



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA**

**CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL
MÉTODO MAGNETOTELÚRICO**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS, MENCIÓN
GEOFÍSICA**

JUAN ANDRÉS BASCUR TORREJÓN

PROFESOR GUÍA:

DIANA COMTE SELMAN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

DANIEL DÍAZ ALVARADO

EMILIO VERA SOMMER

SILVIA LOMBARDO

Este proyecto ha sido parcialmente financiado por FONDECYT 1130071.

SANTIAGO DE CHILE

2015

RESUMEN

En este trabajo se determina una metodología para corregir el corrimiento estático (SS) en el método magnetotelúrico (MT) que es adecuada para el modelamiento tridimensional (3D) de sus datos.

Para ello se investigaron tres métodos, el MT/TDEM, basado en la calibración con Transiente Electromagnético (TDEM), y los modelamientos del SS con representación de *Sasaki* y con la Matriz Completa de Distorsión (MCD), los cuales resuelven simultáneamente el SS y la distribución de resistividad eléctrica usando el proceso de inversión conjunta de datos MT. Estos métodos fueron estudiados a través del desarrollo teórico, simulaciones con modelos y usando datos MT de la falla de Pisagua (MT Pisagua) adquiridos en una campaña de terreno para este trabajo.

Para investigar los métodos de modelamiento del SS con *Sasaki* y MCD fue necesario implementarlos previamente. Para ello se desarrolló un algoritmo que fue aplicado al código de inversión 3D MT “WSINV3DMT” del autor Weerachai Siripunvaraporn.

Los resultados de este trabajo indican que los métodos MT/TDEM y modelamiento del SS con *Sasaki* sólo pueden corregir parcialmente el SS en datos MT provenientes de una distribución de resistividad 3D del subsuelo. En cambio, el modelamiento del SS con MCD permite una corrección del SS más completa, en donde se pueden modelar, a través del proceso de inversión 3D, adecuadamente todas las componentes de los datos MT (consiguiendo buen ajuste en Z_{xx} , Z_{xy} , Z_{yx} y Z_{yy}). Debido a lo anterior, la metodología determinada con este trabajo corresponde al modelamiento del SS usando MCD.

Adicionalmente, con el estudio MT Pisagua, adquirido en este trabajo, se obtiene un modelo 3D de resistividad eléctrica del subsuelo que permite investigar la falla de Pisagua. En el modelo se detecta una estructura de baja resistividad (entre 50 a 100 Ohm-m) que se extiende paralela al escarpe de la falla Pisagua (N65E°). Esta estructura indicaría la zona de mayor daño en el basamento (Intrusivo de Pisagua) asociada a la actividad de la falla. Considerando estos resultados, se infiere que la falla de Pisagua seguiría una geometría inversa, lo cual permite explicar la ubicación de la zona de daño detectada con MT y la morfología de terreno.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I:	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivo	3
1.3 Metodología	3
CAPÍTULO 2:	5
MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Método Magnetotelúrico.....	6
2.2 Dimensionalidad en datos magnetotelúricos.....	15
2.3 Distorsión en datos magnetotelúricos	22
2.4 Distorsión Galvánica	23
2.5 Método TDEM (Transiente electromagnético)	26
2.6 Corrección del Corrimiento Estático en MT usando el método TDEM (MT/TDEM)	32
2.7 Limitaciones del método MT/TDEM	35
2.8 Observabilidad del Corrimiento Estático con MT/TDEM	36
2.9 Efectos que Producen Distorsión en los Datos TDEM.....	40
2.10 Representación del Corrimiento Estático del MT/TDEM.....	44
2.11 Aplicación de Método MT/TDEM en conjunto con la Descomposición del Tensor de Impedancias.....	48
CAPÍTULO 3:	50
MODELAMIENTO DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO	50
3.1 Modelamiento del corrimiento estático.....	51
3.2 Inversión 3D en WSINV3DMT.....	54
3.3 Inversión 3D en WSINV3DMT Modelando el Corrimiento Estático	58
3.4 Representaciones del Corrimiento Estático.....	61
3.5 Regularización del Modelamiento del Corrimiento Estático.	64

3.6 Ejemplo I: Aplicación del modelamiento del corrimiento estático (SS) en modelo de capas.....	71
3.7 Ejemplo II: Aplicación del modelamiento del corrimiento estático (SS) en modelo 2D con falla.	81
CAPÍTULO 4:	93
ESTUDIO MT y TDEM EN EL SECTOR DE PISAGUA	93
4.1 Ubicación	95
4.2 Marco Geológico.....	96
4.3 La Falla de Pisagua	98
4.4 Levantamiento MT/TDEM	100
4.5 Procesamiento	102
4.7 Distorsión en los datos MT Pisagua.....	105
4.6 Dimensionalidad en los datos MT	109
4.8 Resultados datos MT y TDEM	115
4.9 Inversión 3D sin efecto SS.....	119
4.10 Inversión 3D con calibración TDEM (MT/TDEM)	123
4.11 Inversión 3D con modelamiento del efecto SS (Sasaki)	130
4.12 Inversión 3D con modelamiento del efecto SS (Matriz Completa de Distorsión).....	134
4.13 Modelamiento del corrimiento estático.....	138
4.14 Análisis de los Resultados.	143
4.15 Interpretación del Modelo de Resistividad 3D.....	149
CAPÍTULO 5:	166
CONCLUSIONES.....	166
BIBLIOGRAFÍA.....	168
ANEXO I:	
RESPUESTAS MODELADAS DE MODELO INVERTIDO CON WSINV3DMT SIN CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO	
ANEXO II:	
RESPUESTAS MODELADAS DEL MODELO INVERTIDO CON WSINV3DMT USANDO MT/ TDEM	

ANEXO III:

RESPUESTAS MODELADAS DE MODELO INVERTIDO CON WSINV3DMT CON CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO (SASAKI, 2004)

ANEXO IV:

RESPUESTAS MODELADAS DE MODELO INVERTIDO CON WSINV3DMT CON CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO (MATRIZ COMPLETA DE DISTORSIÓN)

ANEXO V:

FORMULACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO DE INVERSIÓN MT EN TERMINOS DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO

ANEXO VI:

RESISTIVIDADES APARENTES MT DEL LEVANTAMIENTO MT/TDEM PISAGUA - 2014

ANEXO VII:

SONDAJES TDEM MEDIDOS EN EL LEVANTAMIENTO MT/TDEM PISAGUA - 2014

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Estaciones de magnetotelúrica.	7
Figura 2.2 Resistividad aparente y fase de una estación de magnetotelúrica (Pisagua, 2014).....	11
Figura 2.3 Modelos de resistividad eléctrica del subsuelo obtenidos a través de la técnica de inversión de datos MT.....	14
Figura 2.4 Dimensionalidad en la distribución de resistividad eléctrica en el subsuelo.....	15
Figura 2.5 Configuraciones del loop receptor para la adquisición de TDEM.....	27
Figura 2.6 Propagación de los campo EM en función del tiempo en sondajes TDEM.....	28
Figura 2.7 Curva de resistividad aparente TDEM (izquierda) y modelo 1D interpretado (derecha).....	31
Figura 2.8 Corrección de corrimiento estático MT con TDEM. A – Datos MT medidos y respuesta de referencia de sondaje TDEM, B- datos MT con corrimiento estático corregido.....	33
Figura 2.9 Campos EM asociados a las estaciones de MT y TDEM con un cambio lateral de la resistividad del subsuelo.....	37
Figura 2.10 Resultados del modelamiento 1D de sondajes TDEM sobre un ambiente de falla.....	39
Figura 2.12 Ejemplo de respuestas negativas adquirida con el método TD (<i>Flis</i> , 1987).....	41
Figura 3.1 Factores de corrimiento estático (SShift) utilizados para distorsionar las impedancias MT y factores estimados modelando el corrimiento estático.....	74
Figura 3.2 Mapa en planta con las ubicaciones de estaciones MT simuladas (triángulo negro) en la superficie del modelo.....	76
Figura 3.7 Resistividades Aparentes XY (rojo) y YX (azul) de las estación E17. Con línea continua se presentan los datos simulados con corrimiento estático....	80
Figura 3.8 Factores de SS usados para distorsionar los datos y factores estimados con modelamiento del SS.....	85
Figura 3.9 Vistas en planta del modelo de resistividad original a 100m, 1000m y 5000m de profundidad.....	86
Figura 3.10 Vistas en planta del modelo de resistividad invertido sin corregir el SS a 100m, 1000m y 5000m de profundidad.....	87

Figura 3.11 Vistas en planta del modelo de resistividad invertido usando modelamiento del SS (Sasaki).	88
Figura 3.12 Vistas en planta del modelo de resistividad invertido usando modelamiento del SS (Matriz Completa de Distorsión).	89
Figura 3.13 Perfil L3 del modelo de resistividades, A.- subsuelo original B.- inversión simple (sin SS)	90
Figura 3.14 Perfil L3 del modelo de resistividades, A.- inversión con SS (Sasaki) B.- inversión con SS (Matriz Completa de Distorsión)	90
Figura 3.15 Resistividades Aparentes y fases calculadas en la estación E8.	91
Figura 3.16 Resistividades Aparentes y fases calculadas en la estación E13.	91
Figura 3.17 Resistividades Aparentes y fases calculadas en la estación E18.	92
Figura 3.18 Resistividades Aparentes y fases calculadas en la estación E21.	92
Figura 4.1 Mapa del Sector de Estudiado con el Levantamiento MT (cuadro negro). Estaciones MT en círculos rojos y falla de Pisagua en línea gris segmentada.	95
Figura 4.2 Mapa Geológico de Pisagua (Valenzuela, 2015).	97
Figura 4.4 Instalación de estaciones MT - Levantamiento MT/TDEM Pisagua. ...	101
Figura 4.5 Adquisición de estaciones TDEM - Levantamiento MT/TDEM Pisagua.	101
Figura 4.7 Resistividades aparentes (Rho_{xy} y Rho_{yx}) y curvas de fase (Fase XY y Fase YX) de la Estación P02 del MT Pisagua.	107
Figura 4.8 Resistividades aparentes (Rho_{xy} y Rho_{yx}) y curvas de fase (Fase XY y Fase YX) de la Estación P09 del MT Pisagua.	108
Figura 4.9 Serie de Tiempo del Campo eléctrico Norte registrada en la Estación P17 a las 10:05:00 del 01/07/14.	108
Figura 4.10 Histograma con las clasificaciones del análisis WAL para los datos del levantamiento MT Pisagua.	110
Figura 4.13 Perfil P1 (Figura 4.1) de Resistividad Aparente y Fase construida con los datos de levantamiento MT Pisagua.	116
Figura 4.14 Perfil P1 (Figura 4.1) de Resistividad Aparente y Resistividad Invertida 1D de Pisagua TDEM.	118
Figura 4.15 Vistas en planta del modelo de resistividades a 500 y 0 m.s.n.m invertidas con WSINV3DMT sin SS	120

Figura 4.16 Vistas en planta del modelo de resistividades a -500 y -2000 m.s.n.m invertidas con WSINV3DMT sin SS	120
Figura 4.17 Vistas en planta del modelo de resistividades a -6000 m.s.n.m y a 10000 m.s.n.m invertidas con WSINV3DMT sin SS.....	121
Figura 4.18 Sección vertical del perfil P1 (figura 4.1) del modelo de resistividades invertidas con WSINV3DMT sin SS	122
Figura 4.19 Factores de corrimiento estático calculados usando método MT/TDEM para el levantamiento MT Pisagua.....	123
Figura 4.20 Corrección del Corrimiento Estático usando MT/TDEM en las curvas de resistividad aparente de las estaciones P1 a P12.....	124
Figura 4.21 Corrección del Corrimiento Estático usando MT/TDEM en las curvas de resistividad aparente de las estaciones P13 a P21.....	125
Figura 4.22 Vistas en planta del modelo de resistividades a 500 y 0 m.s.n.m. Invertidas con WSINV3DMT usando datos calibrados con TDEM.....	127
Figura 4.23 Vistas en planta del modelo de resistividad a -500 y -6000 m.s.n.m. Invertidas con WSINV3DMT usando datos calibrados con TDEM.....	127
Figura 4.24 Vistas en planta del modelo de resistividades a -6000 y 10000 m.s.n.m Invertidas con WSINV3DMT usando datos calibrados con TDEM.....	128
Figura 4.25 Sección vertical del perfil P1 del modelo de resistividades invertido con WSINV3DMT usando datos calibrados con TDEM	129
Figura 4.26 Vistas en planta del modelo de resistividades a 500 y 0 m.s.n.m. invertidas con WSINV3DMT con SS (Sasaki)	131
Figura 4.27 Vistas en planta del modelo de resistividades a -500 y -2000 m.s.n.m. invertidas con WSINV3DMT con SS (Sasaki)	131
Figura 4.28 Vistas en planta del modelo de resistividades a -6000 y -10000 m.s.n.m. invertidas con WSINV3DMT con SS (Sasaki)	132
Figura 4.29 Sección vertical del perfil L1 del modelo de resistividades invertido con WSINV3DMT con SS (Sasaki)	133
Figura 4.30 Vistas en planta del modelo de resistividades a 500 y 0 m.s.n.m. invertidas con WSINV3DMT con SS (Matriz Completa de Distorsión).....	135
Figura 4.31 Vistas en planta del modelo de resistividades a -500 y -2000 m.s.n.m invertidas con WSINV3DMT con SS (Matriz Completa de Distorsión).....	135
Figura 4.33: Sección vertical del perfil P1 del modelo de resistividades invertido con WSINV3DMT con SS (Matriz Completa de Distorsión)	137

Figura 4.34 Factores de corrimiento estático (SS) estimados usando los métodos MT/TDEM (azul) y modelamiento del SS usando Matriz Completa de Distorsión (rojo).....	141
Figura 4.35 Factores de corrimiento estático (SS) estimados usando los métodos MT/TDEM (azul) y modelamiento de SS con <i>Sasaki</i> (rojo)..	141
Figura 4.36 Factores del corrimiento estático diagonales (S_{xx} y S_{yy}) obtenidos usando modelamiento de SS con la Matriz Completa de Distorsión.....	142
Figura 4.37 Factores del corrimiento estático diagonales (S_{xx} y S_{yy}) obtenidos usando modelamiento de SS con <i>Sasaki</i>	142
Figura 4.38 Pseudosecciones con las respuestas antidiagonales (Z_{xy} y Z_{yx}) calculadas (resistividad aparente y fase) para las estaciones del estudio MT	146
Figura 4.39 Pseudosecciones con las respuestas diagonales (Z_{xx} y Z_{yy}) calculadas (resistividad aparente y fase) para las estaciones del estudio MT Pisagua con los modelos 3d de resistividad invertidos.....	147
Figura 4.40 Comparación de sección vertical P1 (Figura 4.1) de modelos de resistividad invertidos con (MT/TDEM, <i>Sasaki</i> , Matriz Completa de Distorsión) y sin remover el corrimiento estático (Inv. Normal).....	148
Tabla 4.2 Coordenadas de los perfiles presentados en las Figuras 4.28 a 4.32 (UTM Zona 19, WGS84).	152
Figura 4.41 Trazado superficial de las secciones verticales del modelo de resistividades presentadas en las Figuras 4.38 a 4.43.....	153
Figura 4.42 Perfil N1 - Sección Vertical de Resistividad Eléctrica.....	154
Figura 4.43 Perfil N2 - Sección Vertical de Resistividad Eléctrica.....	154
Figura 4.44 Perfil N3 - Sección Vertical de Resistividad Eléctrica.....	154
Figura 4.45 Perfil N4 - Sección Vertical de Resistividad Eléctrica.....	155
Figura 4.46 Perfil N5 - Sección Vertical de Resistividad Eléctrica.....	155
Figura 4.47 Perfil N6 - Sección Vertical de Resistividad Eléctrica.....	155
Figura 4.48 Secciones en planta de resistividad eléctrica del estudio MT Pisagua.	156
Figura 4.49 Perfil Geológico N3 Interpretado sobre Resistividad Eléctrica.	158
Figura 4.50 Análisis de Sensibilidad para determinar extensión en profundidad de FCZ (<i>Fault conductor zone</i>).....	161
Figura 4.51 Deformación elástica generada por el deslizamiento de Fallas que reproducen el escarpe de Pisagua.....	165

CAPÍTULO I:

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El método magnetotelúrico (MT) es una técnica geofísica que permite determinar la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo. Es utilizado en la actualidad en una gran cantidad de aplicaciones comerciales, debido principalmente a que permite resolver a profundidades del orden de kilómetros, lo que es difícil de obtener con otros métodos geofísicos electromagnéticos.

En el método MT, se instalan estaciones sobre la superficie las que registran los campos eléctrico y magnético terrestres. La relación entre ambos campos, en el dominio de la frecuencia se denomina “tensor de impedancia”, el cual es determinado principalmente por la distribución de resistividad eléctrica en el subsuelo. Posteriormente, a través de una inversión formal, se generan modelos que reconstruyen dicha distribución de resistividad en el espacio. La inversión formal es un proceso iterativo que busca encontrar el modelo de resistividades del subsuelo cuyas respuestas sean similares o iguales a las mediciones observadas (tensor de impedancia). Los primeros métodos de inversión (1D) sólo podían reconstruir modelos en que la resistividad varía con la profundidad, luego hubo inversiones 2D que permitían que ésta variara en dos direcciones y, por último, recientemente se han desarrollado códigos que realizan inversiones 3D y que pueden construir modelos tridimensionales (*i.e. Avdeeva 2008, Siripunvaraporn 2005, Sasaki 2004, Farquharson 2002, Mackie 1994, etc.*).

En cada estación MT, el campo eléctrico medido puede distorsionarse ante la presencia de heterogeneidades locales de la resistividad eléctrica. Este efecto altera los valores observados del tensor de impedancia, tal que si no son considerados en el procesamiento y/o interpretación de los datos, pueden conducir a una inadecuada estimación de la resistividad eléctrica y/o la invención de falsas estructuras en el subsuelo. Este efecto en los datos se denomina principalmente “distorsión galvánica” y en su forma más simple, cuando no depende de la frecuencia, se llama “corrimiento estático” (*static shift*).

Durante los últimos años se han desarrollado múltiples métodos para reconocer, analizar y eliminar estas distorsiones (Groom & Bailey 1989, Chave & Smith 1994, Caldwell 2004, Pellegrini & Hohmann 1990), pero la mayoría de ellos asumen que la resistividad eléctrica se distribuye con algún grado de simetría y por lo tanto sólo se podrían aplicar en métodos de inversión 1D o 2D (Soyer, 2008). Debido a que cada día es más frecuente la necesidad de inversiones 3D, existen varios enfoques recientes en desarrollo que buscan resolver el problema del corrimiento estático considerando una distribución tridimensional de la resistividad del subsuelo (*Miensopust et al. 2011, Avdeeva et al. 2011, Sasaki 2004, Tani 2012*)

Uno de los enfoques más interesantes a la fecha, consiste en incluir la corrección del corrimiento estático dentro del proceso de inversión 3D (modelamiento del corrimiento estático). Esto consiste que en cada iteración del proceso de inversión se estimen tanto los valores de resistividad del modelo como los del corrimiento estático buscando minimizar la diferencia entre los datos observados y los modelados y, a la vez, que el modelo obtenido sea lo más simple posible (mínima estructura).

Alternativamente en las aplicaciones comerciales del método magnetotelúrico (MT), por al menos en los últimos 20 años, se han utilizado tradicionalmente las mediciones del método TDEM (transiente electromagnético en dominio del tiempo) para calibrar los datos MT y remover el corrimiento estático (Pellegrin & Hohmman 1990, Watt et al. 2013, Cumming & Mackie 2010).

Estas dos últimas metodologías (modelamiento del corrimiento estático y el MT/TDEM) son ampliamente utilizadas para corregir el corrimiento estático cuando se utiliza un enfoque 3D en el procesamiento de los datos MT. Ambos métodos tienen sus ventajas y desventajas, lo que ha generado un amplio debate sobre cuál es la metodología correcta.

El método MT/TDEM ha demostrado ser un método efectivo y sencillo para medir (no estimar) la corrección de estática, tal que hay un sin número de perforaciones que abalan sus resultados (*Ursua 2002, Knútur 2010, Irabaruta 2010, etc.*). Sin embargo, involucra un costo mayor ya que requiere de mediciones adicionales (TDEM). Además, las mediciones de TDEM sufren distorsión en ambientes con topografía abrupta (además de los datos del MT) y/o con alta resistividad, por lo que en dichas situaciones la corrección del “corrimiento estático” puede introducir errores en los datos y en la inversión 3D (*Watts 2013, Cumming 2000, Sover 2008*).

El modelamiento del corrimiento estático claramente es de menor costo en comparación con el MT/TDEM, ya que no requiere de mediciones adicionales. Sin embargo, a pesar que existen varias publicaciones mostrando resultados de la técnica (*Miensopust et al. 2013, Miensopust et al. 2011, Avdeeva et al. 2011, Sasaki 2004*), a la fecha no hay

códigos disponibles comercialmente que la implementen y sólo hay versiones de código propietarios (*Schlumberger*).

Con este trabajo se busca investigar ambas técnicas de corrección de estática para desarrollar una metodología que permita corregir este efecto en el ambiente chileno. Esto debido a que en Chile se esperan encontrar sectores donde el corrimiento esté presente, ya que su territorio se caracteriza por tener sectores tanto con topografía muy abrupta y/o con alto contraste, de resistividad eléctrica (altos y bajos valores) en el subsuelo.

1.2 Objetivo

El objetivo general de este trabajo es determinar una metodología para la corrección del corrimiento estático del método MT que sea adecuada para el modelamiento tridimensional de los datos. Para ello se restringirá el alcance del trabajo a los problemas de corrimiento estático que pudieran ser observables en el territorio chileno debidos a características propias de geología local y/o topografía del terreno. Se utilizará como caso de estudio la zona costera entorno a Pisagua, a través del proyecto FONDECYT 1130071.

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- Implementación y validación del método de modelamiento de la corrección estática a través de un programa computacional.
- Determinar las ventajas y limitaciones que tienen los métodos de MT/TDEM y el modelamiento de corrección estática.
- Determinar procedimiento para la corrección del corrimiento estático basada en las técnicas de MT/TDEM y/o modelamiento de la corrección estática.
- Evaluar metodología propuesta realizando modelamiento 3D de datos de un levantamiento MT realizado en territorio chileno.

1.3 Metodología

Inicialmente se desarrollará el marco teórico de este trabajo describiendo el método MT, las distorsiones galvánicas y los métodos para corrección del corrimiento estático.

Se documentará como aplicar la corrección estática del MT/TDEM en función de la dimensionalidad de los datos MT (1D, 2D, 2D/3D, 3D, etc.) y como utilizar la descomposición del tensor de impedancia en conjunto con este método. A partir de lo anterior se determinarán las condiciones requeridas por el método MT/TDEM para que sus correcciones de corrimiento estático sean válidas.

Para permitir investigar la técnica del modelamiento del corrimiento estático, primero se implementará en el código WSINV3DMT (*Siripunvaraporn* 2005) usado para inversiones 3D de datos de magnetotelúrica. Para esto se cuenta con una licencia comercial. La modificación del código se hará continuando el trabajo de *Sasaki* (2004). Para validar los resultados se realizarán inversiones sobre datos simulados a partir de modelos sencillos y conocidos por la comunidad MT.

Se evaluarán los resultados de las etapas anteriores aplicándolos al modelamiento de datos de un levantamiento real de MT/TDEM. Para esto se realizarán inversiones 3D considerando las metodologías desarrolladas en este trabajo y las metodologías tradicionales para corregir el corrimiento estático. Se analizarán e interpretarán los resultados, para luego concluir cual de las metodologías propuestas es adecuada para corregir el corrimiento estático en inversiones 3D de MT.

CAPÍTULO 2:

MARCO TEÓRICO

A continuación se describen los principales conceptos sobre los cuales se desarrolla el presente trabajo.

Inicialmente se introduce el método magnetotelúrico (MT) describiendo sus principales aplicaciones, adquisición, teoría básica e interpretación de sus resultados. Existe extensa bibliografía que puede ser referida para complementar esta introducción de conceptos, la cual se detalla en la bibliografía.

Se presentan los distintos métodos disponibles para analizar la dimensionalidad de los datos MT, los cuales permiten investigar la complejidad con que se distribuye la resistividad eléctrica en el subsuelo (1D, 2D y/o 3D) y seleccionar cual técnica es más adecuada para interpretarlos y corregir el corrimiento estático en ellos.

Posteriormente, se describen los desarrollos que explican la distorsión galvánica y el corrimiento estático en los datos MT sobre los cuales este trabajo busca métodos de corrección aplicados a la inversión 3D.

Se realiza una breve descripción del método TDEM, para luego presentar como éste es aplicado para corregir el corrimiento estático en datos MT (MT/TDEM). Se analizan cuáles son sus limitaciones en función de la dimensionalidad de los datos MT, explicitando las condiciones que son necesarias para su aplicación. Simultáneamente, se investiga como puede ser usado el MT/TDEM en conjunto con las técnicas de descomposición del tensor de impedancia MT.

2.1 Método Magnetotelúrico

El método magnetotelúrico (MT) es una técnica geofísica pasiva que permite obtener la distribución de resistividad eléctrica del subsuelo. Se destaca por examinar desde algunos metros bajo la superficie hasta cientos de kilómetros de profundidad. Sus aplicaciones varían desde estudios regionales para investigar la corteza y el manto terrestre hasta aplicaciones comerciales orientadas a la exploración en las industrias de geotermia, aguas subterráneas, exploración minera, petróleo y/o gas.

En el método MT se distribuyen estaciones con instrumentos geofísicos sobre la superficie terrestre, las que registran el campo magnético natural y el campo eléctrico por períodos prolongados de tiempo (~días). Los campos electromagnéticos (EM) en la superficie son modificados por la distribución de resistividad eléctrica del subsuelo, por lo que es posible determinar esta última observando la relación entre los campos EM.

Las estaciones MT suelen consistir en un equipo de adquisición autónomo alimentado con baterías que registra las mediciones de sensores del campo eléctrico (V/m) y campo magnético (Tesla). En la figura 2.1 se muestra un esquema con cuatro estaciones de magnetotelúrica instaladas sobre la superficie, en las cuales el equipo de adquisición se representa por una caja gris y alrededor de él se encuentran los sensores de campo magnético y eléctrico.

Para medir el campo eléctrico, asociado a las corrientes telúricas, se utilizan electrodos no-polarizables que entran en contacto con el suelo y que miden la diferencia de potencial (voltaje) en dipolos cuyas distancias pueden variar entre 10m y 500m. El campo eléctrico se estima dividiendo la diferencia de potencial medida a lo largo del dipolo. Tradicionalmente se instalan dos dipolos que miden el campo eléctrico en direcciones perpendiculares, las cuales habitualmente coinciden con el Norte y el Este. En la figura 2.1 se muestran los dipolos instalados en cada estación MT, los cuales están formados por un cable negro que conecta los electrodos no polarizables instalados en cada punto cardinal (N, S, E, W) con el equipo de adquisición.

El campo magnético es medido en sus tres componentes (Norte, Este y Vertical) utilizando tres bobinas de inducción y/o sensores de jaula de flujo (flux gate). Las bobinas de inducción se caracterizan por poder detectar el campo magnético en un amplio rango de períodos (10^{-5} seg – 50000 seg.), sin embargo su sensibilidad es inversamente al período y es pequeña en períodos extremadamente altos. En dicha situación, los sensores de jaula de flujo son un buen complemento, ya que están diseñados para medir el campo magnético constante o con períodos altos. En la figura 2.1 se muestran tres bobinas de inducción (cilindros rojos) conectadas al equipo de adquisición de cada estación MT.

