i) Comparación del modelo planteado con el modelo directo y el obtenido con la inversión.

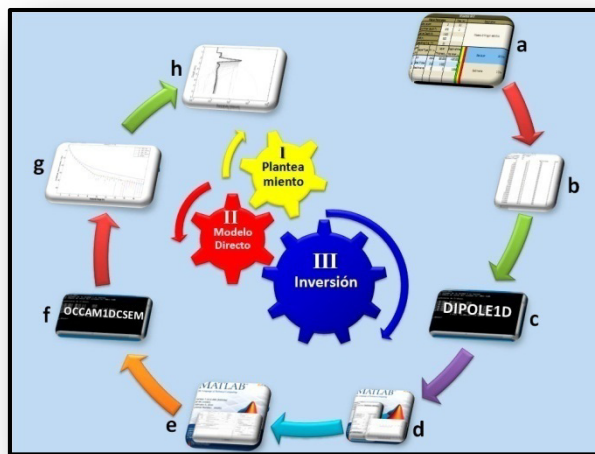


Fig. 5.1. Flujo de trabajo para el modelado e inversión de datos CSEM.

V.3 Pruebas con Dipole1D y Occam1DCSEM

Para verificar que Dipole1D, OCCAM1DCSEM y las librerías de graficado de Matlab fueron instaladas correctamente y funcionan adecuadamente, fue necesario correr pruebas con datos obtenidos a partir de publicaciones donde se utilizó este software y así comparar resultados. A continuación se muestran resultados obtenidos a partir de datos reales que acompañan la documentación del software y datos sintéticos que se generaron con *Dipole1D* y *CreateEMDataFile*.

V.3.1 Prueba del Software con datos reales

En esta prueba se utilizaron los datos que acompañan al software, los cuales pertenecen a una adquisición hecha en el Océano Pacífico, al norte de San Diego, California, EUA. Estos datos son proporcionados y son propiedad de *Scripps Institution of Oceanography de la Universidad de San Diego California*.

Las pruebas consistieron en tomar los archivos de texto que contienen los datos y procesarlos nuevamente con OCCAM1DCSEM, se realizó también el cálculo y graficado de la amplitud y la fase en Excel de Microsoft. Adicionalmente se creó una función en Matlab que grafica estas respuestas a partir de un archivo de texto que contiene los datos de la adquisición, la función está disponible en el ANEXO A de la presente tesis de investigación. A continuación se muestran los resultados de esta prueba.

La adquisición de datos se realizó en el Canal de San Diego, ubicado al este de la bahía de San Diego, California, EUA, con un tirante de agua de 1140 m. Se utilizó un receptor Rx a una profundidad de 1140 m, 44 posiciones de transmisión con un $\text{offset} \approx 150$ m, en un perfil de 11.5 km. La fuente fue remolcada a una profundidad a 100 m del fondo marino y con una frecuencia de transmisión de 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 y 1 Hz, para esta prueba se muestran las

respuestas para la primera frecuencia. La colección consta de un total de 190 datos, registrados en el formato EMDData_1.0 en parte real e imaginaria. La figura 5.2 muestra un mapa regional del área de la línea de arrastre de la fuente y la posición del receptor para la adquisición de los datos mCSEM, proporcionados por Scripps Institution of Oceanography de la Universidad de San Diego California. También se muestran las principales características estructurales de la zona y las posiciones de estaciones gravimétricas y de MT (Constable *et al.*, 2009).

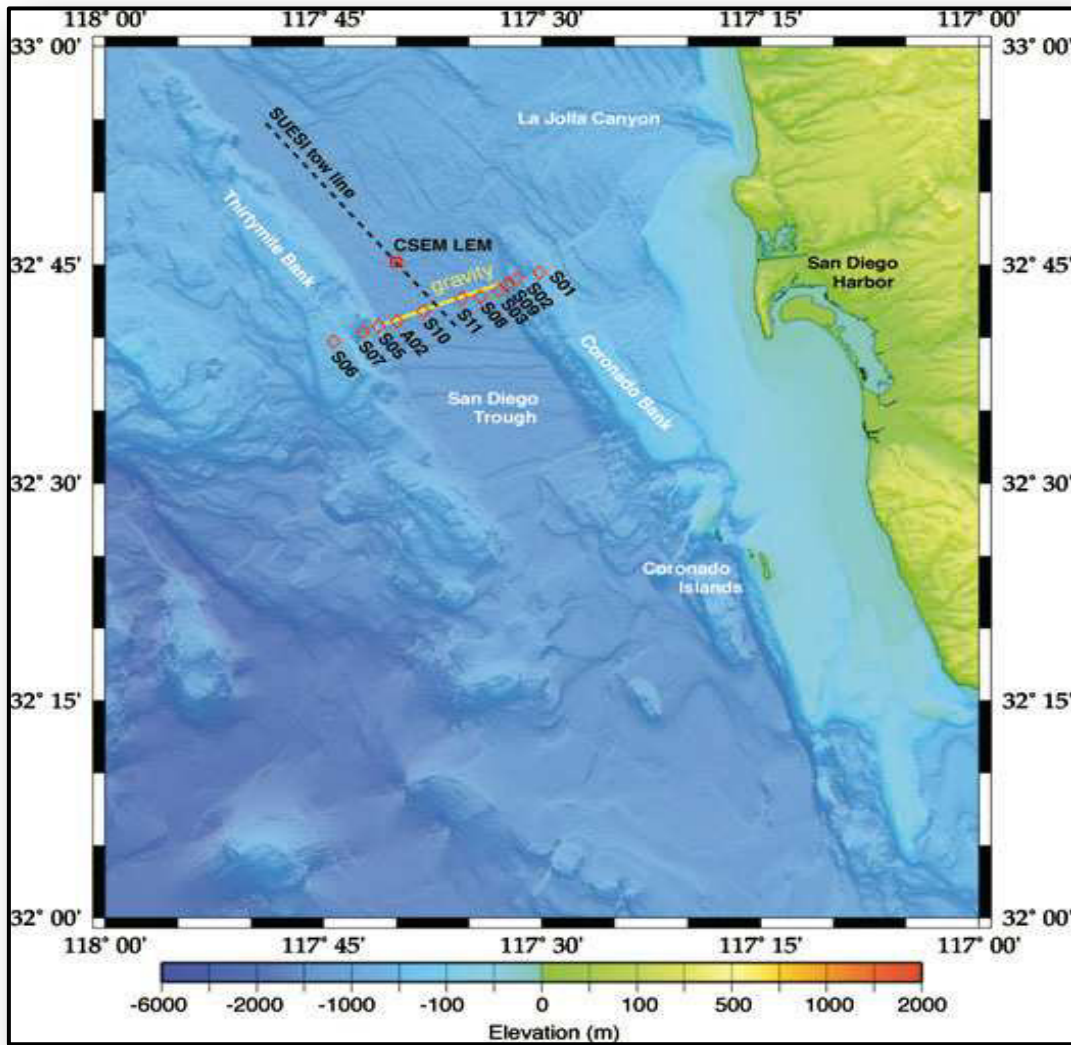


Fig. 5.2. Mapa regional del Canal de San Diego donde se realizaron mediciones de CSEM, MT y gravimétricas (Constable *et al.*, 2009).

La figura 5.3 muestra la tabla de los datos obtenidos en la adquisición de San Diego California E.U.A., utilizados por Constable *et al.* (2009), listados en su parte real e imaginaria a los cuales se les calculó magnitud y fase de la componente E_y del campo eléctrico y se graficó en la hoja de cálculo Excel de Microsoft. Las figuras 5.4 y 5.5, ambas representan los mismos datos, en el primer caso se graficó con el software de Scripps (Key, 2009a) y a continuación con la función CSEMGRPH desarrollada para probar el software instalado, esta última programada en el lenguaje Matlab; como se puede apreciar el comportamiento de ambas curvas es prácticamente el mismo. La función CSEMGRPH se describe a detalle en el anexo A.

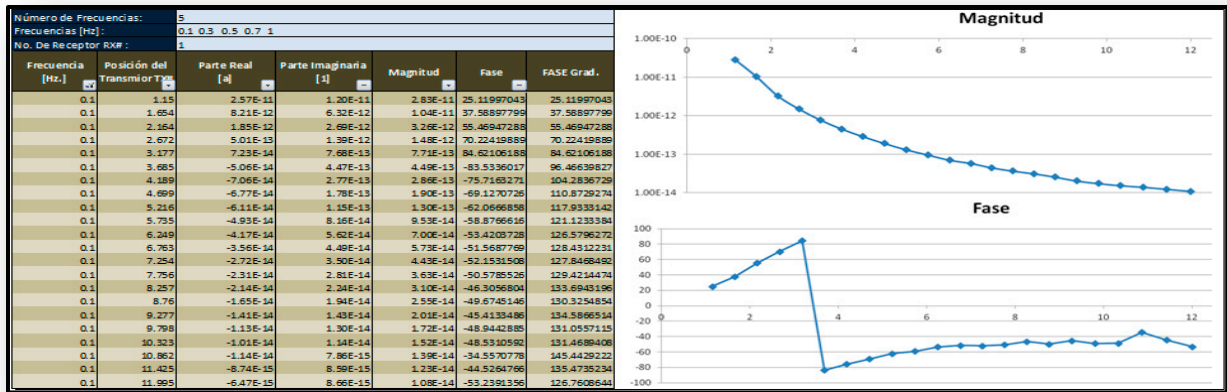


Fig. 5.3. Resultados del cálculo de magnitud y fase del campo eléctrico E_y de los datos de Constable *et al.* (2009), obtenidos con Excel de Microsoft.

Una vez que se cuenta con la respuesta 1D del modelo directo se procede a realizar el modelado Inverso con el software OCCAM1DCSEM de Scripps usando los archivos *datafile*, *model*, y *startup* proporcionados con los datos de la adquisición. La figura 5.6 muestra el gráfico de inversión 1D publicado en el artículo usado para la prueba (Constable *et al.*, 2009); mientras que la figura 5.7 ilustra la obtenida en la prueba con OCCAM1DCSEM y graficada con la función PlotCSEM y como se puede observar los resultados son prácticamente iguales.

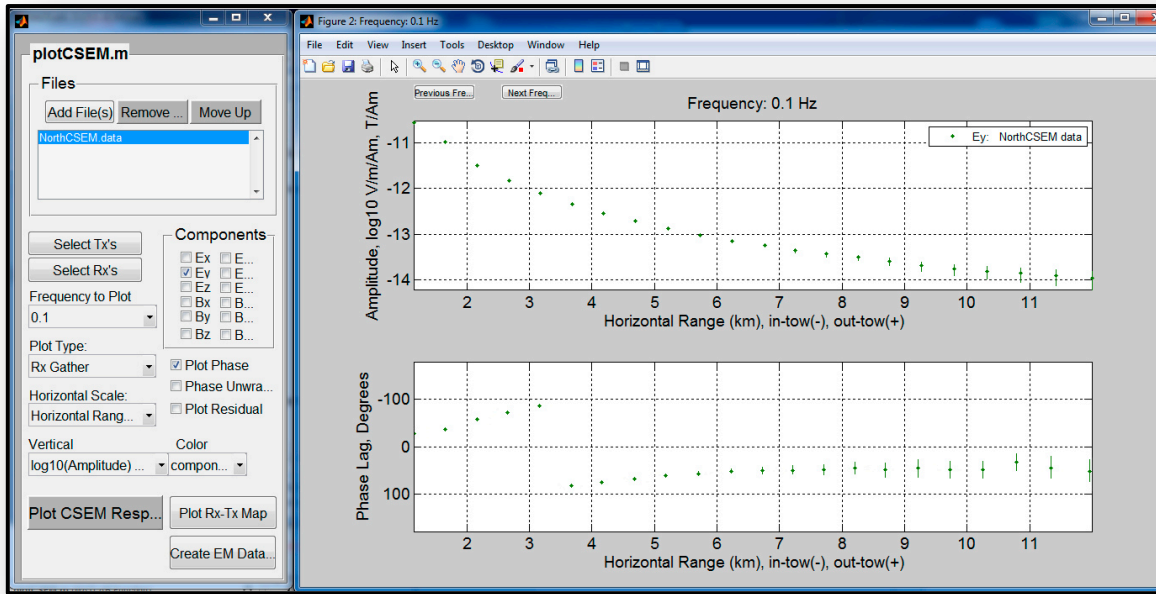


Fig. 5.4. Respuesta de magnitud y fase del campo eléctrico E_y de los datos de Constable *et al.* (2009), obtenida con la función `PlotCSEM`, de Matlab provista con el software de Scripps.

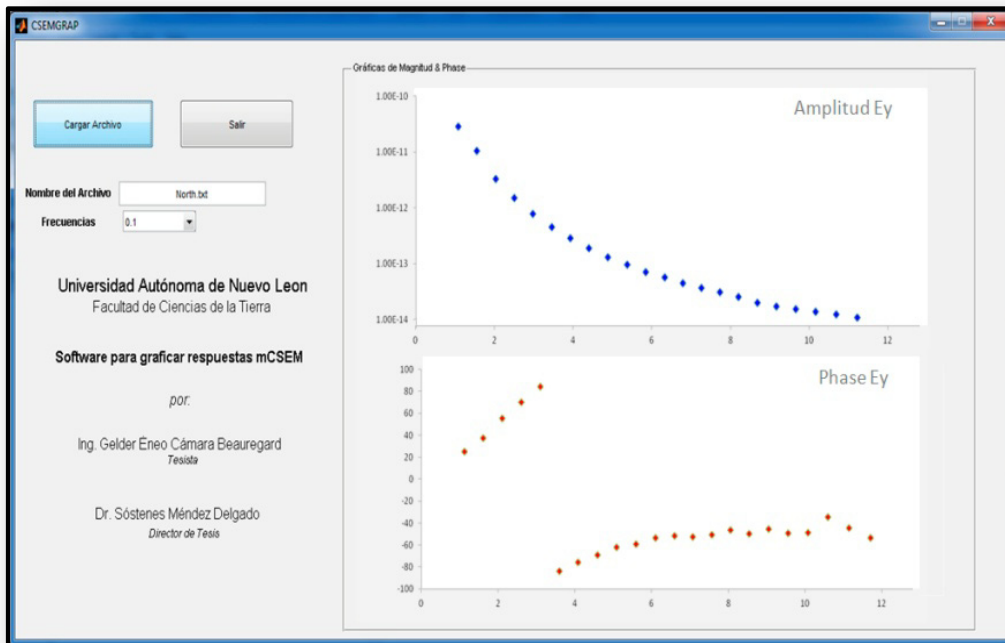


Fig. 5.5. Resultados del cálculo de la magnitud y fase del campo eléctrico E_y de los datos de Constable *et al.* (2009), obtenidos con la función `CSEMGRPH`.

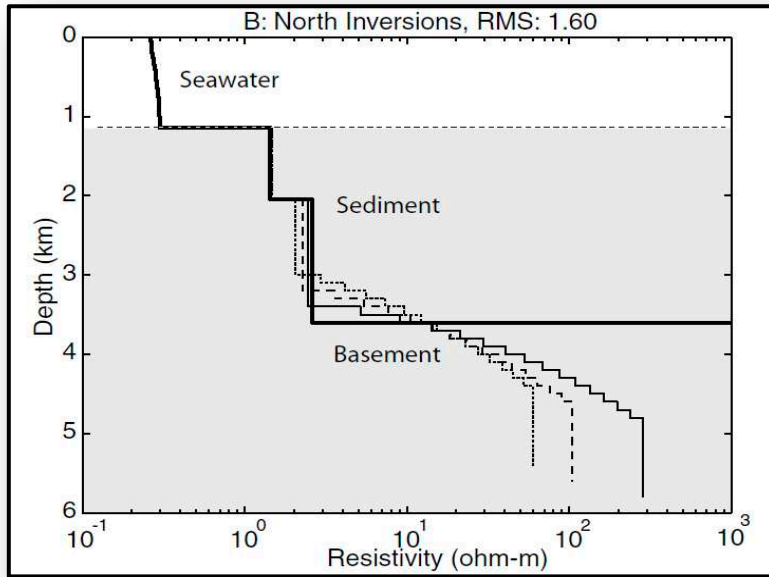


Fig. 5.6. Inversión documentada por Constable *et al.* (2009).

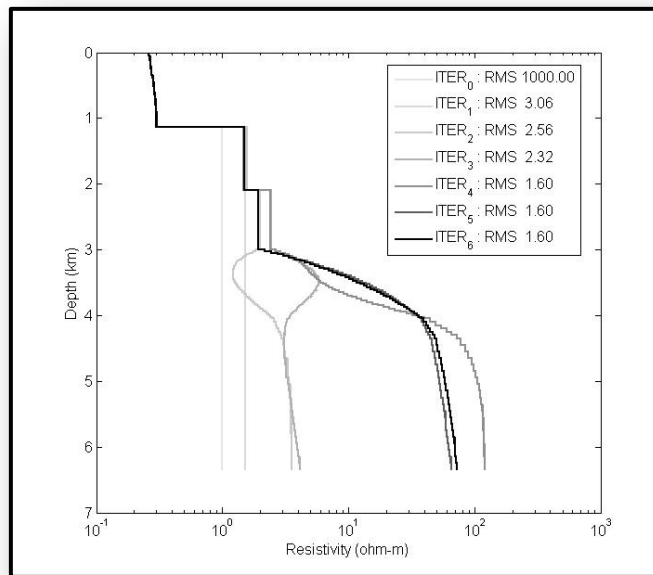


Fig. 5.7. Inversión de datos mCSEM obtenida con la versión de OCCAM1DCSEM para los datos de Constable *et al.* (2009).

V.3.2 Prueba del Software con datos sintéticos

Para esta prueba se trabaja con el modelo planteado en el artículo de Key (2009a), se genera la respuesta del modelo con Dipole1D, se grafica con las funciones de Matlab y finalmente se realiza la inversión con OCCAM1DCSEM. El modelo consta de 5 capas: aire, agua de mar, sedimentos, resistivo y sedimentos de fondo (figura 5.8). Se registraron 41 posiciones de transmisión, con un offset de 500 m, a lo largo de un perfil de 20 km. La fuente es remolcada a 25 m por encima de los receptores ubicados en el fondo marino con un tirante de agua de 1000 m de profundidad. El objetivo resistivo se ubica a 1000 m por debajo del piso oceánico, con un espesor de 100 m y una resistividad de 100 Ω-m.

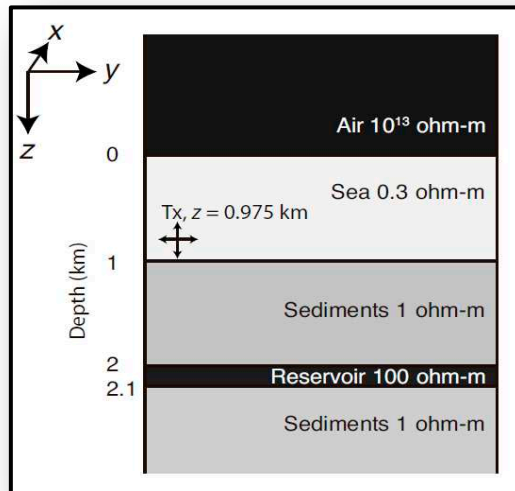


Fig. 5.8. Modelo de 5 capas: aire, agua salada, resistivo y sedimentos, tomado para probar el software (Key, 2009a).

La figura 5.9 presenta las respuestas en amplitud y fase del campo eléctrico E_y , obtenidas al ejecutar el programa Dipole1D en el modelo presentado en la figura 5.8. La frecuencia utilizada por el transmisor es de 0.1Hz.

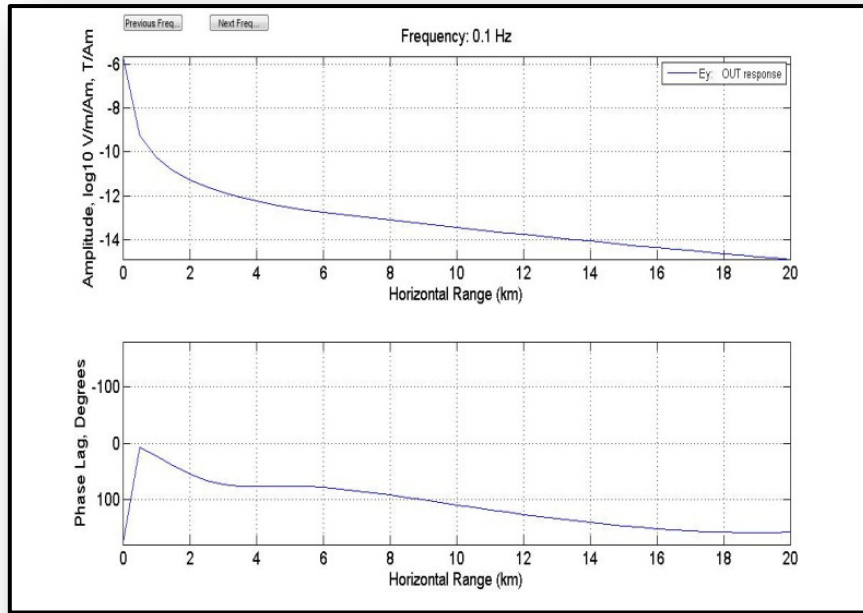


Fig. 5.9. Amplitud y fase del campo eléctrico E_y , del modelo presentado en la figura 5.8, generada con Dipole1D.

Las figuras 5.10 y 5.11 comparan las respuestas presentadas en el artículo de Key (2009a) para el modelo presentado en la figura 5.8, y las obtenidas con el software instalado en la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Nuevo León. En ambos casos se presentan las amplitudes de los campos magnéticos y eléctricos con un nivel de ruido del 2 % obtenidas para un transmisor con una frecuencia de 0.1 Hz. Como se puede observar, las respuestas son muy similares.

A partir de las respuestas anteriores se procede a realizar la inversión de los datos con el software OCCAM1DCSEM. La figura 5.12 muestra los resultados obtenidos por Key (2009a), mientras que la figura 5.13 muestra los resultados obtenidos por el software instalado en la Facultad de Ciencias de la Tierra respectivamente. En ambas figuras se aprecia que el resistivo está bien identificado.

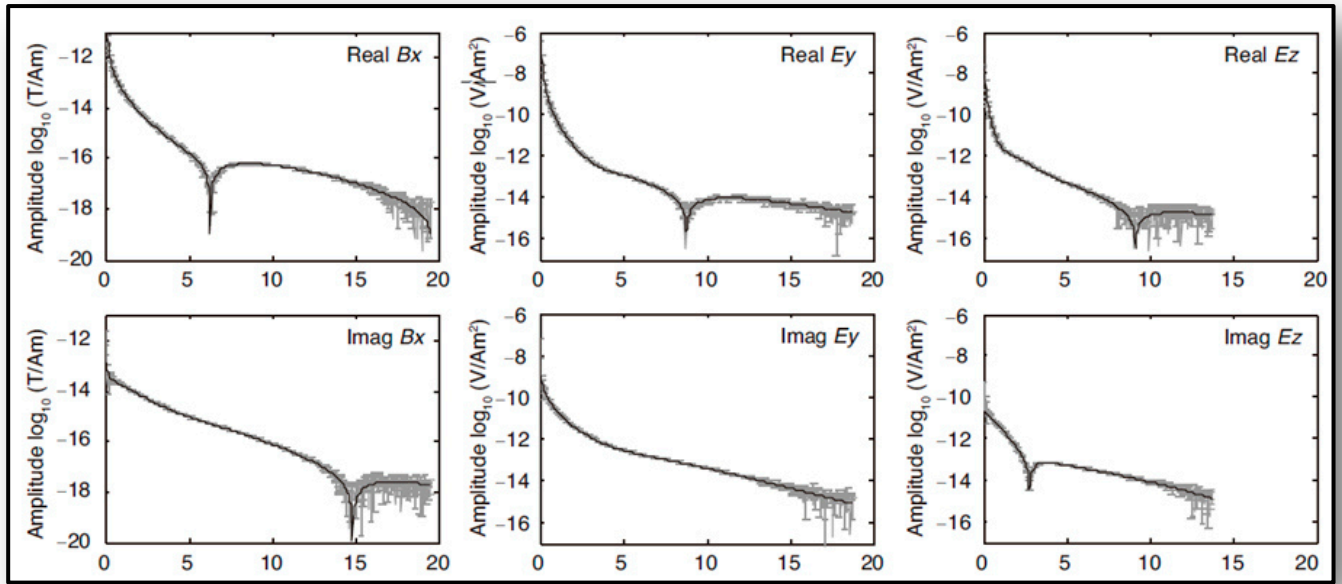


Fig. 5.10. Gráficas de las amplitudes de los campos magnéticos y eléctricos publicadas en el artículo de Key (2009a), obtenidas a partir del modelo de la figura 5.8.

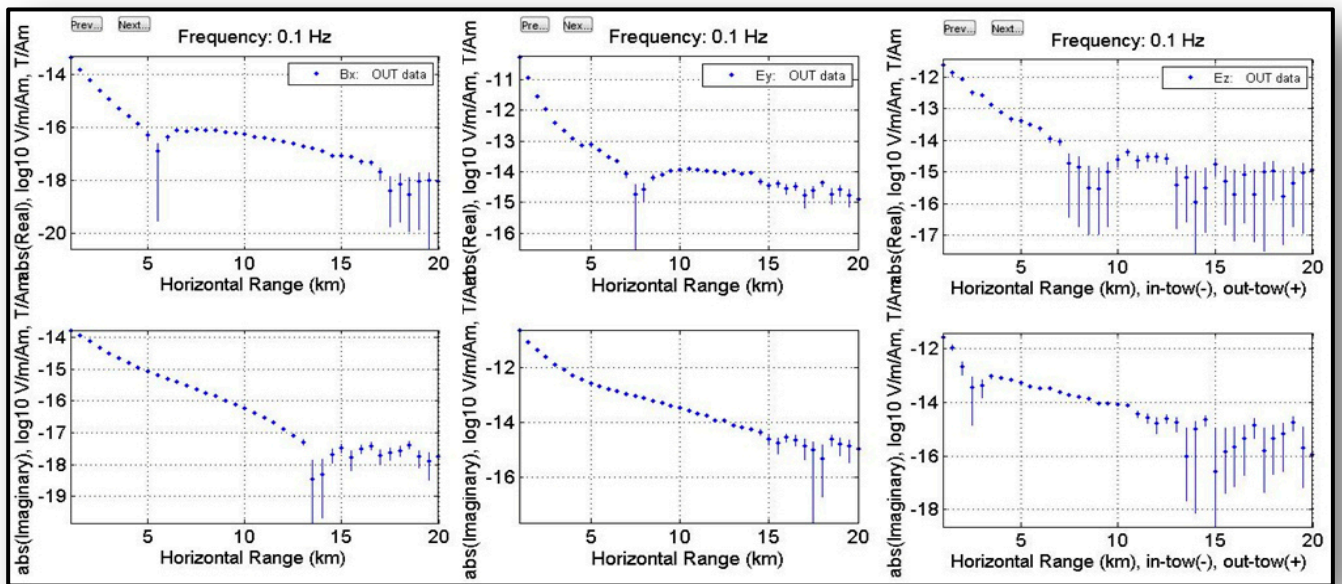


Fig. 5.11. Gráficas de las amplitudes de los campos magnéticos y eléctricos obtenidas con Dipole1D, CreateEMDataFile y PlotCSEM, a partir del modelo de la figura 5.8.

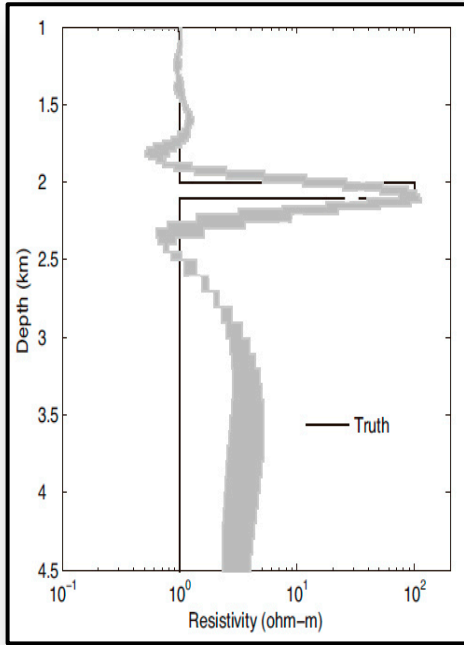


Fig. 5.12. Resultado de la inversión documentada por Key (2009a), para los datos presentados en la figura 5.10.

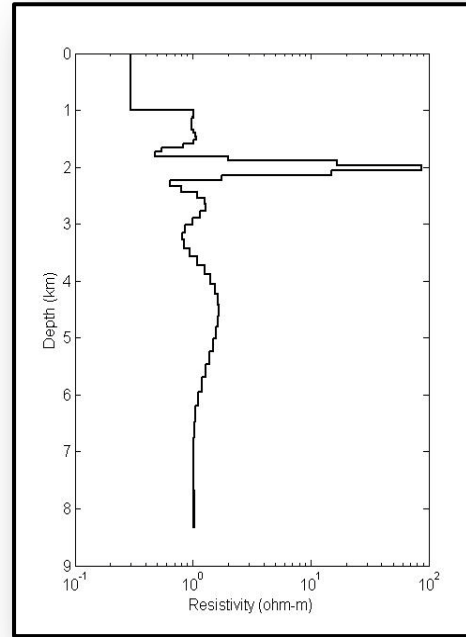


Fig. 5.13. Inversión obtenida con OCCAM1DCSEM para los datos de la figura 5.11 y graficada con PlotCSEM.

En las gráficas de las figuras 5.12 y 5.13 se observan ciertas diferencias que se deben principalmente a dos factores, en primer lugar el tipo de parámetros usados en la inversión por Key (2009a), los cuales pueden ser lineales o logarítmicos, y en segundo lugar a que el software de modelado directo Dipole1D utiliza números aleatorios para generar los datos sintéticos con ruido por lo que difícilmente se obtendrán colecciones de datos idénticas.

V.4 Modelado Directo e Inversión de Datos mCSEM

En este apartado se plantean los modelos con la finalidad de explorar varios escenarios, con la finalidad de obtener conclusiones respecto a la variación de la profundidad del objetivo resistivo, el espesor y su resistividad; así como la presencia de varios objetivos.

V.4.1 Planteamiento de Modelos 1D

En la presente investigación se plantearon básicamente seis modelos (M0 - M5) y en algunos casos como en los modelos M1, M2, M4 y M5 contienen tres sub-modelos, dando con esto un total de catorce modelos utilizados para simular diferentes condiciones en las que pudiera encontrarse un estrato con hidrocarburos.

En todos los modelos planteados en esta investigación se contempla un tirante de agua de mar de 1000 m y una capa de aire de 100 000 m. Los modelos representan variadas condiciones que se mencionan en la lista siguiente:

- a) Capas de sedimentos sin ningún resistivo presente;
- b) La presencia de una capa resistiva a diferentes profundidades;
- c) Capas resistivas simulando reservorios de diferentes espesores;
- d) Una capa resistiva delgada con una resistividad menor que la del reservorio objetivo en profundidad;
- e) Dos capas simulando dos reservorios, separados por un conductor; y
- f) Modelos con una capa resistiva en los que se varía la resistividad del objetivo.

A continuación se describe a detalle cada uno de los modelos listados con anterioridad y de ser el caso se describen también sus sub-modelos.

El Modelo M0

Este es un modelo que se planteó de tres capas (ver figura 5.14): aire, agua de mar y sedimentos, respectivamente. En este modelo no está contemplado ningún reservorio, pretendiendo con este ilustrar únicamente el comportamiento de la respuesta directa y de la inversión cuando no existe ningún contraste de resistividad significativo en las capas de sedimentos marinos.



Fig. 5.14. Modelo M0 que consiste de tres capas: aire, agua de mar y sedimentos.

El Modelo M1

En este modelo se plantean cinco capas: una para el aire con una resistividad de $1 \times 10^{12} \Omega\text{-m}$ que es altamente resistivo; una segunda capa para el agua de mar de $0.30 \Omega\text{-m}$; la tercera es una capa de sedimentos con una resistividad de $1 \Omega\text{-m}$; la siguiente es una capa resistiva de $100 \Omega\text{-m}$ que simula un yacimiento de hidrocarburos y por último otra capa con los sedimentos de fondo de igual resistividad que la tercera capa (ver figura 5.15). Para los submodelos *a*, *b*, y *c* se aumentó la profundidad del reservorio, y así observar variación de la respuesta con el incremento de la profundidad. Los espesores de las capas por debajo del mar, en el modelo M1a son: 1000 m para los sedimentos, 500 m para el resistivo y un espesor infinito para la última capa. Los modelos M1b y M1c difieren del anterior en que la primera capa de sedimentos es de un espesor mayor, 1500 m en el modelo M1b y 2500 m en el modelo M1c, respectivamente.

El Modelo M2

Este modelo también consta de cinco capas (ver Figura 5.16) con resistividades similares a las del modelo anterior, pero el espesor del reservorio en sus submodelos *a*, *b*, y *c* fue variado, disminuyéndolo para observar hasta qué punto una capa rellena de hidrocarburos de espesor delgado puede ser detectada sin problemas con este método. Los espesores de las capas por debajo del mar, en el modelo M2a son: 1000 m para los sedimentos, 800 m para el resistivo y un espesor infinito para la última capa. Los modelos M2b y M2c difieren del

anterior en que el espesor del resistivo varía a 200 m en el modelo M2b y a 50 m en el modelo M2c, respectivamente.

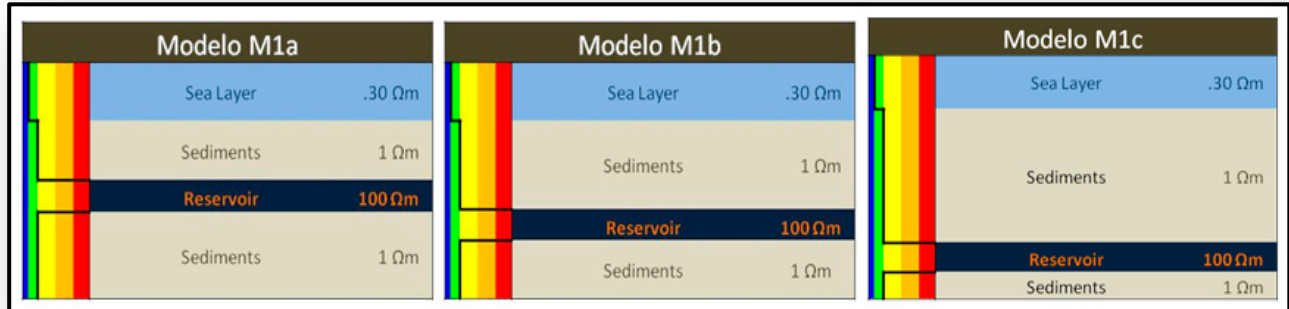


Fig. 5.15. Modelo M1 que consiste de cinco capas: aire, agua de mar y un reservorio entre dos capas de sedimentos. El espesor de la primera capa de sedimentos varía de 1000 (M1a), 1500 (M1b) y 2500 m (M1c).

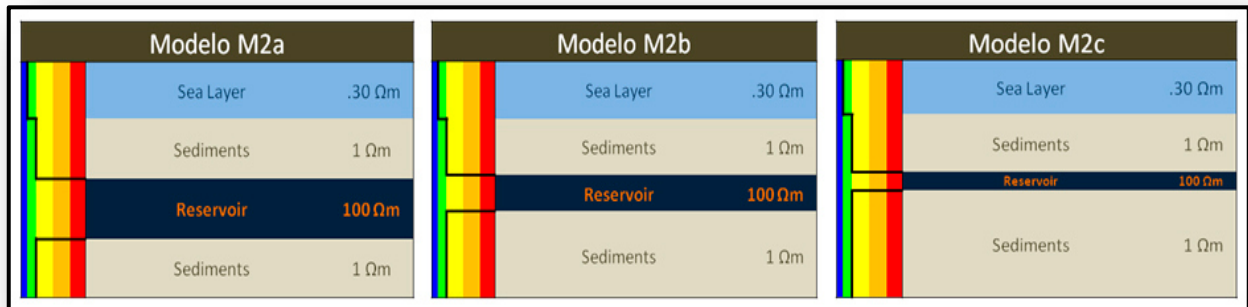


Fig. 5.16. Modelo M2 que consiste de cinco capas: aire, agua de mar y un reservorio entre dos capas de sedimentos. El espesor de la capa reservorio varía de 800 (M2a), 200 (M2b) y 50 m (M2c).

El Modelo M3

El modelo M3 (ver figura 5.17) está compuesto por siete capas: las dos primeras corresponden a la capa de aire, y océano, respectivamente; con resistividades y espesores como en el modelo M2 anteriormente descrito. La tercera es una capa sedimentaria con un espesor de 500 m y con resistividad de 1 Ω-m; la cuarta capa corresponde a la simulación de

un resistivo delgado de 50 m de espesor y una resistividad de 20 Ω-m; seguida por una capa de sedimentos de 1000 m de espesor y resistividad de 1 Ω-m. Un segundo reservorio se encuentra más abajo, con una resistividad de 100 Ω-m y 800 m de espesor; por último los sedimentos de fondo. Con este modelo se pretende ilustrar un escenario considerado importante en la exploración petrolera que es cuando un yacimiento se ve sobrepuesto por una capa resistiva delgada.

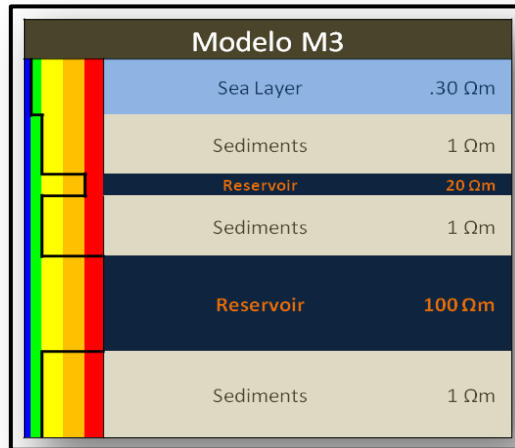


Fig. 5.17. Modelo M3 que consiste de siete capas: aire, agua de mar y dos reservorios entre tres capas de sedimentos.

El Modelo M4

Con este modelo se pretende construir un escenario en el que dos capas contenedoras de hidrocarburo se encuentran separadas por un conductor, en el cual se varía el espesor en 1000, 500 y 200 metros (ver figura 5.18) en los sub-modelos *a*, *b*, y *c*, respectivamente para experimentar con el comportamiento de la respuesta a medida que la distancia entre los dos reservorios se acorta, y observar hasta qué punto pueden ser detectadas como dos capas independientes. El modelo consta de siete capas, donde las tres primeras capas son similares en espesor y resistividad a las de los modelos M1a y M2b antes descritos, la cuarta y sexta capa simulan dos reservorios de 100 Ω-m y 400 m de espesor, el cual es constante en los tres sub-modelos.

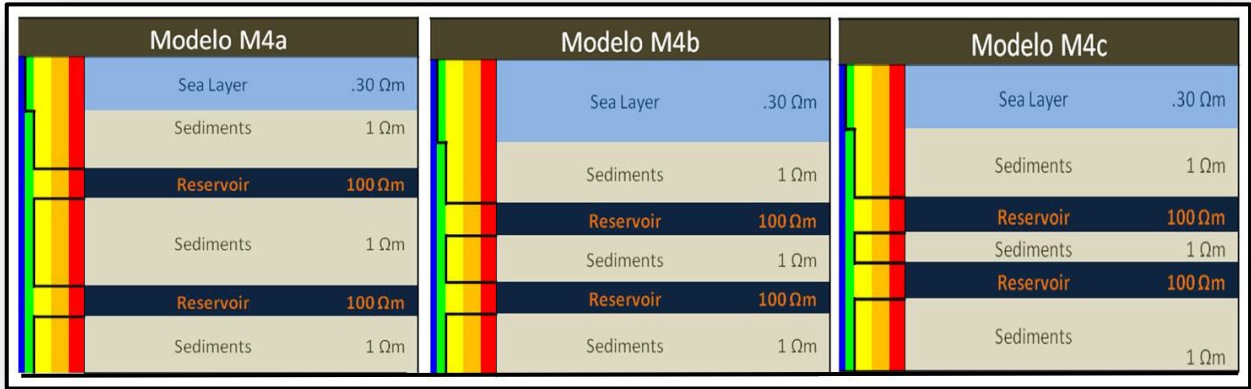


Fig. 5.18. Modelo M4 que consiste de siete capas: aire, agua de mar y dos reservorios entre tres capas de sedimentos. El espesor de la capa de sedimentos entre los dos reservorios varía de 1000 (M4a), 500 (M4b) y 200 m (M4c).

El Modelo M5

Aquí el modelo está constituido por cinco capas (ver figura 5.19): aire, agua de mar, sedimentos, resistivo y fondo. En sus sub-modelos se varía la resistividad del reservorio en 70 (M5a), 40 (M5b), y 20 ohm-metro (M5c), para observar el contraste con la resistividad de fondo de las capas adyacentes. Los espesores de las capas bajo el mar son: 1000 y 500 m, e infinito para la última capa.

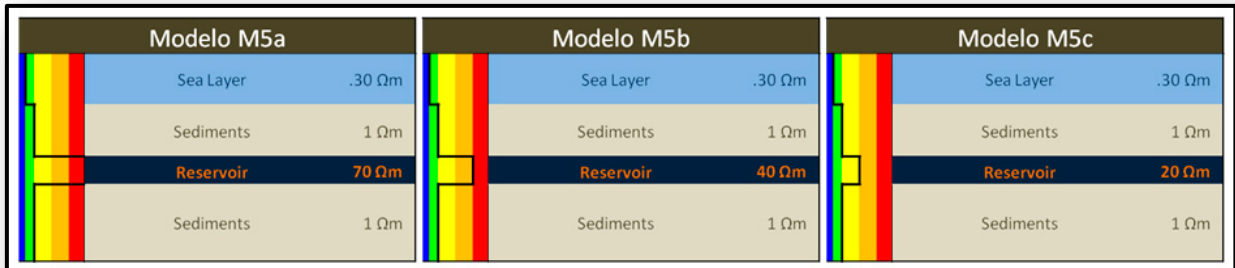


Fig. 5.19. Modelo M5 que consiste de cinco capas: aire, agua de mar y un reservorio entre dos capas de sedimentos. La resistividad del reservorio entre las dos capas de sedimentos varía de 70 (M5a), 40 (M5b) y 20 ohm-m (M5c).