El rango de períodos utilizado para medir los campos EM en cada estación se diseña en función del objetivo del estudio MT, sin embargo un rango tradicional suele detectar variaciones entre 10^{-4} seg hasta 10^3 seg.

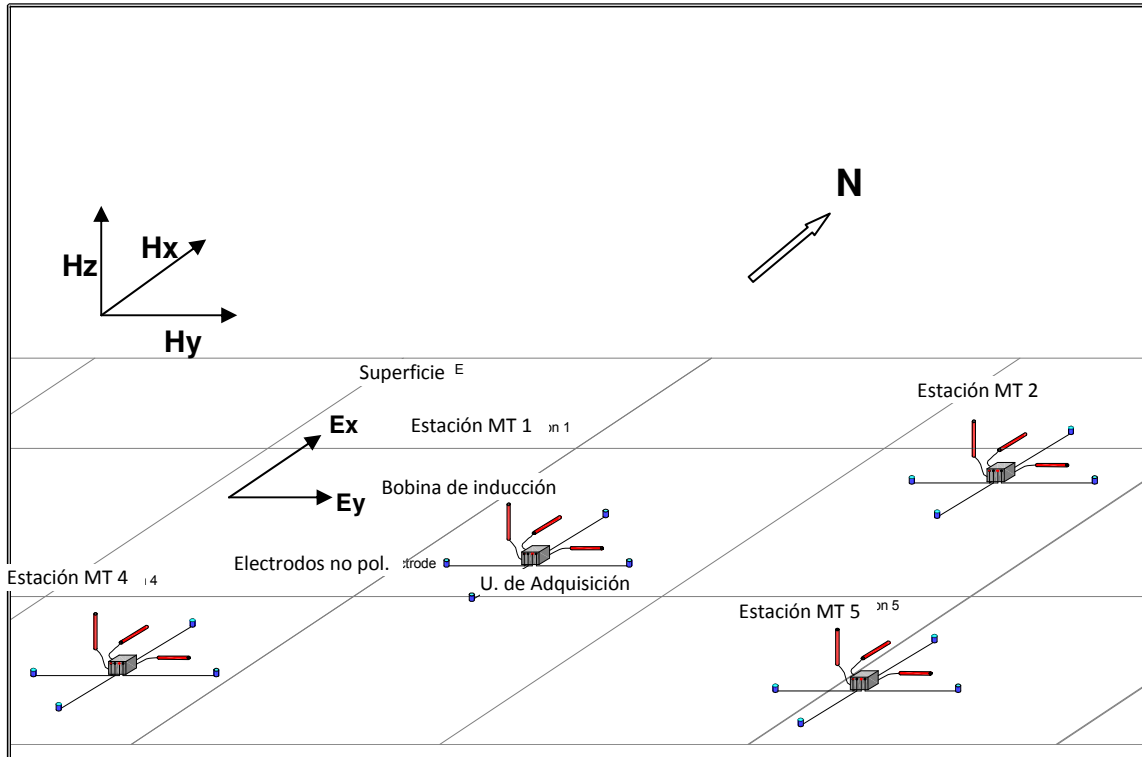


Figura 2.1 Estaciones de magnetotelúrica.

Dentro de este rango de frecuencias y en ausencia de fuentes EM externas, la inducción debido al campo magnético y sus corrientes telúricas asociadas son el principal fenómeno que describe la propagación de los campos EM naturales en el subsuelo. En este caso, las variaciones que existen del campo magnético terrestre inducen diferencias de potencial (Ley de Faraday, 2.1) en el subsuelo, las cuales producen corrientes telúricas cuya intensidad es determinada por la resistividad o conductividad eléctrica (Ley de Ohm). Estas corrientes telúricas también producen un campo magnético (Ley de Ampere, 2.2) secundario que se adiciona al campo magnético terrestre original.

$$\nabla \times E = -j\omega H \quad (2.1)$$

$$\nabla \times H = J + j\omega D \quad (2.2)$$

E : Campo eléctrico.

H : Campo magnético (con dependencia temporal de $\exp(j\omega t)$).

$j\omega D$: Corrientes de desplazamiento.

μ : Permeabilidad magnética en el vacío.

ω : Frecuencia angular.

A través de las ecuaciones de Maxwell se puede derivar la ecuación de difusión que permite describir el fenómeno anterior (2.3). Para esto se utiliza la ley de Ohm, se asume que la permeabilidad magnética es constante en el subsuelo y que no hay fuentes EM externas a los campos naturales terrestres (Por ej.: líneas de distribución eléctrica). Además, se desprecian las corrientes de desplazamiento ($j\omega D$), debido a que en el rango de frecuencias considerado, ellas son muy pequeñas con respecto a las corrientes telúricas.

$$\nabla_x \nabla_x E - j\omega \sigma \mu E = 0 \quad (2.3)$$

El campo magnético y el campo eléctrico horizontales medidos en una estación de magnetotelúrica se relacionan en el dominio de la frecuencia a través del tensor de impedancias indicado en (2.4). Éste se determina principalmente por la distribución de resistividad eléctrica del subsuelo, lo cual permite estudiarla a través de este término. Para calcular el tensor de impedancias (Z_{ij}) se realiza una operación de deconvolución entre las componentes del campo eléctrico y el campo magnético registradas en una estación MT. Existen muchas variantes de cómo llevar a cabo este proceso, pero la mayoría se basa en una regresión de mínimos cuadrados que busca minimizar la diferencia entre el campo eléctrico medido (E) y el estimado del producto del tensor de impedancias con el campo magnético (B). Adicionalmente, al proceso de mínimos cuadrados se suele agregar algún criterio robusto para rechazar datos que se alejen de la tendencia general de la muestra (*outliers*). En Jones & Chave (2013) se puede encontrar una descripción de los métodos de regresión utilizados actualmente.

$$\begin{bmatrix} E_x(f) \\ E_y(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx}(f) & Z_{xy}(f) \\ Z_{yx}(f) & Z_{yy}(f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x(f) \\ H_y(f) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

E : Campo eléctrico.
 H : Campo magnético.
 Z_{ij} : Tensor de impedancias.
 f : Frecuencia.

Además del tensor de impedancias, en una estación de magnetotelúrica también se puede determinar la función de transferencia vertical y/o *Tipper*. Ésta relaciona la componente vertical del campo magnético con sus componentes horizontales (2.5). Esta función guarda relación con el gradiente de la distribución de resistividad eléctrica en el subsuelo.

$$H_z(f) = [T_x(f)T_y(f)] \begin{bmatrix} H_x(f) \\ H_y(f) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

La relación entre el tensor de impedancia y/o el *Tipper* con la resistividad del subsuelo es compleja y sólo existen expresiones analíticas cuando la distribución de resistividad del subsuelo es simple (1D) y en la mayoría de los casos es necesario recurrir a cálculos numéricos.

Cuando la distribución de resistividad eléctrica en el subsuelo corresponde a un semiespacio con resistividad constante (el caso más simple), el tensor de impedancia corresponde al indicado en la ecuación 2.6. En este caso, los elementos de la diagonal del tensor son nulos y los de la antidiagonal son iguales en magnitud pero con signo opuesto. Cabe notar que la función de *Tipper* en esta situación es nula, porque no existe gradiente de resistividad eléctrica (resistividad constante).

$$\begin{bmatrix} E_x(f) \\ E_y(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z_o(f) \\ -Z_o(f) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x(f) \\ H_y(f) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$Z_o(f) = \sqrt{2 \rho \mu \omega} e^{\gamma z}$$

$$\gamma(f) = (-1 + j) \sqrt{\frac{\mu \omega}{2\rho}}$$

ρ : Resistividad eléctrica del subsuelo.
 ω : Frecuencia angular ($2\pi f$).
 μ : Permeabilidad magnética.
 z : Profundidad.
 γ : Constante de propagación.

A partir de 2.6 se puede obtener la expresión 2.7, que permite estimar un valor de resistividad del subsuelo para los valores del tensor de impedancia. Esta expresión sólo es correcta cuando la distribución de resistividad eléctrica del subsuelo es homogénea, por lo que se trata de una aproximación cuando lo anterior no se cumple y se suele llamar “resistividad aparente”. A partir de estos valores de resistividad aparente se pueden construir curvas en función de la frecuencia para cada elemento del tensor, permitiendo escalarlos a una magnitud física que se pueda interpretar (resistividad). Las curvas de resistividad aparente también se acompañan por curvas fase que corresponden al ángulo en el plano complejo de los elementos del tensor (2.8). A pesar de haber algunas otras representaciones (*Caldwell 2004*), es habitual que el resultado medido en cada estación MT se presente como curvas de resistividad aparente y fase para cada elemento del tensor de impedancias.

$$\rho_{ap_{ij}}(f) = \frac{\|Z_{ij}\|}{2\mu\omega} \quad (2.7)$$

$$\phi_{ij}(f) = \text{atan} \left(\frac{Z_{imag}}{Z_{real}} \right) \quad (2.8)$$

$\rho_{ap_{ij}}$: Resistividad aparente del elemento ij del tensor de impedancia.

ϕ_{ij} : Fase del elemento ij del tensor de impedancia.

En la figura 2.2 se presenta un ejemplo con las resistividades aparentes y las curvas de fase calculadas del tensor de impedancias (Z_{xy} y Z_{yx}) correspondiente a la estación P14 del levantamiento MT de Pisagua, 2014 (Capítulo 4). En esta se observan los valores de resistividad aparente (*app. Rho*) y fase (*phase*) calculados entre los períodos de 0.0001 seg a 1000 seg, o su equivalente en frecuencia, entre 10kHz a 0.001Hz.

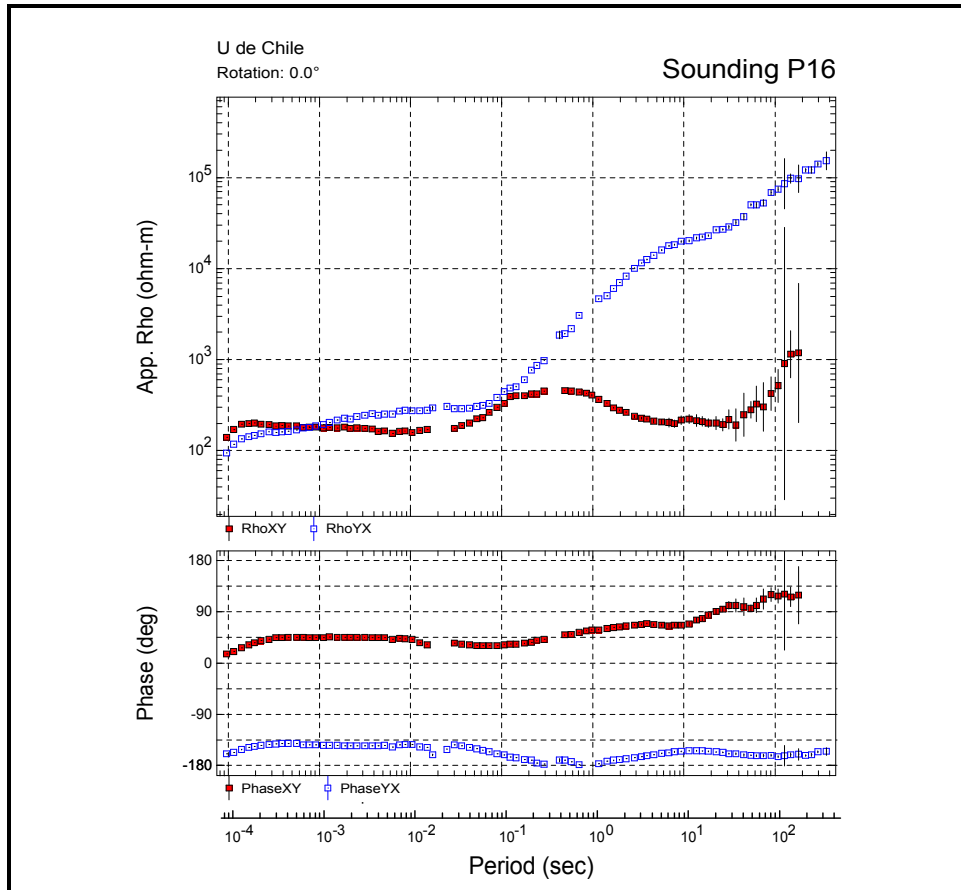


Figura 2.2 Resistividad aparente y fase de una estación de magnetotelúrica (Pisagua, 2014)

La atenuación que sufren los campos EM mientras penetran en el subsuelo varía con su frecuencia. Mientras menor es la frecuencia, los campos sufren menor atenuación y alcanzan mayor profundidad en el subsuelo. Esta atenuación es descrita por la constante de propagación γ (ecuación 2.6), cuya intensidad depende, además de la frecuencia, de cuan baja es la resistividad del subsuelo. Debido a lo anterior, preliminarmente se suele interpretar que la frecuencia en que se calcula el tensor de impedancia es inversamente proporcional a la profundidad de investigación de un dato MT. A partir de esto, las curvas de resistividad aparente y de fase se pueden entender en una primera aproximación como una especie de sondaje vertical, en el cual la frecuencia describe la profundidad, la resistividad aparente es una versión suavizada de la resistividad del subsuelo y las transiciones en la fase marcan los contactos de la estratigrafía. Una aproximación simple que relaciona la profundidad de investigación con la frecuencia es el “*Skin Depth*” (2.9).

$$\text{Skin Depth } (f) = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad [\text{m}] \quad (2.9)$$

ρ : Resistividad [Ohm-m].

f : Frecuencia [Hz].

Cabe notar que cuando la distribución de resistividad en el subsuelo tiende a ser más compleja (2D & 3D) que un modelo de capas horizontales (1D), los valores del tensor de impedancia son influenciados tanto por los cambios laterales y verticales de la resistividad eléctrica, por lo que el análisis anterior podría ser difícil de aplicar y/o puede llevar a conclusiones erróneas sin considerar elementos adicionales (tales como, descomposición del tensor, *strike*, dimensionalidad, distorsión galvánica).

Existen varias herramientas para analizar los datos MT con el fin de estudiar el subsuelo, sin embargo las de mayor uso se basan en la técnica de inversión. Ésta permite estimar un modelo de resistividades del subsuelo cuya respuesta sea similar o igual a los datos MT medidos.

Los métodos de inversión pueden considerar aproximaciones 1D, 2D & 3D, cuya correcta aplicación depende de la complejidad de la distribución de resistividad que presenta el subsuelo o indiquen los datos medidos. En la figura 2.3 se presentan ejemplos de los modelos de resistividad que pueden ser obtenidos a través de estos métodos de inversión.

En la parte superior de la figura 2.3 se muestran modelos de capas obtenidos con la inversión 1D para cada estación MT, estos se presentan en forma de sondaje vertical delimitando profundidades en la que se extiende cada capa y mostrando en escala de color el valor de resistividad correspondiente a ellas. Las inversiones 1D son adecuadas cuando la topografía de los estratos del subsuelo se extiende cuasi horizontalmente. Cuando esta condición no se cumple los modelos 1D obtenidos pueden presentar falsas estructuras y/o anomalías de resistividad eléctrica (artefactos).

En el centro de la figura 2.3 se muestra una sección vertical de la resistividad del subsuelo obtenida con una inversión 2D, en donde se describe la distribución de resistividad eléctrica usando escala de colores y curvas de nivel. La inversión 2D permite interpretar simultáneamente los datos de estaciones MT distribuidas siguiendo una línea sobre el subsuelo. Para esto el método supone que los cambios de resistividad eléctrica en el subsuelo sólo suceden sólo en dos direcciones, verticalmente y a lo largo de la línea de estaciones.

En la parte inferior de la figura 2.3 se muestra un modelo 3D de resistividad eléctrica del subsuelo obtenido con la técnica de inversión 3D. En ésta el subsuelo es representado

por una grilla tridimensional compuesta de varias celdas (prismas rectangulares en la figura) con un valor de resistividad eléctrica en su interior. En la figura los valores de resistividad de cada celda se muestran en escala de colores. Los métodos de inversión 3D no tienen aproximaciones sobre la distribución de resistividad eléctrica. Sin embargo es necesario que la grilla dimensional usada para representar el subsuelo tenga suficientes celdas y de tamaño adecuado para reproducir la distribución de resistividad indicada en los datos.

Las inversiones 1D pueden ser realizadas rápidamente y permiten un acercamiento para entender la información en los datos MT. Las inversiones 2D están muy desarrolladas a la fecha y es posible conseguir complejos modelos con altísima resolución (muchas celdas). A la fecha hay varios códigos para inversiones 3D (*Siripunvaraporn* 2005, *Avdeeva* 2008, *Mackie* 1994, *Sasaki* 2004, etc.) que pueden ser utilizados sobre los datos MT sin realizar ninguna descomposición, rotación y/o interpretación previa de ellos. Sin embargo el número de celdas por cada modelo está limitado por el costo computaciones que requieren los modelos y/o el tiempo necesario para cada proceso de inversión.

Algunas referencias que explican detalladamente los procedimientos de inversión para datos MT son *Jones & Chave* (2013), *Simson & Bahr* (2005) y *Oristaglio & Spies* (1999).

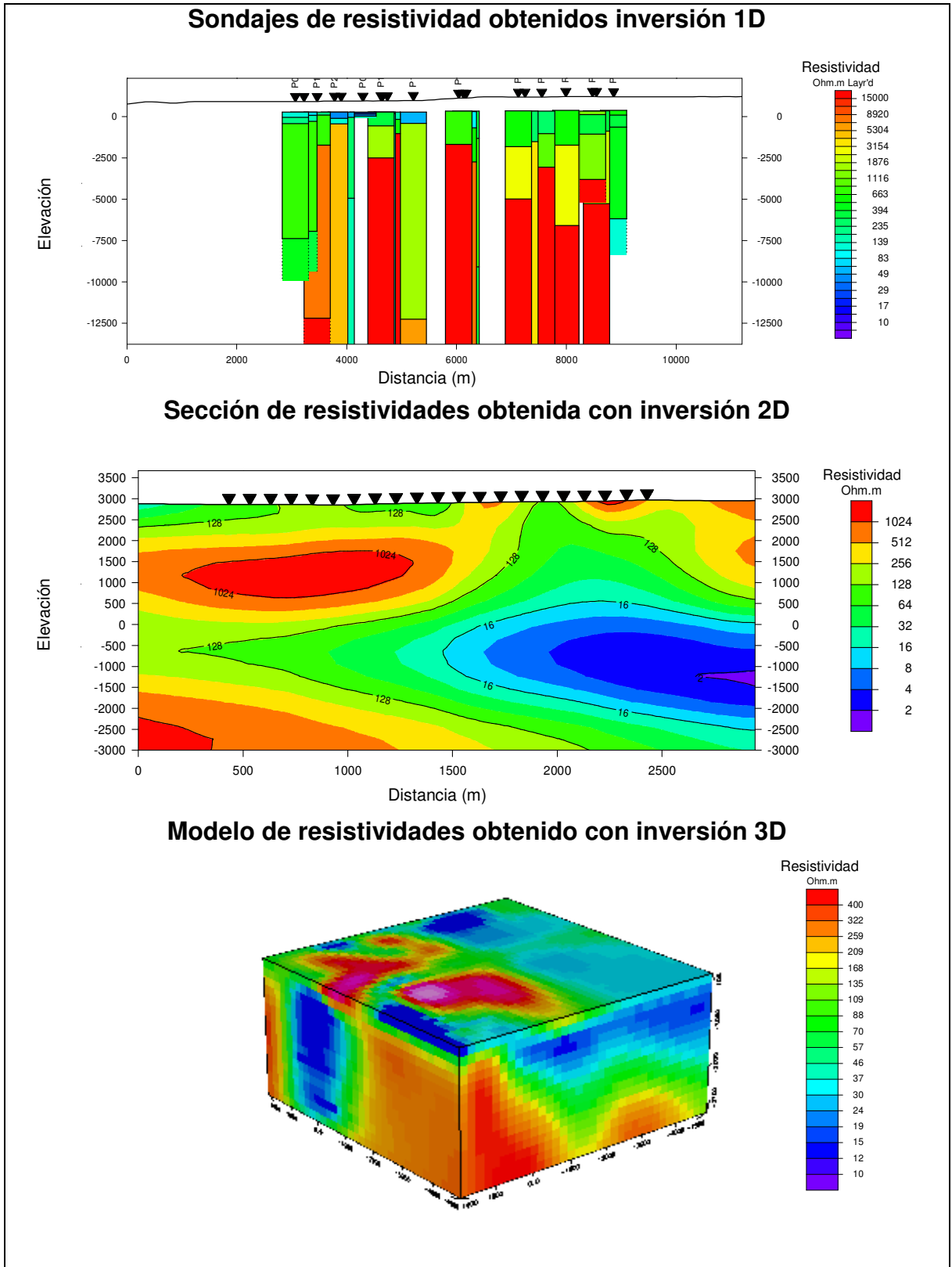


Figura 2.3 Modelos de resistividad eléctrica del subsuelo obtenidos a través de la técnica de inversión de datos MT.

2.2 Dimensionalidad en datos magnetotelúricos

La “dimensionalidad” se refiere al grado de simetría que tiene la distribución de resistividad eléctrica en el subsuelo. Ésta afecta directamente a como se presentan los términos en el tensor de impedancia y es necesario considerarla para su interpretación.

En la figura 2.4 se muestran ejemplos de modelos de resistividad eléctrica del subsuelo con distinta dimensionalidad (1D, 2D o 3D). En el lado izquierdo de la figura, se presenta un modelo con dimensionalidad 1D, el cual presenta capas horizontales y su resistividad eléctrica sólo varía en la dirección vertical. En una dimensionalidad 2D la resistividad puede variar con la profundidad y lateralmente siguiendo una dirección (rumbo). Al centro de la figura 2.4 se muestra un ejemplo de modelo con dimensionalidad 2D, en donde hay un modelo de capas que es atravesado por una estructura de resistividad eléctrica. En una dimensionalidad 3D, la resistividad eléctrica puede variar en cualquier sentido. Un ejemplo de modelo con dimensionalidad 3D se muestra al lado derecho de la figura 2.4, en el cual existen dos estructuras de resistividad con diferente rumbo y no es posible definir una dirección de simetría como el caso 2D.

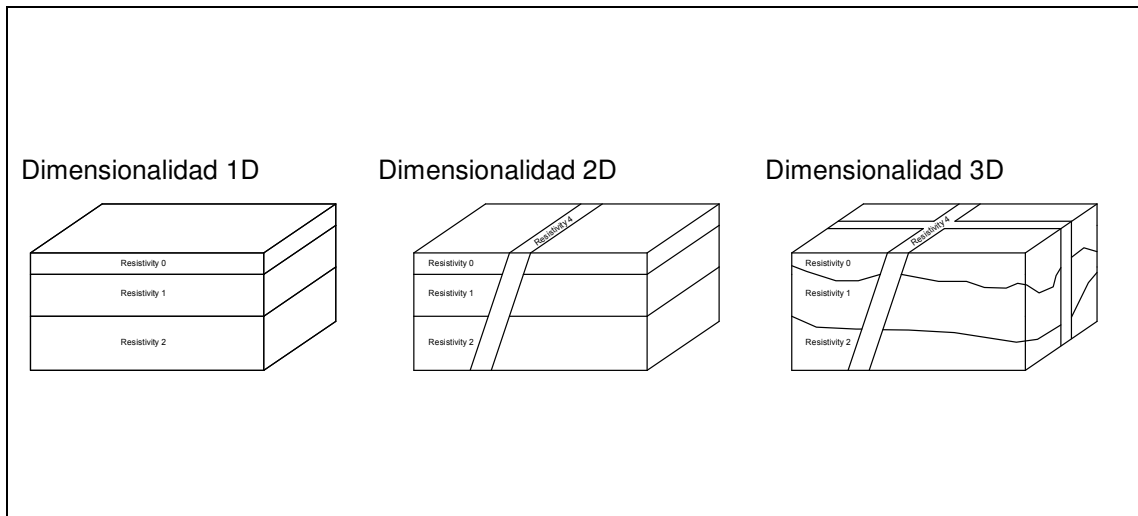


Figura 2.4 Dimensionalidad en la distribución de resistividad eléctrica en el subsuelo.

En el caso de una dimensionalidad 1D, los elementos de la diagonal del tensor son nulos y los elementos de la antidiagonal son iguales pero con signo opuesto (2.10).

$$\begin{bmatrix} E_x(f) \\ E_y(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z_{1D}(f) \\ -Z_{1D}(f) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x(f) \\ H_y(f) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

En el caso de una dimensionalidad 2D los elementos del diagonal del tensor siguen siendo nulos, pero los de la antidiagonal son diferentes tanto en resistividad aparente como en fase (2.11). Estos elementos de la antidiagonal, se denominan componentes TM y TE. En el modo TM, la dirección del campo eléctrico asociado (primer índice del tensor) coincide con la dirección en la cual varía la resistividad eléctrica (cruzando la falla). En el modo TE, el campo magnético asociado es paralelo a la dirección de variación. La componente TM del tensor tiende a ser más sensible a los cambios laterales de la resistividad y la componente TE a los cambios en el sentido vertical.

$$\begin{bmatrix} E_x(f) \\ E_y(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z_{2DTE}(f) \\ Z_{2DTM}(f) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x(f) \\ H_y(f) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

θ : Rumbo o strike que sigue la distribución de resistividad eléctrica.

Lo anterior (tensor diagonal), sólo se cumple cuando una de las direcciones en que se ha medido el campo eléctrico o el campo magnético de la estación MT coincide con el eje de simetría en que varía la resistividad del subsuelo. Cuando estas direcciones son distintas, el tensor se presenta rotado con respecto al eje de simetría (2.11), por lo que los elementos de la diagonal dejan de ser nulos y los de la antidiagonal disminuyen. Debido a esto, para interpretar los datos MT con dimensionalidad 2D es necesario al menos encontrar el rumbo (*strike*) que permita corregir esta rotación y descomponer el tensor en sus respectivas componentes TM y TE.

$$Z_{2D}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & Z_{2DTE} \\ Z_{2DTM} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Procedimientos para encontrar el rumbo en los datos MT con dimensionalidad 2D aún se siguen desarrollando hasta la fecha (2014). El método más simple (*Swift*, 1967) consiste en buscar el ángulo de rotación según 2.12, en el cual los valores de diagonal del tensor sean nulos o mínimos. Sin embargo este procedimiento sólo es efectivo en ausencia de ruido, distorsión galvánica y/o distorsión 3D. Métodos más modernos se

basan en la descomposición de *Groom-Bailey* (*Groom & Bailey*, 1989), invariantes de fase (*J. Weaver et al.*, 2000) y/o el tensor de fase (*Caldwell* 2004). Otra alternativa es utilizar la función de transferencia vertical y/o *tipper* para determinar el rumbo.

En el caso de la dimensionalidad 3D todos los elementos del tensor son no nulos y no debería ser posible recuperar la información del rumbo (ya que no debiera existir). Hay situaciones en las cuales la dimensionalidad 3D de los datos está generada por anisotropías de la resistividad en la superficie (distorsión galvánica) por sobre una respuesta regional 2D o 1D. En estos casos, se puede intentar descomponer el tensor de impedancias (*Groom & Bailey*, 1989) para remover el efecto de distorsión y recuperar la respuesta 2D.