V.4.2 Respuestas del Modelado Directo con Dipole1D

Para generar las respuestas de todos los modelos se utilizaron los siguientes parámetros de adquisición: Se registraron 44 posiciones de transmisión a lo largo de un perfil de 20 km, con un offset de 500 m, la fuente emitiendo a frecuencias de 0.1, 0.5 y 1.0 Hz. Se remolcó la fuente a 25 m por encima del fondo marino.

Se utilizó un solo receptor ubicado en el piso oceánico a 1000 m de profundidad, el cual registró los campos eléctrico E_y , y magnético B_x . Se contempló una capa de aire de 100000 m con una resistividad de $1 \times 10^{12} \Omega\text{-m}$, y un tirante de agua de 1000 m con $0.30 \Omega\text{-m}$ de resistividad y los espesores y profundidades de las capas de sedimentos y reservorios variaron en cada modelo según la condición que se deseó simular.

Respuesta Directa del Modelo M0 con Dipole1D

La figura 5.20 presenta los parámetros del modelo M0 y su descripción, así como las respuestas en amplitud y fase del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz.

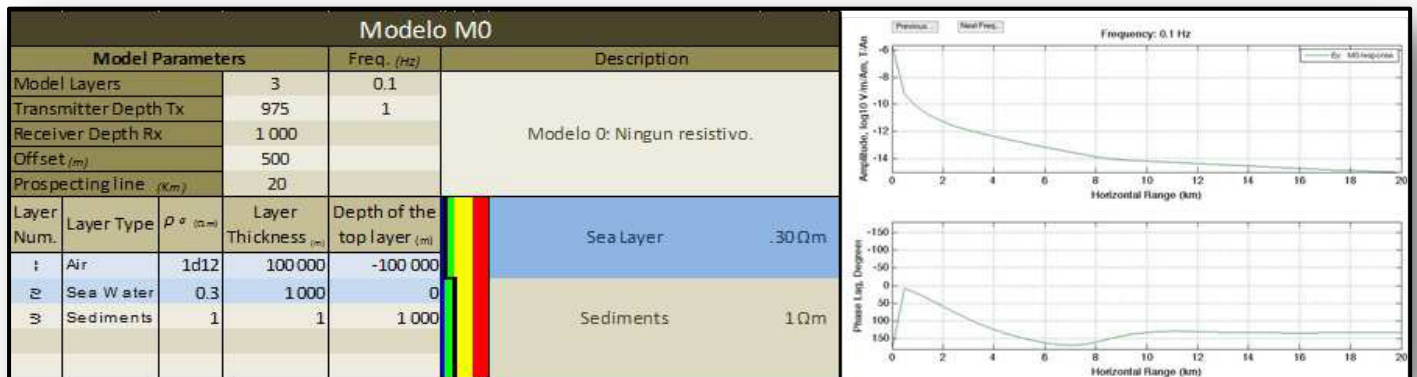


Fig. 5.20. Parámetros del modelo M0 y las respuestas en amplitud y fase del campo eléctrico E_y .

Respuesta Directa del Modelo M1 con Dipole1D

La figura 5.21 presenta los parámetros de los modelos M1, así como las respuestas en amplitud y fase del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz. De la comparación entre las respuestas CSEM obtenidas para los modelos M1a, M1b y M1c, se observa como la gráfica tiene el mismo comportamiento de la amplitud y la fase en los tres casos por tratarse de un resistivo con las mismas características. Se observa cómo la curva de amplitud va descendiendo más rápidamente conforme la profundidad del resistivo es mayor. Así mismo, en el caso de la fase se observa que el mínimo relativo está migrando a valores de mayor offset con la profundidad del resistivo.

Respuesta Directa del Modelo M2 con Dipole1D

En la figura 5.22 se presentan los parámetros de los modelos M2, también se puede observar la comparación entre las respuestas CSEM en amplitud y fase del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz, obtenidas conforme el espesor de la capa resistiva va disminuyendo a través de los modelos M2a, M2b y M2c.

Al observar las gráficas de amplitud y fase en la figura 5.22 se tiene que: la curva de amplitud va descendiendo más rápidamente conforme el espesor del resistivo es menor; en la gráfica de la fase, la curva se vuelve menos cóncava debido a la disminución del espesor del resistivo.

Respuesta Directa del Modelo M3 con Dipole1D

La figura 5.23 presenta los parámetros de los modelos M3 y las respuestas en amplitud y fase del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz. Con base en la respuesta obtenida no se distingue claramente si se trata de la anomalía producida por una o dos capas, aunque la primera sea delgada. Lo anterior justifica el uso de herramientas de inversión para ver si es posible recuperar este modelo más complicado.

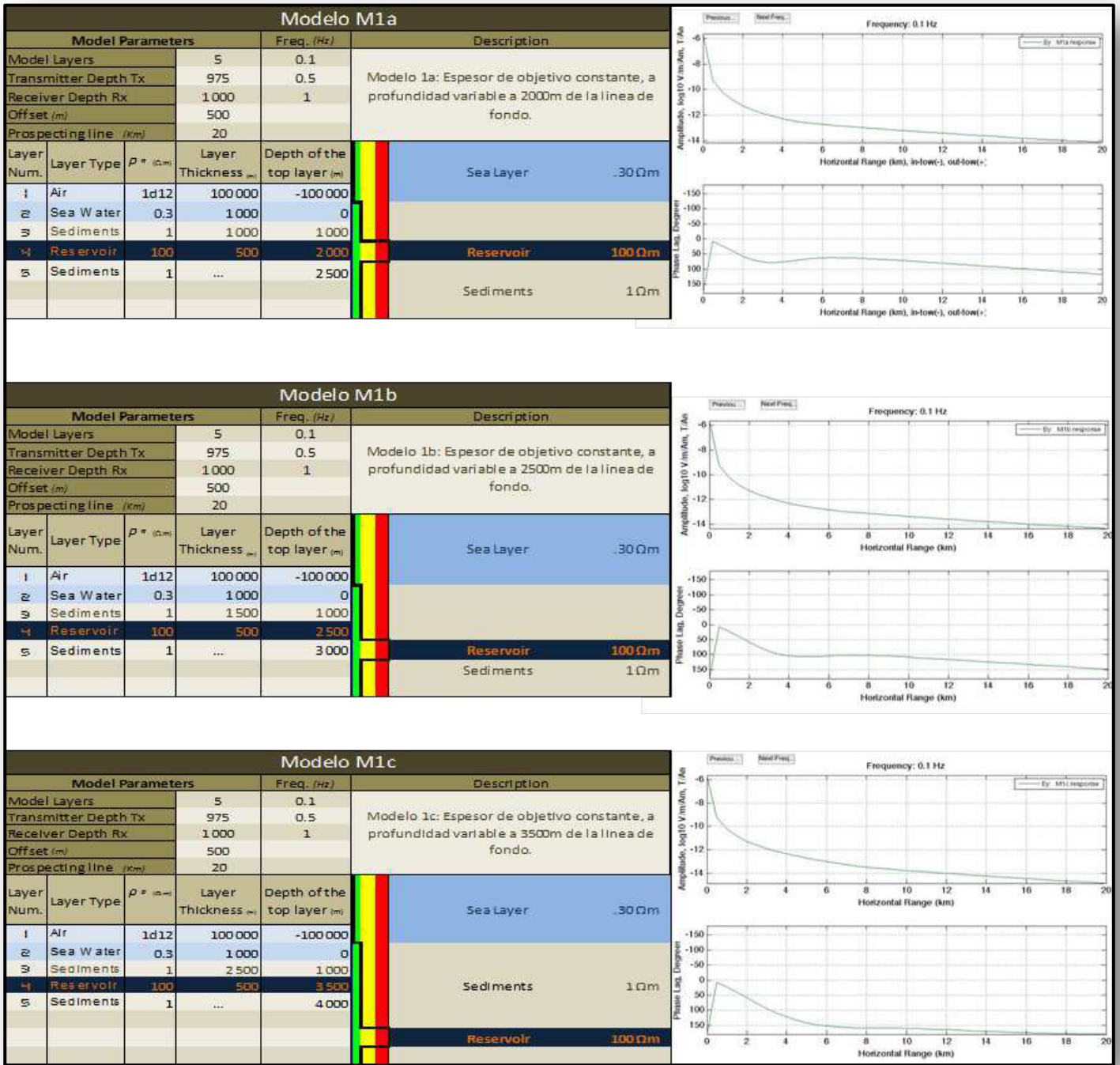


Fig. 5.21. Parámetros del modelo M1 y las respuestas en amplitud y fase del campo eléctrico E_y .

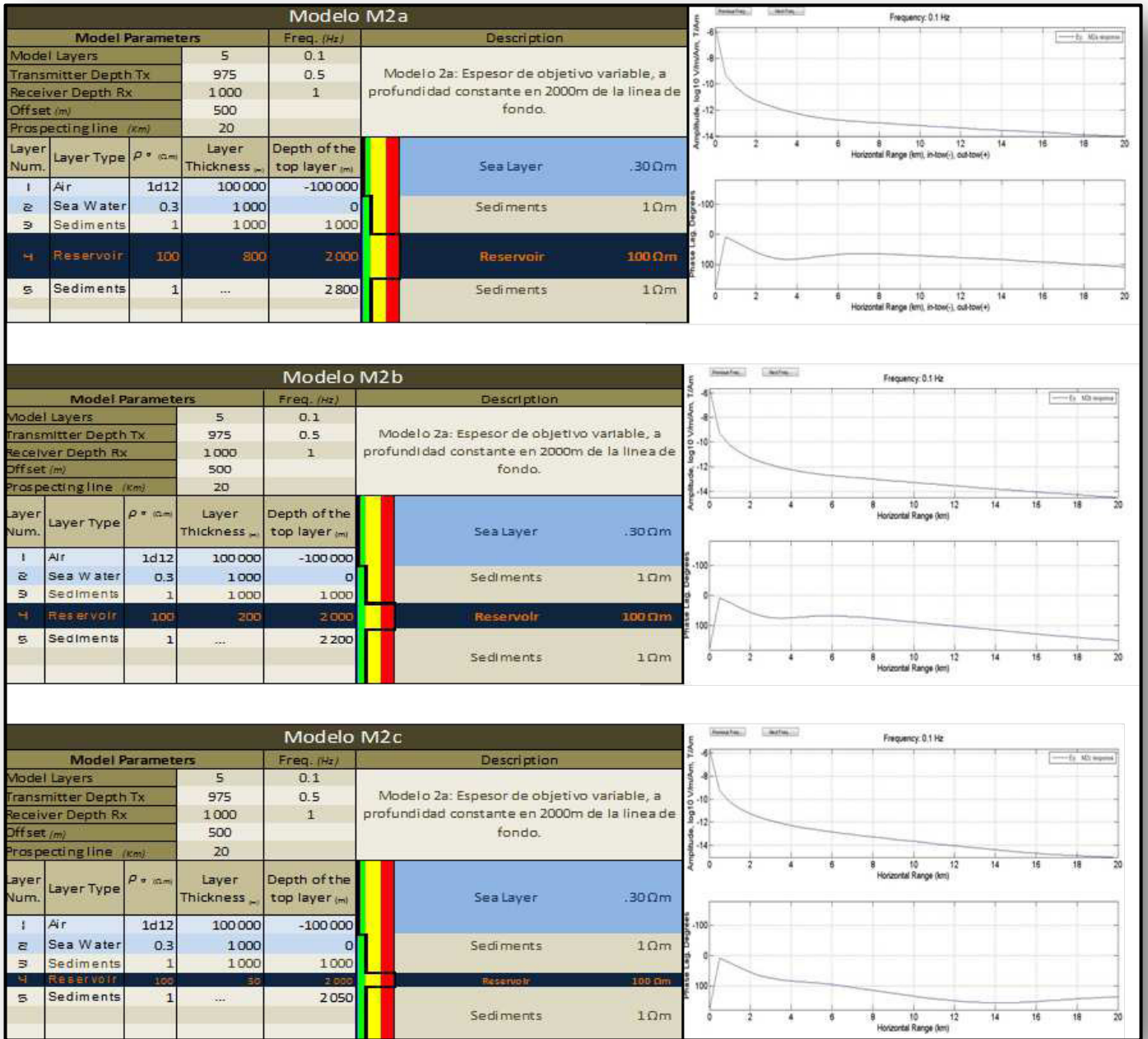


Fig. 5.22. Parámetros del modelo M2 y las respuestas en amplitud y fase del campo eléctrico E_y .

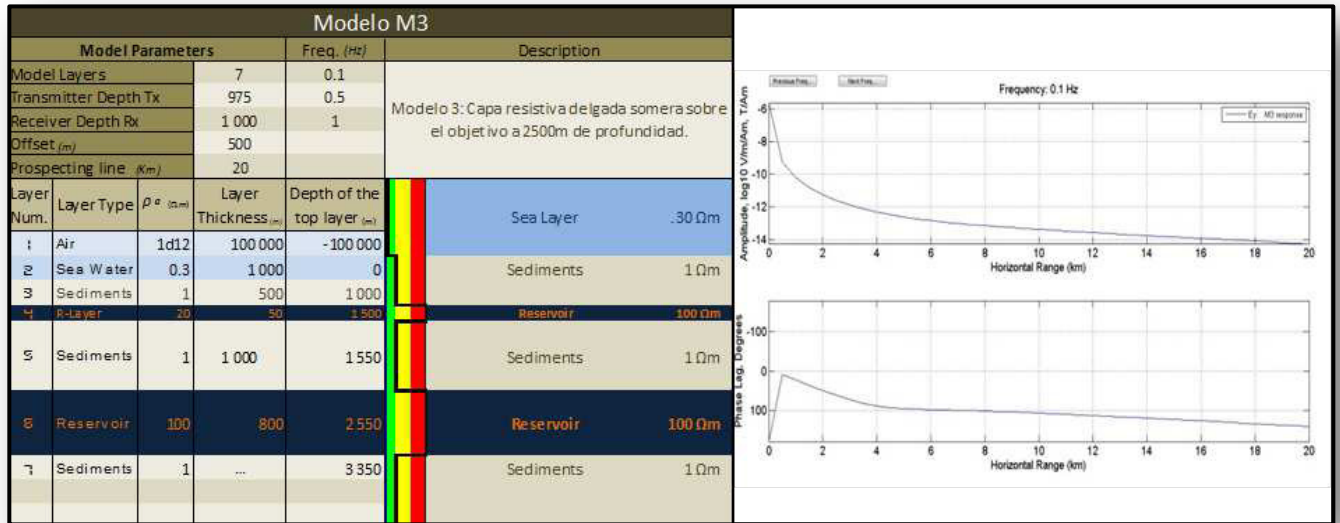


Fig. 5.23. Parámetros del modelo M3 y las respuestas en amplitud y fase del campo eléctrico E_y .

Respuesta Directa del Modelo M4 con Dipole1D

La figura 5.24 presenta los parámetros de los modelos M4 y las respuestas CSEM en amplitud y fase del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz, obtenidas para los modelos M4a, M4b y M4c. En las gráficas de amplitud no se aprecia mucha diferencia, al igual que en la fase. Comparando los gráficos de los modelos M3 y M4 se nota que hay diferencia entre las fases.

Respuesta Directa del Modelo M5 con Dipole1D

La figura 5.25 presenta los parámetros usados en el modelo M5 y las respuestas CSEM en amplitud y fase del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz, obtenidas con los modelos M5a, M5b y M5c. En las gráficas de amplitud y fase se tiene un comportamiento similar a los obtenidos en el modelo M2.

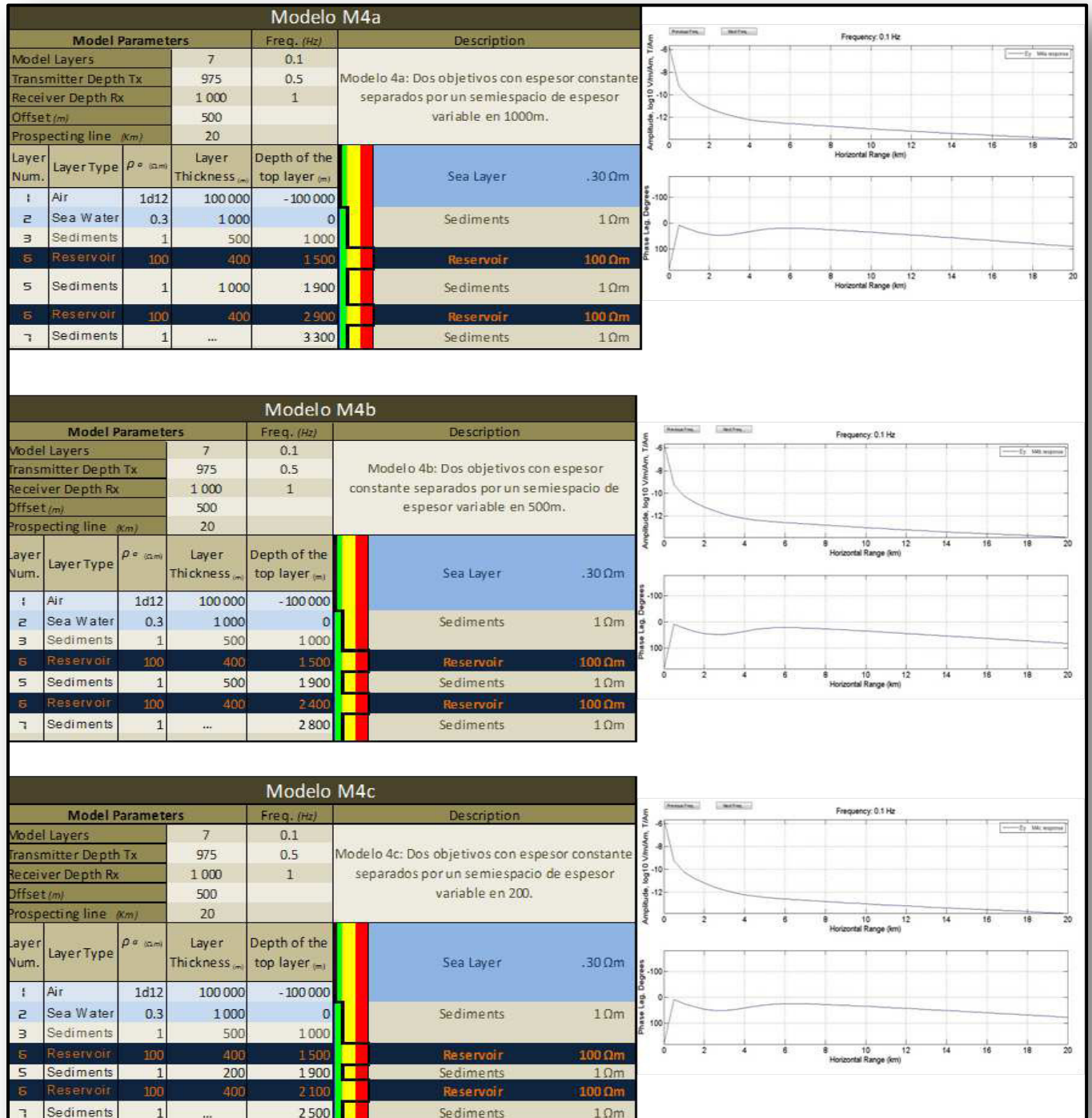


Fig. 5.24. Parámetros del modelo M4 y las respuestas en amplitud y fase del campo eléctrico E_y .