A través de la historia del MT se han desarrollado distintos indicadores para investigar la dimensionalidad del tensor de impedancia. Algunos de los actualmente (2014) en uso son:

Análisis de *Bahr* (*Bahr*, 1988):

El *phase-sensitive skew* se muestra en 2.13. Este parámetro no es afectado por la distorsión en la resistividad aparente (distorsión galvánica), debido a que sólo utiliza la fase de los términos del tensor. Los valores inferiores a 0.1 indican una dimensionalidad de 1D o 2D. Los valores entre 0.1 y 0.3 se consideran 2D o 2D/3D. Los valores sobre 0.3 indican una dimensionalidad 3D.

$$\begin{aligned} S1 &= Z_{xx} + Z_{yy} & S2 &= Z_{xy} + Z_{yx} \\ D1 &= Z_{xx} - Z_{yy} & DS &= Z_{xy} - Z_{yx} \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{\sqrt{([D1, S2] - [S1, D2])}}{|D2|} \quad (2.13)$$

Análisis basado en el tensor de fase (*Caldwell et al.*, 2004):

El tensor de fase es una representación alternativa de los datos MT al tensor de impedancia. Su principal ventaja es que el tensor no se ve afectado por la distorsión galvánica (en el campo eléctrico), pero elimina a la vez información sobre la amplitud del tensor (*Moorkamp*, 2007 y *Caldwell*, 2004). En *Moorkamp* (2007) y *Bibby* (2005) se definen las invariantes λ , β que permiten evaluar la dimensionalidad. Si λ , β son cero la dimensionalidad es 1D. Si sólo $\beta = 0$ entonces la dimensionalidad es 2D o 2D con distorsión galvánica. Si β y λ son distintos de cero la dimensionalidad es 3D.

$$\beta = \frac{1}{2} \operatorname{atan} \left(\frac{(\phi_{xy} + \phi_{yx})}{(\phi_{xx} - \phi_{yy})} \right) \quad (2.14)$$

$$\lambda = \frac{((\phi_{xy} + \phi_{yx})^2 + (\phi_{xx} - \phi_{yy})^2)^{1/2}}{((\phi_{xy} - \phi_{yx})^2 + (\phi_{xx} + \phi_{yy})^2)^{1/2}}$$

Análisis WAL (*Weaver et al.*, 2000):

El análisis WAL utiliza siete invariantes $I_{1..7}$ (2.15) a las rotaciones (2.12) del tensor de impedancias (*Weaver et al.*, 2000). Los dos primeros I_1 y I_2 no contienen información relevante sobre la dimensionalidad, pero sirven para normalizar el resto de los invariantes entre 0 y 1. Los invariantes I_3 y I_4 indican el grado de anisotropía de la distribución de resistividad eléctrica, tal que 0 indica un caso 1D y una mayor valor indica mayor complejidad (2D). Los invariantes I_5, I_6 y I_7 son indicadores de la distorsión galvánica (sección 2.3). Adicionalmente se define un invariante Q que combinación lineal de los otros siete, pero resulta útil para el criterio de selección de dimensionalidad. En la tabla 2.1 se presenta los criterios para determinar la dimensionalidad a partir de estos invariantes (*Marti*, 2009)

$$I_1 = \frac{1}{2} \left(\left(\operatorname{Re}(Z_{xy} - Z_{yx}) \right)^2 + \left(\operatorname{Re}(Z_{xx} + Z_{yy}) \right)^2 \right)^{1/2} \quad (2.15)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} \left(\left(\operatorname{Re}(Z_{xy} - Z_{yx}) \right)^2 + \left(\operatorname{Re}(Z_{xx} + Z_{yy}) \right)^2 \right)^{1/2}$$

$$I_3 = \frac{1}{2} \left(\left(\operatorname{Re}(Z_{xy} + Z_{yx}) \right)^2 + \left(\operatorname{Re}(Z_{xx} - Z_{yy}) \right)^2 \right)^{1/2} / I_1$$

$$I_4 = \frac{1}{2} \left(\left(\operatorname{Im}(Z_{xy} + Z_{yx}) \right)^2 + \left(\operatorname{Im}(Z_{xx} - Z_{yy}) \right)^2 \right)^{1/2} / I_2$$

$$I_5 = \frac{\operatorname{Re}(Z_{xy} - Z_{yx}) \operatorname{Im}(Z_{xx} + Z_{yy}) + \operatorname{Im}(Z_{xy} - Z_{yx}) \operatorname{Re}(Z_{xx} + Z_{yy})}{I_1 I_2}$$

$$I_6 = \frac{\operatorname{Re}(Z_{xy} - Z_{yx}) \operatorname{Im}(Z_{xx} + Z_{yy}) - \operatorname{Im}(Z_{xy} - Z_{yx}) \operatorname{Re}(Z_{xx} + Z_{yy})}{I_1 I_2}$$

$$I_7 = \frac{d_{41} - d_{23}}{Q}$$

$$Q = \left((d_{12} - d_{34})^2 + (d_{13} + d_{24})^2 \right)^{1/2}$$

$$d_{ij} = \frac{\xi_i \eta_j - \xi_j \eta_i}{(\xi_4^2 - \xi_1^2)^{1/2} (\eta_4^2 + \eta_1^2)^{1/2}}$$

$$\xi_1 + j \eta_1 = \frac{1}{2} (Z_{xx} + Z_{yy})$$

$$\xi_2 + j \eta_2 = \frac{1}{2} (Z_{xy} + Z_{yx})$$

$$\xi_3 + j \eta_3 = \frac{1}{2} (Z_{xx} - Z_{yy})$$

$$\xi_4 + j \eta_4 = \frac{1}{2} (Z_{xy} - Z_{yx})$$

Tabla 2.1 Análisis de Dimensionalidad WAL (Marti, 2009)

Valores de los invariantes	Dimensionalidad
$I_3 = 0, I_4 = 0, I_5 = 0, I_6 = 0$	1D
$I_3 \neq 0 \text{ o } I_4 \neq 0, I_5 = I_6 = 0, I_7 = 0 \text{ o } Q = 0$ ($\xi_4 \neq 0 \text{ y } \eta_4 \neq 0$)	2D
$I_3 \neq 0 \text{ o } I_4 \neq 0, I_5 \neq 0, I_6 = 0, I_7 = 0$	2D con distorsión galvánica (sólo en el ángulo de <i>twist</i> de la descomposición de Groom- Bailey)
$I_3 \neq 0 \text{ o } I_4 \neq 0, I_5 \neq 0, I_6 = 0, Q = 0$	1D/2D con distorsión galvánica (No se puede recuperar el rumbo).
$I_3 \neq 0 \text{ o } I_4 \neq 0, I_5 = I_6 = 0, I_7 = 0 \text{ o } Q = 0$ ($\xi_4 = 0 \text{ y } \eta_4 = 0$)	1D/2D con distorsión galvánica (tensor diagonal).
$I_3 \neq 0 \text{ o } I_4 \neq 0, I_5 \neq 0, I_6 \neq 0, Q = 0$	2D con distorsión galvánica (caso general)
$I_7 \neq 0$	3D

Análisis basado en la descomposición de Groom-Bailey (Groom & Bailey, 1989):

La descomposición de Groom-Bailey es utilizada para recuperar las respuestas con dimensionalidad 2D de un tensor de impedancia alterado por distorsión galvánica. Para ello se modelan los datos medidos como el producto de una matriz de distorsión C con un tensor de impedancias de dimensionalidad 2D, el cual es rotado en el rumbo de la distribución de resistividad 2D con respecto a la dirección de medición del tensor. La matriz de distorsión C es obtenida a través de la multiplicación de tres matrices (*twist*, *shear* y *anisotropy*) y un factor de ganancia “g” (2.16).

En total, la descomposición de Groom-Bailey se basa en 9 componentes (t, s, a, g, real(Z_{xy}), imag(Z_{xy}), real(Z_{yx}), imag(Z_{yx}) y el rumbo) las cuales se determinan buscando el mejor ajuste entre los datos medidos y la descomposición. Suponiendo que el efecto de distorsión no depende de la frecuencia es posible estimar siete de estos parámetros (t, s, real(Z_{xy}), imag(Z_{xy}), real(Z_{yx}), imag(Z_{yx}) y el rumbo), buscando la descomposición que mejor se ajusta a los datos. McNeice & Jones (2001) presentan un enfoque adicional en donde se busca el rumbo, suponiendo que el resultado debe coincidir en los tensores medidos de distintas estaciones en una sólo área de estudio. Los otros dos parámetros (g y a) no pueden ser determinados directamente a partir de los tensores de impedancias y es necesario interpretarlos por una vía alternativa.

El análisis de dimensionalidad a través de Groom & Bailey se lleva a cabo en los datos MT, evaluando si es posible separar los datos en la descomposición propuesta con un

buen ajuste. En caso que la descomposición es efectiva significa que los datos tienen una dimensionalidad 2D o 1D, en caso contrario estos serían 3D.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & -t \\ t & 1 \end{bmatrix} 1/\sqrt{1+t^2} \quad (2.16)$$

$$S = \begin{bmatrix} 1 & s \\ s & 1 \end{bmatrix} 1/\sqrt{1+s^2}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1+a & 0 \\ 0 & 1-a \end{bmatrix} 1/\sqrt{1+a^2}$$

$$C = g T S A$$

$$Z_{medido} = R(\theta) C \begin{bmatrix} Z_{xy} & 0 \\ 0 & Z_{yx} \end{bmatrix} R'(\theta)$$

θ : Rumbo de la distribución de resistividad 2D.

2.3 Distorsión en datos magnetotelúricos

En un estudio magnetotelúrica los parámetros de medición se ajustan en función de los objetivos del subsuelo a detectar. Por ejemplo, la distancia entre las estaciones debe ser suficientemente pequeña para poder resolver los objetivos de menor tamaño, y a la vez, el área cubierta por todas las estaciones debe ser lo bastante grande para observar las estructuras de mayor tamaño y/o profundidad a estudiar.

Cuando hay estructuras en el subsuelo de menor o mayor tamaño que las consideradas en un estudio MT, el efecto que producen en los campos EM pueden a veces afectar las mediciones dentro del rango del estudio. En este caso las respuestas del subsuelo que producen las estructuras no consideradas (ya sean de mayor o menor tamaño) podrían ser cubiertas parcialmente o no ser medidas con el suficiente detalle (*aliasing*) en el estudio MT. Estos efectos generalmente se identifican como una distorsión en los datos y es considerado un problema cuando pueden ser mal interpretados como una estructura del subsuelo dentro de las dimensiones consideradas en el estudio MT y/o cuando alteran lo suficiente los datos como para que estos no puedan modelarse adecuadamente.

Este mismo efecto se observa en la mayoría de las técnicas geofísicas. Por ejemplo en los métodos de potencial (magnetometría y gravimetría), habitualmente hay que separar el campo regional del campo local, para poder interpretar las anomalías de interés en el área de estudio.

En sísmica de reflexión, se generan retrasos en las trazas sísmicas (corrimiento estático), debido a las variaciones en la topografía y velocidad de las capas más someras del subsuelo, lo cual desalinea y/o cambia la forma de las reflexiones de las capas más profundas.

En MT comúnmente este efecto se manifiesta en la denominada “distorsión galvánica” que es generada por cuerpos de pequeño tamaño en superficie que generan discontinuidades en la resistividad eléctrica. La “distorsión galvánica” tiende a desviar los valores del tensor de impedancias en todas las frecuencias, por lo que se ven afectadas tanto las mediciones en profundidad (frecuencias bajas) como las más superficiales (frecuencias altas). La distorsión galvánica se explica más detalladamente en la sección siguiente.

Adicionalmente también en MT se hace referencia a la distorsión generada por la dimensionalidad de las estructuras en el subsuelo, en la que los datos medidos pueden

representar una dimensión intrínseca (1D, 2D o 3D) del subsuelo distinta a las aproximaciones (1D, 2D) realizadas para interpretarlos (*Chave & Jones, 2013*).

Otra fuente de distorsión en los datos magnetotelúricos es producida por la topografía o la forma del terreno, lo cual tiende a modificar el tensor impedancias. En general se observa que en valles, el voltaje registrado tiende a aumentar debido a la concentración de las corrientes telúricas. El efecto contrario es observado en las cimas de cerros o montañas (disminuye la resistividad aparente). Este efecto es dependiente de la frecuencia y es más acentuado en las frecuencias cuyo “*Skin Depth*” (2.9) es comparable a las dimensiones de la deformación del terreno.

Existen otros tipos de distorsión que son generados por propiedades eléctricas intrínsecas del subsuelo. Por ejemplo cuando la resistencia de contacto entre los electrodos no-polarizables y el suelo es muy alta (> 2k Ohm), hay pérdidas de voltaje en el cable de los dipolos de la estación MT causado por el contacto capacitivo con el suelo en las frecuencias más altas (*Zonge & Hughes, 1985*).

2.4 Distorsión Galvánica

El efecto de distorsión más común en los datos MT se denomina “Distorsión Galvánica” y consiste en el acoplamiento a los campos EM de interés con una respuesta EM no-inductiva producida cuerpos y/o estructuras superficiales de pequeña dimensión en la superficie (*Chave & Smith, 1994*). En estos cuerpos se generan acumulaciones de carga en sus bordes, que modifican el campo eléctrico en todos los períodos observados (independiente de la frecuencia). En algunos casos, cuando estas acumulaciones de carga también afectan la dirección de circulación de las corrientes telúricas, se puede observar distorsión sobre el campo magnético. Sin embargo, en la mayoría de los casos la distorsión del campo magnético es sustancialmente menor que la del campo eléctrico, por lo que la mayoría de las correcciones usadas sólo se basan en el campo eléctrico (*Jones, 2011*).

La distorsión en el campo eléctrico generada por un pequeño cuerpo de resistividad eléctrica puede representarse a través de la ecuación 2.17. Esta expresión se puede obtener restando las ecuaciones de difusión del campo eléctrico considerando la aproximación de campo cuasi-estático libre de fuentes en un medio con la resistividad de fondo y otro incluyendo una pequeña variación puntual (*Chave & Smith, 1994*).

$$\nabla \times \nabla \times E(r) + j \omega \mu_0 \sigma_0 E(r) = -j \omega \mu_0 \delta \sigma(r) E(r) \quad (2.17)$$

E : Campo eléctrico total resultante de la variación de resistividad.

σ_o : Conductividad eléctrica de fondo.

μ_o : Permeabilidad eléctrica en el vacío.

w : Frecuencia angular

$\delta\sigma$: Variación de la resistividad eléctrica con respecto a σ_o

La solución de la ecuación 2.17, para determinar el campo eléctrico es expresada en forma integral en 2.18 (Hohmann, 1976). Y a la vez, el campo magnético puede calcularse a partir del campo eléctrico usando la ley de Faraday. La primera integral a la izquierda en la ecuación 2.18 corresponde a la respuesta inductiva del subsuelo y la segunda a la respuesta galvánica del subsuelo, que es la que genera la denominada "distorsión galvánica".

$$E(r) = E^0(r) - j w \mu_o \int_{V_s} g(r, r_s) \delta\sigma(r_s) E(r_s) dv_s + \frac{\nabla \nabla}{\sigma_o} \int_{V_s} g(r, r_s) \delta\sigma(r_s) E(r) dv \quad (2.18)$$

$$H(r) = H^0(r) - \mu_o \nabla \times \int_{V_s} g(r, r_s) \delta\sigma(r_s) E(r_s) dv \quad (2.19)$$

E^0 : Campo eléctrico regional asociado a σ_o (conductividad de fondo).

H^0 : Campo magnético regional asociado a σ_o (conductividad de fondo)

Donde,

$$g(r, r_s) = \frac{\exp(j\gamma_o \|r - r_s\|)}{4 \pi \|r - r_s\|} \quad (2.20)$$

$$\gamma_o = \sqrt{j w \mu_o \sigma_o}$$

$g(r, r_s)$: Función de Green.

γ_o : Constante de Propagación

L_o : Largo de Difusión = $1/|\gamma_o|$

En Groom & Bahr (1992) se resuelve la ecuación 2.18 para anisotropías o inhomogeneidades superficiales de resistividad eléctrica (que generan la distorsión galvánica), aproximando que el campo eléctrico es constante sobre ellas (aproximación de Born). Este trabajo es posteriormente complementado en Chave y Smith (1994), quienes utilizan una aproximación LN (*localized nonlinear*) que es menos restrictiva que la anterior, sin embargo los resultados son similares. Básicamente la solución entregada requiere que el tamaño de la anisotropía sea pequeño con respecto al largo de difusión (*Skin Depth*) de la respuesta regional del campo eléctrico (basada en la resistividad de fondo). Bajo este supuesto la expresión 2.18 puede simplificarse por:

$$E(r) = E^0(r) + [-j \omega \mu_0 f(r) I + \frac{1}{\sigma_0} F(r)] E_i(r_s) \quad (2.21)$$

$$E(r) = E^0(r) + G(r) E_i(r_s)$$

$$f(r) = \int_{V_s} g(r, r_s) \delta\sigma(r_s) dv_s$$

$$F_{ij}(r) = \frac{\partial^2 f(r)}{\partial x_i \partial x_j}$$

Dentro de la anisotropía de resistividad en superficie (r similar a r_s) se puede evaluar el campo eléctrico como indica 2.22 en función de campo eléctrico regional E_0 . Reemplazando 2.22 en 2.21 se obtiene una expresión general para el campo eléctrico distorsionado por anisotropía superficial (2.23).

$$E_i(r) = (I - G(r_s))^{-1} E_0(r) \quad (2.22)$$

$$E(r) = (I + G (I - G(r_s))^{-1}) E_0(r) = C(r) E_0(r) \quad (2.23)$$

A pesar que no aparece implícito, el desarrollo anterior sólo es válido cuando la respuesta inductiva de la anisotropía superficial puede ser despreciada. Para esto es necesario que la frecuencia sea lo bastante baja para que el efecto galvánico sea considerablemente mayor que el inductivo. Lo importante del desarrollo anterior es que permite justificar que el efecto de distorsión galvánica puede ser modelado como un tensor o matriz que multiplica al campo eléctrico regional. Si se supone que el campo magnético no es afectado por la distorsión galvánica, se puede extender el resultado anterior al tensor de impedancias como indica 2.24.

$$Z_{\text{dist}}(r) = C(r) Z(r) \quad (2.24)$$

En *Groom & Bailey* (1990) se presenta la solución de la Matriz Completa de Distorsión C generada por una semiesfera en la superficie utilizando las expresiones mostradas anteriormente. Si la estación MT se encuentra en la superficie dentro de la semiesfera se observa una Matriz de distorsión diagonal cuyo efecto depende del contraste de resistividad eléctrica entre el cuerpo y el medio. Fuera de la semiesfera, el tensor deja de ser diagonal y el efecto del corrimiento estático varía con respecto a la posición de la estación MT.

$$C_{int}(r) = \begin{bmatrix} 3\sigma_1/(\sigma_2 + 2\sigma_1) & 0 \\ 0 & 3\sigma_1/(\sigma_2 + 2\sigma_1) \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$C_{ext}(r) = \begin{bmatrix} 1 + K \frac{(2x^2 - y^2)}{r^5} & K \frac{3xy}{r^5} \\ K \frac{3xy}{r^5} & 1 + K \frac{(2y^2 - x^2)}{r^5} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$K = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_2 + 2\sigma_1} R^3$$

R : Radio del cuerpo distorsionante (semiesfera).

r : Distancia de la estación MT al centro de la semiesfera.

σ_1 : Conductividad del fondo.

σ_2 : Conductividad de la semiesfera.

Calculando la matriz de distorsión C , usando 2.25 y 2.26, y considerando una semiesfera con 10kohm-m de resistividad con un radio (R) de 5m y embebida en un medio con 100 ohm-m se obtiene el resultado presentado en 2.27. En el caso del tensor externo (C_{ext}) a la anomalía se consideró una estación a 6m de distancia de la anisotropía ($x=3m$ e $y=5m$). Los valores anteriores son representativos de lo observado con el caliche en la el estudio MT en la falla de Pisagua presentado en el capítulo 4. La diferencia entre el tensor externo e interno muestra que el grado de distorsión puede variar significativamente sólo cambiando la ubicación de medición en algunos metros.

$$C_{int}(r) = \begin{bmatrix} 1.49 & 0 \\ 0 & 1.49 \end{bmatrix}$$

$$C_{ext}(r) = \begin{bmatrix} 1.06 & -0.41 \\ -0.41 & 0.62 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Cabe notar que en una estación MT para medir el campo eléctrico se detecta la diferencia de potencial entre (habitualmente) dipolos de 100m de largo. En el caso de la distorsión galvánica, generada por pequeños cuerpos de alta resistividad (caliche) como el propuesto, el efecto se atenúa rápidamente con la distancia, por lo que probablemente sólo es afectado uno de los extremos del dipolo.

2.5 Método TDEM (Transiente electromagnético)

En el método TDEM (transiente electromagnético) se utilizan dos loops de cable instalados sobre la superficie, el loop transmisor y el loop receptor. El loop transmisor suele tener forma cuadrada, debido a las facilidades que presenta colocarlo sobre el

terreno. El loop receptor puede instalarse usando distintas configuraciones, las más importantes son (figura 2.5):

- Loop coincidente: el loop transmisor y el loop receptor tiene el mismo tamaño y se instalan en la misma posición. En la figura 2.5 esta configuración se muestra en el lado izquierdo.
- Loop central: el loop receptor es más pequeño que el transmisor y se instala al interior de éste. Esta configuración se presenta al centro de la figura 2.5.
- Lotem: el loop receptor se instala separado por una distancia por fuera del loop transmisor. Esta figura se muestra en el lado derecho de la figura 2.5.

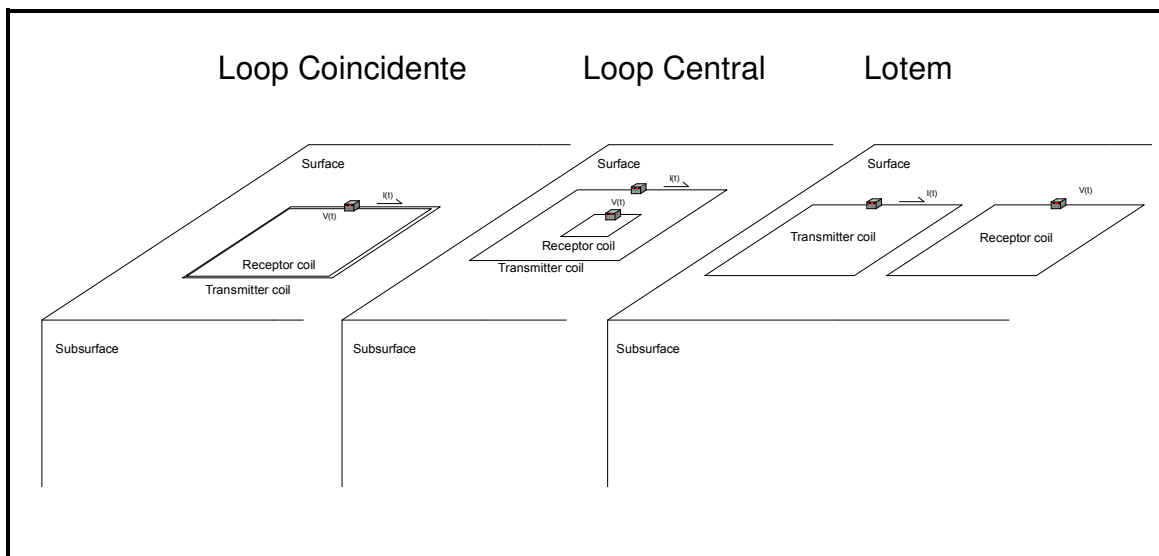


Figura 2.5 Configuraciones del loop receptor para la adquisición de TDEM

En la figura 2.6 se esquematiza de izquierda a derecha como se propagan en el tiempo los campos EM en el subsuelo durante la aplicación del método TDEM.

En la adquisición del TDEM, se hace circular una corriente eléctrica continua (DC) por el loop transmisor generando un campo magnético primario que se introduce en el subsuelo ($T=0$ seg en figura 2.6). Al interrumpir súbitamente la corriente del loop transmisor, se reduce abruptamente el campo magnético introducido. Esto produce un cambio en el flujo magnético, el cual induce corrientes de Eddy en el subsuelo que se propagan en forma de un circuito cerrado.

Después del corte del transmisor, las primeras corrientes que se inducen se generan inmediatamente bajo el loop transmisor imitando su forma y circulando en sentido contrario a la corriente insertada inicialmente ($T=100$ useg en figura 2.6). A estas corrientes se les denomina como “anillo de corriente”. Mientras avanza el tiempo, el anillo de corriente inducida se desplaza a mayor profundidad penetrando en el

subsuelo, aumentando su tamaño y cambiando gradualmente a una forma circular ($T = 1$ msec y $T = 10$ msec en figura 2.6).

Mientras el anillo de corriente penetra en el subsuelo, éste va generando un campo magnético secundario que retorna a la superficie y cuyas variaciones inducen un voltaje en el loop receptor que es registrado (entre $T = 100$ μ seg a $T = 10$ msec en la figura 2.6). La intensidad de la corriente inducida y, por lo tanto la del campo magnético secundario, depende de la resistividad eléctrica del tramo del subsuelo que atraviesa el anillo de corriente. Mientras menor es la resistividad, mayores son las corrientes y el campo magnético secundario. La magnitud del voltaje inducido en el loop receptor es proporcional a la intensidad del campo magnético secundario y, por lo tanto, es un indicador de la resistividad eléctrica del subsuelo. Debido a que el anillo de corriente inducida se va profundizando en subsuelo a cada momento desde la interrupción del transmisor, el tiempo en el cual se reciben señales en el loop receptor será proporcional a la profundidad investigada.

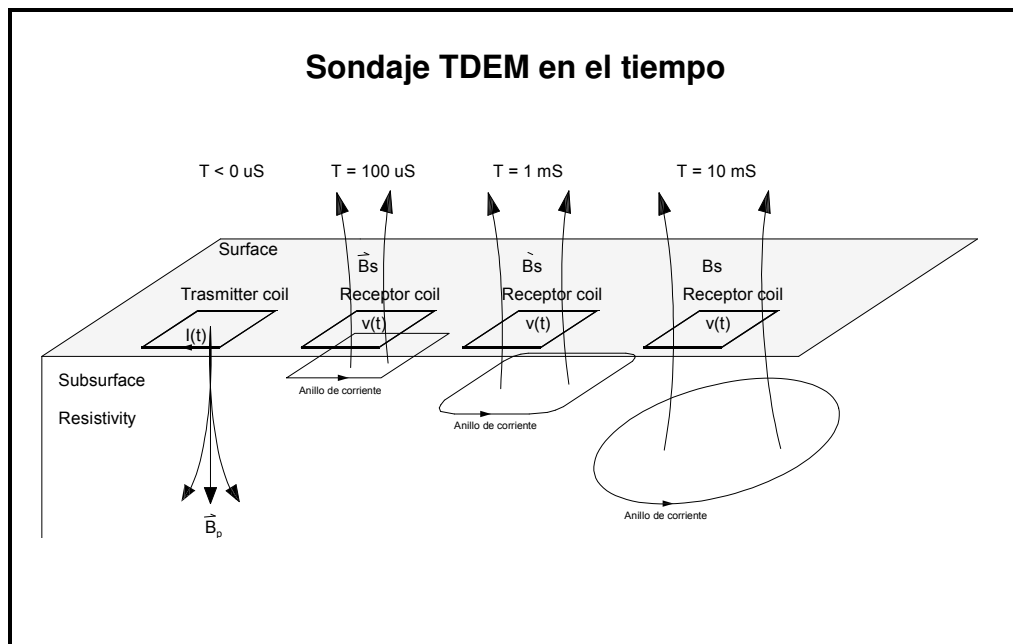


Figura 2.6 Propagación de los campo EM en función del tiempo en sondajes TDEM

El voltaje inducido en el loop receptor se denomina curva de decaimiento de voltaje y corresponde a la medición registrada en un sondaje de TDEM. En un medio de resistividad constante el decaimiento de voltaje que sería registrado se indica en 2.28 (Ward & Hohmann, 1988).

El decaimiento de voltaje se divide en la respuesta temprana (2.29) y la tardía (2.30). Las respuestas tempranas sólo se consideraban en estudios superficiales que requieren detectar hasta algunos pocos metros bajo la superficie. La respuesta tardía es usada para los estudios de mayor profundidad.

A partir de las respuestas temprana y tardía se puede despejar la resistividad en función de los voltajes y tiempos observados. Las respuestas tardías y tempranas aquí expresadas, sólo son válidas en un medio homogéneo de resistividad contante, por lo que las resistividades estimadas a través de las expresiones anteriores son una aproximación y se denominan “resistividades aparentes”. En concordancia con las respuestas, también se definen las resistividades aparentes tardías y tempranas (2.31 y 2.32).

$$v(t) = \frac{-m}{2\pi\sigma\mu r^5} \left[9 \operatorname{erf}(\theta r) - \frac{2\theta r}{\sqrt{\pi}} (9 + 6\theta^2 r^2 + 4\theta^4 r^4) e^{-\theta^2 r^2} \right] \quad (2.28)$$

$$\theta = \sqrt{\frac{\sigma\mu}{4t}}$$

$$v_{early}(t) = \frac{-9m}{2\pi\sigma\mu r^5} \quad (2.29)$$

$$m = I \times A_t \times A_r$$

$$v_{late}(t) = \frac{-m \sigma^{3/2} \mu^{3/2}}{20\pi^{3/2} t^{5/2}} \quad (2.30)$$

$$\rho_{ap}^{early}(t) = \frac{-2\pi\mu r^5}{9m} v(t) \quad (2.31)$$

$$\rho_{ap}^{late}(t) = \frac{-\mu m^{3/2}}{20^{3/2}\pi t^{5/3}} (v(t))^{-2/3} \quad (2.32)$$

ρ_{ap}^{late} : Resistividad aparente tardía.

ρ_{ap}^{early} : Resistividad aparente temprana.

v_{early} : Curva de decaimiento de voltaje temprana.

v_{late} : Curva de decaimiento de voltaje tardía.

μ : Permeabilidad magnética en el vacío.

I : Corriente eléctrica circulada en el loop transmisor.

A_t : Área de loop transmisor (largo x ancho).

A_r : Área del loop receptor (largo x ancho).

Cuando se interrumpe la corriente del loop transmisor ésta no decae instantáneamente a cero (rampa del transmisor), debido a la auto inductancia y resistencia del cable del loop transmisor. Esto produce que el campo magnético primario transmitido no es anulado inmediatamente y, que en los primeros tiempos después de apagar el transmisor, en el loop receptor se puedan detectar sumados los cambios del campo magnético primario y el campo magnético secundario proveniente del subsuelo (Raiche, 1984). La mayoría de los software de interpretación de TDEM (Por ejemplo: 1X1D interpex y WinGlink) descartan estos datos tempranos y sólo trabajan con los datos posteriores a la extinción de la rampa de transmisor. Debido a lo anterior, los sondajes TDEM suelen ser ciegos a la distribución de resistividad de los estratos más superficiales. Un loop transmisor habitualmente usado cubre un área de $100 \times 100 \text{ m}^2$, con lo cual se obtiene una rampa del transmisor de alrededor de 70 useg (*Zonge GDP32 Manual*). Utilizando la fórmula del Skin Depth (2.9) y la relación tiempo-frecuencia de Sternberg (1988), se obtiene que estos 70useg de rampa determinarían la no interpretación de los primeros 30 metros bajo la superficie en un semiespacio de 10 ohm-m y a 90m bajo la superficie para un semiespacio de 100 ohm-m.

La profundidad de investigación que puede alcanzar un sondaje de TDEM depende principalmente de cuatro factores: la resistividad del subsuelo, la magnitud de campo magnético transmitido, el período de tiempo registrado y el ruido EM ambiente. La señal introducida por el TDEM penetra menos en el subsuelo mientras menor es la resistividad, debido a esto en medios conductivos el TDEM tiene menor profundidad de investigación y viceversa para los medios resistivos. La magnitud del campo magnético introducido en el subsuelo depende del área de loop transmisor y la cantidad de corriente eléctrica introducida en el loop transmisor. Una regla empírica que usada tradicionalmente define que la profundidad de investigación de un TDEM es aproximadamente 2 a 3 veces el lado del loop transmisor. Mientras mayor es el tiempo que transcurre, el anillo de corriente inducido en el TDEM alcanza mayor profundidad, cuyas señales son registradas en el loop receptor. Sin embargo, estas señales cada vez son más débiles por lo que depende del nivel de ruido hasta qué punto son observables.

Al igual que en MT, se utiliza la resistividad aparente para presentar los resultados medidos en un sondaje de TDEM. En la figura 2.7 se muestra un ejemplo de curva de resistividad aparente que se expresa en función del tiempo en los cuales fueron medidos sus datos. Los datos de un sondaje TDEM son habitualmente interpretados calculando un modelo de capas (1D) de resistividad eléctrica cuya respuesta sea similar o igual a los datos medidos (resistividad aparente). También generalmente se construyen secciones o perfiles de resistividad interpolando lateralmente los modelos 1D de los sondajes de TDEM. En la figura 2.7 a la derecha se presenta un ejemplo de un modelo 1D (*1D Inversion model*) interpretado a partir de datos de un sondaje TDEM (*Observed*), en el cual el área achurada delimita los valores de resistividad y profundidad de éste. La resistividad aparente calculada (*Calculated*) de este modelo se muestra con línea continua sobre los datos de resistividad aparente medidos

(*Observed*). En la figura también se nota como se ajustan los datos calculados a los observados, dando cuenta de la apropiada interpretación del modelo de capas a la derecha.

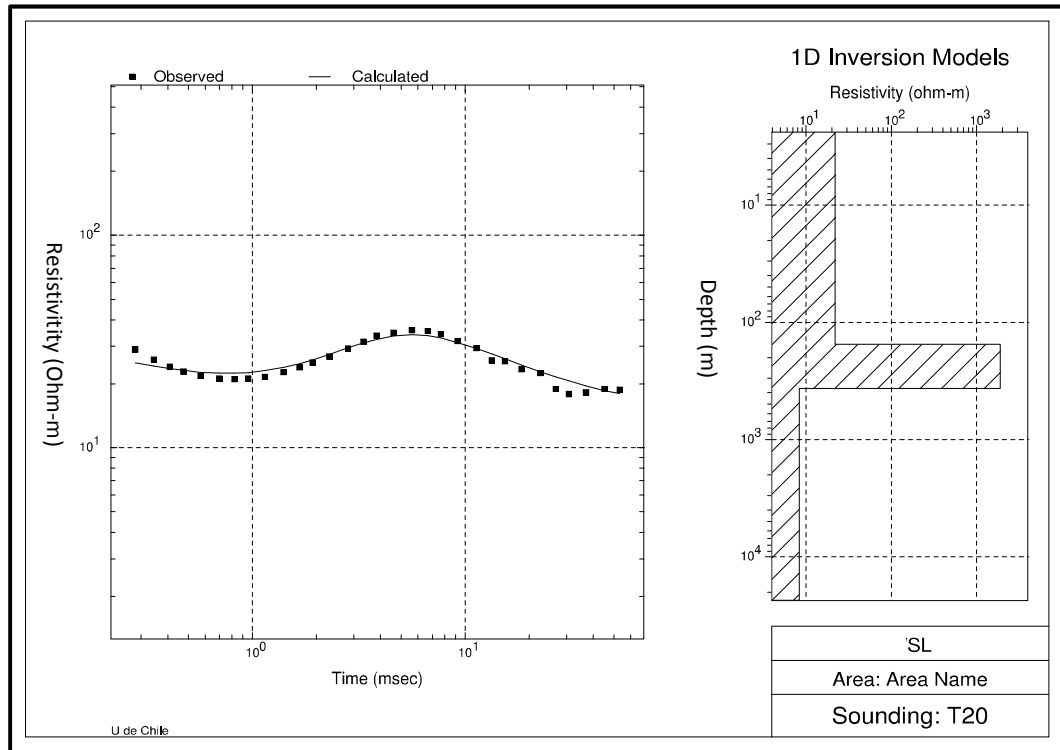


Figura 2.7 Curva de resistividad aparente TDEM (izquierda) y modelo 1D interpretado (derecha)

2.6 Corrección del Corrimiento Estático en MT usando el método TDEM (MT/TDEM)

En 1990, *L. Pellegrin & G. Hohmann* publicaron un método para corregir el corrimiento estático en estaciones MT *utilizando* como referencia los resultados de sondajes TDEM. Este trabajo fue la continuación de los resultados publicados por *Stenberg et al.* (1988), los cuales ya proponían los sondajes TDEM para este uso. Desde entonces a la fecha, el método MT/TDEM ha sido el preferido para corregir el corrimiento estático en levantamientos MT (*Watts et al.*, 2013).

El método propone calibrar las curvas de resistividad aparente de una estación de MT usando como referencia los resultados de un sondaje TDEM medido en la misma ubicación (figura 2.8). Para ello se siguen los siguientes pasos:

- Obtener un modelo de resistividades eléctricas del subsuelo con capas horizontales (1D) cuya respuesta se ajuste con los datos TDEM medidos.
- A partir del modelo 1D obtenido, se modela un nuevo tensor de impedancias (Z) MT y se calcula su curva de resistividad aparente. Esta curva se utilizará como referencia para calibrar las resistividades aparentes de MT.
- Multiplicar por un factor los valores de las curvas de resistividad aparentes de MT (ρ_{xy} y ρ_{yx}) para que sus valores coincidan con la curva de referencia anterior (figura 2.8).

El procedimiento anterior se ejemplifica en la figura 2.8. En esta se presenta en su parte superior (A), un ejemplo de curvas de resistividad aparente (ρ_{xy} roja y ρ_{yx} azul) de una estación MT. El corrimiento estático en ellas se puede notar al observar la separación que éstas tienen en las frecuencias más altas ($\sim 1\text{kHz}$). La curva de referencia obtenida con TDEM se muestra en negro. En la parte inferior de la figura 3.1 (B), se muestra como se ajustan las curvas de resistividad aparente MT a la curva de referencia (TDEM) desplazándolas verticalmente. Este desplazamiento vertical equivale a multiplicar por un factor cada resistividad aparente.

Debido a que el método TDEM tiene menor profundidad de investigación que el método MT, la calibración anterior se debe realizar sólo considerando las mayores frecuencias de la curva de referencia del TDEM. Para determinar el rango de frecuencias y/o períodos válidos, se utiliza la expresión presentada en *Stenberg* (1988) que relaciona los tiempos de la curva de decaimiento de voltaje de TDEM con las frecuencias de los datos MT (2.33).

$$\frac{194}{f} = t \quad (2.33)$$

f : frecuencia en impedancia del método MT [Hz].

t : tiempo de un sondajes TDEM [mseg].

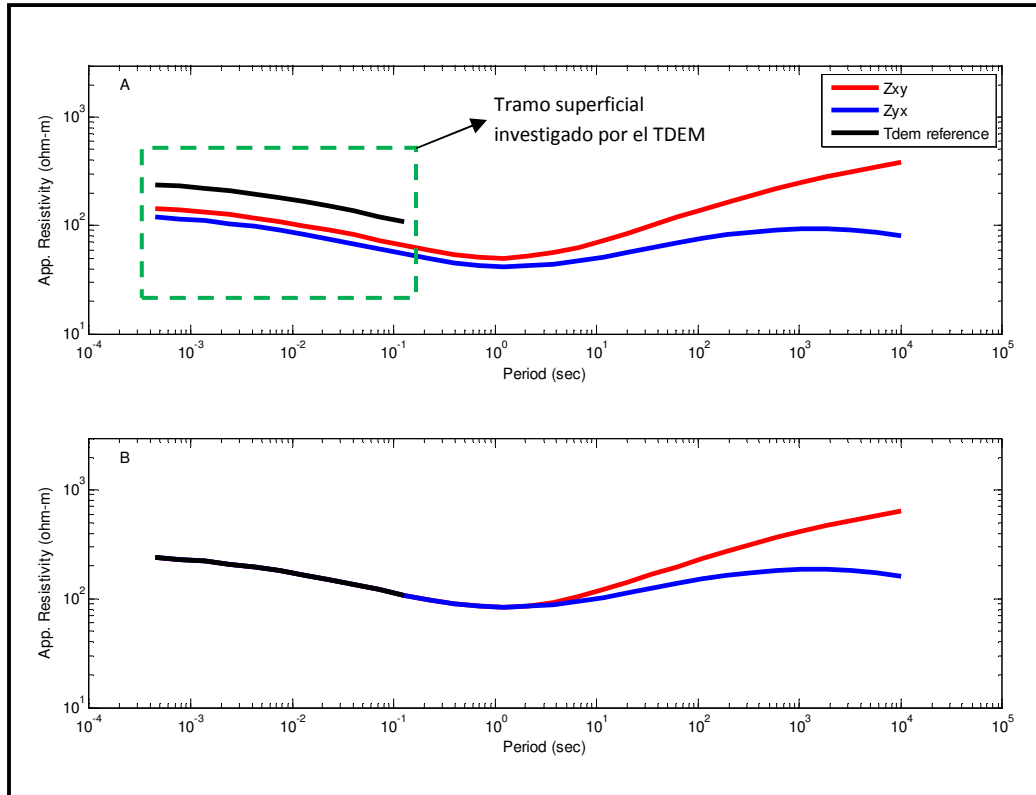


Figura 2.8 Corrección de corrimiento estático MT con TDEM. A – Datos MT medidos y respuesta de referencia de sondaje TDEM, B- datos MT con corrimiento estático corregido.

La calibración con TDEM (MT/TDEM) se utiliza para escalar las resistividades aparentes de las componentes de la antidiagonal del tensor (Z_{xy} y Z_{yx}), lo cual corresponde a un caso de dimensionalidad 2D (ver 2.2). Para el caso de un tensor de impedancias con dimensionalidad 3D, es decir con cuatro componentes (Z_{xx} , Z_{yy} , Z_{xy} y Z_{yx}), *Knútur et al.* (2010) presentaron una extensión usando una matriz de corrección diagonal que multiplica al tensor de impedancia (2.34). Los términos de esta matriz diagonal corresponden a la raíz de los factores de escalamiento utilizados para calibrar las resistividades aparentes. Cabe notar que la extensión de *Knútur et al.* (Tensor diagonal) es equivalente a la calibración con TDEM para el caso 2D.

$$\begin{bmatrix} Z_{xx}^c(f) & Z_{xy}^c(f) \\ Z_{yx}^c(f) & Z_{yy}^c(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{xy} & 0 \\ 0 & f_{yx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{xx}(f) & Z_{xy}(f) \\ Z_{yx}(f) & Z_{yy}(f) \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$$f_{xy} = \sqrt{S_x} \quad f_{yx} = \sqrt{S_y}$$

$$\rho_{xy}^c(f) = S_x \rho_{xy}(f) \quad \rho_{yx}^c(f) = S_y \rho_{yx}(f)$$

ρ_{ij}^c : Resistividad aparente con el SS corregido.

ρ_{ij} : Resistividad aparente medida.

S_i : Factor para corregir el SS en la resistividad aparente.

Z_{ij}^c : Impedancia con SS corregido.

Z_{ij} : Impedancia medida.

f_{ij} : Factor para corregir el SS en impedancia.

El principal argumento del MT/TDEM para corregir el corrimiento estático, es que las curvas de decaimiento de voltaje medidas por el TDEM sólo son sensibles en los tiempos muy tempranos ($\ll 0.1$ mseg) a los estratos superficiales de resistividad eléctrica en donde se podría generar el corrimiento estático. Esto permite que las mediciones de los estratos más profundos que se detectan en los tiempos posteriores (>0.1 mseg) no sean observables los efectos de las capas superiores. Debido a ello, los datos del TDEM no se verían afectados por el corrimiento estático que distorsiona los datos MT y, por lo tanto, el perfil de resistividad del subsuelo (modelo 1D) obtenido con el TDEM se puede usar como referencia para corregir los datos MT. Lo anterior es esperado, ya que el método TDEM sólo utiliza el campo magnético no siendo significativamente afectado por el acumulamiento de cargas en las inhomogeneidades superficiales asociado al corrimiento estático (*Stenberg, 1988*).

Una de las ventajas importantes de este método de corrección de corrimiento estático (MT/TDEM), es que el método TDEM es sencillo de adquirir requiriendo de poco equipamiento (sistema de adquisición con receptor y transmisor, cables y baterías) y poco personal (aproximadamente 4 personas), por lo que su adquisición en terreno es bastante rápida (1-30min por estación). En levantamientos pequeños de MT con dos estaciones instaladas diariamente, los sondajes TDEM pueden ser registrados con un sólo equipo de adquisición y con el mismo personal usado para la instalación de estaciones MT, por lo que la medición adicional del TDEM no genera un impacto importante en los costos y duración del proyecto. En levantamientos MT con mayor número de estaciones diarias, en zonas con dificultad de acceso y/o condiciones climáticas adversas, la medición de los sondajes TDEM requiere de varios equipos de adquisición usados simultáneamente y/o de cuadrillas de personal dedicadas especialmente a esta tarea, por lo que la adquisición adicional del método puede significar un aumento entre un 20% a un 40% los costos del proyecto.

Para la aplicación de este método se utilizan aproximaciones 1D, tanto para el método TDEM, como para MT, cuyas soluciones fueron desarrolladas hace más de 60 años (*Wait 1951, Cagniard 1953, Tikhonov 1950, Rikitake 1948*) por lo que existe amplia literatura y software para realizarlas no requiriendo de procesos computacionales complejos y/o demorosos. Esta es una de las razones para que el método haya adquirido tanta popularidad, ya que fácilmente se puede tener acceso a herramientas de software para su implementación y su aplicación es sencilla.

2.7 Limitaciones del método MT/TDEM

Las limitaciones del método MT/TDEM para remover el corrimiento estático en datos MT se pueden abordar de tres enfoques distintos. Estos son:

- **Observabilidad del corrimiento estático.**

Para que el efecto del corrimiento estático sea observable con el MT/TDEM se requiere que la distribución de la resistividad en los tramos más superficiales del subsuelo se pueda aproximar por un modelo de capas 1D (*Pellegrin et al.*, 1990). Esto significa que existe una relación íntima entre la dimensionalidad con que se distribuye la resistividad y la aplicabilidad del método MT/TDEM.

- **Distorsión en los datos TDEM**

Existen efectos anexos (Polarización Inducida, Superpermeabilidad magnética, corrientes galvánicas) que pueden afectar a los datos TDEM por sobre la inducción asociada a resistividad eléctrica del subsuelo. Cuando estos efectos están presentes pueden distorsionar los datos de TDEM, produciendo que se interprete una equivocada distribución de la resistividad del subsuelo y del corrimiento estático. En estos casos el método MT/TDEM no es posible aplicarlo, ya que no se puede medir la resistividad eléctrica del subsuelo con el TDEM.

- **Representación del Corrimiento Estático del MT/TDEM.**

De acuerdo con el desarrollo de Groom & Bailey (1990) el efecto del corrimiento estático es descrito por una matriz (matriz completa de distorsión) con cuatro factores reales que multiplica al tensor de impedancias. El método MT/TDEM sólo observa la diagonal de esta matriz (Pellegrin & Hohmann, 1990) y su corrección sólo es completa cuando el tensor de impedancias medido tiene su diagonal nula (caso 1D o 2D). Cuando la dimensionalidad del tensor de impedancias es 3D, todos sus términos son distintos de cero, haciendo que participen todos los términos de la matriz de distorsión en el efecto del corriente estático (Jones, 2011). Debido a esto, en el caso 3D la corrección del método MT/TDEM sólo puede ser parcial, ya que no incluye y/o no observa los factores de la antidiagonal de la matriz completa de distorsión.

A continuación se analizan y se desarrollan cada uno de estos enfoques por separado.

2.8 Observabilidad del Corrimiento Estático con MT/TDEM

Para que el corrimiento estático pueda ser observado comparando los resultados de TDEM y MT, se requiere que exista al menos un sector del subsuelo que sea investigado por ambos métodos y que pueda ser adecuadamente descrito por un modelo de capas (dimensionalidad 1D) de resistividad eléctrica (*Pellegrin et al.*, 1990).

El sector del subsuelo que es investigado simultáneamente por el TDEM y el MT se identifica en donde las frecuencias estudiadas por ambos métodos coinciden. Los datos de TDEM son medidos en tiempo para lo cual se utiliza 2.33 para calcular sus frecuencias equivalentes. El rango de profundidades al que correspondería este sector del subsuelo puede estimarse en una primera aproximación utilizando el skin-depth (2.9), para ello se considera el rango de frecuencias coincidente entre las respuestas de ambos métodos y los valores de resistividad observados. Por ejemplo, el rango de frecuencia coincidente con una respuesta de TDEM entre 0.1 mseg a 10 mseg y una impedancia de MT medida entre 10kHz hasta 0.001Hz, corresponde a intervalo entre 1940 Hz a 19.4 Hz según 2.33. Si la respuesta del TDEM muestra valores alrededor de 10 ohm-m en este rango de frecuencias, el sector de coincidencia correspondería al tramo del subsuelo, según el *Skin Depth* (2.9), entre los 36m a 360m de profundidad. Si este sector de coincidencia puede ser descrito por un modelo de capas (1D) dependerá de cuan compleja es la distribución resistividad eléctrica en este tramo del subsuelo, lo cual puede estar asociado a múltiples variables como litología, estructuras geológicas, petrología de las rocas, etc. Debido a lo anterior, el cumplimiento de esta condición puede variar ampliamente con respecto al sector de estudio y no siempre será posible de anticipar si se cumplirá.

Los métodos de TDEM y MT tienen distintas sensibilidades cuando hay cambios laterales de resistividad en el subsuelo, lo cual equivale a un caso con una dimensionalidad mayor a la 1D. En general se asume que los datos TDEM dependen más de los cambios verticales de resistividad que de los laterales, debido a su forma de medición (*Cumming & Mackie* 2010). Esto produce, que aunque haya una equivalencia en las frecuencias investigadas por el TDEM y MT, cuando hay cambios laterales de resistividad, no necesariamente los datos observados por ambos métodos responderían al mismo sector del subsuelo. Cuando sucede esto, no debería corregirse el corrimiento estático usando la calibración basada en TDEM, ya que se estarían comparando sectores cuyos valores de resistividad no necesariamente deberían coincidir. Esto generalmente se ve reflejado cuando las resistividades aparentes de MT y curva de referencia del TDEM no son paralelas.

Un caso excepcional puede ser considerado cuando el subsuelo presenta una dimensionalidad 2D que sólo afecta a la estación MT y no a los datos de TDEM. Esta situación se ejemplifica en la figura 2.9, en donde se presenta un cambio lateral de

resistividad de 10 a 100 ohm-m. En este caso las corrientes inducidas del TDEM (sección 2.5), sólo circulan dentro del medio con 100 ohm-m y no alcanzan a detectar el cambio lateral de 10 ohm-m. En cambio en la estación MT, los campos EM se alinean (modos TE y TM) con la orientación del cambio lateral de resistividad modificando su tensor de impedancias. En este caso, el tensor puede ser descompuesto en los modos TE y TM rotando el sistema de coordenadas hacia el rumbo eléctrico (strike). En los inicios del MT, esta descomposición era utilizada para interpretar datos de un ambiente 2D utilizando técnicas modelamiento 1D, para lo cual se aceptaba que sobre una anomalía se podía utilizar el modo TE para hacer interpretaciones 1D y fuera de la anomalía se puede usar el modo TM (A. Jones & A. Chave, 2013). Para aplicar lo anterior a la corrección del corrimiento estático basado en el TDEM, se debería primero realizar la descomposición de los modos TE - TM y luego calzar la resistividad aparente del modo que corresponda (habitualmente TE) a la curva de referencia del TDEM. Este tipo de descomposición se describe en R. W. Groom & R.C. Bailey, 1991.

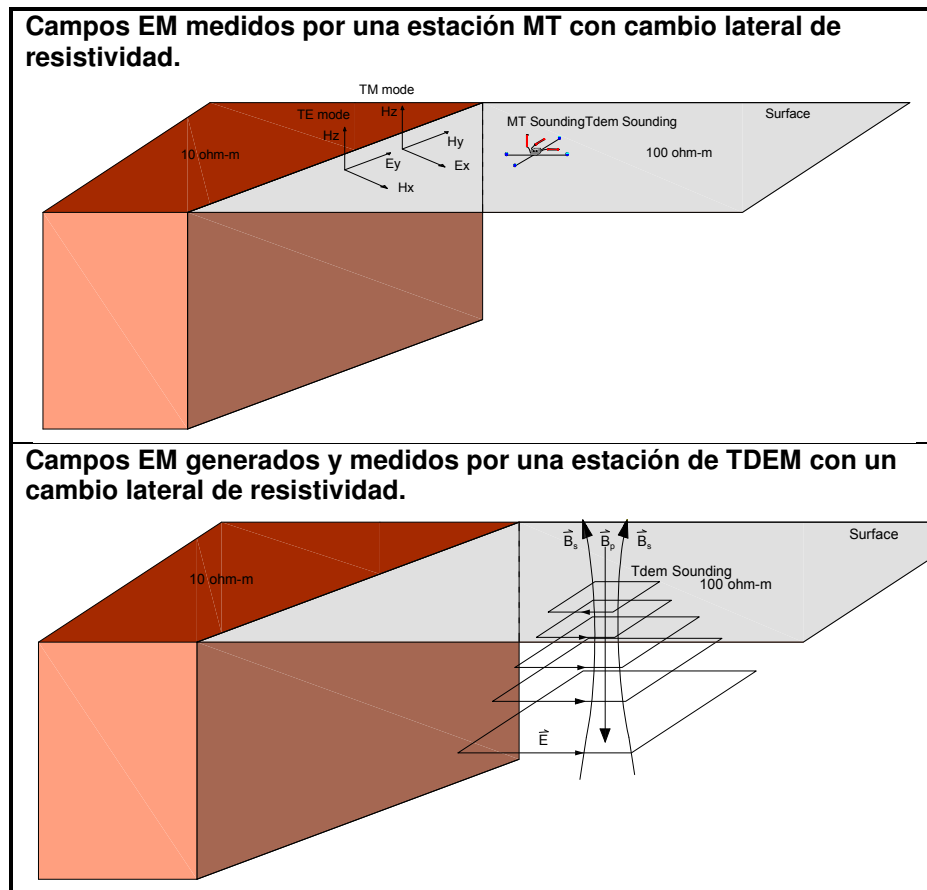


Figura 2.9 Campos EM asociados a las estaciones de MT y TDEM con un cambio lateral de la resistividad del subsuelo.

Cuando el método TDEM alcanza a detectar los cambios laterales de resistividad en el subsuelo, es decir una distribución de resistividad con dimensionalidad 2D o 3D, el modelamiento 1D usado en éste tiende a interpretar los cambios laterales de resistividad eléctrica como parte del modelo de capas. Esto produce un resultado equivocado sobre la distribución de resistividad en los modelos obtenidos. En dicha situación, tampoco es adecuado usar el método MT/TDEM para corregir el corrimiento estático, porque la curva de referencia basada en el modelamiento 1D del TDEM se mostrará distorsionada.