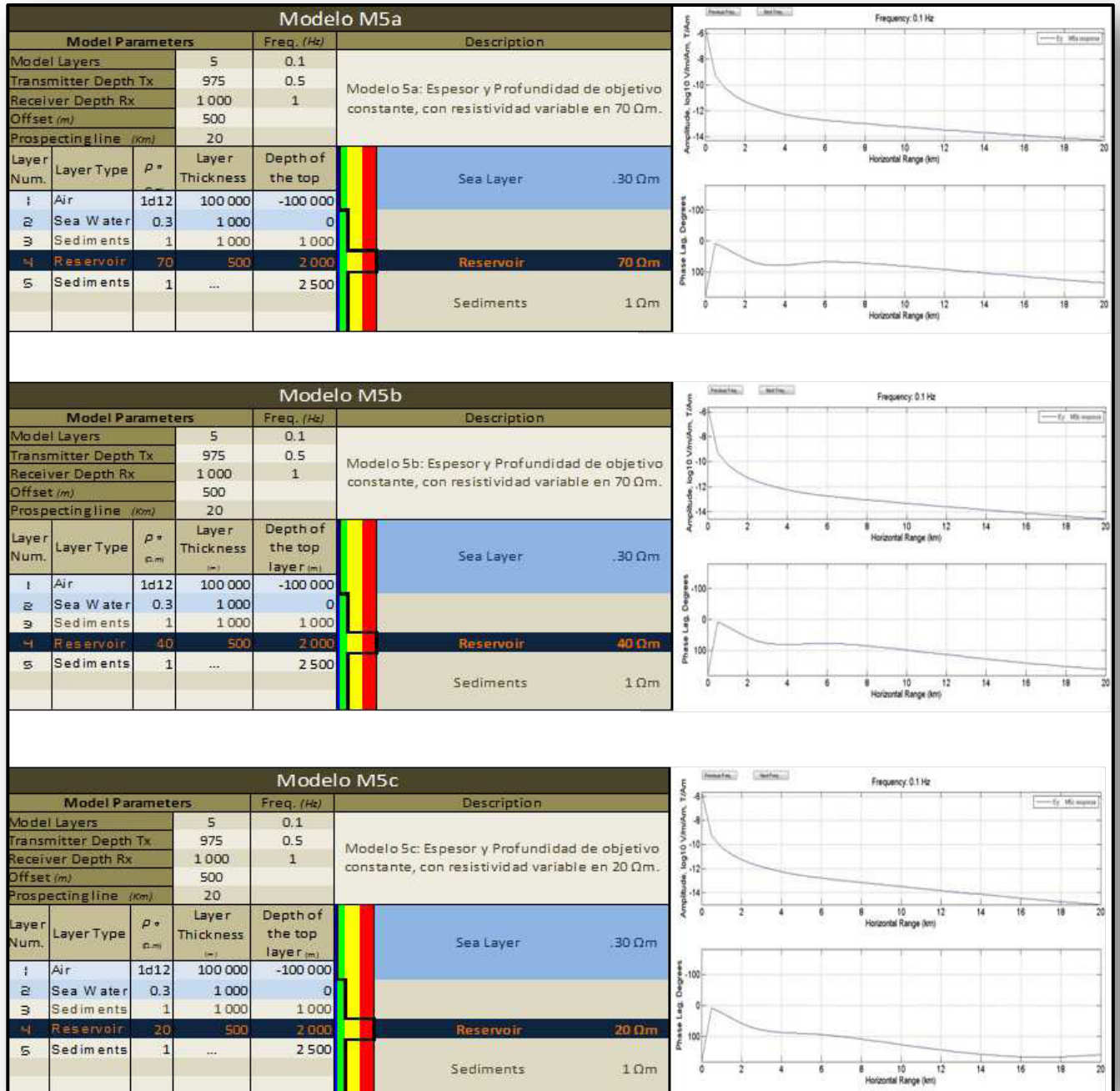


Fig. 5.25. Parámetros del modelo M5 y las respuestas en amplitud y fase del campo eléctrico E_y .

V.4.3 Respuestas de la Inversión de Datos con OCCAM1DCSEM

En la inversión de datos con OCCAM1DCSEM se hizo uso de la función *CreateEmDataFile* para crear los archivos de Inicio, Modelo y Datos, para todos los modelos, usando como criterio un RMS de 1.6 y se añadió también un 2% de ruido a los datos. El semi-espacio se discretizó en 80 capas con una variación logarítmica del espesor en todos los modelos, excepto en los modelos M3 y M2c en los que se utilizó espesor constante.

A continuación se muestra el resultado de las inversiones realizadas con OCCAM1DCSEM, graficadas con la función *PlotOccam1DCSEM* de Matlab con la opción “*alliter*” activada, para a su vez registrar el resultado de la inversión en cada iteración. También se muestra la respuesta de la curva de resistividad obtenida con la inversión, utilizando la función *PlotCSEM* también hecha en Matlab y propiedad de Scripps, para observar el ajuste de la primera y última iteración, respecto a la obtenida con el modelado directo.

Inversión de los datos CSEM provenientes del Modelo M0

La figura 5.26 muestra a la izquierda el modelo final obtenido (línea negra) a partir de OCCAM1DCSEM, así como modelos intermedios (líneas grises). Se pueden comparar las respuestas del modelo final con el modelo a partir del cual se obtuvieron los datos que se utilizaron en la inversión. Las gráficas de la derecha presentan las respuestas CSEM en amplitud del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz: para la primer iteración los datos del modelo son representados por los puntos en color azul y la curva azul es la respuesta a estos datos, la curva verde es la respuesta calculada para la iteración final y los puntos rojos son los datos del modelo planteado inicialmente, las barras representan el ruido de los datos. Podemos observar que para este modelo la curva de iteración final se ajusta en gran manera al modelo planteado inicialmente y que en muy pocas iteraciones (7) llega a una solución buena.

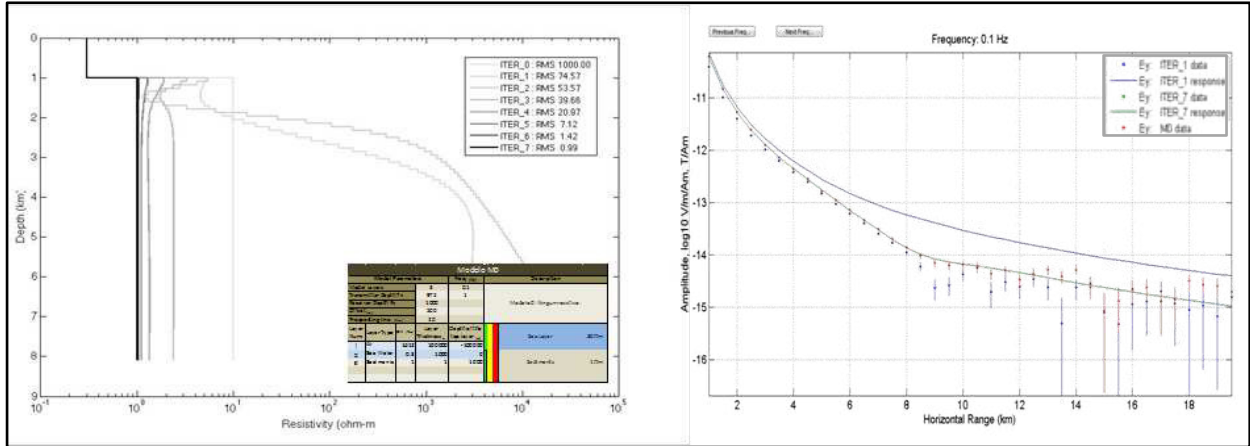


Fig. 5.26. Resultados de la inversión CSEM de los datos provenientes del modelo M0. Izquierda: modelo final e intermedios. Derecha: datos de amplitud del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz y respuestas del modelo inicial y final.

Inversión de los datos CSEM provenientes del Modelo M1

En la figura 5.27 se observa el modelo final obtenido por la inversión (izquierda) para los casos *a*, *b* y *c* y las respuestas obtenidas del modelo y el ajuste de los datos (derecha). Las gráficas de la derecha presentan las respuestas CSEM en amplitud del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz: se puede apreciar en azul la curva del modelo en la primera iteración, en verde la curva del modelo en la iteración final y los puntos rojos los datos del modelo planteado, las barras representan el ruido de los datos. Se puede ver que a medida que la profundidad del resistivo es mayor, aparecen oscilaciones por debajo del resistivo detectado; de hecho pareciera que hay otro resistivo en el caso M1c. La explicación puede estar en que los valores de los campos eléctricos disminuyen con la profundidad del objetivo; además, el último caso requiere más iteraciones (200) para ajustar el modelo.

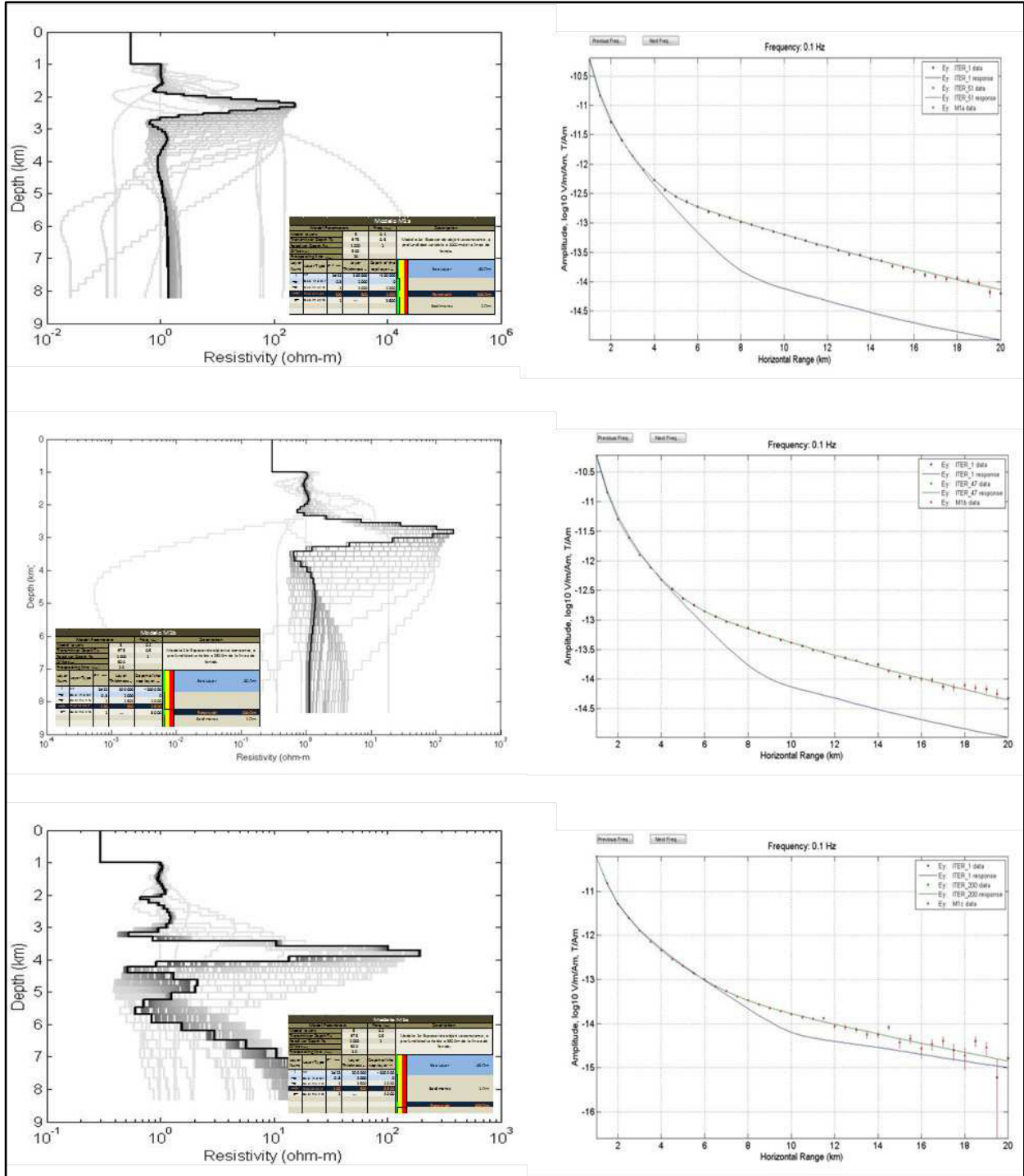


Fig. 5.27. Resultados de la inversión CSEM de los datos provenientes del modelo M1, para los casos *a*, *b* y *c*. Izquierda: modelo final e intermedios. Derecha: datos de amplitud del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz y respuestas del modelo inicial y final.

Inversión de los datos CSEM provenientes del Modelo M2

La figura 5.28 muestra a la izquierda la inversión obtenida para el modelo M2 en la que el modelo final se logra ajustar adecuadamente a los datos planteados en los modelos M2a, M2b y M2c. Las gráficas de la derecha presentan las respuestas CSEM en amplitud del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz. Para lograr un mejor ajuste en el caso M2c, se recurrió a una discretización uniforme de las capas del semiespacio.

Inversión de los datos CSEM provenientes del Modelo M3

En la figura 5.29 se observa el modelo final obtenido por la inversión (izquierda) y la respuesta obtenida para el modelo M3 en el que se plantea un resistivo delgado y de menor resistividad por encima del yacimiento. Las gráficas de la derecha presentan las respuestas CSEM en amplitud y fase del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz. Se puede observar que la respuesta del modelo obtenido se ajusta bien a los datos sintéticos. Dado que existe una capa delgada, aquí también fue necesario aplicar una discretización uniforme del semiespacio para mejorar la solución.

Inversión de los datos CSEM provenientes del Modelo M4

En la figura 5.30 se muestra el modelo final obtenido por la inversión (izquierda) para los casos a , b y c del modelo M4 y las respuestas obtenidas del modelo y el ajuste de los datos (derecha). Las gráficas de la derecha presentan las respuestas CSEM en amplitud del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz: se presenta en azul la curva de respuesta del modelo y los puntos corresponden a los datos del modelo en la primer iteración, en verde la curva de respuesta en la iteración final y los puntos en rojo los datos del modelo planteado, las barras representan el ruido de los datos.

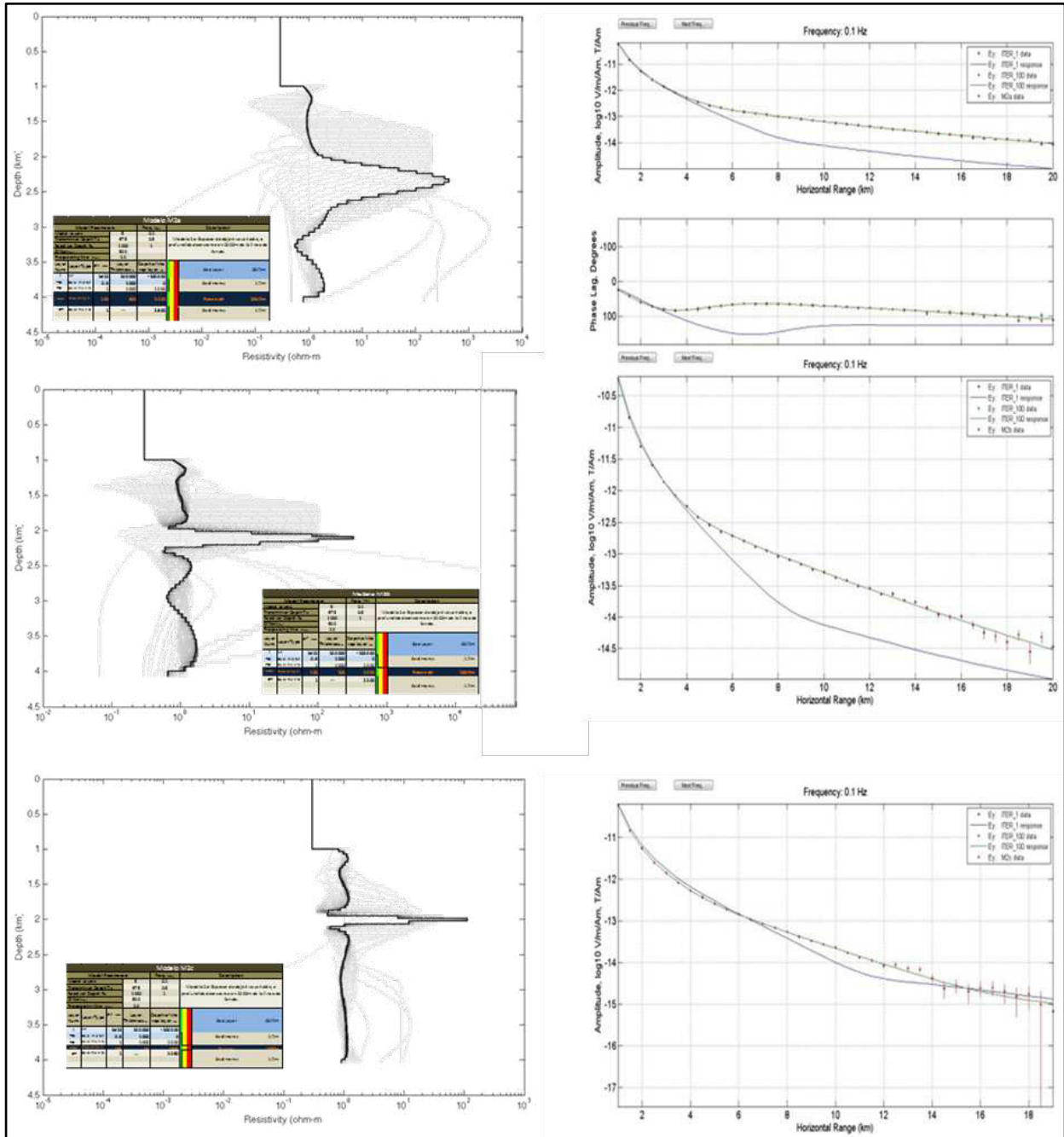


Fig. 5.28. Resultados de la inversión CSEM de los datos provenientes del modelo M2, para los casos *a*, *b* y *c*. Izquierda: modelo final e intermedios. Derecha: datos de amplitud del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz y respuestas del modelo inicial y final.

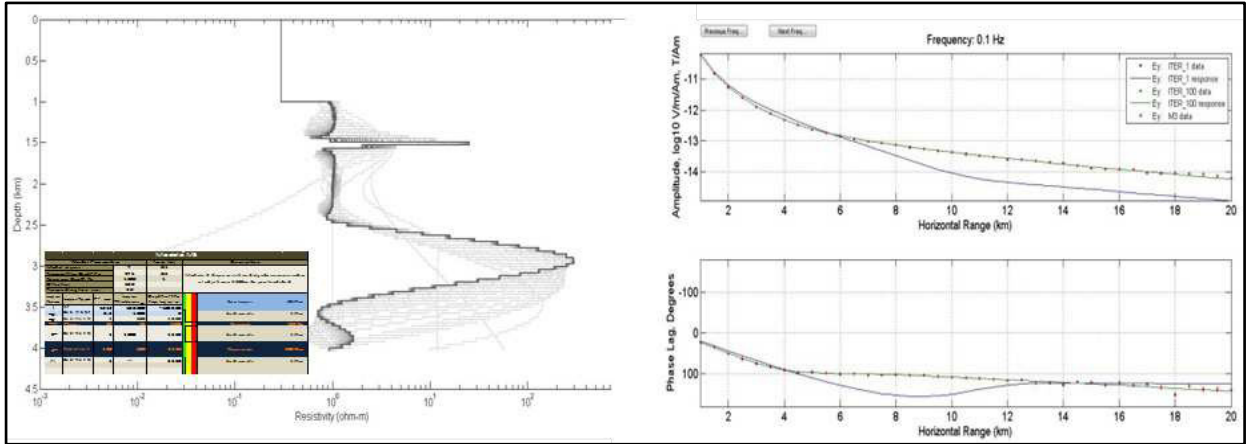


Fig. 5.29. Resultados de la inversión CSEM de los datos provenientes del modelo M3. Izquierda: modelo final e intermedios. Derecha: datos de amplitud y fase del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz y respuestas del modelo inicial y final.

En la Figura 5.30 se observa claramente las dos capas resistivas y como se va reduciendo la separación entre ellas a través de los casos *a*, *b* y *c* sin que esto produzca un efecto que haga ver las dos capas como si fuera una sola, aunque se tienen algunas variaciones en la resistividad en los alrededores de los resistivos.

Inversión de los datos CSEM provenientes del Modelo M5

La figura 5.31 muestra la inversión y la respuesta obtenida para el modelo M5. A la izquierda se tiene el modelo final obtenido por la inversión (línea negra) y modelos intermedios (líneas grises) para los casos *a*, *b* y *c* del modelo M5. A la derecha se presentan las respuestas CSEM en amplitud del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz. Se logra ajustar en gran manera los datos de la inversión al modelo inicial, aunque aparecen asimetrías en el pico de los resistivos.