Un ejemplo de lo anterior se presenta en la figura 2.10, en donde se muestra como se ve afectado el modelamiento 1D del TDEM en un ambiente de falla (Ausken, 1995). En este caso el modelo del subsuelo está formado por dos capas y una estructura vertical. La primera capa se ubica entre la superficie y los 20m de profundidad teniendo una resistividad de 30 ohm-m. La segunda capa se ubica bajo los 20m de profundidad y posee 100 ohm-m. La estructura vertical tiene 50m de ancho con 10 ohm-m de resistividad y se ubica bajo la primera capa en el lado izquierdo del modelo. En este ejemplo se puede notar que la mayoría de los modelos 1D obtenidos presentan una primera capa superficial con valores cercanos a los 30 ohm-m, lo cual coincide con la primera capa del modelo original. Sin embargo a mayor profundidad y mientras más cerca de la estructura vertical se ubican las estaciones de TDEM, aparecen nuevas capas que no coinciden con distribución de resistividad ubicada inmediatamente bajo ellas. Al calcular curvas de referencia con estas estaciones para calibrar el efecto del corrimiento estático, sólo los resultados de la primera capa serán adecuados para realizar la corrección, debido a que son los únicos que no presenta distorsión.

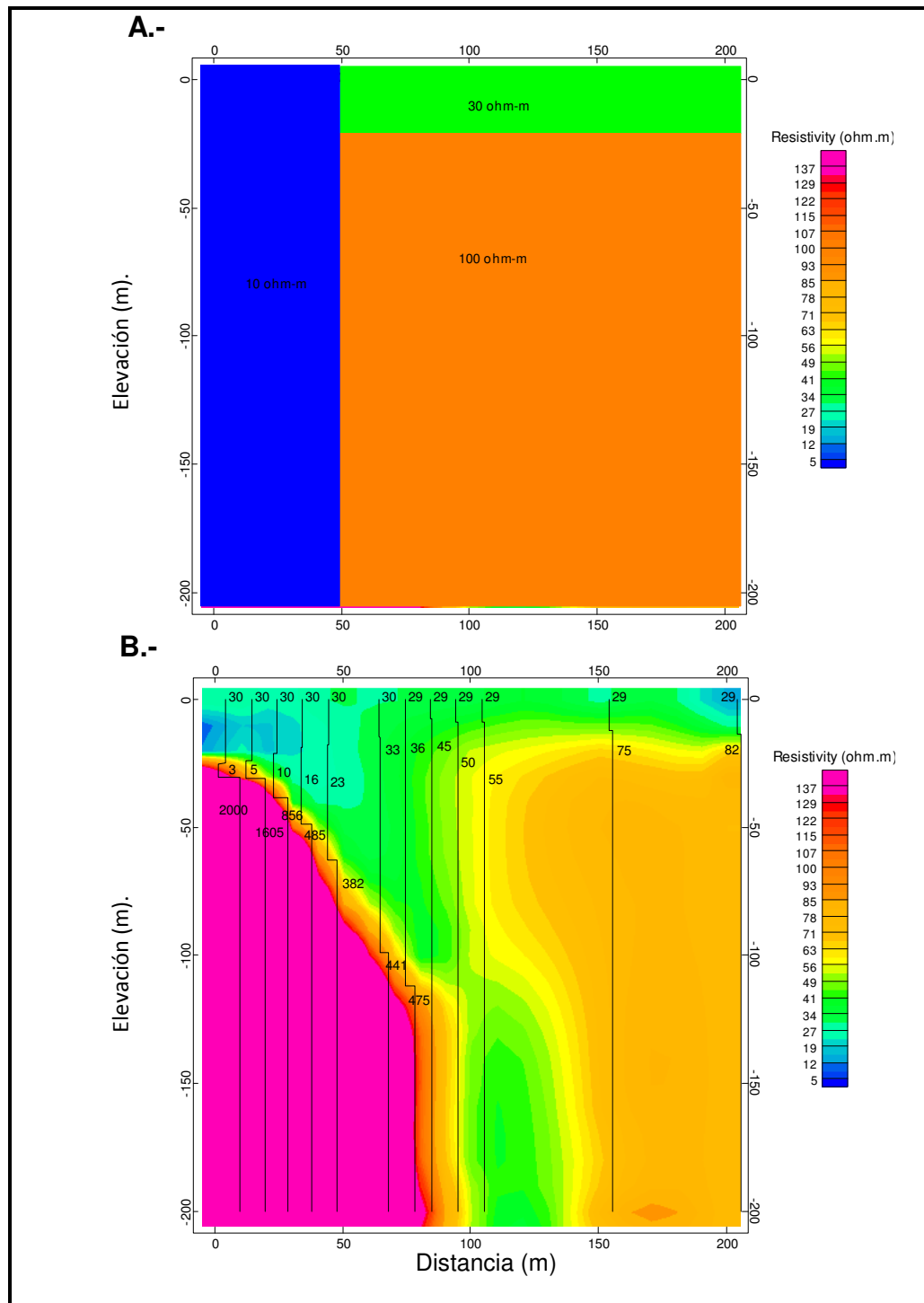


Figura 2.10 Resultados del modelamiento 1D de sondajes TDEM sobre un ambiente de falla.

A.- Modelo original de resistividades del subsuelo.

B.- Modelos 1D invertidos de sondajes TDEM simulados a partir del modelo original (líneas negro) y modelo de resistividades interpolado (colores) a partir de los modelos 1D.

2.9 Efectos que Producen Distorsión en los Datos TDEM

En el método TDEM, los datos medidos son generados principalmente por la distribución de resistividad eléctrica en el subsuelo. Hay algunas situaciones en las que el subsuelo presenta características especiales que reaccionan a los campos EM generados por el TDEM y cuyas respuestas pueden alterar las mediciones del TDEM. A continuación se desarrollan algunas de estas características especiales.

Efectos galvánicos.

Este efecto se presenta cuando un cuerpo 3D es atravesado por las corrientes de inducción producidas por un campo magnético variable (*Newman et al.*, 1986). En el caso del TDEM, este campo sería generado por el *loop* transmisor. Si la resistividad del cuerpo es distinta a la del medio conductivo que lo rodea, se genera una discontinuidad en el campo eléctrico a través de la acumulación de cargas en sus bordes. Esta situación se produce para mantener la continuidad del vector de corriente normal a la superficie del cuerpo, de forma que las cargas se distribuyen en concordancia con la forma del cuerpo 3D y la dirección de circulación de la corriente. A partir de esta acumulación de cargas existe una diferencia de potencial que permite la circulación de una nueva corriente, denominada “galvánica”, a través del medio conductivo que rodea el cuerpo 3D. Esta corriente galvánica también genera un campo magnético el cual podría alcanzar al *loop* receptor pudiendo aumentar o disminuir el voltaje inducido en el *loop* receptor, produciendo el aumento o disminución de la resistividad aparente registrada.

En el caso de un sondaje TDEM, que es sólo interpretado modelando capas horizontales en el subsuelo, los efectos galvánicos serán interpretados como variaciones de resistividad en el medio.

Cuando el TDEM es utilizado para determinar las correcciones estáticas, generalmente se mide en la misma ubicación de cada estación MT, las cuales suelen estar bastante espaciadas (~1 Km). Debido a esto, a pesar que el efecto galvánico en un TDEM es un efecto local, es bastante difícil distinguirlos debido a la baja cobertura de datos.

Respuestas negativas

Desde los orígenes del método TDEM se han encontrado respuestas con voltajes negativos, las cuales no pueden ser explicadas directamente con un comportamiento puramente resistivo del subsuelo (*Flis* 1987, *Smith & West* 1988, *Desclores* 1990, etc.). En la figura 2.12 se muestra un ejemplo de esta situación, donde se gráfica la curva de decaimiento de voltaje medida por el *loop* receptor en la adquisición de un sondaje TDEM reportado en *Flis* (1987). En ésta curva de decaimiento se puede observar que antes de 1 mseg se registran voltajes positivos y, posteriormente, sólo se observan valores negativos.

Este efecto es común apreciarlo en la curva de decaimiento de voltaje en torno a un 1 mseg (*Smith & West*, 1988) posterior al corte de la corriente de transmisor, aunque se han reportado respuestas negativas (NR) más tempranas (*Desclores*, 1990).

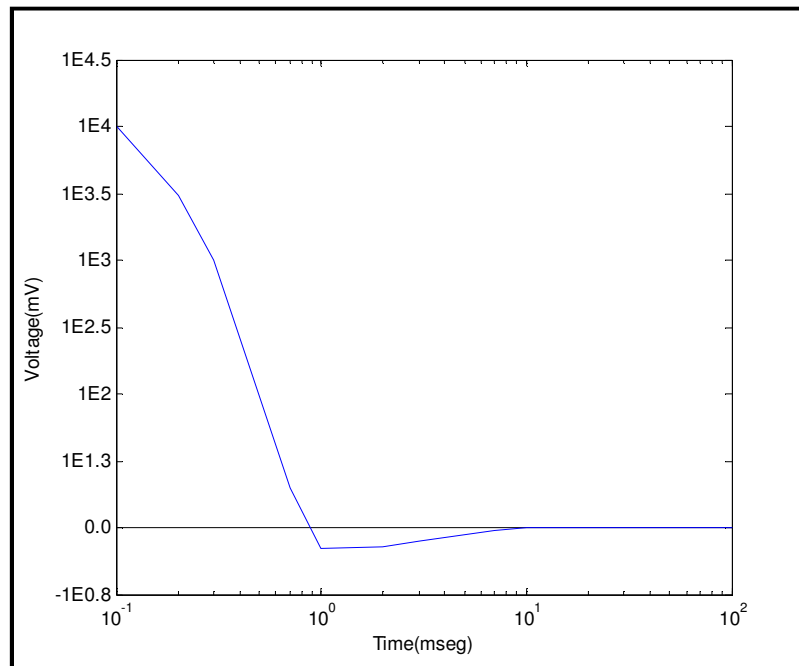


Figura 2.12 Ejemplo de respuestas negativas adquirida con el método TD (*Flis*, 1987).

La explicación más aceptada a este fenómeno es que es causado por una respuesta dispersiva de la resistividad (variación con la frecuencia) asociada a cuerpos o capas polarizables del subsuelo (*Flis*, 1987). Estos cuerpos o capas se polarizarían moviendo sus cargas en la dirección de las corrientes de inducción de TDEM, que son más intensas inmediatamente después de la interrupción del transmisor. Una vez que las corrientes de inducción alcanzan mayores profundidades que la del cuerpo o capa polarizable, éste comenzaría a descargarse generando una corriente inversa. El campo

magnético asociado a esta corriente se restaría al campo magnético generado por la respuesta del resto del medio generando una disminución del voltaje recibido por el *loop* receptor de TDEM. Este fenómeno es equivalente al de polarización inducida observado en DC/IP, pero manifestado en rangos de tiempo completamente distintos, ya que el TDEM registra el decaimiento de voltaje entre 0.1 mseg a 100 mseg y el DC/IP lo registra entre 45 mseg a 1100mseg.

Se ha observado que la magnitud de la respuesta negativa en los sondeos de TDEM está relacionada con la configuración de los *loops*, profundidad, tamaño del cuerpo. En configuraciones de *loop* coincidente y *loop* central (sección 2.5) el efecto de la respuesta negativa es más acentuado que otras configuraciones (Por ej.: LOTEM) y que mientras mayor sea el tamaño del loop menor es el efecto de la respuesta negativa (Descloitres, 2000). En Kaliouby (2004) se estudia el comportamiento de la respuestas negativas generadas por un cuerpo polarizable 3D de 30 ohm-m enterrado en un medio de 300 ohm-m. Los resultados indican que las respuestas negativas son más intensas mientras menor es la profundidad de cuerpo polarizable y que estas tienden a disminuir cuando el tamaño del loop transmisor es similar al de cuerpo polarizable. Las respuestas negativas tienden a presentarse más favorables en medios con alta resistividad (>300 ohm-m) que tienen embebidas cuerpos y/o capas con resistividad significativamente menor (Smith & West, 1988).

La interpretación de datos de TDEM con respuestas negativas es claramente de mayor dificultad, debido a que se deben agregar parámetros adicionales para representar la polarización del cuerpo o capa. Generalmente se utiliza el modelo de Cole-Cole para incluir la respuesta en frecuencia del cuerpo cargable (Descloitres 2000, Kailouby 2004, etc.).

El uso de datos de TDEM con respuesta negativa para la determinación del corrimiento estático no se recomienda, ya que para su interpretación se requiere de separar la respuesta inductiva y la respuesta polarizada del subsuelo, lo cual significa que se deben determinar parámetros adicionales (Cole-Cole) agregando mayor incertidumbre sobre el modelo de resistividad interpretado. Bajo esta situación no resulta confiable utilizar el modelo de resistividades del TDEM como patrón de referencia para calibrar los datos MT.

Efectos Topográficos.

En *Watts & Mackie* (2013) se presenta como cambia la resistividad aparente del método TDEM en función de la topografía del terreno. Para ello se calculan las respuestas del método considerando las siguientes deformaciones del terreno sobre un medio de resistividad homogénea con 100 ohm-m.

- Valle de 500m de profundidad con 30 o 60 grados de inclinación. En la base del valle hay un sector plano de 50m.
- Montaña de 500m de altura con 30 o 60 grados de inclinación. En la cima hay un sector plano con 50m de largo.

En la simulación de los datos se consideró una configuración de loop central, en la que el *loop* transmisor tiene un área 50x50 m² y el *loop* receptor tiene un área 1m². Los resultados muestran que los datos de TDEM no son significativamente afectados en un valle, ya que los valores de resistividad aparente varían menos de un 30% con respecto al modelo plano. Sin embargo, en el caso de la montaña se observan variaciones de hasta 600% (con 60° de inclinación) en los valores de resistividad aparente. En ambos casos (valle y montaña) se observa que la resistividad aparente se encuentra desplazada de los 100 ohm-m del modelo original independientemente del tiempo registrado (static shift de TDEM).

En el mismo *Watts & Mackie* (2013) se evalúa como el método de calibración con TDEM (MT/TDEM) puede corregir el corrimiento estático en datos MT cuando hay topografía pronunciada. Se concluye que en el caso de la montaña el método de corrección con TDEM puede introducir mayores artefactos al modelo invertido que el mismo corrimiento estático.

2.10 Representación del Corrimiento Estático del MT/TDEM.

El método para corregir el corrimiento estático (SS) basado en la calibración con TDEM (MT/TDEM) utiliza el modelo descrito en 2.35 para corregir los datos en el tensor de impedancias. En éste el SS es removido multiplicando una matriz de distorsión diagonal al tensor de impedancia. Esta corrección es aplicada al tensor de impedancias en todas sus frecuencias invariablemente, debido a que se supone que el corrimiento estático es independiente de la frecuencia (Sección 2.4).

De acuerdo con el desarrollo de *Groom & Bahr* (1992) la matriz de distorsión producido por anisotropías de resistividad eléctrica superficiales no siempre es diagonal (por ejemplo 2.24) y resulta más adecuado representarlo como una matriz con todos sus elementos son distintos de cero (matriz de distorsión completo). Debido a esto la corrección del SS usando una matriz diagonal obtenida con la calibración con TDEM (con sólo dos términos distintos de cero), sólo puede corregir parcialmente el efecto del SS en los datos MT, ya que es una representación incompleta de este efecto.

Como se describe en la sección anterior en los tramos más superficiales (cubiertos por el TDEM y el MT) se debe tener una dimensionalidad 1D para permitir observar los factores de SS usando la calibración con TDEM (MT/TDEM). A períodos mayores (o frecuencias más bajas) que alcanzan una mayor profundidad en el subsuelo, el tensor de impedancia de MT podría aumentar su dimensionalidad debido a que detectaría una mayor complejidad en la distribución de resistividad en el subsuelo. Lo anterior se suele apreciar en las resistividades aparentes de la antidiagonal del tensor cuando se separan en las frecuencias más bajas, como en la figura 2.8. Debido a lo anterior, la corrección del corrimiento estático inicialmente medida con el TDEM en un ambiente 1D superficial, podría ser aplicada a datos con mayor dimensionalidad que 1D en las frecuencias bajas de mayor profundidad en el MT.

A continuación se analiza cómo afecta la representación incompleta de la matriz diagonal del MT/TDEM cuando es usada para corregir el efecto del SS en datos de mayor dimensionalidad que 1D. Para esto se estudian las siguientes situaciones:

- Caso 1: Datos MT con dimensionalidad 2D y distorsionados con una Matriz Completa de Distorsión (4x4).
- Caso 2: Datos MT con dimensionalidad 2D con rumbo eléctrico y distorsionados con una Matriz Completa de Distorsión (4x4).
- Caso 3: Datos MT con dimensionalidad 3D y distorsionados con una Matriz Completa de Distorsión (4x4).

Cuando la dimensionalidad del tensor de impedancias es 2D, sólo los términos de la antidiagonal son distintos de cero (Z_{xy} y Z_{yx}). Al aplicar un corrimiento estático en los datos utilizando una matriz de distorsión completa (2x2), se obtiene un tensor de impedancias con sus cuatro elementos distintos de cero (2.27). Al utilizar el método de calibración sobre este tensor, se comparan las resistividades aparentes de su antidiagonal con la curva de referencia del TDEM, lo cual permite observar los factores de corrimiento estático s_{xy} y s_{yx} (siempre que el subsuelo sea 1D en la sección investigada por TDEM y MT). Usando estos factores se construye la matriz diagonal que sería estimada usando el método de calibración con TDEM. En 2.36 se muestra el resultado de aplicar esta corrección sobre los datos distorsionados. En ésta sólo se logra corregir el efecto del corrimiento estático en los elementos de la antidiagonal del tensor de impedancia (Z^c_{xy} y Z^c_{yx}), pero no es los elementos de la diagonal (Z^c_{xx} y Z^c_{yy}) que siguen siendo distintos de cero. Si el tensor resultante de esta corrección (estimado en 2.36) fuera interpretado a través del modelamiento 2D con una inversión formal, sólo se utilizarían los términos de la antidiagonal del tensor y, por lo tanto, el efecto del corrimiento estático habría sido adecuadamente corregido. Sin embargo en una inversión o modelamiento 3D de los datos en donde se usan los cuatro términos del tensor de impedancia, los términos de la diagonal en donde el SS no ha sido adecuadamente corregido podrían producir errores en el modelamiento.

$$\begin{array}{ccc}
 \text{Matriz de} & \text{T. de Impedancias} & \text{T. de Impedancias} \\
 \text{distorsión} & \text{2D} & \text{2D con corrimiento estático} \\
 \\
 \begin{bmatrix} s_{xy} & s_{xx} \\ s_{yy} & s_{yx} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix} & = \begin{bmatrix} s_{xx}Z_{yx} & s_{xy}Z_{xy} \\ s_{yx}Z_{yx} & s_{yy}Z_{xy} \end{bmatrix} & (2.35)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc}
 \text{Tensor de} & \text{T. de Impedancias} & \text{T. de Impedancias} \\
 \text{corrección} & \text{2D con corrimiento estático} & \text{estimado} \\
 \text{estimado con} & & \\
 \text{TDEM} & & \\
 \\
 \begin{bmatrix} 1/s_{xy} & 0 \\ 0 & 1/s_{yx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{xx}Z_{yx} & s_{xy}Z_{xy} \\ s_{yx}Z_{yx} & s_{yy}Z_{xy} \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} \frac{s_{xx}}{s_{xy}}Z_{yx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & \frac{s_{yy}}{s_{xy}}Z_{xy} \end{bmatrix} = Z^c & (2.36)
 \end{array}$$

En el caso 2, los datos con dimensionalidad 2D presentan un rumbo eléctrico. Esto significa que hay un ángulo (rumbo o strike eléctrico) entre eje de simetría, con que se distribuye la resistividad 2D del subsuelo, y el sistema de referencia utilizado para la medición de las estaciones MT. El tensor de impedancias con corrimiento estático en este caso correspondería al indicado en 2.37 (*Groom & R. Bailey, 1992*). Si los datos son rotados hacia el rumbo eléctrico y luego se aplica la calibración basada en TDEM usando la matriz diagonal, se obtiene el resultado del caso 1 en donde los términos de la antidiagonal del tensor son corregidos efectivamente, pero no los de la diagonal. Por el contrario, si la calibración con TDEM es aplicada sobre el tensor de impedancias sin corregir el rumbo eléctrico, se obtiene el mismo resultado de corrección del SS que en el caso 3 (3D).

$$\begin{array}{ccccc}
 \text{Tensor de} & \text{Matriz de rotación} & \text{Matriz de} & \text{Tensor de} & \text{Matriz de rotación} \\
 \text{impedancias} & \text{al rumbo eléctrico} & \text{Distorsión} & \text{Impedancias} & \text{al rumbo eléctrico} \\
 \text{con SS} & & & \text{2D} & \text{(transpuesta)} \\
 \\
 Z(\theta) = & \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} s_{xy} & s_{xx} \\ s_{yy} & s_{yx} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} & (2.37)
 \end{array}$$

θ : rumbo o strike eléctrico

En 2.38 se analiza el caso 3, en el cual un tensor de impedancias con dimensionalidad 3D es afectado por el SS con una matriz de distorsión completa. El método de la calibración con TDEM (MT/TDEM) sólo puede observar los términos de la diagonal de la matriz de distorsión. Al intentar corregir el efecto del SS multiplicando por esta matriz diagonal estimada (C_{TDEM}), sólo se remueven los factores de la diagonal de la matriz de distorsión original, quedando términos remanentes en la antidiagonal (2.39). Esto produce que en el tensor de impedancias (Z_{corr}) “corregido” se elimina el escalamiento del SS, pero quedan términos adicionando (2.40). En el caso de las impedancias de la diagonal del tensor, los valores sin distorsión Z_{xx} y Z_{yy} son adicionados por los

elementos Z_{yx} y Z_{yx} amplificados por un factor (2.40). En el caso de la antidiagonal, las impedancias Z_{yx} y Z_{yx} se le suman Z_{xx} y Z_{yy} escalándolos por un factor. En general, los elementos de la antidiagonal del tensor de impedancia (Z_{xy} y Z_{yx}) suelen ser mucho mayores en magnitud que los de la diagonal (Z_{xx} y Z_{yy}), por lo que el efecto de la adición anterior termina modificando mayormente a los impedancias de la diagonal del tensor. De esta manera, la calibración por TDEM es capaz reducir el efecto de escalamiento del SS en el tensor de impedancia en los términos de la antidiagonal, pero no es capaz de reducir la distorsión en los términos de la diagonal. Esto puede producir al menos dos efectos, por un lado, al igual que los casos analizados anteriormente, se dificulta el modelamiento 3D, debido a que el SS no es corregido en los términos de la diagonal del tensor. Por otro lado, los términos de la diagonal del tensor poseen información relevante sobre la orientación de estructuras de resistividad en el subsuelo (*Kijan et al., 2014*). Debido a que estos términos no tienen corregido el SS en el caso 3, al realizar el modelamiento 3D sobre los datos se podrían obtener estructuras mal orientadas y/o no detectarlas.

$$\begin{array}{ccc}
 \text{Matriz de} & \text{T. de Impedancias} & \text{T. de Impedancias} \\
 \text{distorsión} & \text{3D} & \text{3D con corrimiento estático} \\
 \begin{bmatrix} s_{xy} & s_{xx} \\ s_{yy} & s_{yx} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} & = Z
 \end{array} \quad (2.38)$$

$$C_{TDEM} = \begin{bmatrix} 1/s_{xy} & 0 \\ 0 & 1/s_{yx} \end{bmatrix}$$

$$Z_{corr} = C_{TDEM} \begin{bmatrix} s_{xy} & s_{xx} \\ s_{yy} & s_{yx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}$$

$$Z_{corr} = \begin{bmatrix} 1 & s_{xx}/s_{xy} \\ s_{yy}/s_{yx} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

$$Z_{corr} = \begin{bmatrix} Z_{xx} + \frac{s_{xx} Z_{yx}}{s_{xy}} & Z_{xy} + \frac{s_{xx} Z_{yy}}{s_{xy}} \\ Z_{yx} + \frac{s_{yy} Z_{yx}}{s_{yx}} & Z_{yy} + \frac{s_{yy} Z_{xy}}{s_{yx}} \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Del análisis anterior, se puede resumir que la técnica de calibración con TDEM es efectiva removiendo el efecto del corrimiento estático en las impedancias de la antidiagonal (Z_{xy} e Z_{yx}) en tensores con dimensionalidad 2D y, en algunos casos, hasta con dimensionalidad 3D. Esto resulta útil para los métodos de modelamiento y/o inversión 2D que sólo utilizan estas impedancias (Z_{xy} e Z_{yx}). Sin embargo, el efecto del SS no puede ser removido en las impedancias de la diagonal del tensor, lo que puede introducir errores en los métodos de inversión 3D que utilizan los elementos del tensor de impedancias.

2.11 Aplicación de Método MT/TDEM en conjunto con la Descomposición del Tensor de Impedancias.

De la documentación realizada en las secciones anteriores, es posible apreciar que el uso combinado de técnicas de descomposición del tensor de impedancia con el método MT/TDEM aparentemente podrían mejorar los resultados de corrección del corrimiento estático. A continuación se analizan esta proposición.