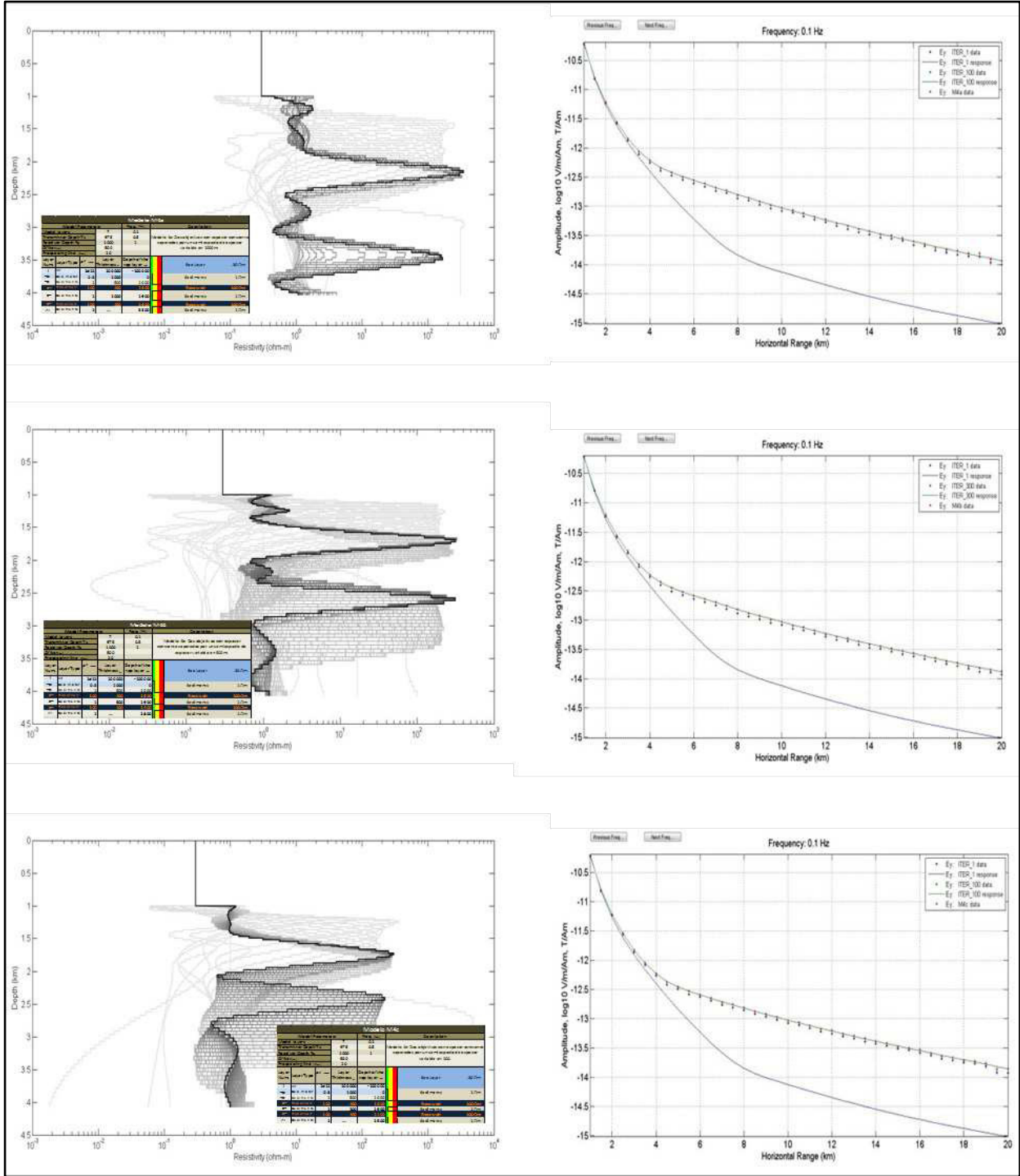


Fig. 5.30. Resultados de la inversión CSEM de los datos provenientes del modelo M4, para los casos *a*, *b* y *c*. Izquierda: modelo final e intermedios. Derecha: datos de amplitud del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz y respuestas del modelo inicial y final.

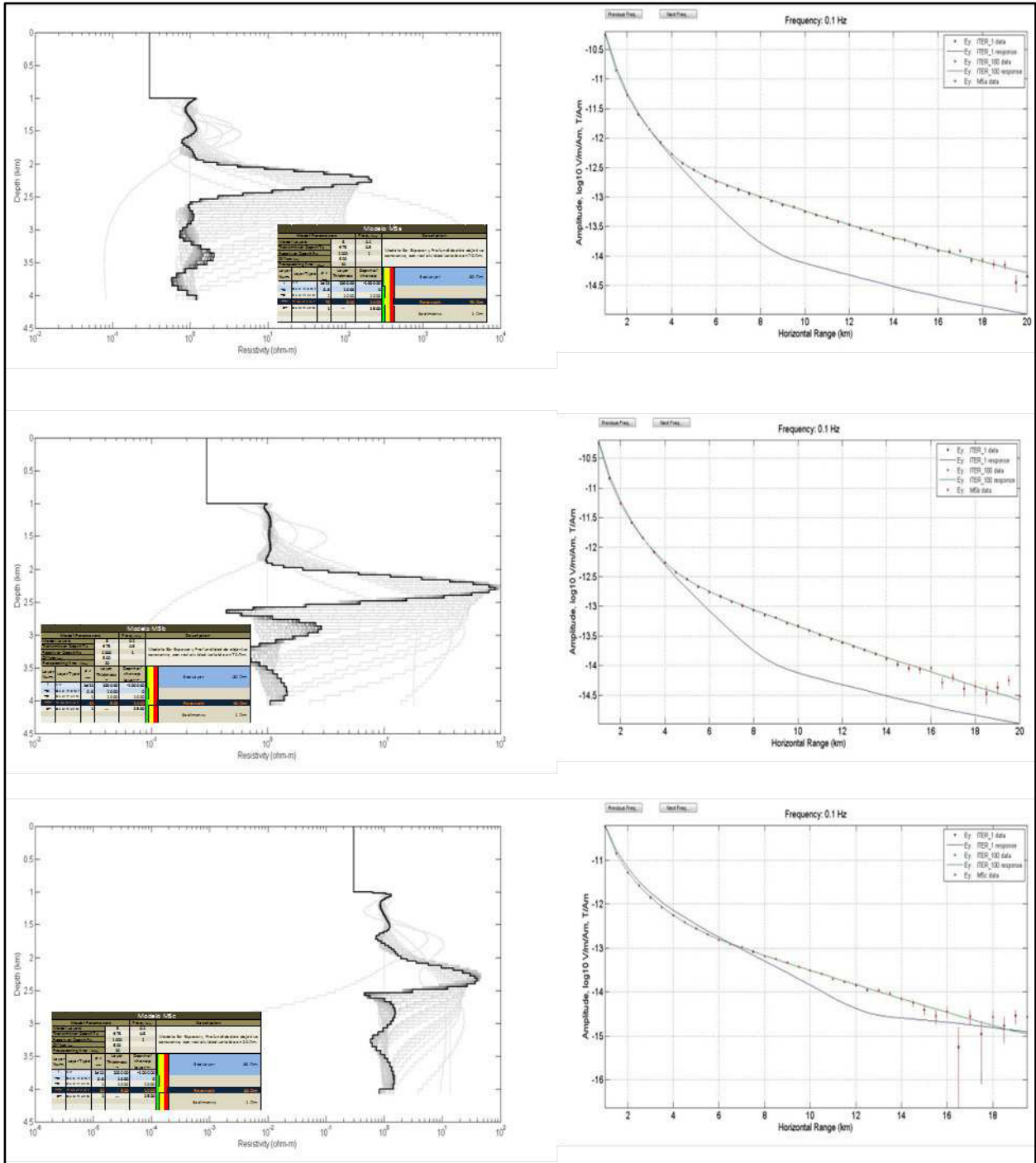


Fig. 5.31. Resultados de la inversión CSEM de los datos provenientes del modelo M5, para los casos *a*, *b* y *c*. Izquierda: modelo final e intermedios. Derecha: datos de amplitud del campo eléctrico E_y para la frecuencia de 0.1 Hz y respuestas del modelo inicial y final.

V.5 Resumen

Para verificar el correcto funcionamiento del software OCCAM1DCSEM y Dipole1D se corrieron pruebas con datos reales adquiridos en el área del canal de San Diego E.U.A. (Constable *et al.*, 2009), con buenos resultados. Al comparar los resultados obtenidos con los del artículo publicado por Key (2009a) encontramos que son los mismos resultados, aunque existen pequeñas variaciones, estas son debidas a que el software Dipole1D utiliza datos aleatorios para generar parte de la información de las capas, y por ello el software al correr en tiempos diferentes siempre generará estas pequeñas variaciones.

Se plantearon los modelos a estudiar, se generaron los datos sintéticos con Dipole1D, agregándoles ruido y se graficó la respuesta para cada uno de ellos. Posteriormente se realizó la inversión con OCCAM1DCSEM a partir de los datos sintéticos, para los cinco modelos incluyendo los casos de cada modelo. En el caso de los modelos M3 y M2c se cambió el criterio de capas logarítmicas a lineales, ya que en estos casos particulares se busca modelar capas resistivas muy delgadas respecto a las adyacentes y por lo tanto utilizar una escala logarítmica no permite obtener buenos resultados en la inversión de los datos.

Como se puede observar en las figuras 5.27 a 5.31, los valores de las resistividades de las capas objetivo están sobrevaloradas, aunque las capas están en su posición. En el siguiente capítulo se analizan estas respuestas y se presenta un software diseñado para tratar de reinterpretar estas curvas de salida en la inversión y mejorar los resultados.

VI Resultados y reinterpretación

VI.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de la inversión con los datos sintéticos generados con Dipole1D para cada modelo planteado en el capítulo anterior, así como las respectivas variaciones de cada modelo. Como se observó en el capítulo anterior, los resultados de la inversión dan modelos suavizados que permiten obtener los resistivos a la profundidad esperada, pero la resistividad está sobrevalorada. Como una manera de reinterpretar los resultados se desarrolló la aplicación *Occam1DInterpreter* la cual fue programada y compilada en el lenguaje de programación Matlab y se describe más adelante.

VI.2 Resultados de la inversión de los datos sintéticos

En esta sección se muestran los resultados de la inversión (OCCAM1DCSEM) de los datos sintéticos obtenidos al aplicar Dipole1D a los modelos M0, M1, M2, M3, M4 y M5 con sus variantes. En estos casos solo se presentan los modelos resultantes de la inversión para cada caso.

Las capas contenedoras de hidrocarburos presentan una resistividad mayor que puede contrastar en gran manera con la resistividad de las capas que solo se componen de sedimentos con agua salada; como se puede observar de los resultados del modelado e inversión del modelo M0 con cualquiera de los modelos planteados en esta investigación. La figura 6.1 presenta la respuesta de E_y del modelo M0 (*curva azul*) y la respuesta del modelo M1a (*presencia de hidrocarburos, curva verde*), para comparar el comportamiento de un modelo constituido por solo capas de sedimentos sin hidrocarburo, contra otro modelo con una capa como reservorio.

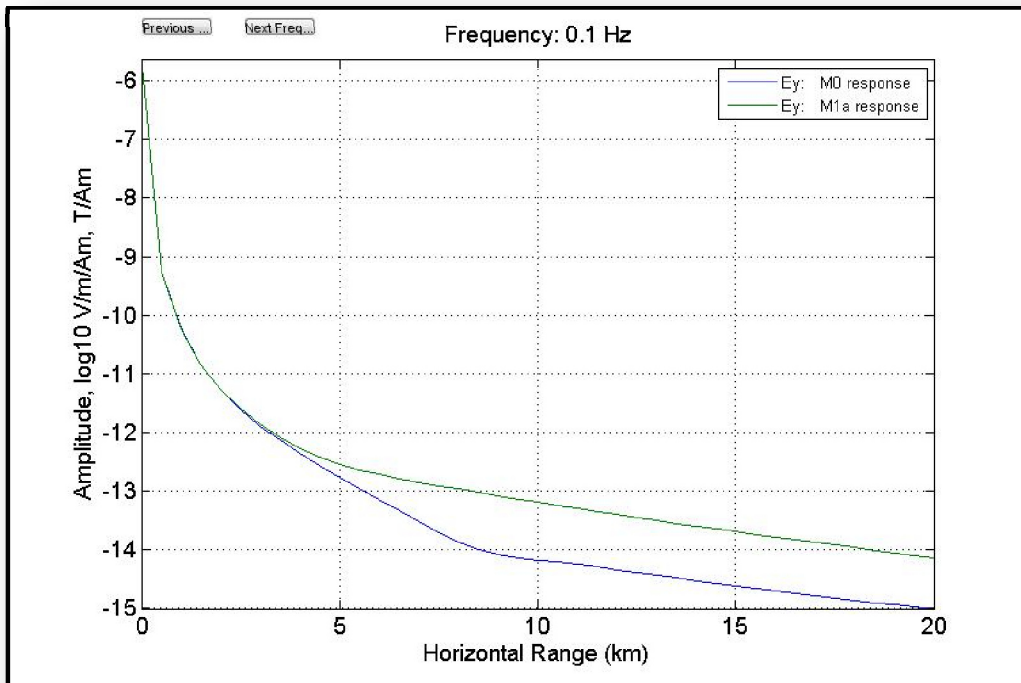


Fig. 6.1. Comparación de la respuesta de E_y para un semiespacio conductor (M0) y otro con un reservorio con hidrocarburos (M1a).

VI.2.1 Resultados del modelo M1

Respecto al modelo M1, los resultados del modelado con Dipole1D y la inversión con OCCAM1DCSEM, mostraron que una capa contenedora de hidrocarburos a diferentes profundidades (1000, 1500, 2500 m) puede ser detectada; sin embargo, se pudo observar que conforme la profundidad aumenta, se empieza a perder resolución (se obtienen resistividades mayores de lo que deberían aparecer) como se puede apreciar en la figura 6.2.

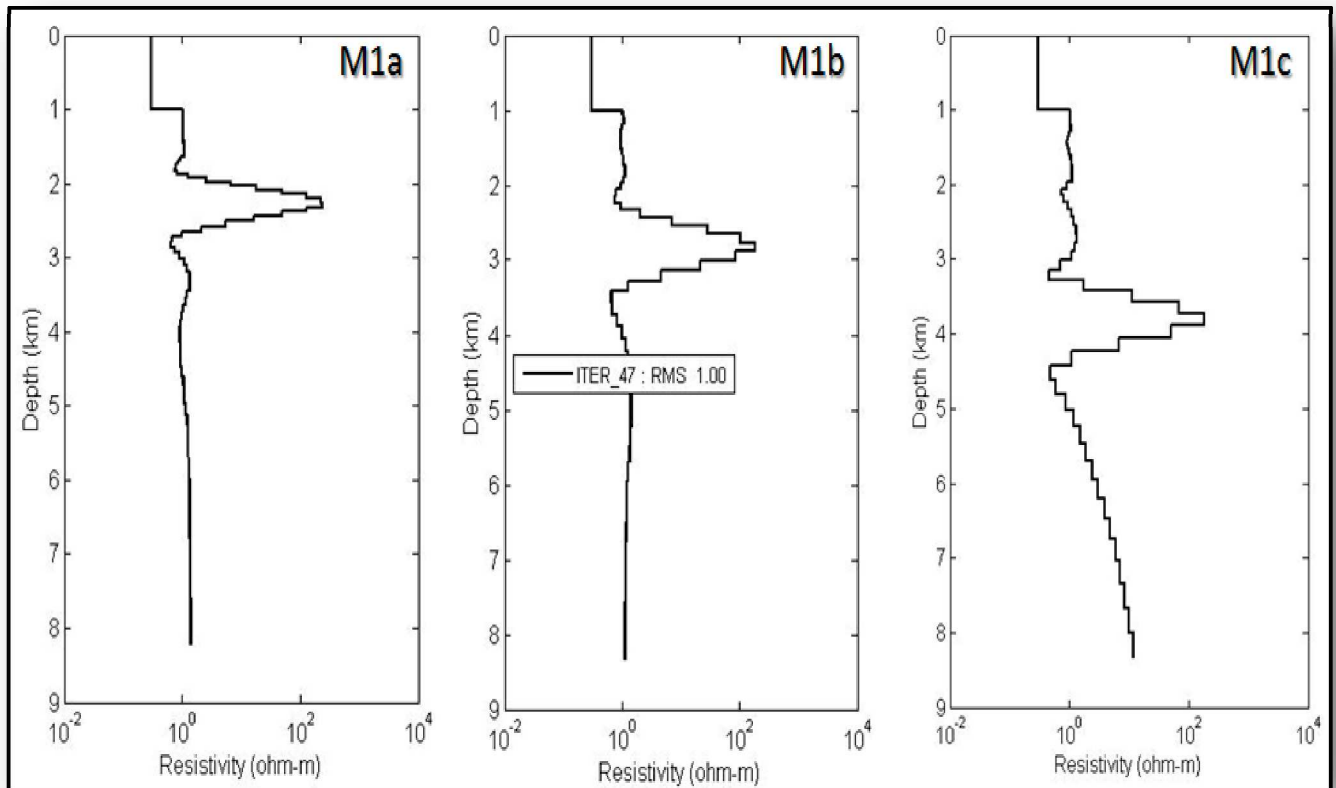


Fig. 6.2. Comparación de los resultados de la inversión para el modelo M1 en sus variantes a (1000 m), b (1500 m) y c (2500 m) para la profundidad de la parte superior del reservorio.

VI.2.2 Resultados del modelo M2

En el modelo M2 planteamos una capa resistiva de 100 Ω -m que representa el reservorio, la cual permanece constante en los 3 sub-modelos y varía su espesor en 800, 200 y 50 m dando como resultado que: la inversión con OCCAM1DCSEM permite visualizar claramente capas gruesas de espesores de 800 m hasta capas muy delgadas de 50 m como se ilustra en la figura 6.3. Sin embargo, como se muestra con el modelo M2c, entre más delgada sea la capa resistiva más difícil será definirla, además el software tendrá mayor gasto computacional al necesitar más iteraciones como en este caso.

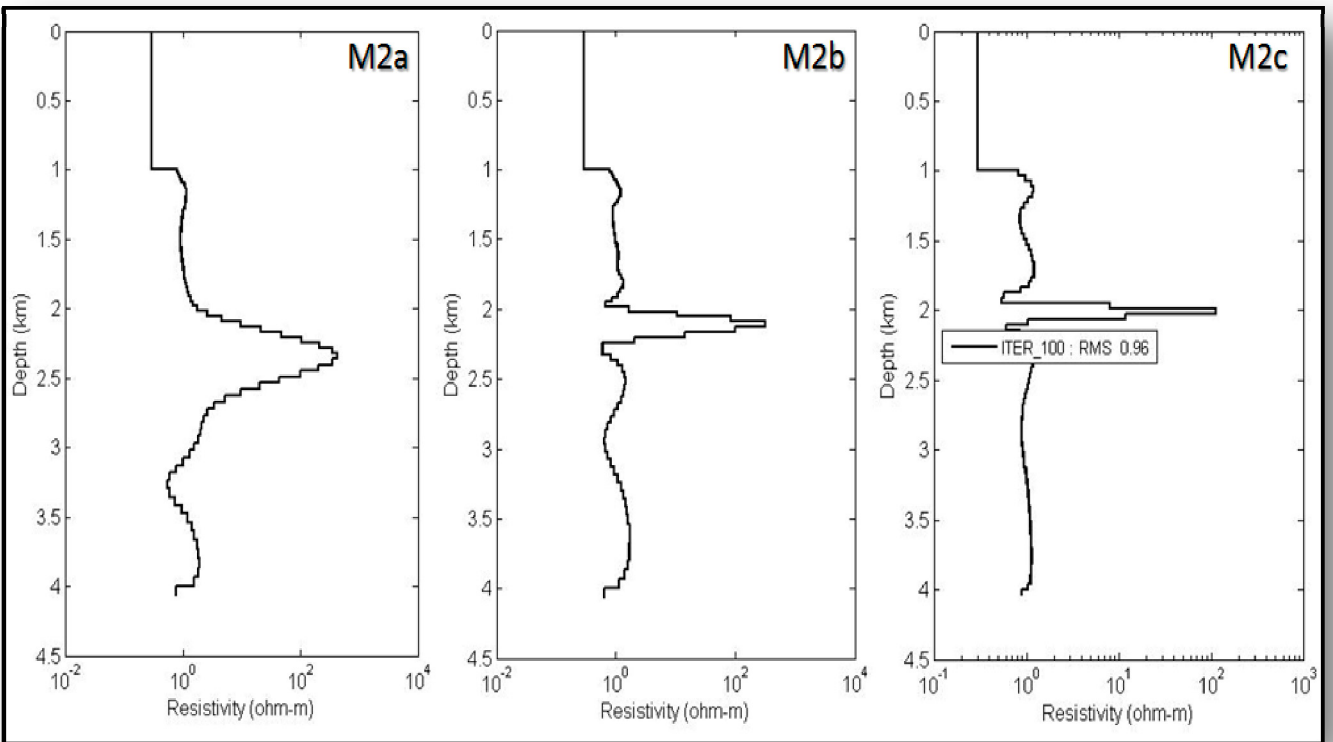


Fig. 6.3. Comparación de los resultados de la inversión para el modelo M2 en sus variantes a (800 m), b (200 m) y c (50 m) de espesor del reservorio.

VI.2.3 Resultados del modelo M3

En los casos donde el reservorio objetivo se encuentra a una determinada profundidad y sobre él tenemos una capa resistiva delgada como se plantea en el modelo M3, la inversión de OCCAM1D logró definir claramente el resistivo delgado aun de menor resistividad que el reservorio como se ilustra con la figura 6.4. En este caso, como en el del modelo M2c, se realizó una discretización lineal del semiespacio para poder recuperar mejor la capa delgada.

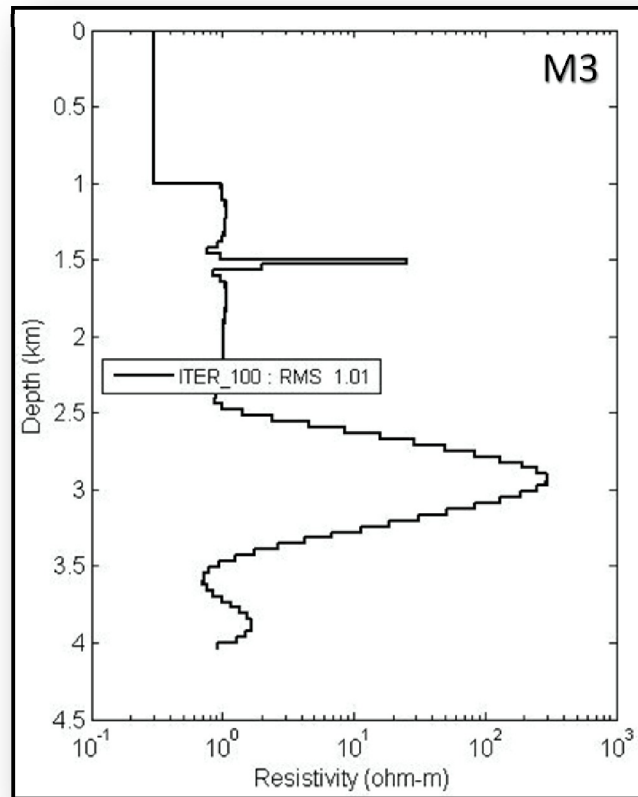


Fig. 6.4. Resultados de la inversión para el modelo M3.

VI.2.4 Resultados del modelo M4

En el modelo M4, en el cual se plantearon dos reservorios separados por un conductor de espesor variable, se obtuvo como resultado que se pueden definir bien las capas hasta una separación de 200 m sin que se muestren como un solo horizonte; esto último es importante en la exploración de hidrocarburos ya que si se toman como una sola dos capas productoras separadas, el confundir el conductor con un estrato productor, traería consecuencias económicas graves a la hora de la perforación ya que se estaría sobreestimando la reserva de hidrocarburo. En la figura 6.5 se muestran los modelos de inversión obtenidos con OCCAM1DCSEM. Para los dos primeros el software encontró una buena solución en las primeras 100 iteraciones; sin embargo para el modelo M4c se tuvo que correr 300 iteraciones

para poder encontrar el modelo de inversión que pudiera definir mejor las dos capas.

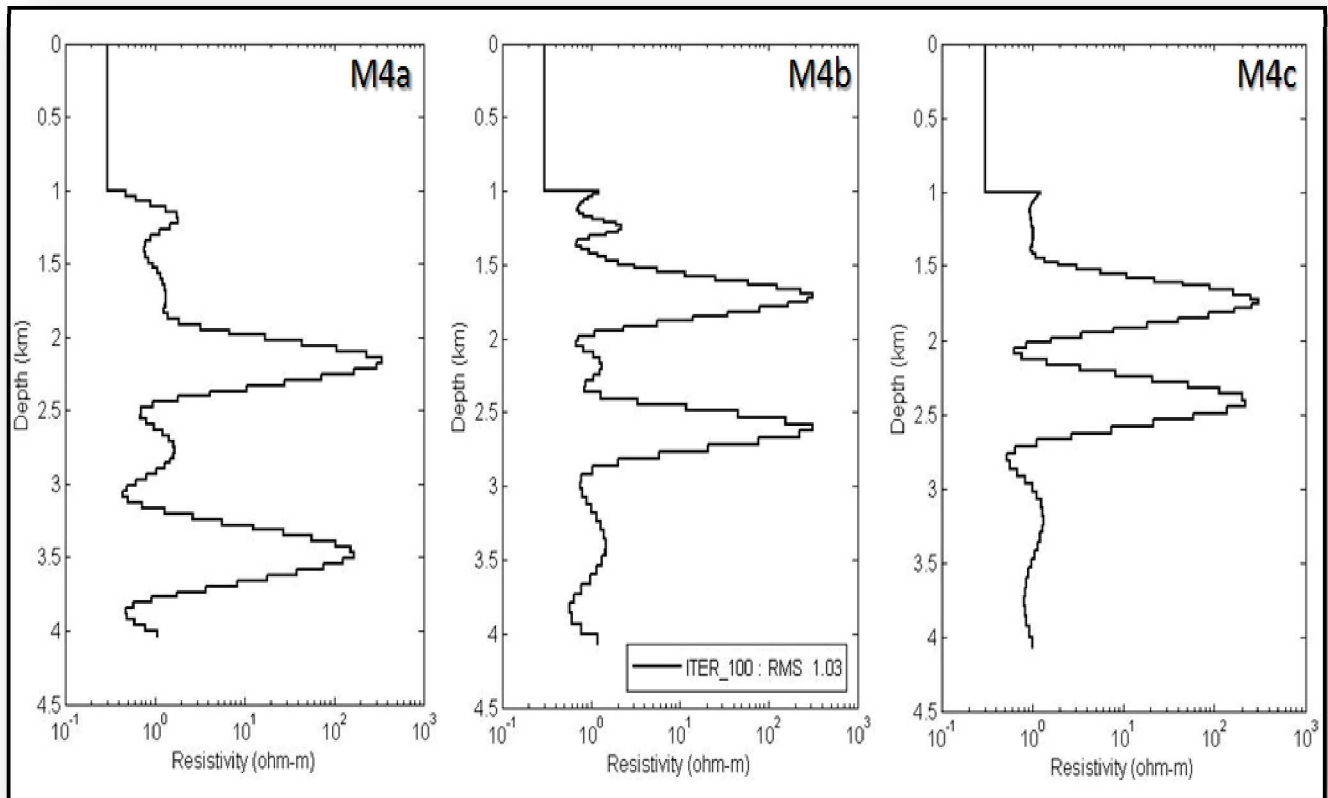


Fig. 6.5. Comparación de los resultados de la inversión para el modelo M4 en sus variantes a (1000 m), b (500 m) y c (200 m) para el espesor de la capa entre dos reservorios.

VI.2.5 Resultados del modelo M5

Para capas con resistividades diferentes como las planteadas en los modelos M5 a, b y c, obtuvimos como resultado que: la inversión de datos con Occam1DCSEM pudo modelarlas sin ningún problema. Como se observa en la figura 6.6. En los tres modelos el resultado es bueno. Particularmente, para el caso del modelo M5c se puede apreciar que la definición decae considerablemente respecto al modelo M5a. Esto es debido a que el contraste entre las resistividades de la capa resistiva y las conductoras que la rodean va disminuyendo a través de los tres modelos. Sin embargo, el resistivo queda bien definido en los tres modelos.

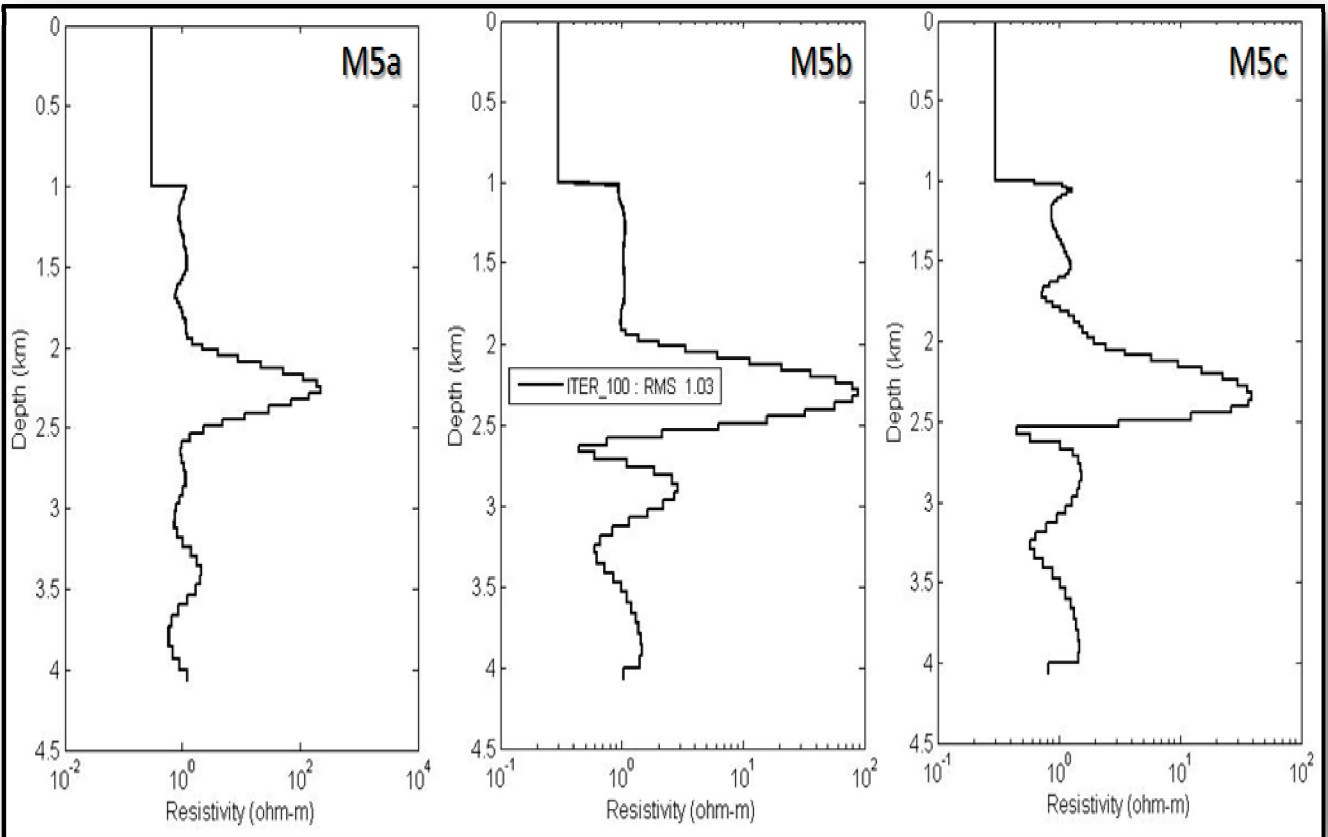


Fig. 6.6. Comparación de los resultados de la inversión para el modelo M5 en sus variantes a (70 Ohm-m), b (40 Ohm-m) y c (20 Ohm-m) para la resistividad de la capa del reservorio.

VI.3 La herramienta Occam1DInterpreter

La herramienta Occam1DInterpreter es una aplicación que tiene como objeto identificar y reinterpretar zonas de interés dentro de un gráfico 1D de resistividad versus profundidad, el cual es generado con el software OCCAM1DCSEM propiedad de *Scripps Institution of Oceanography*. Occam1DInterpreter es una aplicación diseñada durante la realización de la presente investigación y sirve como auxiliar para determinar modelos de resistividad menos suavizados, para poder compararlos mejor con los modelos originales.

La aplicación Occam1DInterpreter está basada en el lenguaje de programación Matlab ver. R2011a, que contiene la característica GUI (*Graphical User Interface*) útil para crear una interfaz gráfica amigable entre el software y el usuario. Sin embargo, para ejecutar Occam1DInterpreter no es necesario tener instalado Matlab, ya que está empaquetado en un archivo que permite ejecutarse sin la necesidad de Matlab, basta con tener instalada la versión 7.15 de MCR (*Matlab Compiler Runtime*), provista con la aplicación. El ANEXO B presenta los requisitos de hardware y software para instalar esta herramienta, así como la manera de instalarla.

VI.3.1 Descripción del algoritmo Occam1DInterpreter

Occam1DInterpreter se centra en un análisis estadístico del modelo final producto de la inversión con el software OCCAM1DCSEM, este archivo debe estar guardado en formato **.fig* (de Matlab). Los datos relacionados con el modelo final se pueden presentar en un gráfico que provee información que es aprovechada para identificar zonas de interés donde posiblemente exista la presencia de hidrocarburos; este es un gráfico de coordenadas x, y , donde el eje de las abscisas corresponde a las resistividades en ohm-metro y el de las ordenadas a las profundidades. Entonces, lo primero es extraer estos valores mediante una función de Matlab que los almacena en una matriz de $2 \times N$. Ahora bien, se extraen las zonas de interés mediante el análisis estadístico de la desviación estándar.

La desviación estándar o desviación típica de un conjunto de datos (denotada con el símbolo σ o s , dependiendo de si los datos provienen de una población o de una muestra) es una medida de la variación de los valores con respecto a la media, de gran utilidad en la estadística descriptiva. La desviación estándar se define como la raíz cuadrada de la varianza, que informa de la media de distancias que tienen los datos respecto de su media aritmética, expresada en las mismas unidades que la variable. Para conocer con detalle un conjunto de datos, no basta con conocer las medidas de tendencia central, sino que necesitamos conocer también la desviación que presentan los datos en su distribución respecto de la media aritmética de dicha distribución. Todo esto con el objeto de tener una visión de los mismos,

más apegada a la realidad al momento de describirlos e interpretarlos para la toma de decisiones.

La desviación estándar de una muestra es una medida del grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio \bar{x} . Dicho de otra manera, la desviación estándar es simplemente el *promedio* o variación esperada con respecto a la media aritmética

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}, \quad (6.1)$$

donde se tienen N datos x_i .

Dado que el archivo producto de OCCAM1DCSEM nos ofrece los valores de las coordenadas, aprovecharemos esa información para construir un gráfico interpretativo. Para ello se toman los datos de las abscisas, que son los correspondientes a la resistividad en $\Omega\text{-m}$ y se almacenan en un *vector* llamado Vector Resistividad; de igual forma con los datos de las ordenadas al que llamaremos Vector Profundidad. Cabe señalar que para efectos computacionales, la estructura de datos *Vector* proporciona un identificador índice único a cada dato obtenido, tanto de las abscisas como de las ordenadas; por lo tanto, por medio de los índices se relacionan ambas estructuras de datos.

A continuación, en el Vector Resistividad se obtienen conjuntos de cinco en cinco elementos pero con incrementos de uno en uno, esto es: primero los elementos de los índices del 1 al 5, luego los elementos del 2 al 6 y así iterativamente hasta recorrer todo el vector. En cada iteración se procede a evaluar la dispersión existente entre los datos del conjunto; si existe una alta dispersión ese conjunto se marca y almacena en una nueva estructura de datos para después aplicarle otro proceso ya que esto indica que empieza a existir una variación importante en la resistividad registrada, de lo contrario al existir una dispersión baja, se procede a analizar el siguiente conjunto. La Tabla VI.1 presenta el análisis del Vector Resistividad para determinar las desviaciones estándar y compararlas con el primer elemento de cada muestra. Para los datos primeros cinco datos mostrados en la Tabla VI.1, la media es 0.18 y aplicando la ecuación 6.1 se obtiene una desviación estándar de 0.109 que es poco mayor que 0.1 (el primer valor de la muestra).

Tabla VI.1. Muestreo del Vector Resistividad en búsqueda de la desviación estándar de cada muestra.

Inicio		1er. Iteración		2da. Iteración		3ra. Iteración		...	Nma. Iteración	
Vector Resistividad (x)		Vector Resistividad (x)		Vector Resistividad (x)		Vector Resistividad (x)			Vector Resistividad (x)	
Ind.	$\rho(x)$	Ind.	$\rho(x)$	Ind.	$\rho(x)$	Ind.	$\rho(x)$		Ind.	$\rho(x)$
1	0.1	1	0.1	1	0.1	1	0.1		1	0.1
2	0.1	2	0.1	2	0.1	2	0.1		2	0.1
3	0.1	3	0.1	3	0.1	3	0.1		3	0.1
4	0.3	4	0.3	4	0.3	4	0.3		4	0.3
5	0.3	5	0.3	5	0.3	5	0.3		5	0.3
6	0.3	6	0.3	6	0.3	6	0.3		6	0.3
7	0.34	7	0.34	7	0.34	7	0.34	...	7	0.34
8	0.45	8	0.45	8	0.45	8	0.45		8	0.45
9	1	9	1	9	1	9	1		9	1
...
...
...
...
...
N-1	100	N-1	100	N-1	100	N-1	100		N-1	100
N	0.3	N	0.3	N	0.3	N	0.3	...	N	0.3

De este modo, cuando haya una variación de la desviación estándar mayor a 0.5, el software asume que está entrando a una zona con un aumento de resistividad que puede ser significativa, esto corresponde generalmente a una zona de transición. Cuando esta variación es detectada, a partir de ese dato todos los datos subsecuentes se guardan en una matriz aparte en donde las columnas pares corresponden a las resistividades y las impares a su respectiva profundidad. Este proceso se sigue hasta que la desviación estándar vuelve a ser menor a 0.5. En caso de aparecer nuevas zonas de interés, éstas serán almacenadas en nuevas columnas que corresponden a nuevas capas resistivas, todo esto hasta llegar al final del Vector Resistividad obtenido de los datos de OCCAM1DCSEM. La estructura de los datos en la matriz de resistividad vs profundidad queda como lo muestra la Tabla VI.2.

Una vez que los datos son filtrados, ordenados y almacenados en la matriz anterior, el software procede a buscar el valor máximo de amplitud de la ondícula de la anomalía, y entonces se calcula una media aritmética que incluye los datos desde el primer elemento que compone la anomalía hasta el punto máximo, una vez calculada se busca en el conjunto de datos, el valor más cercano a la media y se marca para ser utilizado como la cima de la capa, del mismo modo se calcula la base usando los valores desde el punto máximo hasta el último de los datos de la capa. La demás capas en el caso de existir se calculan de la misma forma. En

el ANEXO C se presentan las instrucciones para la operación de la herramienta Occam1DInterpreter, así como el flujo de trabajo.

Tabla VI.2. Matriz que contiene los valores de resistividad y profundidad de varias zonas de interés obtenidas con el análisis de la desviación estándar.

Matriz de Capas Resistivas NxM					
Resistividad (ρ) Capa1	Profundidad Capa 1	Resistividad (ρ) Capa	Profundidad Capa	Resistividad (ρ) Capa N	Profundidad Capa N
ρ 1	Depth 1	...	...	ρ 1	Depth 1
ρ 2	Depth 2	...	...	ρ 2	Depth 2
ρ 3	Depth 3	...	...	ρ 3	Depth 3
...
...
...
ρ M	Depth M	...	...	ρ M	Depth M

VI.4 Reinterpretación con la herramienta Occam1DInterpreter

Con base en las instrucciones presentadas en el ANEXO C, se realizaron varias reinterpretaciones de los resultados de la inversión obtenidos con el software OCCAM1DCSEM. A continuación presentamos ejemplos de su utilización.

VI.4.1 Reinterpretación del modelo M1a

La figura 6.7 presenta la reinterpretación del modelo final obtenido con OCCAM1DCSEM para los datos del modelo M1a. La línea en color negro es el modelo de inversión obtenido con OCCAM1DCSEM y la línea azul presenta el modelo teórico planteado inicialmente; en ese caso se tiene sólo una capa resistiva reinterpretada, la cual se muestra en línea roja; por lo que se puede apreciar la similitud entre el modelo teórico y el recuperado después de todo el proceso. Esta reinterpretación permite ubicar la cima y la base de la capa resistiva, así como una resistividad más cercana a la real.

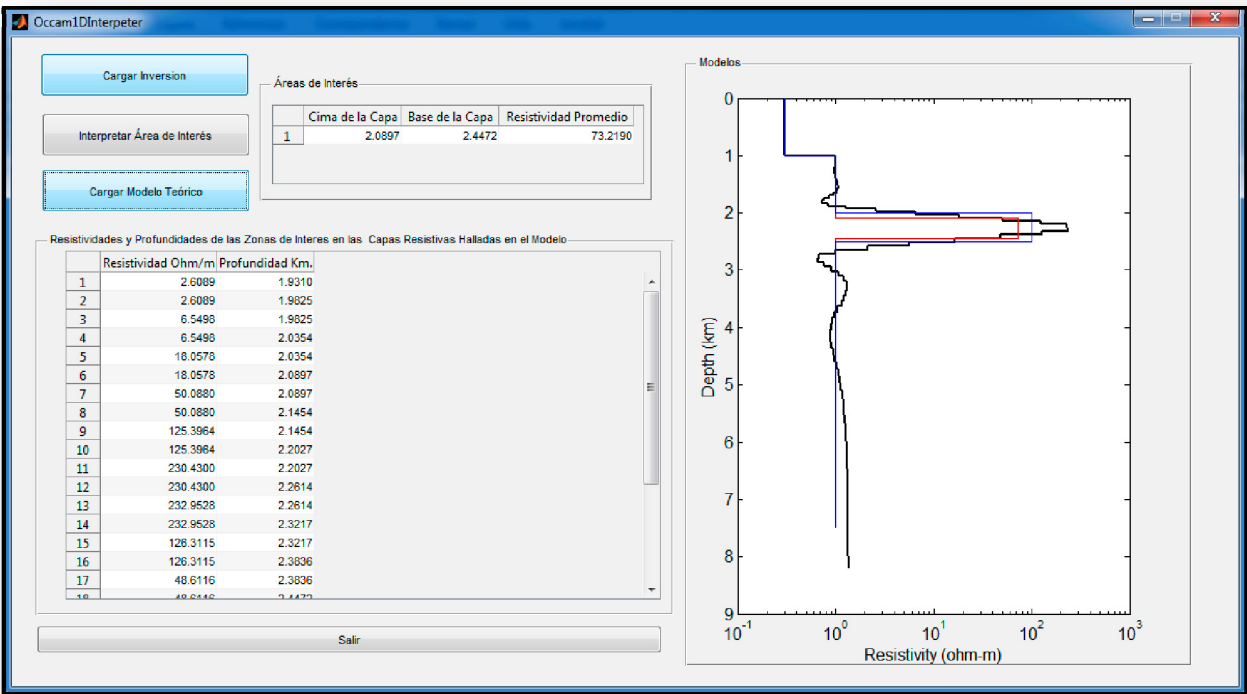


Fig. 6.7. Reinterpretación de la geometría de la capa resistiva del modelo M1a.