El MT/TDEM utiliza una representación incompleta (matriz de distorsión diagonal) del corrimiento estático (SS), por lo que sólo puede removerlo parcialmente (Sección 10). Por otro lado, la descomposición de Groom & Bailey utiliza un modelo más completo de distorsión (Matriz Completa de Distorsión) que puede corregir más adecuadamente el SS, pero no puede observar dos de sus términos: la ganancia (g) y anisotropía (A). Debido a lo anterior, se pueden usar ambas técnicas combinadas para mejorar la corrección del SS. En tal caso, el MT/TDEM completa los términos de ganancia (g) y anisotropía (A) de la descomposición de *Groom & Bailey*, reemplazándolos por su tensor diagonal (2.41). Para realizar esta corrección, primero se aplica la descomposición de *Groom & Bailey* sobre el tensor de impedancia medido para obtener el rumbo (θ), la matriz de *twist* (T), la matriz de *shear* (S) y los términos Z^c_{xy} y Z^c_{yx} . Luego se determina la calibración con TDEM (s_{xy} e s_{yx}), comparando la curva de referencia del modelo 1D del TDEM con los términos Z^c_{xy} y Z^c_{yx} . Como resultado se obtienen los términos Z^o_{xy} y Z^o_{yx} que corresponden a una descomposición 2D con corrección estática corregida del tensor de impedancia medido (2.42).

$$Z_{medido} = R(\theta) C \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix} R'(\theta) = R(\theta) T S \begin{bmatrix} 0 & Z^c_{xy} \\ Z^c_{yx} & 0 \end{bmatrix} R'(\theta) \quad (2.41)$$

$$C = g T S A$$

$$g A = \begin{bmatrix} \frac{g(1+a)}{\sqrt{1+a^2}} & 0 \\ 0 & \frac{g(1-a)}{\sqrt{1+a^2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{xy} & 0 \\ 0 & s_{yx} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & Z^c_{xy} \\ Z^c_{yx} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{xy} & 0 \\ 0 & s_{yx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & Z^o_{xy} \\ Z^o_{yx} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

El mismo resultado del procedimiento anterior puede obtenerse, rotando el tensor de impedancia (θ) hacia el rumbo eléctrico (donde $Z_{xx}=0$ y $Z_{yy}=0$) y luego calibrando la antidiagonal del tensor de impedancia obtenido con la curva de referencia del TDEM (sección 2.6). Para esto primero se debe calcularse el rumbo eléctrico del tensor de impedancia, para lo cual se puede usar cualquiera de los métodos propuestos en la sección 2.2. Luego, se rota el tensor hacia el rumbo eléctrico aplicando las matrices de rotación indicadas en 2.43 para obtener Z^c . Comparando las resistividades aparentes de la antidiagonal del tensor obtenido (Z^c_{xy} y Z^c_{yx}) con la curva de referencia del TDEM (sección 2.6), se determina el tensor diagonal de distorsión C_{tdem} , el cual contiene los factores s_{xy} y s_{yx} . Al multiplicar por C_{tdem}^{-1} al tensor de impedancia desrotado, se consigue un tensor cuyos elementos de la antidiagonal tienen corregido el efecto de SS y que son iguales a los obtenidos con la aplicación conjunta de la descomposición de *Groom & Bailey* y el MT/TDEM. Los elementos de diagonal del tensor obtenido en este caso no son útiles, por que sólo corresponden a los elementos de la antidiagonal escalados y se deben desechar para recuperar la respuesta 2D del tensor (2.45).

$$Z_{medido} = R(\theta) \begin{bmatrix} Z^c_{xx} & Z^c_{xy} \\ Z^c_{yx} & Z^c_{yy} \end{bmatrix} R'(\theta) \quad (2.43)$$

$$\begin{bmatrix} Z^c_{xy} & Z^c_{xx} \\ Z^c_{xx} & Z^c_{yx} \end{bmatrix} = C Z = \begin{bmatrix} s_{xy} & s_{xx} \\ s_{yx} & s_{yx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{tdem}^{-1} C Z = \begin{bmatrix} s_{xy} & 0 \\ 0 & s_{yx} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} s_{xy} & s_{xx} \\ s_{yx} & s_{yx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{s_{xx}}{s_{xy}} Z_{yx} & Z^0_{xy} \\ Z^0_{yx} & \frac{s_{yy}}{s_{xy}} Z_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

$$Z = \begin{bmatrix} 0 & Z^0_{xy} \\ Z^0_{yx} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Las dos métodos de corrección del corrimiento estático propuestos anteriormente requieren que el tensor de impedancias tenga dimensionalidad 2D (sección 2.10). Además, para que el MT/TDEM pueda observar el efecto del corrimiento estático es necesario un comportamiento 1D de resistividad eléctrica en los estratos más superficiales (Sección 2.9).

Debido a lo anterior, ninguna de estas técnicas es realmente adecuada para ser aplicada en datos con dimensionalidad 3D. Sin embargo, no siempre todos los datos considerados en una inversión de MT 3D tienen dimensionalidad 3D, por lo que en dichas situación estos métodos podrían ser efectivos. Si ese es el caso, para usar los datos en una inversión 3D se debería revertir la rotación del rumbo en el tensor 2D obtenido de la corrección para permitir utilizarlo con sus cuatro componentes.

CAPÍTULO 3:

MODELAMIENTO DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO

En este capítulo se describe el método para corregir el corrimiento estático (SS) en impedancias de magnetotelúrica a través del modelamiento durante el proceso de inversión. En éste se estima el modelo de resistividades del subsuelo y los factores del corrimiento estático de cada estación, a través de un proceso iterativo, tal que sus respuestas minimicen la diferencia con los datos observados.

Este método resulta atractivo ya que introduce menores distorsiones en los procesos de inversión 3D de datos MT. Esto debido a que no removería la información tridimensional en los datos y no introduciría aproximaciones de menor dimensionalidad (Chave & Jones 2013, Watts et al., 2013). También en algunos casos, el método se propone como una alternativa a la calibración con TDEM, en la cual no se necesitarían mediciones adicionales a las estaciones MT teniendo menores costos en la adquisición en terreno. Cabe notar que como la corrección del SS a través del modelamiento es realizada casi automáticamente en el proceso de inversión, ésta se simplifica considerablemente requiriéndose menor experiencia y análisis para su aplicación.

El método propuesto parte del trabajo de Sasaki (2004 y 2006), en el cual se implementa e investiga un código de inversión 3D para datos de magnetotelúrica incluyendo la estimación del SS.

Para implementar el modelamiento del corrimiento estático en este trabajo se modificó el código de inversión 3D de datos MT presentado por Siripunvaraporn (2006) con su versión paralela (WSINV3DMT). Este código se encuentra ampliamente distribuido y actualmente en uso por la comunidad científica (www.mtnet.info). WSINV3DMT permite estimar el modelo tridimensional de resistividades del subsuelo utilizando los tensores de impedancias medidos en estaciones MT, pero no considera ninguna técnica para remover el corrimiento estático en los datos. A través de la implementación de este trabajo se desarrolló una versión del código que si puede corregir el corrimiento estático.

En este capítulo primero se presenta la formulación teórica de método del modelamiento del corrimiento estático y se describe su implementación en el código

WSINV3DMT. Posteriormente se muestran ejemplos del método aplicándolo a datos simulados con SS y se discuten sus resultados para reconocer sus características.

3.1 Modelamiento del corrimiento estático

En Sasaki (2004) se presenta un método para resolver el corrimiento estático (SS) en impedancias MT estimándolo directamente en cada iteración del proceso de inversión. Para esto se supone que el corrimiento estático puede ser modelado a través de cuatro factores reales que escalan individualmente los elementos del tensor de impedancia (3.1).

$$\begin{pmatrix} Z_{xx}^c & Z_{xy}^c \\ Z_{yx}^c & Z_{yy}^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{xx}Z_{xx} & s_{xy}Z_{xy} \\ s_{yx}Z_{yx} & s_{yy}Z_{yy} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{pmatrix} \rho_{xx}^c & \rho_{xy}^c \\ \rho_{yx}^c & \rho_{yy}^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{xx}^2\rho_{xx} & s_{xy}^2\rho_{xy} \\ s_{yx}^2\rho_{yx} & s_{yy}^2\rho_{yy} \end{pmatrix}$$

Z_{ij}^c : Impedancia con corrimiento estático

Z_{ij} : Impedancia sin corrimiento estático

ρ_{ij}^c : Resistividad aparente con corrimiento estático

ρ_{ij} : Resistividad aparente sin corrimiento estático

a_{ij} : Factor de escalamiento de corrimiento estático

s_{ij} : Logaritmo del factor de escalamiento de corrimiento estático

El método trabaja sobre los logaritmos de las resistividades aparentes y las fases de cada elemento del tensor (3.2). Al aplicar la función logaritmo sobre las resistividades aparentes ya distorsionadas, es posible separar los factores del corrimiento estático y las resistividades no distorsionadas (3.2). Cabe notar que las fases no son afectadas por el corrimiento estático en este modelo, ya que los factores de estática no tienen componentes imaginarias. Esto último es una aproximación, ya que en el caso de corrimiento estático sobre un tensor con dimensionalidad 3D existe una combinación lineal entre las componentes diagonal y antidiagonal del tensor, pudiendo afectar las fases de la componente resultante (Jones, 2011).

$$\log(\rho^c) = \log(s\rho) = \log(\rho) + S$$

$$S = \log(s)$$

(3.2)

Lo anterior permite que el modelamiento directo de las respuestas en las estaciones de MT pueda ser escrito como indica 3.3. En donde $F(m_k)$ representa el vector con los logaritmos de las resistividades aparentes y fases calculadas a partir del modelo de resistividades m_k de cada estación MT. La matriz G asigna a cada respuesta el factor de corrimiento estático (S), de forma que las resistividades aparentes sean escaladas (independientemente de la frecuencia) y que las fases no sean afectadas.

$$F^*(m_k) = F(m_k) + G S \quad (3.3)$$

El proceso de inversión se implementa buscando los valores de resistividad y los factores de corrimiento estático que minimizan la función objetivo expresada en la ecuación 3.4. En ésta se intenta principalmente disminuir la diferencia entre los datos medidos de las estaciones MT con las respuestas calculadas del modelo de resistividades y escaladas por los factores de corrimiento estático.

Para que el modelo de resistividades obtenido sea con mínima estructura se adicionan en la función objetivo dos términos de regularización que favorecen la formación de modelos simples y con mínima estructura. El primer término de regularización se forma con el producto cuadrático del modelo de resistividad (m_{k+1}) con el laplaciano C (3.6), el cual penaliza los modelos que presentan variaciones abruptas en la resistividad. El segundo término castiga los modelos que tienen mucha variación con respecto a su iteración anterior, de forma que multiplica esta diferencia por un factor α^2 . Adicionalmente se incluye en la función objetivo un término que penaliza los factores del corrimiento estático que sean grandes o muy pequeños (muy diferentes de 1) escalando su producto cuadrático por un factor β^2 . Un factor de laplace λ permite definir a que términos del proceso de inversión se dará mayor importancia, si a las restricciones impuestas al modelo o el ajuste con los datos. Los parámetros $\alpha^2, \beta^2, \lambda$ se definen iterativamente en función de resultados del proceso de inversión.

$$\min_{m_i, S} \|\beta S\|^2 + [\|C(m_{k+1})\|^2 + \|\alpha(m_{k+1} - m_k)\|^2] \lambda + \|C_d(d - F(m_{k+1}) - GS)\|^2 \quad (3.4)$$

La minimización de la función objetivo 3.4 es equivalente a resolver el problema lineal definido en 4.5. En Sasaki (2004) éste se resuelve iterativamente usando el método de gradiente bi-conjugado.

$$\begin{bmatrix} C_d J & C_d G \\ \alpha \lambda I & 0 \\ C \lambda & 0 \\ 0 & B I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{k+1} \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_d \Delta d \\ -\lambda C m_k \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Laplaciano. (3.6)

$$C_{ijk,lmn} = -6 \delta_{il} \delta_{jm} \delta_{kn} + (\delta_{i+1l} + \delta_{i-1l}) \delta_{jm} \delta_{kn} + \delta_{il} (\delta_{j+1m} + \delta_{j-1m}) \delta_{kn} + \delta_{il} \delta_{jm} (\delta_{k+1n} + \delta_{k-1n})$$

$$\delta_{kn} = \begin{cases} \text{si } k = n & 1 \\ \text{si } k \neq n & 0 \end{cases}$$

3.2 Inversión 3D en WSINV3DMT

Antes de presentar la formulación del modelamiento del corrimiento estático (SS) en WSINV3DMT de este trabajo, se muestra una breve descripción de las expresiones utilizadas en la versión original del código (sin corrección de SS). Una descripción más detallada del código se puede encontrar en (Siripunvaraporn & Egbert 2000, Siripunvaraporn et al. 2005, Siripunvaraporn & Egbert. 2007, Siripunvaraporn 2012)

WSINV3DMT (Siripunvaraporn et al 2005) es un código escrito en Fortran que estima, usando los tensores de MT medidos, la distribución tridimensional de la resistividad eléctrica en el subsuelo. Para ello utiliza la técnica de inversión, en la cual se busca un modelo de resistividades del subsuelo cuyas respuestas MT sean similares a las impedancias. Para esto el subsuelo es representado a través de un modelo de celdas de distintos tamaños y valores de resistividad. Las respuestas MT del modelo (modelamiento directo) se calculan usando la formulación de diferencias finitas de Mackie (1993), en la cual se escriben las integrales de contorno que representan las ecuaciones de Maxwell como operadores lineales sobre las diferencias finitas de los campos EM en las celdas del modelo.

El código WSINV3DMT utiliza directamente como datos de entrada los tensores de impedancia (Z_{xx} , Z_{xy} , Z_{yx} , Z_{yy}) medidos en cada estación MT. Se define la función objetivo (3.7), la cual se intenta minimizar para encontrar el modelo de resistividades del subsuelo.

$$\min_{m_i} (m - m_o)^T C_m^{-1} (m - m_o) + \lambda^{-1} (d - F(m))^T C_d^{-1} (d - F(m)) \quad (3.7)$$

$$d_i = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix}$$

m : modelo de resistividades del subsuelo

m_o : modelo de resistividades del subsuelo de referencia

C_d : matriz de covarianza con los errores de los datos

C_m : matriz de covarianza del modelo

$F(m)$: respuestas MT calculadas del modelo m

d : tensores de impedancias medidos

λ : multiplicador de Laplace

En la función objetivo se normalizan las diferencias entre las impedancias medidas y las calculadas por la matriz C_d , que incluye los errores estimados en los datos o su desviación estándar. Esto permite que sean comparables las diferencias de las impedancias a distinta frecuencia (cuyos valores son proporcionales a f) y, además, permite no exigir que el ajuste entre las respuestas y los datos no sea mayor que el

error en los datos. Para regularizar la búsqueda del modelo de resistividad “m”, tal que presente una mínima estructura sin artefactos, se penaliza su diferencia con un modelo de referencia m_0 (tradicionalmente un modelo homogéneo). La matriz de covarianza C_m se utiliza para suavizar las diferencias entre modelos ($m_k - m_0$) y correlacionar espacialmente sus errores. En el código el producto con la matriz C_m es equivalente a la convolución con una función que propaga los errores radialmente con decaimiento exponencial (3.8). En la práctica, el código nunca realiza la multiplicación directa de la matriz C_m con la diferencia entre los modelos, sino que la resuelve a través de la resolución numérica de la ecuación de difusión (*Siripunvaraporn & Egbert, 2000*).

$$C_m(r, r') = y(r') \exp\left(-\frac{k[r-r']^2}{R_e^2}\right) \quad (3.8)$$

El multiplicador de laplace λ en la función objetivo establece el balance entre los errores de los datos y los errores de los modelos, definiendo así, a que término se le da mayor importancia al momento de la minimización en el proceso de inversión. Por ejemplo si λ es pequeño, el proceso inversión priorizará reducir la diferencia entre los datos y las respuestas calculadas sin importar si el modelo obtenido es parecido al modelo de referencia. En caso contrario, si λ es grande el proceso intenta obtener un modelo más suave y de mayor similitud con el modelo de referencia (m_0). En el código WSINV3DMT el multiplicador de laplace se calcula automáticamente en cada iteración, calculando varias soluciones del modelo para distintos valores de λ y eligiendo la que menor diferencia presenta entre sus respuestas y los datos. A este tipo de procedimiento se le denomina el enfoque OCCAM.

Para minimizar 3.7 se aplica iterativamente el método de *Newton-Rapston*. En éste se linealiza la función directa $F(m)$ alrededor del último modelo m_k obtenido y se resuelve una nueva iteración que minimiza la función objetivo calculada con $F(m)$ (3.9). La solución tradicional a este problema se muestra en 3.10.

$$\min_{m_i} (m_{k+1} - m_o)^T C_m^{-1} (m_{k+1} - m_o) + \lambda^{-1} (d - F(m_k) - J(m_k)[m_{k+1} - m_k])^T C_d^{-1} (d - F(m_k) - J(m_k)[m_{k+1} - m_k]) \quad (3.9)$$

$$m_{k+1} = m_o + \left(J^T C_d^{-1} J + \lambda C_m^{-1} \right)^{-1} J^T C_d^{-1} X_k \quad (4.10)$$

$$X_k = (d - F(m_k) + J[m_k - m_o]) \quad (4.11)$$

m_i : Modelo de resistividades de la iteración i.

J : Jacobiano calculado con la iteración k del modelo de resistividades $\left(\frac{\partial d}{\partial m}\right)$

La solución 3.10 requiere de invertir la matriz $\left(J^T C_d^{-1} J + \lambda C_m^{-1} \right)$, la cual tiene $N_m \times N_m$ términos (N_m : número de celdas del modelo). En la ecuación 3.12 se muestra una manera cuasi-equivalente de calcular 3.10, cuyo resultado es similar, pero en donde la matriz invertida tiene $N_d \times N_d$ (número de datos). Esta operación resulta más sencilla, ya que en la mayoría de los procesos de inversión el número de datos (N_d) suele menor que el número de celdas del modelo (N_m), requiriéndose menos cálculos para resolver la inversión de la matriz. A esta formulación se le denomina "inversión en el espacio de los datos" y es la utilizada por el código WSINV3DMT

$$m_{k+1} = m_o + C_m J^T (J^T C_m J + \lambda C_d)^{-1} X_k \quad (3.12)$$

En cada iteración del proceso de inversión de WSINV3DMT en donde se obtiene un modelo m_{k+1} de resistividades se requiere calcular 3.12. Para esto el código ejecuta los siguientes pasos:

- Modelamiento directo ($F(m_k)$) en donde se calculan a partir del modelo m_k las impedancias MT en cada estación.
- Se calcula el Jacobiano o matriz de sensibilidad ($J=dZ/dm_k$) a partir de las respuestas del modelo directo.
- Se calcula X_k usando 3.11.
- Se calcula $J^T C_m J$
- Se calcula $(J^T C_m J + C_d)^{-1} X_k$ usando método QMR (Quasi Minimal Residual)
- Multiplicar el resultado anterior por $C_m J^T$

- Sumar el resultado anterior con el modelo de referencia m_0 para obtener una iteración del modelo m_{k+1} de resistividades del subsuelo.

Durante todo el proceso de inversión se utiliza el error RMS (*Root Mean Square*) para evaluar la diferencia entre los datos medidos y los calculados. Este parámetro permite evaluar cuán bien explican los modelos de resistividades obtenidos, los datos medidos y es un indicador de que tan “confiables” son estos resultados. En 3.13 se presenta la expresión utilizada en WSINV3DMT para determinar el error RMS. El objetivo del proceso de inversión es encontrar un modelo cuyo error RMS sea cercano a 1, de forma que el ajuste entre los datos y respuestas no sea mayor que el ruido o error que los datos presentan.

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_d} (F_i(m_k) - d_i)^2}{N_d \sigma_i^2}} \quad (3.13)$$

d_i : Componente i de los datos medidos (tensor de impedancias).

$F_i(m_k)$: Componente i de los datos calculados del modelo m_k (tensor de impedancias).

σ_i : Error base o ruido en los datos.

N_d : Número de datos.

Por ejemplo un error de 2.5 RMS calculado sobre un error base de 5% en los datos, significa que existe una diferencia del 12.5% entre los datos calculados y los medidos.

3.3 Inversión 3D en WSINV3DMT Modelando el Corrimiento Estático

Para implementar el modelamiento del corrimiento estático (SS) en WSINV3DMT, siguiendo el trabajo de Sasaki (2004), se define una nueva función objetivo para el proceso de inversión (3.15) que agrega la corrección del efecto de SS (f) en las impedancias MT medidas. Esta nueva función es minimizada encontrando conjuntamente los parámetros óptimos que corrigen el efecto de SS y los valores del modelo de resistividad (m). En la función objetivo modificada (3.15) se reemplaza el vector original de los datos (impedancias MT) (d) por uno nuevo con los datos con el SS corregido ($d_m f$). Estos últimos son calculados a través de la multiplicación entre una matriz de datos (d_m), construida con las impedancias de las estaciones MT, y un vector con factores de determinan el efecto de SS en cada estación (f). El modelo o representación que es utilizado para remover el efecto de SS en cada estación, se determina según cómo se organizan y/o distribuyen las impedancias MT observadas al interior de d_m . En la sección 3.4 se muestran expresiones de las matrices d_m para las representaciones del SS de la Matriz completa de distorsión (Groom & Bailey 1989) y Sasaki (2004), las cuales se utilizan en este trabajo.

Función objetivo WSINV3DMT original

$$\min_{m_{k+1}, f} (m - m_0)^T C_m^{-1} (m - m_0) + \lambda^{-1} (d - F(m))^T C_d^{-1} (d - F(m))$$

Función objetivo WSINV3DMT modificado

$$\min_{m_{k+1}, f} (m - m_0)^T C_m^{-1} (m - m_0) + \lambda^{-1} (d_m f - F(m))^T C_d^{-1} (d_m f - F(m))$$

(3.15)

m_0 : Modelo de resistividades de referencia.

m_k : Modelo de resistividades invertido.

d : Datos (impedancias MT).

f : factores de corrimiento estático.

d_m : Matriz de datos.

$d_m f$: Datos con SS corregido usando " f ".

C_m, C_d : Matrices de Covarianza.

λ : Factor de Laplace.

Para minimizar la función objetivo modificada (3.15) se aplica iterativamente el método de Gauss-Newton linealizando sólo en torno al modelo de resistividades y, luego, minimizando la función resultante (3.16). En cada iteración se calculan los

valores del modelo de resistividades del subsuelo (m_{k+1}) y los factores de corrimiento estático (f_{k+1}).

$$\min_{m_{k+1}, f_{k+1}} (m_{k+1} - m_0)^T C_m^{-1} (m_{k+1} - m_0) + \lambda^{-1} (X_k - J [m_{k+1} - m_0])^T C_d^{-1} (X_k - J [m_{k+1} - m_0]) \quad (3.16)$$

$$X_k = (d_m f_{k+1} - F(m_k) + J [m_k - m_0])$$

m_0 : Modelo de resistividades de referencia.

J : Jacobiano calculado a partir de la iteración k del modelo de resistividades $\left(\frac{\partial m}{\partial d}\right)$.

d : Datos.

m_{k+1} : Iteración $k+1$ del modelo de resistividades.

f_{k+1} : Iteración $k+1$ de los factores de corrimiento estático..

Es posible demostrar (Anexo V) que 3.16 puede ser expresada a partir de sólo los factores de SS (f_{k+1}), tal como se presenta en la ecuación 3.17. Para esto se requiere utilizar la transformación al espacio de datos utilizada por *Siripunvaraporn & Egbert* (2000). En 3.18 se muestra la expresión correspondiente a los factores de SS (f_{k+1}) que minimizan 3.16. El modelo de resistividades que minimiza 3.16 en conjunto con los factores de SS se puede calcular usando 3.19 (Anexo I).

La formulación anterior permite resolver cada iteración del problema de inversión primero encontrando los factores de SS (f_{k+1}) usando 3.18 y luego determinando el modelo de resistividades (m_{k+1}) correspondiente utilizando 3.19.

$$F_{obj} = (X_k^0 - (d - d_m f))^T A (X_k^0 - (d - d_m f)) \quad (3.17)$$

$$A = (\lambda C_d + J C_m J^T)^{-1}$$

$$X_k^0 = (d - F(m_k) + J_k [m_k - m_0])$$

$$f_{k+1} = (d_m^T A d_m)^{-1} d^T A (d - X_k^0) \quad (3.18)$$

$$m_{k+1} = m_0 + C_m J^T A [X_k^0 - (d - d_m f)] \quad (3.19)$$

Los datos MT corregidos con SS de cada iteración y el modelo de resistividad expresado en función de ellos se expresan como se indica abajo:

$$\begin{aligned}
 d^c_k &= d_m f_{k+1} = d_m (d_m^T A d_m)^{-1} d_m^T A (d - X_k^o) \\
 d^c_k &= d_m (d_m^T A d_m)^{-1} d_m^T A (F(m_k) + J_k[m_k - m_0]) \\
 m_{k+1} &= m_0 + C_m J^T A (d^c_k - F(m_k) + J [m_k - m_0]) \quad (3.20)
 \end{aligned}$$

Para evaluar 3.17 y encontrar los factores de SS se utiliza el método del gradiente conjugado resolviendo el sistema lineal mostrado en 3.21. Para ello se debe computar la multiplicación de la matriz A con varios vectores. Esto es realizado aprovechando que ésta es la misma matriz que WSINV3DMT utiliza para calcular una iteración del modelo de resistividades en el dominio de los datos y por lo tanto es posible reutilizar esta parte del código.

$$(d_m^T A d_m) (I - f) = d_m^T A (d - X_k^o) \quad (3.21)$$

3.4 Representaciones del Corrimiento Estático.

En la sección anterior (3.3) se presenta la formulación para implementar el modelamiento del corrimiento estático (SS) durante el proceso de inversión en WSINV3DMT. En ésta el efecto del corrimiento estático es representado por el producto matricial de una matriz d_m que contiene los datos (tensores de impedancias MT) y un vector f con los factores que determinan el SS. Dependiendo como se organizan los términos al interior de la matriz d_m y cuantos factores de SS se utilizan, es posible aplicar cualquier modelo lineal del SS en el proceso de inversión. Esto permite que se pueda implementar en el proceso de inversión conjunta (modelo de resistividad + SS) otros modelos o representaciones del SS además del propuesto por Sasaki (2004). Debido a lo anterior, se consideró incluir adicionalmente el modelo de la matriz de distorsión completo (*Groom & Bailey* 1989) en la modificación de WSINV3DMT de este trabajo.

Estos modelos del corrimiento estático se describen abajo:

- *Sasaki* (2004):
El efecto del corrimiento estático es modelado por cuatro factores reales positivos que escalan independientemente cada término del tensor de impedancia (3.21).
- Matriz Completa de Distorsión:
El efecto del corrimiento estático es modelado por una matriz de cuatro elementos que multiplica el tensor de impedancias (3.22). Esta representación es la que se supone mejor predice el efecto del SS y se supone que se aventaja sobre el modelo anterior, porque puede predecir la distorsión en las fases de los términos del tensor de impedancia (A. Jones, 2011).

Modelos de corrimiento estático (SS)

Modelo Sasaki (2004)

$$\begin{pmatrix} f_{xx}Z_{xx} & f_{xy}Z_{xy} \\ f_{yx}Z_{yx} & f_{yy}Z_{yy} \end{pmatrix}$$

Matriz Completa de Distorsión

$$\begin{pmatrix} f_{xy} & f_{xx} \\ f_{yy} & f_{yx} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix}$$

(3.22)

En el modelo o representación de *Sasaki* (2004) del SS, los términos de la matriz d_m se organizan separando en columnas las componentes del tensor de impedancias (Z_{xx} , Z_{xy} , Z_{yx} , Z_{yy}) de cada estación MT, incluyendo los valores correspondientes a todas sus frecuencias (3.23). En este caso se utilizan cuatro factores de SS por cada tensor de impedancia (estación), por lo que el número total de factores es $4 \times N_{\text{estaciones}}$.

Representación del SS de *Sasaki*

$$d_m = \begin{bmatrix} Zxx_{f1,s1} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Zxx_{fn,s1} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Zxy_{fn,s1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & Zxy_{fn,s1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Zyx_{f1,s1} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & Zyx_{fn,s1} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Zyy_{f1,s1} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & Zyy_{fn,s1} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & Zxx_{f1,sm} & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & Zxx_{fn,sm} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & Zxy_{f1,sm} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & Zxy_{fn,sm} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & Zyx_{f1,sm} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & Zyx_{fn,sm} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & Zyy_{f1,sm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & Zyy_{fn,sm} \end{bmatrix} \quad f = \begin{bmatrix} f_{xx1} \\ f_{xy1} \\ f_{yx1} \\ f_{xx1} \\ \dots \\ f_{xxn} \\ f_{xyn} \\ f_{yxn} \\ f_{yyn} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

En el modelo de la Matriz Completa de Distorsión del SS se utiliza la misma cantidad de factores de corrimiento estático que en el caso anterior, pero los elementos del tensor de impedancia se organizan para reproducir el producto de la matriz completa de distorsión del SS con el tensor de impedancias (3.24).