VI.4.2 Reinterpretación del modelo M3

La reinterpretación del modelo final obtenido con OCCAM1DCSEM para los datos del modelo M3 se ilustra en la figura 6.8. En este caso de tienen identificados dos resistivos, al reinterpretarlos obtenemos que las resistividades de las capas están bien determinadas; en el caso de los espesores, el de la capa inferior no queda muy bien determinado pero si la posición de la capa.

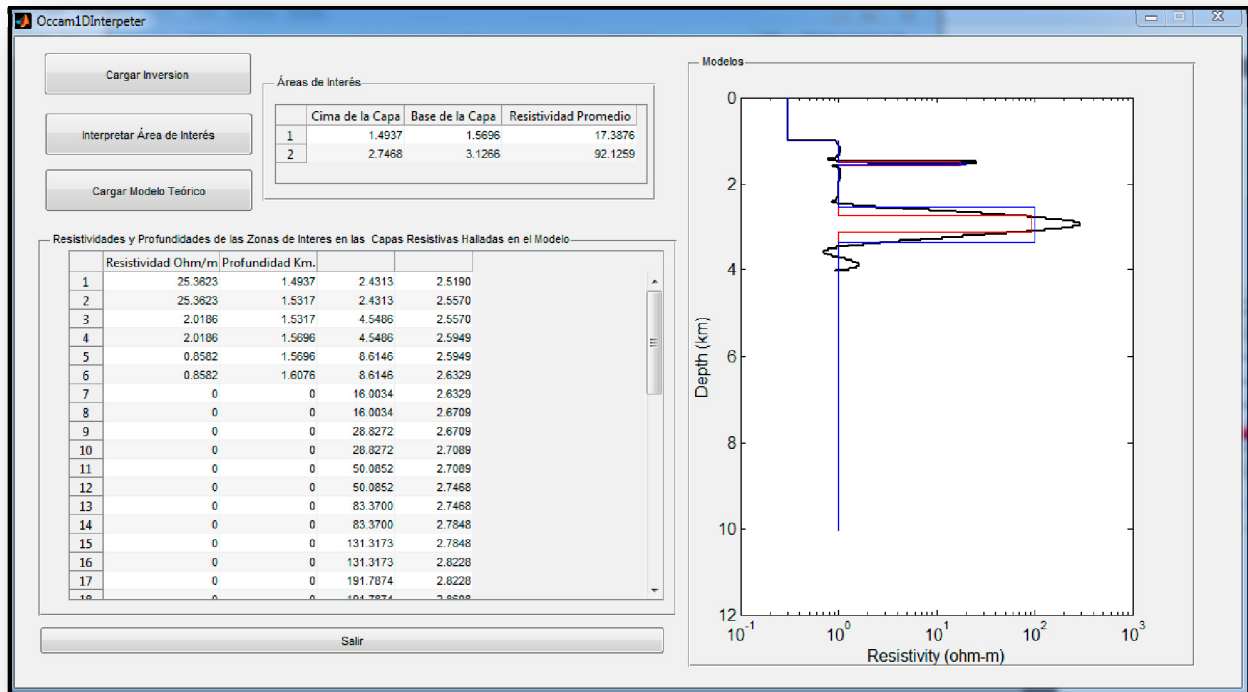


Fig. 6.8. Reinterpretación de la geometría de las capas resistivas del modelo M3.

VI.4.3 Reinterpretación del modelo M4b

La figura 6.9 ilustra la reinterpretación de la geometría del modelo M4b, en la que se observan dos capas resistivas separadas por un conductor. La línea en color negro es el modelo de inversión obtenido con OCCAM1DCSEM y la línea azul presenta el modelo teórico planteado inicialmente; en ese caso se tienen dos capas resistivas reinterpretadas, lo cual se muestra en línea roja. Se puede apreciar la similitud entre el modelo teórico y el recuperado después de todo el proceso. Esta reinterpretación permite ubicar la cima y la base de las capas resistivas, así como una resistividad más cercana a la real.

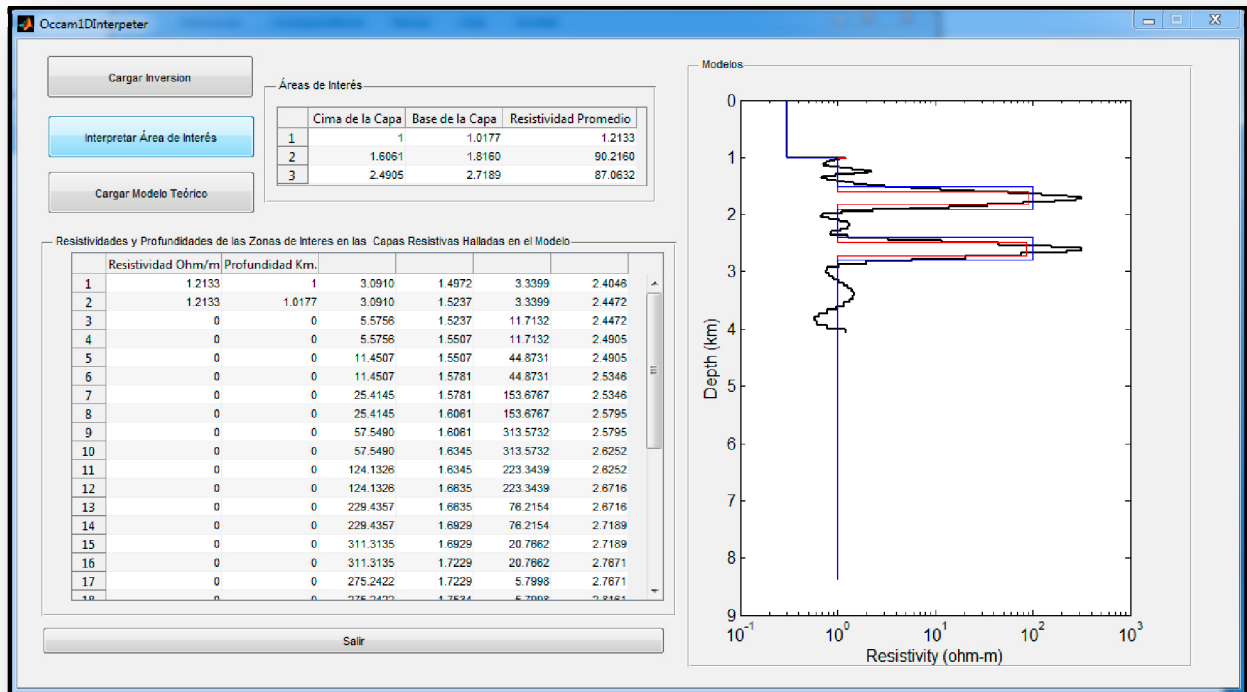


Fig. 6.9. Reinterpretación de la geometría de las capas resistivas del modelo M4b.

VI.5 Resumen

Como se ve en los resultados anteriores, la herramienta Occam1DInterperter ayuda a ilustrar de mejor manera el modelo obtenido con OCCAM1DCSEM, ya que permite hacer énfasis en las zonas de interés al trazar las líneas tanto de interpretación como las del modelo inicial, permitiendo con esto poder hacer mejores comparaciones entre los resultados. También permite tener una mejor idea de la resistividad y espesor de las capas de interés.

VII Conclusiones y Recomendaciones

A lo largo de este documento se han presentado las bases del modelado 1D de datos acerca de los Métodos Electromagnéticos de Fuente Controlada (CSEM) en ambiente marino en los que se usa un Dipolo Eléctrico Horizontal (DEH) como fuente. También se han presentado las bases de la inversión 1D de dichos datos utilizando una regularización tipo Occam.

El modelado e inversión de datos mCSEM fue posible gracias al software Dipole1D y OCCAM1DCSEM, respectivamente. Dicho software está disponible en la página electrónica de la Universidad de California en San Diego, en particular Scripps Institution of Oceanography. Por ello, fue necesario instalar el software en una estación de trabajo para realizar prueba y entender los procesos.

Con la ayuda de la colección de datos reales adquiridos y proporcionados por Scripps se logró reconstruir el modelo para el escenario planteado por Constable *et al.* (2009) en su estudio publicado acerca del canal de San Diego E.U.A. También se tomó un modelo planteado en el artículo de Key (2009a) y con ayuda del software de modelado directo Dipole1D se generó la simulación para esa adquisición mCSEM, obteniendo así los datos sintéticos usados para la inversión con OCCAM1DCSEM. En ambos casos los resultados obtenidos con el software instalado y los publicados fueron idénticos como se mostró a lo largo del capítulo V. Con lo anterior pudimos comprobar el buen funcionamiento del software utilizado en la investigación.

VII.1 Conclusiones

Los modelos estudiados en el transcurso del presente trabajo proporcionaron información acerca de las distintas situaciones que se pudieran presentar en un yacimiento de hidrocarburos. Se determinó que es posible diferenciar una formación contenedora de aceite de otras formaciones conductoras a diferentes profundidades; incluso de existir otros resistivos

también estos pueden ser detectados e identificados como se detalla en los siguientes puntos:

- Es posible determinar la presencia de un resistivo hasta una profundidad de 3000 metros por debajo de la línea del fondo marino sin ningún problema (modelo M1c) siempre que el contraste de resistividades sea grande; se pudieran recuperar resistivos a profundidades mayores, pero conforme la profundidad en la que se encuentra el resistivo aumente se irá perdiendo la resolución siendo cada vez más difícil definirlo.
- Para los casos en los que se trabajó con capas resistivas delgadas, los resultados mostraron que es posible detectar capas resistivas de hasta 50 metros de espesor (modelos M2c y M3), en los que se definió sin problemas la capa. Cabe señalar que conforme el resistivo es más delgado el software necesitará más iteraciones para mejorar la resolución del modelo, además de requerir una discretización uniforme de las capas en la inversión.
- Es posible distinguir un reservorio somero de uno más profundo, si solo si la formación conductora que los separe tenga un espesor considerable (modelos M3 y M4), ya que conforme el conductor se torne más delgado se corre el riesgo de que el software pueda enmascararlo y darle un efecto como si tratara de un solo horizonte. Sin embargo, en las pruebas realizadas en esta investigación, el software logró detectarlas perfectamente cuando la capa conductora que los separa tiene un espesor mínimo de hasta 200 metros (modelo M4c). Una opción para resistivos separados por conductores más delgados sería modificar el criterio de suavizado, pero esto podría hacer que el software no logre encontrar criterios muy pequeños y se cicle; un ajuste RMS entre 1.0 y 1,6 permite generar modelos suavizados de inversión con una gran definición.
- En el caso de tener en profundidad dos cuerpos resistivos con diferentes resistividades también pueden ser recuperados con este método, siempre que las resistividades del cuerpo menos resistivo no sea demasiado pequeñas de modo que se acerque mucho al de la roca conductora que los encajona (modelo M3), porque de ser así el software podría tomarlo como parte del la formación conductora circundante.
- En el caso de tener capas resistivas gruesas, es posible detectarlas, aun cuando la resistividad de la capa sea pequeña, al menos hasta 20 ohms-m (modelo M5c).

La inversión de datos mCSEM en todos los modelos planteados permitió claramente distinguir posibles capas productoras someras tanto como profundas, aunque en estas últimas

conforme la profundidad de los objetivos aumenta la resolución comienza a decaer; sin embargo, esto puede ser mejorado aumentando el número de iteraciones y modificando el criterio RMS; esto es útil en yacimientos con profundidad considerable, como lo es el caso del reciente yacimiento petrolero descubierto por Petróleos Mexicanos en un área de 12 kilómetros cuadrados a 115 millas náuticas del puerto El Mezquital del municipio de Matamoros, Tamaulipas. En el área conocida como Cinturón Plegado de Perdido en las aguas profundas del Golfo de México, se tiene el pozo exploratorio Supremus-1 a una profundidad de 1100 metros del fondo marino y un tirante de agua de 2,900 metros. PEMEX estima un potencial de 3 mil millones de barriles de petróleo crudo equivalente al 21 por ciento de las actuales reservas probadas de crudo (PEP, 2012).

Los ejemplos anteriores confirman que el Método Electromagnético de Fuente Controlada (CSEM) en ambiente marino en los que se usa un Dipolo Eléctrico Horizontal (DEH) como fuente es una buena alternativa para la detección de hidrocarburos en aguas profundas. Dado que un resistivo no necesariamente implica un reservorio de hidrocarburos, este método es una excelente opción complementaria en la integración con otros métodos geofísicos.

VII.2 Recomendaciones

Dipole1D y OCCAM1DCSEM son herramientas muy poderosas para realizar el modelado e inversión de datos mCSEM a la hora de hacer investigaciones con datos sintéticos. Con base en la experiencia obtenida, se recomienda:

- Al invertir datos donde se tengan capas resistivas delgadas es recomendable utilizar espesores lineales en las capas a la hora de generar los archivos *model*, *data* y *startup*, necesarios para la inversión, con la función `CreateEMDatafile` en Matlab proporcionada con el software OCCAM1DCSEM y Dipole1D.
- En algunos casos se puede llegar a un compromiso entre los criterios de RMS y el número de las iteraciones para llegar al modelo final con el software OCCAM1DCSEM. En ocasiones, el software alcanzará el límite de iteraciones que trae por default, que es 100,

antes de encontrar el criterio RMS establecido inicialmente, generando así un modelo de inversión donde las capas no se definen bien, para esto será conveniente aumentar el número de iteraciones en el archivo *startup*, mejorando el resultado final, aunque el tiempo de computo podría ser elevado debido al incremento en el número de las iteraciones.

- Explorar las variaciones de la matriz diagonal \mathbf{P} y el multiplicador de Lagrange μ en el funcional (4.1) a minimizar para ver si se pueden mejorar los resultados de la inversión con OCCAM1DCSEM
- OCCAM1DCSEM, Dipole1D y las funciones de Matlab están disponibles para plataformas Unix y Microsoft, pero se recomienda usar la primera e inclusive para las funciones de Matlab, debido a que Unix presenta mayor estabilidad y fiabilidad a la hora de procesar los resultados de las inversiones y el tiempo de cómputo para las iteraciones mejora notablemente.

Referencias

Archie, G.E., 1942, The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics, *Trans. AIME*, Vol 146.

Bannister, P. R., 1968, Electromagnetic fields within a stratified earth produced by a long horizontal line source, *Radio Science*, 3, 387–390.

Bannister, P. R., 1984, New simplified formulas for ELF subsurface to subsurface propagation, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, OE-9, 154–163.

Bazán Navarrete, G. y Ortíz Muñiz, G. 2008. Reservas de Hidrocarburos. *Energía a debate*. Marzo 2008 (www.energiaadebate.com/Articulos/marzo2008/Bazanmarzo2008.htm).

Cagniard L., 1953, Basic Theory of the Magneto-Telluric Method of Geophysical Prospecting, *Geophysics* Vol. 18: 605–635.

Chave, A. D., y Cox, C. S., 1982, Controlled electromagnetic sources for measuring electrical conductivity beneath the oceans, 1. Forward problem and model study, *Journal of Geophysical Research*, 87, 5327–5338.

Cheesman, S. J., Edwards, R. N. y Chave, A. D., 1987, On the theory of sea floor conductivity mapping using transient EM systems, *Geophysics*, 52, 204–217.

Cheesman, S. J., Edwards, R. N. y Law, L. K., 1988, First results of a new short baseline sea floor transient EM system, 58th Annual International Meeting, *SEG Expanded Abstracts*, 259–261.

COMESA [Compañía Mexicana de Exploraciones S.A.]. (2009). Informe del Seminario de Métodos Electromagnéticos. Aplicación de los métodos electromagnéticos de fuente controlada en el dominio del tiempo y la frecuencia en la exploración marina del petróleo, (págs. 2-9). Villahermosa, Tabasco.

Constable, S., y Cox, C. S., 1996, Marine controlled source electromagnetic sounding: The PEGASUS experiment, *Journal of Geophysical Research*, 101, 5519–5530.

Constable S., and Key K., 2004, *Marine Electromagnetic Methods for hydrocarbon exploration, Part B: Marine CSEM Methods and Instruments*, lecture series, Scripps Institution of Oceanography, <http://www.marineemlab.ucsd.edu>.

Constable, S., Key, K. and Lewis, L. 2009. Mapping offshore sedimentary structure using electromagnetic methods and terrain effects in marine magnetotelluric data. *Geophys. J. Int.* Vol. 176: 431-442pp.

Constable, S. C., Parker, R. L. y Constable, C. G., 1987, Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data, *Geophysics*, 52, 289–300.

Constable, S. y Srnka, L.J. 2007, Marine Controlled-Source Electromagnetic Methods An introduction to marine controlled-source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration, *Geophysics*, Vol. 72, No. 2.

Cox, C. S., 1981, On the electrical conductivity of the oceanic lithosphere: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25, 196–201.

Cox, C. S., Constable, S. C., Chave A. D., y Webb, S. C., 1986, Controlled source electromagnetic sounding of the oceanic lithosphere, *Nature*, 320, 52–54.

Cox, C., T. Deaton, and S. Webb, 1984, A deep-sea differential pressure gauge: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1, 237–246.

Cox, C. S., Filloux, J. H. y Larsen, J. C., 1971, Electromagnetic studies of ocean currents and electrical conductivity below the ocean floor, in A. E. Maxwell, ed., *The sea*, Vol. 4, Part I: Wiley Interscience, 637–693.

Edwards, R. N., y Chave, A. D., 1986, A transient dipole-dipole method for mapping the conductivity of the seafloor, *Geophysics*, 51, 984–987.

Edwards, R. N., Law, L. K., Wolfgram, P. A., Nobes, D. C., Bone, M. N., Trigg, D. F., y DeLaurier, J. M., 1985, First results of the MOSES experiment: Sea sediment conductivity and thickness determination, Bute Inlet, British Columbia, by magnetometric offshore electrical sounding, *Geophysics*, 50, 153–160.

ElectroMagnetics GeoServices [EMGS], <http://www.emgs.com>

EMGS, 2011, *The marine controlled source electromagnetic (CSEM) Method, Mexican summer school 2011 manual*, México D.F.

Evans, R. L., Constable S. C., Sinha, M. C. y Cox, C. S., 1991, Upper crustal resistivity structure of the East Pacific Rise near 13°N, *Geophysical Research Letters*, 18, 1917–1920.

Evans, R. L., Law, L. K., Louis, B. St., y Cheesman, S., 2000, Buried paleochannels on the New Jersey continental margin: Channel porosity structures from electromagnetic surveying, *Marine Geology*, 170, 381–394.

Evans, R. L. y Webb, S.C., 2002, Crustal resistivity structure at 9.5°N on the East Pacific Rise: Results of an electromagnetic survey, *Geophysical Research Letters*, 29, 1082.

Fischer, P. A., 2005, New EM technology offerings are growing quickly, *World Oil*, Vol 226, no. 6.

Flosadottir, A. H., y Constable, S., 1996, Marine controlled source electromagnetic sounding 1. Modeling and experimental design, *Journal of Geophysical Research*, 101, 5507–5517.

Hesthammer, J., Stefatos, A., Fanavoll, S., Danielsen, J., 2010, CSEM Performance In Light Of Well Results, *The Leading Edge*, June 2010 pp 31-41.

Holten, T., and Grude, E., 2009, Vertical source, vertical receiver, electromagnetic technique for offshore hydrocarbon exploration, *First Break - Special Topic*, Vol. 27., pp 90.

Holten, T., Veiberg, D., & Flekkoy, E., 2010, *Vertical Electric Time-domain Responses from a Vertical Current Source for Offshore Hydrocarbon Exploration*, 71st EAGE Conference & Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, 2009.

Key, K. 2009a. 1D inversion of multicomponent, multifrequency marine CSEM data: Methodology and synthetic studies for resolving thin resistive layers, *Geophysics*, Vol. 74 (2):F9–F20.

Key, K. 2009 b, *OCCAM1DCSEM: An Inversion Program for Generating Smooth 1D Models from Controlled-Source Electromagnetic and Magnetotelluric Data.*, Seafloor Electromagnetic Methods Consortium & Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego. 55pp.

Key, K., Constable, S. y Weiss, C. J., 2006, Mapping 3D salt using the 2D marine magnetotelluric method: Case study from Gemini Prospect, Gulf of Mexico, *Geophysics*, 71, No. 1, B17–B27.

Kraichman, M. B., 1970, *Handbook of electromagnetic propagation in conducting media*, U. S. Government Printing Office.

Leonardon E.G., 1928, Some Observations Upon Telluric Currents and Their Applications to Electrical Prospecting, *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 33: 91–94.

MacGregor, L. M., Constable, S. y Sinha, M. C., 1998, The RAMESSES experiment III: Controlled source electromagnetic sounding of the Reykjanes Ridge at 57°45'_N, *Geophysical Journal International*, 135, 773–789.

MacGregor, L., Sinha, M. y Constable, S., 2001, Electrical resistivity structure of the Valu Fa Ridge, Lau Basin, from marine controlled-source electromagnetic sounding, *Geophysical Journal International*, 146, 217–236.

Parasnis, D.S., Orellana, E., 1970, *Principios de geofísica aplicada*, Madrid España, ed. Paraninfo.

Parker, R. L., 1994, *Geophysical inverse theory*: Princeton University Press.

Petróleos Mexicanos Exploración y Producción 2008, Aguas Profundas un nuevo reto. Eventos y presentaciones Sala de prensa, Marzo 10 de 2008:
<http://www.pemex.com/index.cfm?action=news§ionID=8&catID=11300&contentID=17758>

Petróleos Mexicanos Exploración y Producción 2012, Inicia PEMEX trabajos exploratorios en aguas profundas del Golfo de México en Matamoros, Tamaulipas. Boletines y Sala de prensa, Boletines regionales, Reynosa, Junio.7de 2012:
<http://www.pemex.com/index.cfm?action=news§ionID=118&catID=11388&contentID=26621>

Petromarker, <http://www.petromarker.com>

Rust, W. M., 1938, A historical review of electrical prospecting methods, *Geophysics*, 3, 1–6.

Schlumberger, 2009a. Marine CSEM: Evolution of a technology, *Oilfield Review*, Vol. 21, No. 1. 1pp.

Schlumberger, 2009b, *Electromagnetic Sounding for Hydrocarbons*, Oilfield Review Spring 2009: Vol. 21, No. 1. pp4-19

Schlumberger, C., M. Schlumberger, and E. G. Leonardon, 1934, Electrical exploration of water-covered areas, *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, 110, 122-134.

Scripps Institution of Oceanography - UC San Diego, <http://www.sio.ucsd.edu>

Sinha, M. C., Patel, P. D., Unsworth, M. J., Owen, T. and Cormack, M., 1990, An active source EM sounding system for marine use, *Marine Geophysical Research*, 12, 59–68.

Spiess, F. N. and K. C. Macdonald, 1980, East Pacific Rise: Hot springs and geophysical experiments: *Science*, 207, 1421–1433.

Stoyer, C. H., 1977, Electromagnetic fields of dipoles in stratified media: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 25, 547–552.

Udías, A., Mezcua, J., 1997, *Fundamentos de Geofísica*, Madrid España, ed. Alianza.

Unsworth, M., and Oldenburg, D., 1995, Subspace inversion of electromagnetic data: Application to mid ocean ridge exploration, *Geophysical Journal International*, 123, 161–168.

Vozoff, K., 1972, The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins, *Geophysics*, 37, 98–141.

Wait, J. R., 1982, *Geo-electromagnetism*: Academic Press.

Ward, S. H., and G.W. Hohmann, 1988, *Electromagnetic theory for geophysical applications*, in M. N. Nabighian, ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics*, SEG, 131–312.

Webb, S. C., and S. C. Constable, 1986, Microseism propagation between two sites on the deep sea floor: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 76, 1433–1445.

Webb, S. C., Constable, S. C., Cox, C. S. and Deaton, T. K., 1985, A seafloor electric field instrument, *Geomagnetism and Geoelectricity*, 37, 1115–1129.

Worthington, P., 1985, The Evolution of shaly-sand concepts in reservoir evaluation, *The Log Analyst*, Vol 26, no. 1.

Yuan, J., and R. N. Edwards, 2000, The assessment of marine gas hydrates through electronic remote sounding: Hydrate without a BSR: *Geophysical Research Letters*, 27, 2397–2400.

Zhdanov, M. S., 2002, *Geophysical inverse theory and regularization problems*: Elsevier Science.

ANEXO A

Función CSEMGRPH

A continuación se presenta la función CSEMGRPH diseñada en Matlab para graficar datos de campos eléctricos y/o magnéticos en magnitud y fase, provenientes de los datos obtenidos y publicados en la adquisición del canal de San Diego California E.U.A., y utilizados por Constable *et al.* (2009).

La función CSEMGRPH fue desarrollada para probar el software instalado, y con la ayuda de esta función se pudo comprobar que el comportamiento de las graficas obtenidas con el software de Scripps, Excel, y CSEMGRPH fue prácticamente el mismo; demostrando con esto que el software funciona adecuadamente.

Esta función carga los datos desde un archivo de texto que contiene información de la adquisición en cada posición de transmisión en su parte real e imaginaria, así como las frecuencias utilizadas.

Primero se cargan los datos desde el archivo de texto, y los almacena en una estructura de datos de tipo matriz de la siguiente forma: la primer columna para las frecuencias, la segunda para la posición de transmisión, la tercera es la parte real, en la cuarta se almacena la parte imaginaria, y por último en la quinta y sexta se dejan en blanco para almacenar la magnitud y la fase respectivamente.

Posteriormente se calcula para cada elemento de la tabla la magnitud y la fase, de la forma siguiente:

$$\text{Magnitud} = \sqrt{r^2 + i^2} \quad (\text{A1})$$

$$\text{Fase} = \tan \frac{i}{r} \quad (\text{A2})$$

Finalmente se realiza el graficado de cada magnitud contra su respectiva posición de transmisión y de igual forma se hace para la fase (Figura A.1). Adicionalmente se agregó un filtro de datos para las frecuencias para poder mostrar de forma independiente las gráficas.

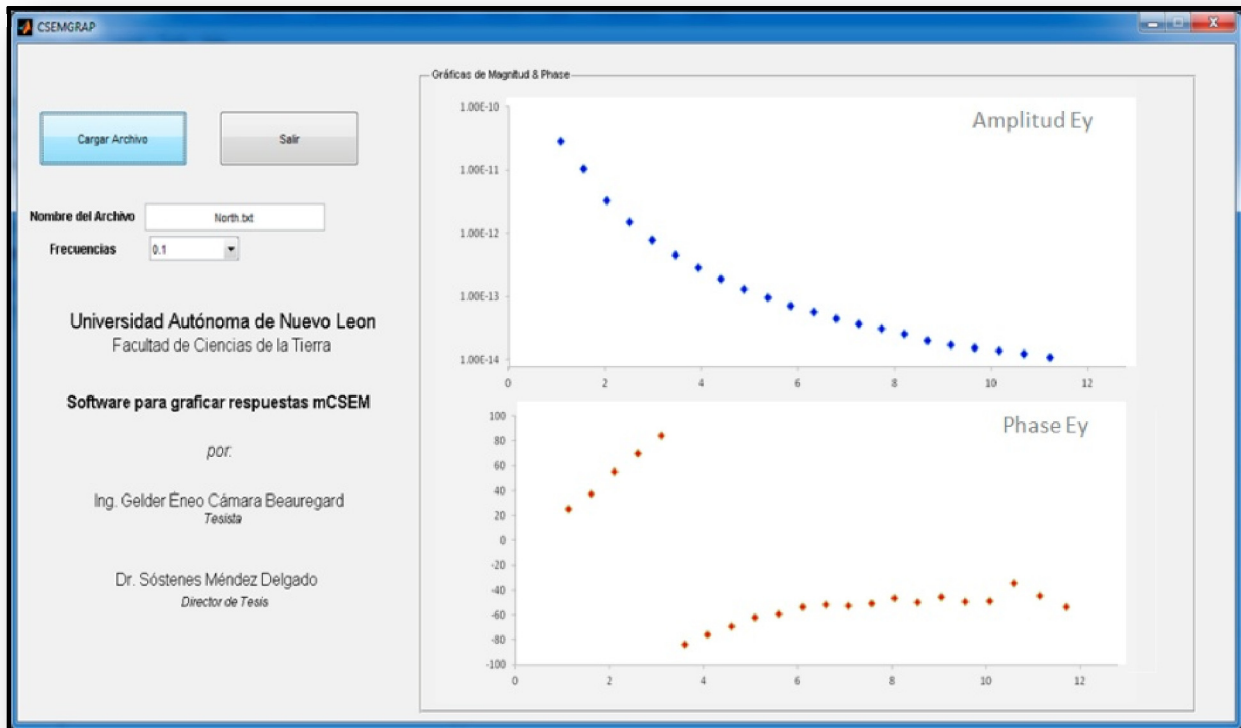


Fig. A.1. Resultados del cálculo de la magnitud y fase del campo eléctrico E_y de los datos de Constable *et al.* (2009), obtenidos con la función CSEMGRPH.

ANEXO B

Instalación de Occam1DInterpreter

A continuación se presentan las necesidades mínimas de hardware y software requeridos para la herramienta Occam1DInterpreter; así como la manera correcta de instalarla.

Requisitos de hardware:

- Computadora PC compatible
- Procesador Intel Core i3 o superior
- 2 Gb de Memoria RAM o más

Requisitos de Software:

- Sistema Operativo Microsoft Windows 7, 64 Bits o superior.
- Tener instalado el MCR ver. 7.5 o superior de Matlab, provisto con Occam1DInterpreter.
- Tener instalada la actualización de Java 10 o superior.

Instalación:

1. Copiar la carpeta que contiene la aplicación en el lugar donde desee trabajar.
2. Instalar el MCR dando clic derecho sobre el icono del MCRinstaller otorgándole permisos de administrador, el MCRintaller se encuentra en la carpeta principal de la aplicación.
3. Iniciar la aplicación dando doble click sobre el icono Occam1DInterpreter.

ANEXO C

Instrucciones de Operación y flujo de trabajo de Occam1DInterpreter

Instrucciones de operación:

Occam1DInterpreter para trabajar necesita alimentarse con dos archivos principales:

Archivo.fig: este es un tipo de archivo de Matlab que contiene los datos de una gráfica y que permitirá acceder a ellos para volver a construir la misma gráfica en cualquier otro momento; a diferencia de un archivo *.jpg que solo contiene una imagen en mapa de bits. Después de correr la inversión con OCCAM1DCSEM estos datos se grafican con la función PlotOccam1DCSEM hecha por el fabricante en lenguaje Matlab, entonces se guarda la gráfica resultante con la extensión *.fig; para después hacer uso de los datos contenidos en este archivo para buscar zonas de interés con la herramienta Occam1DInterpreter.

Runfile: este es un archivo de texto de formato compatible Dipole1D, en el se describen datos tales como número de capas, espesores, profundidades, resistividades, posiciones de transmisión y otros parámetros importantes para el modelado Directo y la inversión con OCCAM1DCSEM.

Flujo de Trabajo:

- 1.- Inicie la aplicación dando doble clic sobre el icono Occam1DInterpreter en la carpeta del Software (Figura C.1).
- 2.- Cargar el archivo de Inversión *.fig, obtenido con OCCAM1DCSEM dando clic en el botón cargar inversión e ir a la carpeta con el archivo fig (Figura C.2).
- 3.- Interpretar las zonas de interés dando clic en el botón “Interpretar Zonas de Interés” y seleccionar el archivo fig correspondiente al modelo que se va a trabajar (Figura C.3).

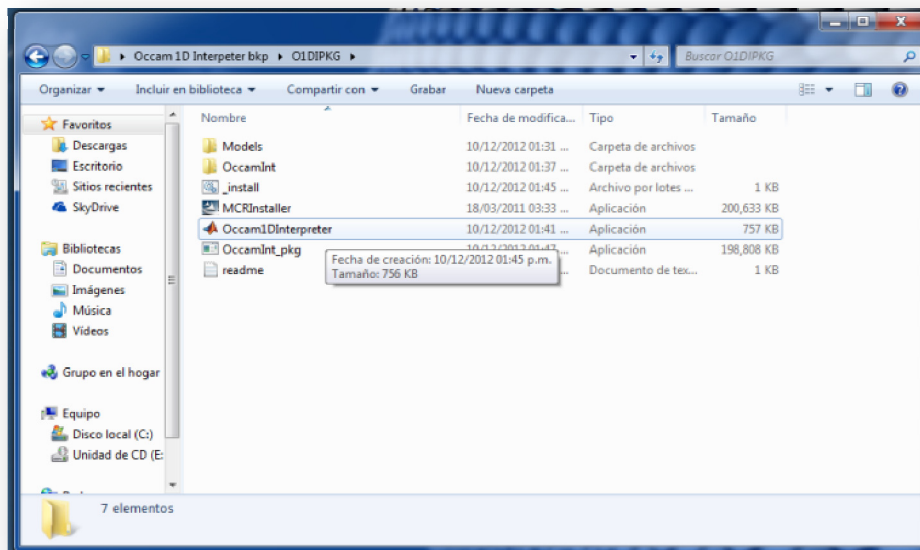


Fig. C.1. Ubicación del archivo autoejecutable con el que se inicia la aplicación Occam1DInterpreter.



Fig. C.2. Ventana Principal de la aplicación donde se cargarán los archivos necesarios y se interpretarán las zonas de interés.

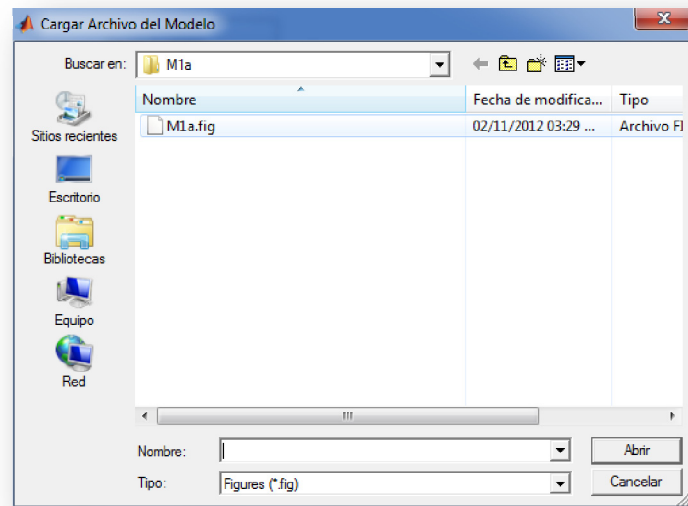


Fig. C.3. Ventana de carga del archivo que contiene los datos obtenidos con OCCAM1DCSEM.

En esta ventana se grafica el modelo final obtenido con OCCAM1DCSEM (línea negra) y el modelo 1D recalculado (línea roja), en esta ventana también aparecen los límites y la resistividad del área de interés (Figura C.4).

4.- Por último, se puede cargar el archivo inicial dando clic en el botón “Cargar Modelo Teórico” para comparar el resultado de la inversión con nuestro modelo teórico. Para ello seleccionamos el *RUNFILE* que es un archivo de texto de formato compatible con Dipole1D (Figura C.5).

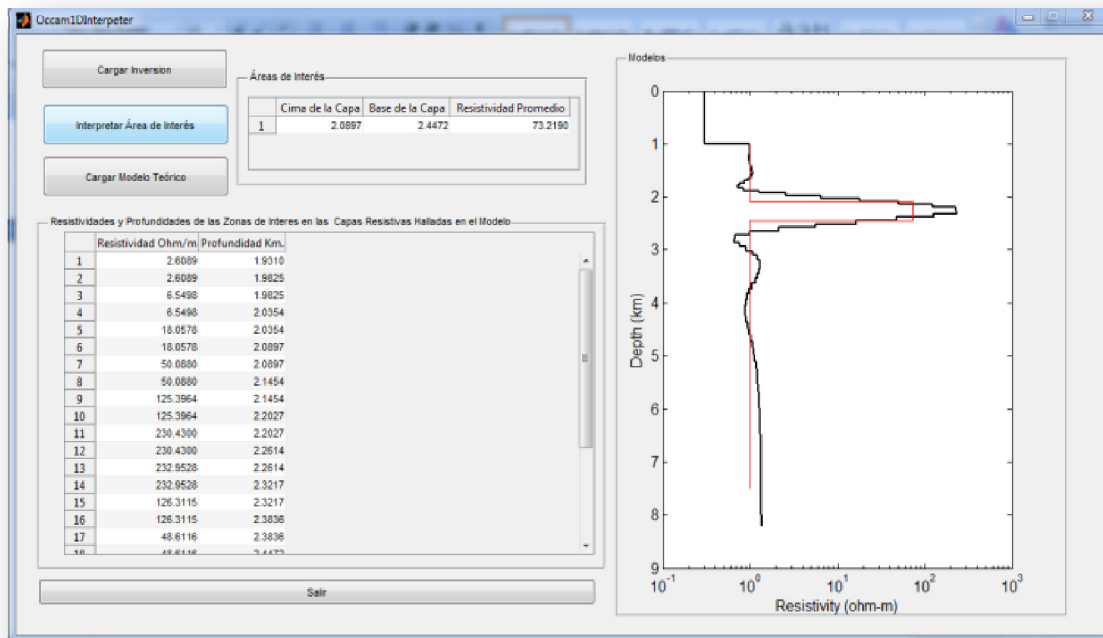


Fig. C.4. Ventana de interpretación que muestra el grafico de resistividad 1D con las zonas de alta resistividad (derecha en color rojo), los datos calculados para la capa resistiva (parte superior izquierda) y los datos de resistividad (recuadro inferior izquierdo).

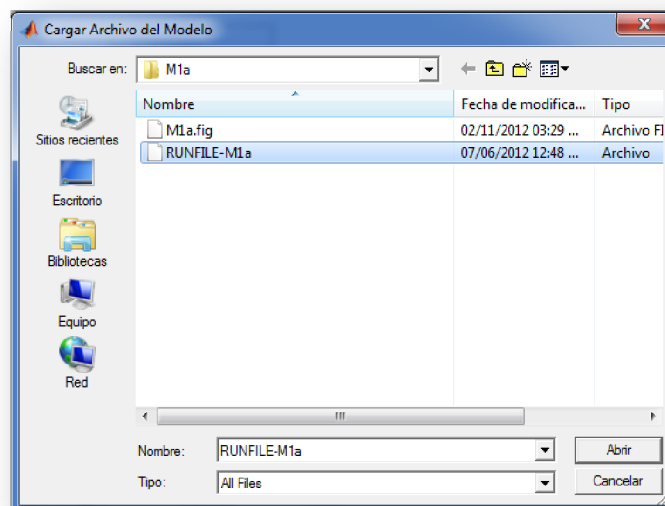


Fig. C.5. Ventana de carga del archivo “*RUNFILE*” en formato Dipole1D que contiene los datos del Modelo Teórico.

En el cuadro Área de Interés podemos observar el valor de resistividad promedio de la capa así como la profundidad del techo y base. En el cuadro de la esquina inferior izquierda las resistividades y profundidades de cada dato que conforma el área de interés. En el gráfico (Figura C.6) ahora aparecen: el modelo final obtenido con OCCAM1DCSEM (línea negra) y el modelo 1D recalculado (línea roja) y el modelo de partida (en línea azul).

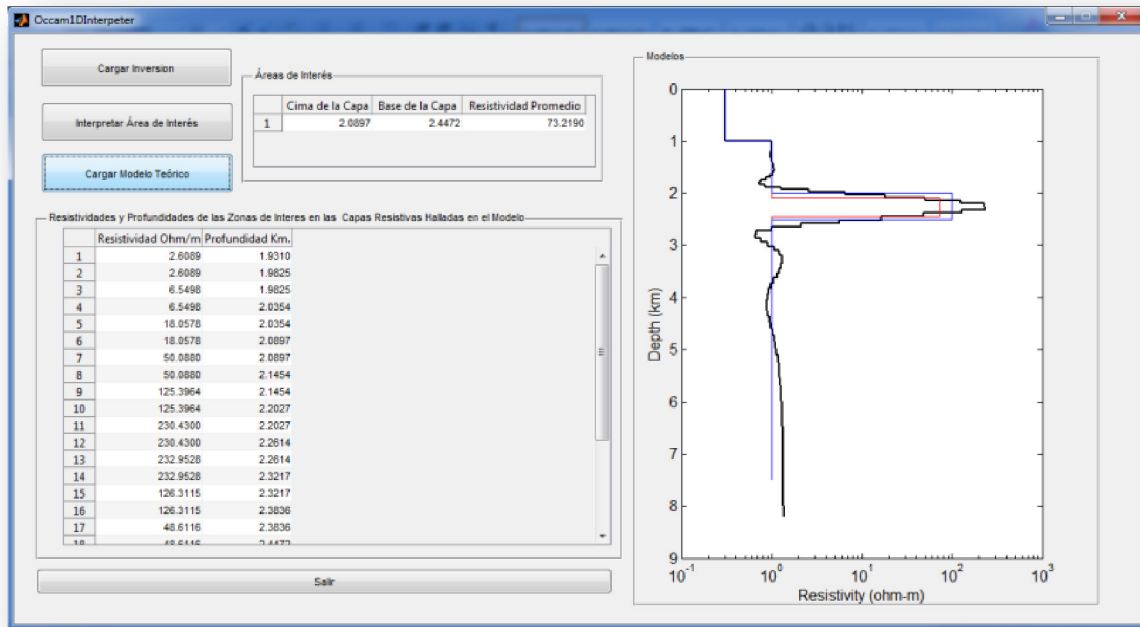


Fig. C6. Ventana de comparación entre el Modelo Teórico (en azul) y el obtenido en la inversión (en rojo).