Representación del SS “Matriz Completa de Distorsión”.

$$d_m = \begin{bmatrix} Zxx_{f1,s1} & Zyx_{fn,s1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Zxx_{fn,s1} & Zyx_{fn,s1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Zxy_{fn,s1} & Zyy_{fn,s1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Zxy_{fn,s1} & Zyy_{fn,s1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Zxx_{f1,s1} & Zyx_{f1,s1} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & Zxx_{fn,s1} & Zyx_{fn,s1} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Zxy_{f1,s1} & Zyy_{f1,s1} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & Zxy_{fn,s1} & Zyy_{fn,s1} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & Zxx_{f1,sm} & Zyx_{f1,sm} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & Zxx_{fn,sm} & Zyx_{fn,sm} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & Zxy_{f1,sm} & Zyy_{f1,sm} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & Zxy_{f1,sm} & Zyy_{fn,sm} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & Zxx_{f1,sm} & Zyx_{f1,sm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & Zxx_{f1,sm} & Zyx_{f1,sm} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & Zxy_{f1,sm} & Zyy_{f1,sm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & Zxy_{f1,sm} & Zyy_{f1,sm} \end{bmatrix} f = \begin{bmatrix} f_{xy1} \\ f_{xx1} \\ f_{yy1} \\ f_{yx1} \\ \dots \\ f_{xyn} \\ f_{xxn} \\ f_{yy1} \\ f_{yxn} \end{bmatrix}$$

(3.24)

3.5 Regularización del Modelamiento del Corrimiento Estático.

A la formulación de inversión conjunta (modelo de resistividades + SS) presentada en 3.15, es necesario agregar una restricción sobre los valores de corrimiento estático (SS). Sin ésta habitualmente en cada iteración del proceso de inversión hay una disminución sostenida de los factores de SS y de las resistividades del modelo, lo cual produce un resultado con valores mínimos de resistividad que no necesariamente guarda relación con la resistividad del subsuelo.

En esta sección primero se define el concepto de resistividad aparente promedio necesario para explicar la causa de este efecto, luego se analiza y se propone un método de regularización para evitarlo.

Resistividad aparente promedio

La resistividad promedio de los datos de MT se define en 3.25, la cual corresponde a un promedio de los valores de todas resistividades aparentes en los datos (impedancias MT) que son ponderadas por sus errores o desviación estándar. Esta resistividad aparente promedio es un indicador del valor sobre el cual se distribuyen las variaciones de resistividad del subsuelo. Además, la resistividad aparente promedio puede escribirse en función de las impedancias de las estaciones MT como describe 3.26, en donde este parámetro queda expresado como el producto cuadrático de las impedancias (Z) en el espacio de C_d^{-1} y escalado por un factor K . La matriz C_d^{-1} considera sólo los errores de los datos, es posible considerar además la covarianza ("suavidad") en el modelo de resistividades del subsuelo reemplazando C_d^{-1} por $(\lambda C_d + J C_m J^T)^{-1}$. Este cambio resulta conveniente para simplificar los cálculos del proceso de inversión y la posterior regularización de los factores de SS (3.27).

$$\widehat{\rho}_{ap} = \frac{\frac{1}{N_d} \sum_{k=1}^{N_d} \frac{\rho_k^{ap}}{\Delta \rho_k}}{\frac{1}{N_d} \sum_{k=1}^{N_d} \frac{1}{\Delta \rho_k}} \quad (3.25)$$

$$\rho_k^{ap} = \|Z_k\|^2 / (\mu w)$$

$$\widehat{\rho}_{ap} = \frac{\frac{1}{N_d} \sum_{k=1}^{N_d} \frac{\|Z_k\|^2}{\frac{\mu w}{\Delta Z_k^2}}}{\frac{1}{N_d} \sum_{k=1}^{N_d} \frac{1}{\Delta \rho_k}} = K Z^T C_d^{-1} Z \approx K Z^T (\lambda C_d + J C_m J^t)^{-1} Z \quad (3.26)$$

$$K = \frac{1}{\sum_{l=1}^{N_d} \frac{\mu \omega}{\Delta \rho_{ij}}}$$

$$\widehat{\rho}_{ap} = K Z^T A Z = K \|Z\|_A^2 \quad (3.27)$$

$$A = (\lambda C_d + J^t C_m J)^{-1}$$

N_d : Número de datos.

ρ_k^{ap} : Resistividad aparente correspondiente al dato "k".

ρ_k^{ap} : Resistividad aparente correspondiente al dato "k".

Z_k : Impedancia correspondiente al dato "k".

$\Delta \rho_k$: Error o desviación estándar de la resistividad aparente del dato "k".

ΔZ_k : Error o desviación estándar de la impedancia del dato "k".

μ : Permeabilidad magnética en el vacío.

w : Frecuencia angular.

C_d : Matriz de covarianza con los errores de los datos.

C_m : Matriz de covarianza del modelo de resistividades (suavidad).

J : Jacobiano $(\frac{\partial Z}{\partial m})$.

Convergencia a valores pequeños de SS y resistividad

En la función objetivo 3.15, cuando una iteración del modelo de resistividad (m_k) presenta valores mucho menores que el modelo de referencia (m_0), se produce que el término al error de modelo tiende sólo a depender de los valores del modelo de referencia ($(m_k - m_0)^T C_m (m_k - m_0) \approx m_0^T C_m m_0$). A la vez, se pueden elegir factores de SS con valores muy pequeños para eliminar la influencia de los datos en la función objetivo. En dicha situación, tal como indica 3.28, la función objetivo sólo dependerá de la resistividad del modelo iterado (ρ), la cual siempre podría reducirse para minimizar aún más el valor de la función y no necesariamente converger a un valor. En la mayoría de las situaciones esto produce que el proceso de inversión converja a una distribución de resistividad eléctrica con valores extremadamente bajos, lo cual podría conducir a un modelo totalmente errado del subsuelo.

$$Fobj = (fd - F(m_k))^T C_d^{-1} (fd - F(m_k)) + \lambda (m_k - m_{ref})^T C_m^{-1} (m_k - m_{ref}) \quad (3.28)$$

$$\text{Si } m_k \ll m_0, \quad f_i \ll 1,$$

$$Fobj = (F(m_k))^T C_d^{-1} (F(m_k)) + \lambda m_{ref}^T C_m^{-1} m_{ref}$$

$$F(m_k) = \mu \omega \rho_o^{1/2}$$

$$Fobj = \rho \left(\sum_{i=1}^{N_d} \frac{\mu^2 \omega_i^2}{C_{d_i}} \right) + \lambda m_{ref}^T C_m^{-1} m_{ref}$$

d : Tensores de impedancia MT de las estaciones.

f : Factores de corrimiento estático.

λ : Fac.tor de Laplace.

m_{ref} : Modelo de referencia del proceso de inversión.

$F(m_k)$: Tensores de impedancia calculados a partir modelo inicial m_k .

C_d : matriz de covarianza de los datos.

C_m : matriz de covarianza del modelo.

ρ_o : Resistividad eléctrica.

N_d : Número de datos.

Regularización de los factores de corrimiento estático

La convergencia a valores pequeños (resistividades y factores de SS) del proceso de inversión definido en 3.15, se debe principalmente a que el modelo de resistividades (m_k) y los datos con SS corregido (d_{mfk}) obtenidos en cada iteración del proceso, son independientes de la resistividad aparente promedio de los datos medidos ($\widehat{\rho_{ap}}$). Esto produce un grado de libertad que le permite al proceso de inversión minimizar la función objetivo 3.15 escalando a valores bajos las resistividades del modelo y los datos corregidos, tal como indica la sección anterior.

Para explicar la independencia del proceso de inversión sobre $\widehat{\rho_{ap}}$, se realiza la descomposición 3.29. En ésta los datos MT medidos (d) se expresan a partir de $\widehat{\rho_{ap}}$ y el vector de datos unitarios (\hat{d}_A) definido en el espacio de la matriz A (definida en 3.17).

$$d = A^{-1/2} \|d\|_A \hat{d}_A = A^{-1/2} \sqrt{\frac{\widehat{\rho_{ap}}}{K}} \hat{d}_A \quad (3.29)$$

$$\hat{d}_A = \frac{A^{1/2} d}{\|d\|_A}$$

K : Constante definida en 3.27

d : Datos MT (impedancias) medidos.

A : Matriz con covarianzas del proceso de inversión definida en 3.27

Reemplazando 3.29 en la expresión 3.20 de los datos con SS corregido (d^c_k) de cada iteración del proceso de inversión, se obtiene la expresión 3.30. En ésta se nota que los d^c_k no dependen de $\widehat{\rho_{ap}}$ y que la única parte de los datos medidos que es utilizada corresponde al vector de datos unitario (\hat{d}_A). Debido a que cada iteración del modelo de resistividades se calcula a partir de los d^c_k (3.20), éste también no depende de $\widehat{\rho_{ap}}$.

$$d^c_k = A^{-1/2} \sqrt{\frac{\widehat{\rho}_{ap}}{K}} \widehat{d}_A \left(\frac{\widehat{\rho}_{ap}}{K} \widehat{d}_A^T \widehat{d}_A \right)^{-1} (A^{-1/2} \sqrt{\frac{\widehat{\rho}_{ap}}{K}} \widehat{d}_A)^T A (F(m_k) + J_k[m_k - m_0])$$

$$d^c_k = A^{-1/2} \widehat{d}_A \left(\widehat{d}_A^T \widehat{d}_A \right)^{-1} \widehat{d}_A^T A^{1/2} (F(m_k) + J_k[m_k - m_0]) \quad (3.30)$$

d^c_k : Datos MT (impedancias) corregidas usando los factores de SS calculados en el iteración k.

d_A : Vector de datos unitario definido en 3.29.

m_0 : Modelo inicial del proceso de inversión.

m_k : Modelo de resistividades calculados en la iteración k.

$F(m_k)$: Respuestas MT (modelamiento directo) del modelo m_k .

J : Jacobiano $\left(\frac{\partial z_{lmn}}{\partial m_{ijk}} \right)$

El resultado anterior significa que el proceso de inversión de 3.15 no utiliza una parte importante de los datos medidos: “la resistividad aparente promedio ($\widehat{\rho}_{ap}$)”. Esta es reemplazada en cada iteración de d^c_k por el valor más conveniente para minimizar la función objetivo (3.15), lo cual se realiza sólo basándose en el criterio de “suavidad” o error del modelo $((m_k - m_0)^t C_m^{-1} (m_k - m_0))$ e ignorando la información medida sobre este valor. Esto produce que el resultado final de la resistividad aparente promedio en $d^c_k (\widehat{\rho}_{ap}^{SS})$ no necesariamente sea consistente con la distribución de resistividad del subsuelo, debido a que su cálculo es independiente de las mediciones y es hecho principalmente basado en la “suavidad” del modelo. La resistividad promedio del modelo de resistividad invertido en general está directamente relacionada con $\widehat{\rho}_{ap}^{SS}$, por lo que también se espera que sus valores de resistividad no sean consistentes con los del subsuelo. La profundidad de investigación del método MT depende de esta resistividad promedio del subsuelo (Skin Depth), por lo que también la profundidad interpretada de las principales estructuras de resistividad eléctrica obtenidas con el proceso de inversión 3.15 podría variar.

Para evitar el problema anterior es necesario que $\widehat{\rho}_{ap}^{SS}$ sea previamente determinado y fijado, de forma que el proceso de inversión no pueda cambiarlo. Este valor corresponde efectivamente a la resistividad aparente promedio de los datos MT sin efecto de SS y cuyo valor no puede ser observado por proceso de inversión 3.15. Para poder determinar $\widehat{\rho}_{ap}^{SS}$ se proponen los siguientes procedimientos:

1. Estimar $\widehat{\rho}_{ap}^{SS}$ directamente de $\widehat{\rho}_{ap}$. Para esto se debe cumplir que el SS sólo afecte localmente a algunas estaciones MT, tal que su efecto se pueda minimizar o cancelar a través del promedio de las resistividades aparentes.
2. Utilizar un método alternativo (Por ej: MT/TDEM) para remover el SS en los datos medidos de algunas estaciones MT y usar el promedio de sus resistividades aparentes para estimar el valor de $\widehat{\rho}_{ap}^{SS}$.
3. Ajustar el valor de $\widehat{\rho}_{ap}^{SS}$ para que la profundidad de las estructuras del modelo de resistividad eléctrica invertido coincidan con resultados observados y/o esperados con otras metodologías (Geología, perforaciones, otros métodos geofísicos).

Se prefiere utilizar la primera condición, debido a que es la más simple y no requiere de mediciones y/o información adicional. Cabe notar, que para que sea efectiva se debe cumplir que $\widehat{\rho}_{ap}^{SS} \approx \widehat{\rho}_{ap}$. Esta condición es muy similar a la utilizada en los códigos de inversión 2D (deGroot-Hedlin, 1991) y en el código de inversión 3D de Sasaki (2004), en donde se impone que el promedio del logaritmo de los factores de SS sea 0. Este tipo de condiciones ha sido discutida (Sternberg 1991, Knútur et al. 2008, Knútur et al. 2010), debido a que no tendría justificación física y no siempre se observa su cumplimiento. En este trabajo, se propone como condición alternativa que la resistividad aparente promedio de las estaciones MT con SS corregido ($\widehat{\rho}_{ap}^{SS}$) se pueda estimar calculando el promedio de los datos medidos ($\widehat{\rho}_{ap}$).

La condición $\widehat{\rho}_{ap}^{SS} = \widehat{\rho}_{ap}$, puede ser expresada en forma análoga como se indica 3.31 (ver 3.27), en donde el producto cuadrático de las impedancias originales debe ser igual al de las impedancias con el SS corregido. La restricción 3.31 se incluye en el proceso de inversión adicionándola a la función objetivo 3.15 y multiplicándola por un factor de *laplace* (3.32).

Los factores de SS que minimizan 3.32 corresponden a la misma solución encontrada antes para minimizar función objetivo 3.15, pero multiplicada por un factor escalar. Esta solución anterior de los factores de SS se presenta en 3.33 y nueva solución regularizada por la restricción impuesta se indica en 3.34. El factor escalar que corrige los factores de SS se puede encontrar a partir de los datos originales y los corregidos como se indica 3.35 y 3.36.

Para ocupar el resultado anterior en el proceso de inversión incluyendo la regularización sobre los factores de SS, en cada iteración se siguen los siguientes pasos:

- Se determinan los factores de SS usando 3.33.
- Se calculan las resistividades aparentes promedio para los datos originales y para datos corregidos con los factores calculados usando 3.26.
- Se corrigen los factores de SS usando 3.36

- A partir de estos factores de SS se determina el modelo de resistividades usando 3.19

$$\widehat{\rho}_{ap}^{orig} = \widehat{\rho}_{ap}^{corr} \quad \Leftrightarrow \quad d^T A d = f^T d^T A d f \quad (3.31)$$

$$\min_f (X_k^0 - d(I - f))^T A (X_k^0 - d(I - f)) + \gamma(d^T A d - f^T d^T A d f) \quad (3.32)$$

$$f = (d^T A d)^{-1} d^T A (X_k^0 - d) \quad (3.33)$$

$$f^{reg} = \frac{1}{(1+\gamma)} (d^T A d)^{-1} d^T A (X_k^0 - d) \quad (3.34)$$

$$d^T A d - \frac{f_{min}^T d^T A d f_{min}}{(1+\gamma)^2} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{(1+\gamma)} = \sqrt{\frac{d^T A d}{f^T d^T A d f}} \quad (3.35)$$

$$f^{reg} = \sqrt{\frac{d^T A d}{f^T d^T A d f}} (d^T A d)^{-1} d^T A (X_k^0 - d) \quad (3.36)$$

$$A = (\lambda C_d + J C_m J^T)^{-1}$$

$$X_k^0 = (d - F(m_k) + J_k[m_k - m_0])$$

3.6 Ejemplo I: Aplicación del modelamiento del corrimiento estático (SS) en modelo de capas.

Para investigar las propiedades del modelamiento del corrimiento estático (SS) se prueban sus resultados realizando inversiones 3D con datos simulados a partir de un modelo de capas de resistividad eléctrica. Para esto se distorsionan los datos simulados con distintos valores de SS. En este caso, tanto las simulaciones e inversiones se realizaron con el código de diferencias finitas de inversión y modelamiento 3D "WSINV3DMT" (Siripunvaraporn 2006). Para las inversiones que implementan el método del modelamiento del corrimiento estático se utiliza el código desarrollado en este trabajo considerando las representaciones de Sasaki y el Matriz completa de distorsión (sección 3.4).

El modelo de resistividades utilizado se muestra en la Figura 3.3 La primera capa del modelo (1000 ohm-m) se ubica entre la superficie hasta los 250m de profundidad. La segunda capa se distribuye entre los 250m y los 1200m de profundidad con 1 ohm-m. Bajo esta última, se ubica una tercera capa con 50 ohm-m.

En la figura 3.2 se muestra la ubicación en planta de las estaciones MT simuladas en este ejemplo sobre la superficie del modelo resistividades. En ésta la posición de cada estación MT se representa por un triangulo negro. En cada estación MT se calculo su tensor de impedancias completo (Z_{xx} , Z_{yy} , Z_{yx} , Z_{xy}) usando 16 frecuencias entre 10kHz a 0.015Hz. Además en figura 3.2 se muestra el trazado de perfil L4 utilizado para presentar los resultados de los distintos modelos invertidos.

Para simular el efecto del corrimiento estático (SS) se generaron aleatoriamente factores (s_{xx} , s_{xy} , s_{yx} , s_{yy}) siguiendo una distribución log-normal, los cuales multiplicaron los elementos del tensor de impedancia calculado en cada estación tal como es indicado abajo.

$$\begin{bmatrix} s_{xx}Z_{xx} & s_{xy}Z_{xy} \\ s_{yx}Z_{yx} & s_{yy}Z_{yy} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

En la figura 3.1 se muestran los factores utilizados producir el efecto de corrimiento estático en los datos usando una línea continua azul. Se presenta un gráfico por cada uno de los factores indicados en 3.37. En la figura además se presentan los factores estimados por el modelamiento del SS, los cuales se explican más adelante.

El modelo celdas utilizado en todas las inversiones para construir el modelo de resistividad del subsuelo consta de 27 x 27 celdas horizontales, cuyos anchos varían

desde 500m (área de las estaciones) a 100.000m en los bordes. Verticalmente tiene 27 niveles cuyos espesores van aumentando cuadráticamente desde 16m hasta 125km.

Los parámetros utilizados en todas las inversiones con WSINV3DMT fueron los mismos. Estos fueron:

- La inversión consideró el tensor de impedancia completo sin *Tipper*.
- La matriz de covarianza de datos C_d se determinó usando el 5% de promedio cuadrático entre Z_{xy} y Z_{yx} en cada estación.
- Como modelo inicial se utilizó un modelo homogéneo de 10 ohm-m.
- Como modelo de referencia m_o se usó el modelo inicial.
- Para determinar la matriz de covarianza del modelo C_m se usaron los siguientes parámetros:
 - $R_e: 5$ $L_x: 0.2$ $L_y: 0.2$ $L_z: 0.2$

Para evaluar el ajuste entre los datos y las respuestas calculadas de los procesos inversión se utilizó la definición 3.13 del error RMS, en donde se consideran tanto los elementos antidiagonales (Z_{xy} y Z_{yx}) como los diagonales (Z_{xx} y Z_{yy}) de los tensores impedancias. Como error base o desviación estándar para calcular el error RMS, se usó el 5% de $(|Z_{xy}| |Z_{yx}|)^{1/2}$ en cada estación MT.

Entre las figuras 3.3 a 3.5 se presentan secciones verticales de resistividad eléctrica extraídas de los modelos invertidos con los distintos métodos bajo la línea L4 indicada en la Figura 3.2. En el eje vertical de la figura se indica la elevación y en el eje horizontal la distancia a lo largo de la línea L4. Los valores de resistividad son mostrados de acuerdo a la escala de colores presentada a la derecha de la figura.

En la Figura 3.3 (B) se muestra la sección correspondiente al perfil L4 (Figura 3.2) del modelo de resistividades invertido usando los datos que no incluyen el efecto de corrimiento estático. Este resultado se obtuvo después de tres iteraciones con un error RMS=1.56, el cual considerando el error base utilizado (%5) indicaría una diferencia del 7.8% entre los datos calculados y medidos. Esta sección se utiliza como referencia, ya que indica el resultado que debería obtenerse al invertir datos, en los cuales ha sido removido efectivamente el efecto del corrimiento estático.

En la Figura 3.4 (A) se presenta la misma sección bajo perfil L4 del modelo invertido usando los datos distorsionados con corrimiento estático y el código WSINV3DMT original (sin considerar el modelamiento del corrimiento estático). Este corresponde al

mejor resultado obtenido después de 5 iteraciones y tiene un error RMS de 6.25, que equivale a un 31.25% de diferencia entre datos medidos y calculados (bastante alto).

En la Figura 3.4 (B) se muestra la sección del perfil L4 obtenida del modelo invertido con considerando el efecto del corrimiento estático con la representación de *Sasaki*. En la Figura 3.5 se presenta la sección obtenida del modelo invertido con la representación del Matriz completa de distorsión. Estos modelos obtuvieron un error RMS de 3.06 y 3.09 respectivamente, los cuales equivalen a 15% de diferencia entre datos medidos y calculados.

En la Figura 3.4 (A) es fácil ver como el corrimiento estático introducido en los datos simulados produce artefactos en el modelo invertido con el código original (WSINV3DMT sin modelamiento de SS). En este se observan algunas anomalías que no tienen ninguna correspondencia con el modelo original. Por ejemplo, entre 1.000m y 3.000m de profundidad se observa un conductor de 2 ohm-m que se propaga casi verticalmente bajo E17 y que no aparece en el modelo de capas original. Cabe notar que el error RMS (6.25) obtenido también indica que no se alcanza un buen ajuste con los datos.

En cambio en las Figuras 3.4 (B) y 3.5 correspondientes a las inversiones con modelamiento del SS (*Sasaki* y Matriz completa de distorsión) pueden recuperar el modelo original sin presentar artefactos y con resultados similares a los obtenidos con la inversión de los datos sin SS mostrada en la Figura 3.3 (B).

En la Figura 3.1 se presentan los factores de SS aplicados para distorsionar los datos y los que fueron estimados a través de la modelación con la inversión usando la notación indicada en 3.37. En la Figura los factores de *Sasaki* se indican usando “x” de color rojo y los factores de la Matriz completa de distorsión se indican con “o” de color azul. En S_{xy} y S_{yx} se nota que los factores estimados y los aplicados siguen la misma tendencia, pero se observan diferencias de hasta 50% en sus valores (Por ej.: S_{yx} en la estación 3). Sin embargo, se considera que la corrección de SS obtenida es efectiva, a pesar de las diferencias observadas, ya que los modelos invertidos y el original no presentan diferencias importantes.

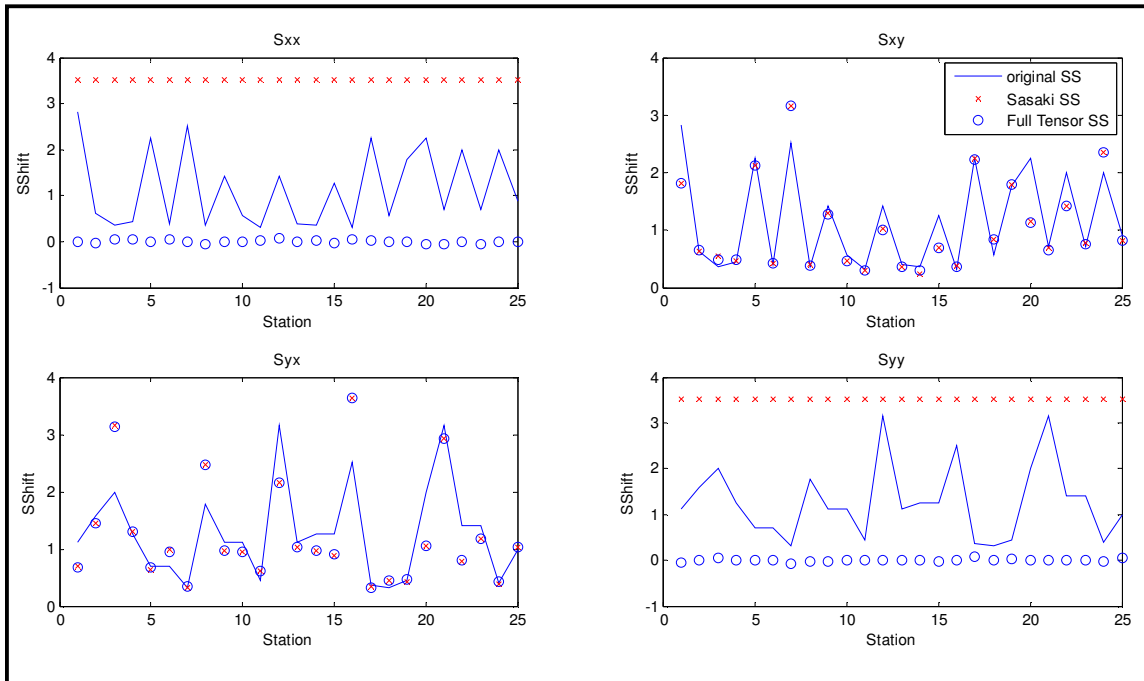


Figura 3.1 Factores de corrimiento estático (SShift) utilizados para distorsionar las impedancias MT y factores estimados modelando el corrimiento estático. Con líneas continuas azules se muestran los factores usados para distorsionar las impedancias MT. Con círculos azules se muestran los factores estimados con el método de Matriz Completa de Distorsión y letra “x” en rojo se muestran los factores estimado con el enfoque de *Sasaki*.

Los resultados del modelamiento del SS con Sasaki y la Matriz completa de distorsión son casi equivalentes en este caso, tanto en los modelos obtenidos (Figuras 3.4 (B) y 3.5) como en los factores de corrimiento estático estimados para la diagonal del tensor (S_{xy} e S_{yx}). Esto se debería a que la distorsión aplicada en los datos consiste en dos factores escalares, lo cual puede ser representado de manera exacta por ambos modelos de SS (*Sasaki* y Matriz completa de distorsión).

En el caso de la representación de *Sasaki*, debido a que los datos utilizados poseen términos nulos en la diagonal del tensor (respuestas de un modelo 1D), los términos S_{xx} y S_{yy} no pueden generar cambios en los datos. Esto produce que sus valores no puedan ser observados en el proceso de inversión quedando indeterminados. En la Figura 3.1 se puede observar cómo S_{xx} y S_{yy} obtienen valores cercanos a 3.5, debido principalmente al criterio de regularización utilizado (sección 3.5). En el caso de la Matriz completa de distorsión, es posible determinar sus cuatro términos en donde sus términos antidiagonales son *cero* ($S_{xy} = 0$ y $S_{yx} = 0$) y los de su diagonal (S_{xy} y S_{yx}) corresponden a la distorsión introducida en los datos simulados.

En la Figura 3.6 se muestran las resistividades aparentes (ρ_{xy} e ρ_{yx}) y fase obtenidas para los cuatro modelos invertidos en las estaciones E13 y E17 (Figura 3.2). Las

curvas de resistividad aparente y fase son una forma de presentar los datos del tensor de impedancia y se calculan como indica en 2.16 y 2.17. En este caso sólo se presentan los resultados para la antidiagonal del tensor (xy e yx), debido a que la diagonal en los datos de entrada es nula (dimensionalidad 1D). Las resistividades aparentes y fases usadas como dato de entrada para las inversiones se indican con línea continua. Las resistividades aparentes y fases calculadas del modelo obtenido con inversión normal sin SS se muestran con “x”. Las resistividades aparentes y fases calculadas del modelo invertido con *Sasaki* se muestran con “o” y las de la Matriz Completa de Distorsión con “.”.

En la Figura 3.6 se puede observar cómo el proceso de inversión con el código original trata de ajustar el corrimiento estático en la estación E17 modificando los valores de resistividad del modelo, lo cual sólo se logra en las frecuencias más bajas. Esto produce la estructura de baja resistividad mencionada en el párrafo anterior bajo E17. En el caso de las inversiones con el modelamiento del corrimiento estático (*Sasaki* y Matriz completa de distorsión), donde el efecto es corregido por los factores de SS estimados, los procesos de inversión no necesitan producir estructuras especiales en el modelo para ajustarse con los datos.

En la Figura 3.6, también se presentan los resultados para la estación E13, ubicada al lado de estación E17. En este caso, las respuestas del modelo invertido con el código original son capaces de ajustarse a los datos que presentan corrimiento estático, el cual es evidente en la separación de sus curvas de resistividad aparente (Figura 3.6). Debido a que el código original no modela el efecto del corrimiento estático, requiere introducir cambios en el modelo de resistividad eléctrica para reproducir esta separación. Por ejemplo, se puede observar en un artefacto de resistividad intermedia (~15 ohm-m) ubicado a 300m bajo la estación E13, que habría sido generado para permitir el ajuste entre datos con SS y las respuestas modeladas. En cambio, los modelos producidos considerando el modelamiento del corrimiento estático (*Sasaki* y Matriz completa de distorsión) presentan un ajuste similar con los datos, pero sin necesidad de artefactos en sus modelos invertidos.

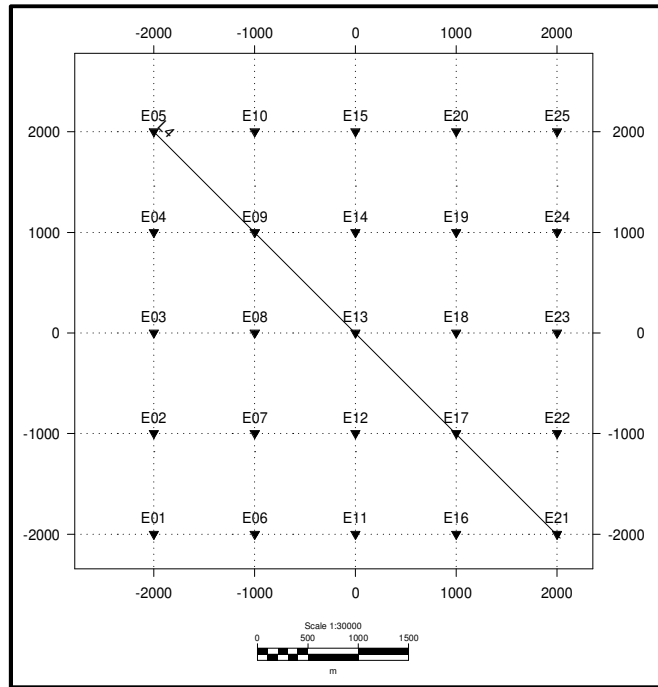


Figura 3.2 Mapa en planta con las ubicaciones de estaciones MT simuladas (triángulo negro) en la superficie del modelo.

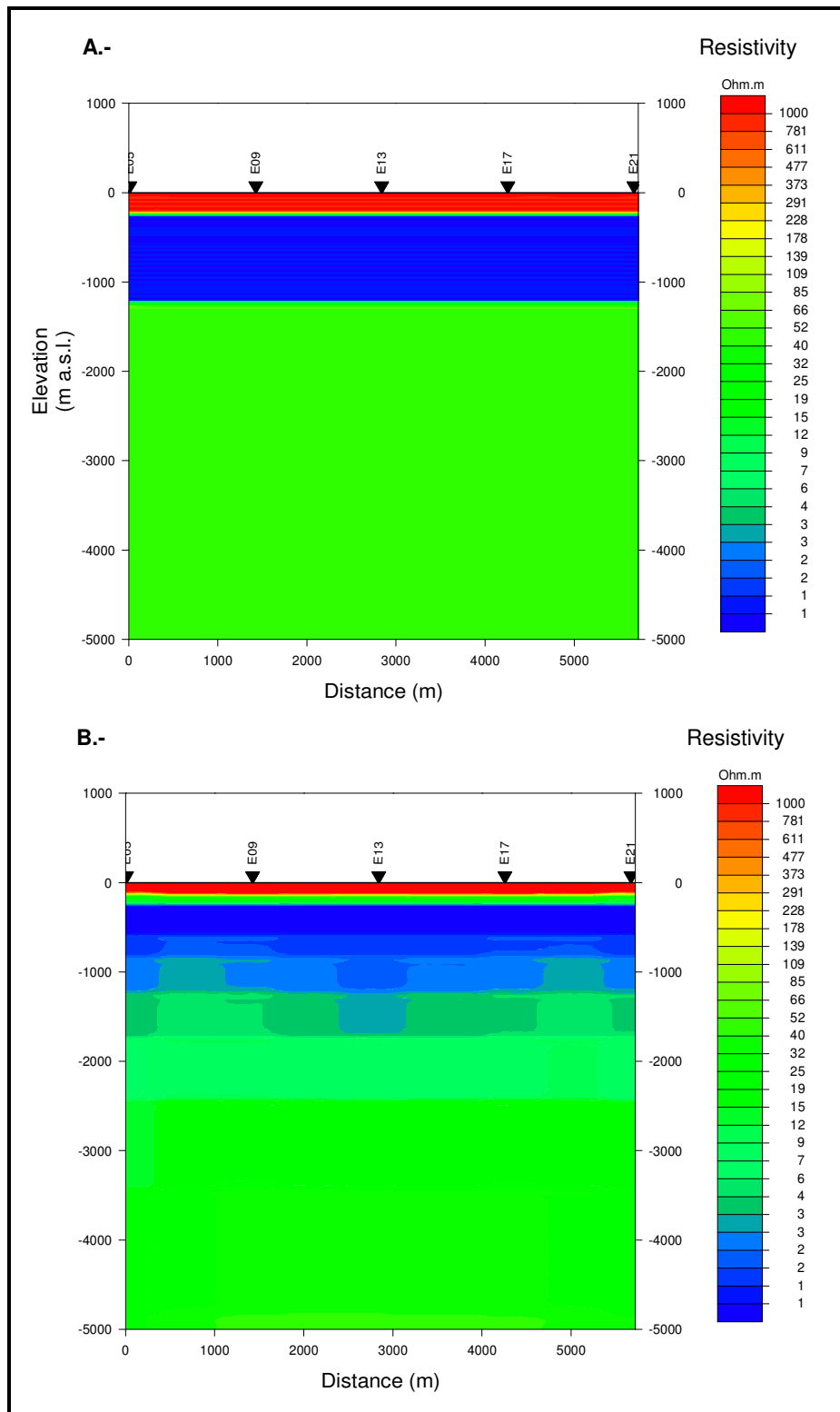
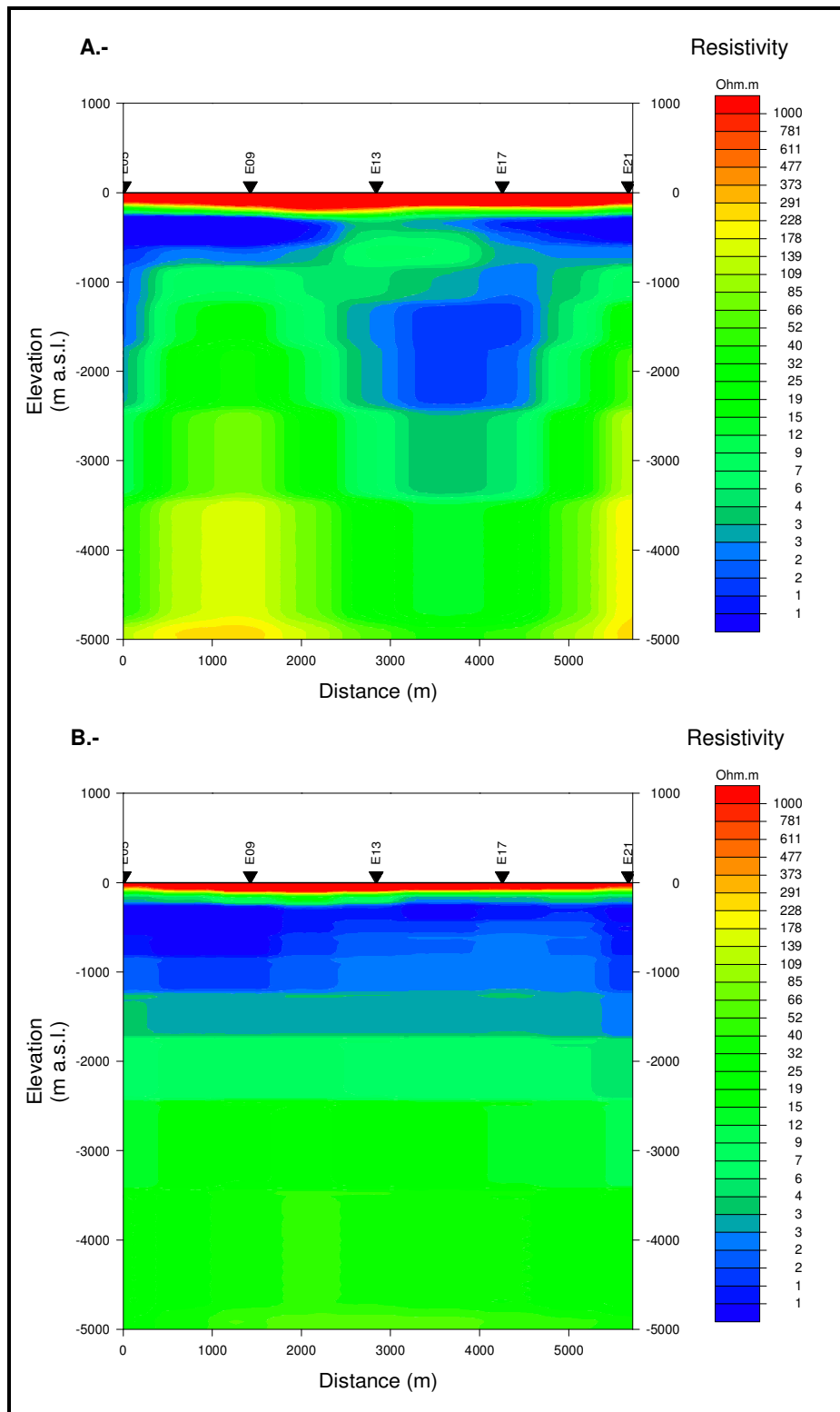


Figura 3.3 A.- Modelo de resistividad bajo L4 original de capas del subsuelo B.- Modelo Invertido bajo L4 de los datos MT simulados sin corrimiento estático



**Figura 3.4 A.- Modelo invertido de datos MT simulados con corrimiento estático bajo L4.
B.- Modelo Invertido considerando modelamiento del corrimiento estático usando los
datos de A (Sasaki) bajo L4.**

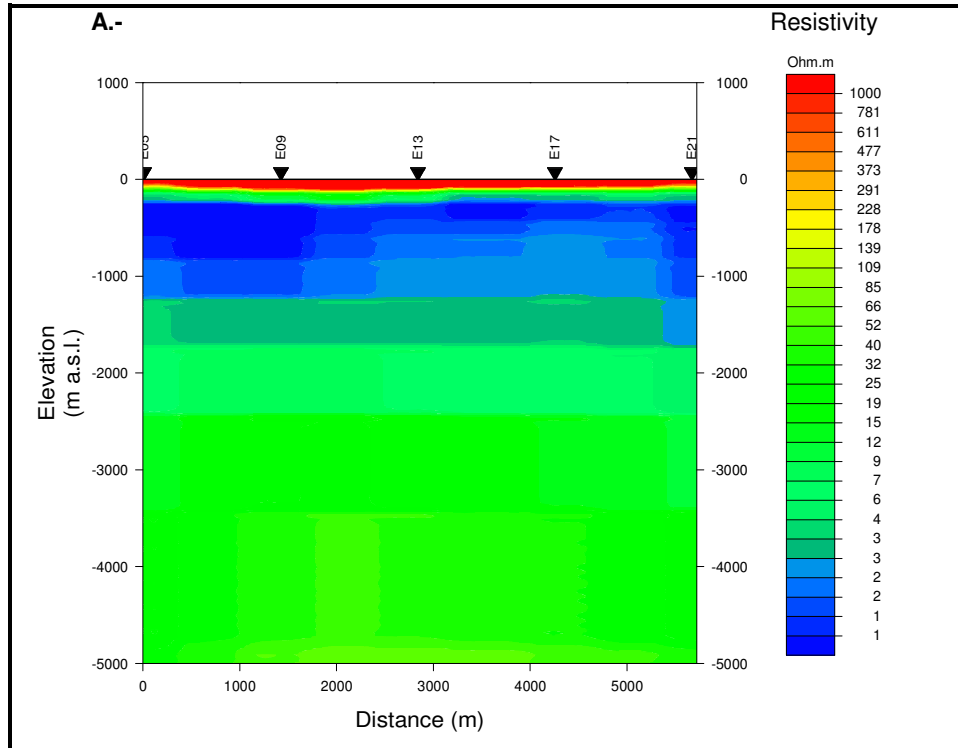


Figura 3.5 A.- Modelo invertido de resistividad bajo el L4 usando datos MT simulados con corrimiento estático aplicando el método de la Matriz completa de distorsión.

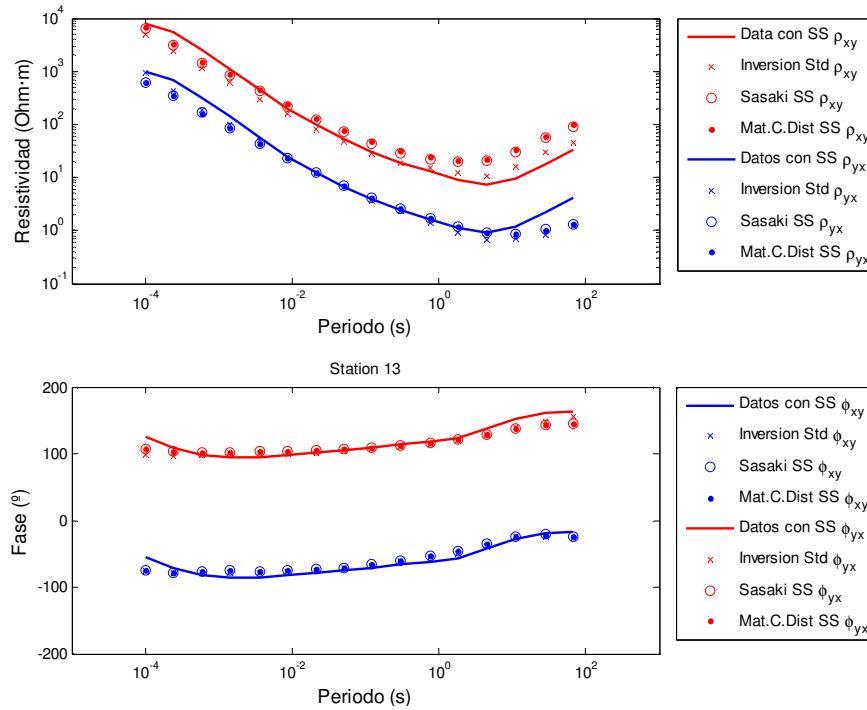


Figura 3.6 Resistividades Aparentes XY (rojo) y YX (azul) de la estación MT E13

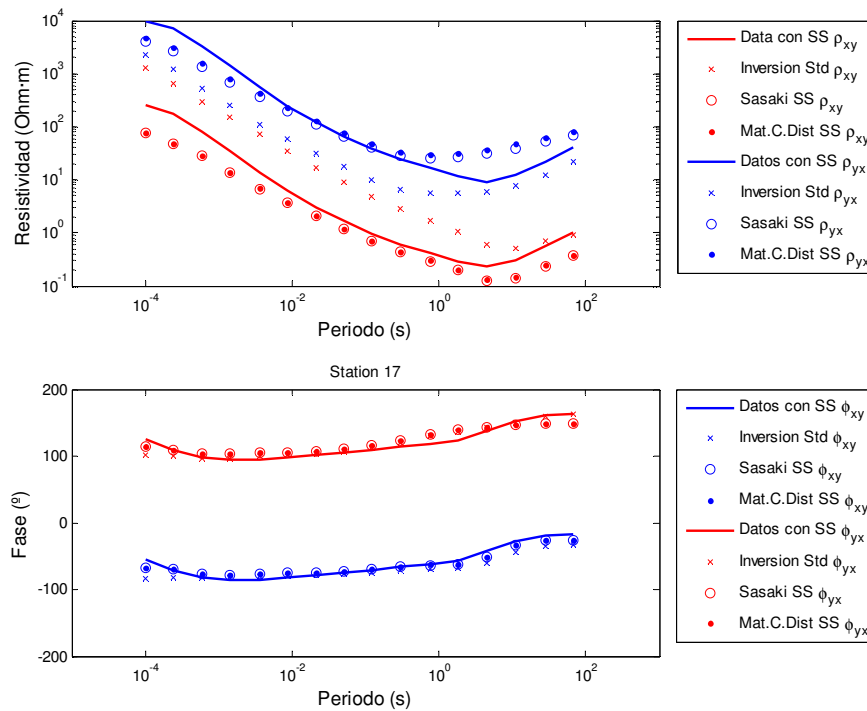


Figura 3.7 Resistividades Aparentes XY (rojo) y YX (azul) de las estación E17. Con línea continua se presentan los datos simulados con corrimiento estático. Con “x” se muestran las resistividades aparentes obtenidas inversión normal (std. Inversion), con “o” se muestran las respuesta obtenidas con *Sasaki*, con “.” se muestran las respuestas obtenidas con la Matriz Completa de Distorsión.

3.7 Ejemplo II: Aplicación del modelamiento del corrimiento estático (SS) en modelo 2D con falla.

En esta sección se evalúan los resultados del modelamiento del corrimiento estático (SS) aplicado sobre un modelo del subsuelo con una falla vertical con rumbo de 45°. En la Figuras 3.9 y 3.13 (A) se muestra el modelo de resistividades utilizado, en el cual la falla se representa por una franja de 10 ohm-m inmersa en un medio de 200 ohm-m.

Utilizando el modelo del subsuelo anterior se calcularon los tensores de impedancia correspondientes a las estaciones ubicadas, tal como indica la Figura 3.2 (mismas estaciones que en el ejemplo I), usando el código WSINV3DMT (*Siripunvaraporn* 2006). Estos datos fueron distorsionados incluyendo el efecto del SS con la descomposición de *Groom-Bailey* (1989) y luego se invirtieron usando el código desarrollado en este trabajo (con modelamiento del SS) y el código original WSINV3DMT. En el caso del modelamiento del SS se utilizaron las representaciones de *Sasaki* (2004) y la Matriz Completa de Distorsión.

Se usó la misma configuración de celdas utilizada en el ejemplo I, en el cual existen 29 x 29 celdas horizontales y 29 celdas verticales.

La descomposición de *Groom-Bailey* (1989) utilizada para aplicar el efecto del SS en los datos se presenta en capítulo 2. En ésta, el tensor de impedancia de cada estación es distorsionado multiplicando por una matriz de distorsión C (3.38). Ésta última se construye a través de la multiplicación de las matrices de *Twist* (T), *Shear* (S) y *Anisotropy* (A), definidas por sus ángulos respectivos, y un escalar de ganancia (g). En este caso, los ángulos de *Twist* para cada estación se eligieron aleatoriamente entre $\pm 20^\circ$, los ángulos de *Shear* entre $\pm 20^\circ$, la anisotropía entre ± 0.3 y la ganancia “g” se determinó como la amplitud de las matrices anteriores

$$T = \begin{bmatrix} 1 & -t \\ t & 1 \end{bmatrix} 1/\sqrt{1+t^2} \quad (3.38)$$

$$S = \begin{bmatrix} 1 & s \\ s & 1 \end{bmatrix} 1/\sqrt{1+s^2}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1+a & 0 \\ 0 & 1-a \end{bmatrix} 1/\sqrt{1+a^2}$$

$$g = \sqrt{1+t^2} \sqrt{1+s^2} \sqrt{1+a^2}$$

$$C = g T S A t = \tan(\xi) \quad s = \tan(\eta)$$

ξ : Ángulo de *twist*

η : Ángulo de *shear*

Los valores de matriz C utilizados para distorsionar cada estación se presentan con línea continua en la Figura 3.8 (*original SS*), tal que se presenta un gráfico por cada elemento de la matriz de distorsión (C) siguiendo la notación indicada en 3.39. Además, en la Figura se presentan los factores de SS estimados con los métodos de *Sasaki* y Matriz Completa de Distorsión representados con “o” y “x” respectivamente. Estos resultados se analizan más adelante.

$$CZ = \begin{bmatrix} s_{xy} & s_{xx} \\ s_{yy} & s_{yx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

En la Figura 3.10 se presentan secciones en planta a 100m, 1.000m y 5.000m de profundidad del modelo de resistividad invertido usando el código original de WSINV3DMT (que no corrige el efecto del SS). Este proceso de inversión obtuvo un error de 3.69 RMS (3.13), el cual equivale a un 18.5% de diferencia entre los datos observados y los calculados. En las secciones a profundidad 100m y 1.000m se nota cómo la estructura principal del modelo original (falla vertical con rumbo 45°) es recuperada, pero también se observan artefactos o anomalías que no están presentes en el modelo original (señalados en Figura). En la sección a 5.000m profundidad ya no es posible observar la falla principal del modelo, siendo reemplazada por un cuerpo de alta resistividad en centro del área y dos anomalías de baja resistividad en los extremos Noreste y Suroeste. Esta estructura fue generada durante la *inversión* de los datos y no tiene ninguna relación con el modelo original.

En las Figuras 3.11 (*Sasaki*) y 3.12 (Matriz completa de distorsión) se presentan las secciones en planta de resistividad a 100m, 1.000m y 5.000m de profundidad obtenidas con procesos de inversión que modelan el SS. Los dos resultados corresponden a la tercera iteración. El modelo de *Sasaki* obtuvo un RMS de 3.1 y el Matriz Completa de Distorsión de 2.65, estos equivalen a 15% y a un 13.5% de diferencia entre los datos observados y los datos calculados. Ambos procesos de inversión, usando la representación de *Sasaki* y la Matriz completa de distorsión para remover el SS, obtuvieron modelos de resistividad casi idénticos. En estos se observa una estructura central en el modelo con rumbo de 45° y con resistividades entre 10 a 20 ohm-m. En este caso no se observan artefactos como los del primer modelo (WSINV3DMT sin modelamiento del SS). En la sección en planta a 5.000m de profundidad aún es posible observar la falla, pero con menor contraste en los valores de resistividad. Cabe notar que en la sección en planta a 100m de profundidad, el medio que rodea la falla se presenta con valores mayores a 200 ohm-m y en las plantas a mayor profundidad éste valor tiende disminuir (~100 ohm-m).

En las Figuras 3.13 y 3.14 se muestran las secciones verticales de resistividad de los modelos invertidos correspondientes al perfil L3 (Figura 3.2).

En la Figura 3.10 (B), que tiene resultados del código WSINV3DMT sin modelamiento del SS, se observa como la falla sólo se detecta hasta los 2.000m de profundidad y, bajo ésta, el modelo pierde toda su similitud con el modelo original (4.8.8 A). En cambios en las secciones obtenidas con *Sasaki* y la Matriz completa de distorsión (invertidas con modelamiento de SS) es posible observar la falla hasta por lo menos los 5.000m de profundidad.

En las Figuras 3.15 a 3.18 se muestran las resistividades aparentes (ρ_{xy} e ρ_{yx}) y fases obtenidas para los modelos invertidos para las estaciones E8, E13, E18 y E21 (Figura 3.2). Las curvas de resistividad aparente y fase son una manera de presentar los datos del tensor de impedancia de las estaciones MT y se calculan como indica en 2.16 y 2.17. En el lado izquierdo de las Figuras 3.15 a 3.18 se presentan las resistividades aparentes y fases correspondientes a la antidiagonal del tensor de impedancias (Z_{xy} y Z_{yx}) y en el lado derecho las curvas correspondientes a la diagonal del tensor (Z_{xx} y Z_{yy}). Las resistividades aparentes y fases del tensor de impedancias distorsionadas con SS y usada como dato de entrada para las inversiones se indican con línea continua (*Datos con SS*). Las resistividades aparentes y fases calculadas del modelo obtenido con inversión normal sin considerar el SS se muestran con "x" (*Inversión Estd.*). Las resistividades aparentes y fases calculadas del modelo invertido con *Sasaki* se muestran con "o" (*Sasaki SS*) y las de la Matriz Completa de Distorsión con ".".

En las Figuras 3.16 a 3.18 se puede apreciar como las resistividades aparentes del modelo de WSINV3DMT sin SS (ρ_{xy} y ρ_{yx}) no pueden ajustarse a los datos originales (*Datos con SS*) en las frecuencias más altas (> 1 kHz) debido al desplazamiento que produce el corrimiento estático. Estas sólo logran ajustarse en las frecuencias más

bajas (< 10 Hz) en donde se produce una separación en las curvas de resistividad aparente (ρ_{xy} y ρ_{yx}) necesaria para superar el desplazamiento generado por el corrimiento estático en los datos. La separación anterior de las resistividades aparentes calculadas corresponde al intento que realiza el proceso de inversión para explicar el corrimiento estático observado en esta estación, para lo cual debe modificar la distribución de resistividad eléctrica en el modelo invertido. Estos cambios introducidos en el modelo para ajustar las bajas frecuencias en la estación E21 producirían los sectores de baja resistividad observados bajo los 5.000m de profundidad en los extremos NE - SW.

También en la Figuras 3.15 a 3.18 se nota como las respuestas ρ_{xy} y ρ_{yx} de los modelos de *Sasaki* y la Matriz Completa de Distorsión se mantienen paralelas a los datos distorsionados, evitando la formación de artefactos en los modelos invertidos. Las resistividades aparentes de *Sasaki* presentan valores levemente menores que los datos y la Matriz completa de distorsión muestra un mejor ajuste con ellos, dando cuenta del mejor valor de RMS obtenido en la inversión (2.65).

En las respuestas diagonales del tensor ρ_{xx} y ρ_{yy} (a la derecha de las Figuras 3.15 a 3.18), sólo el modelo de la Matriz completa de distorsión es capaz de ajustar adecuadamente la fase y los valores de resistividad aparente. Lo anterior se debe a que el modelo de *Groom-Bailey* utilizado para distorsionar los datos, corresponde a la multiplicación de una matriz (como la Matriz Completa de Distorsión) que puede mezclar las respuestas de fase de los elementos diagonales y antidiagonal del tensor de los datos. Esta distorsión en las fases no puede ser reproducida por el modelo de *Sasaki*, ya que sólo escala independientemente los elementos del tensor (no modifica la fase de los elementos del tensor).

En la Figura 3.8 se muestran los valores estimados de SS para los métodos de *Sasaki* y la Matriz completa de distorsión. En esta se observa como el método de la Matriz completa de distorsión obtienen para S_{xy} , S_{yx} , S_{xx} y S_{yy} valores similares a los usados originalmente para distorsionar los datos. Para los valores de S_{xx} y S_{yy} en la Matriz completa de distorsión también obtiene un buen ajuste con los datos usados originalmente. En el modelo de *Sasaki*, los valores de SS son aplicados de forma diferente en los datos que en el modelo matricial de distorsión (C) usado originalmente, por lo que no se espera que haya total similitud en los resultados. Sin embargo se observa que S_{xy} y S_{yx} de *Sasaki* muestran una tendencia similar y valores que los aplicados a los datos originalmente.

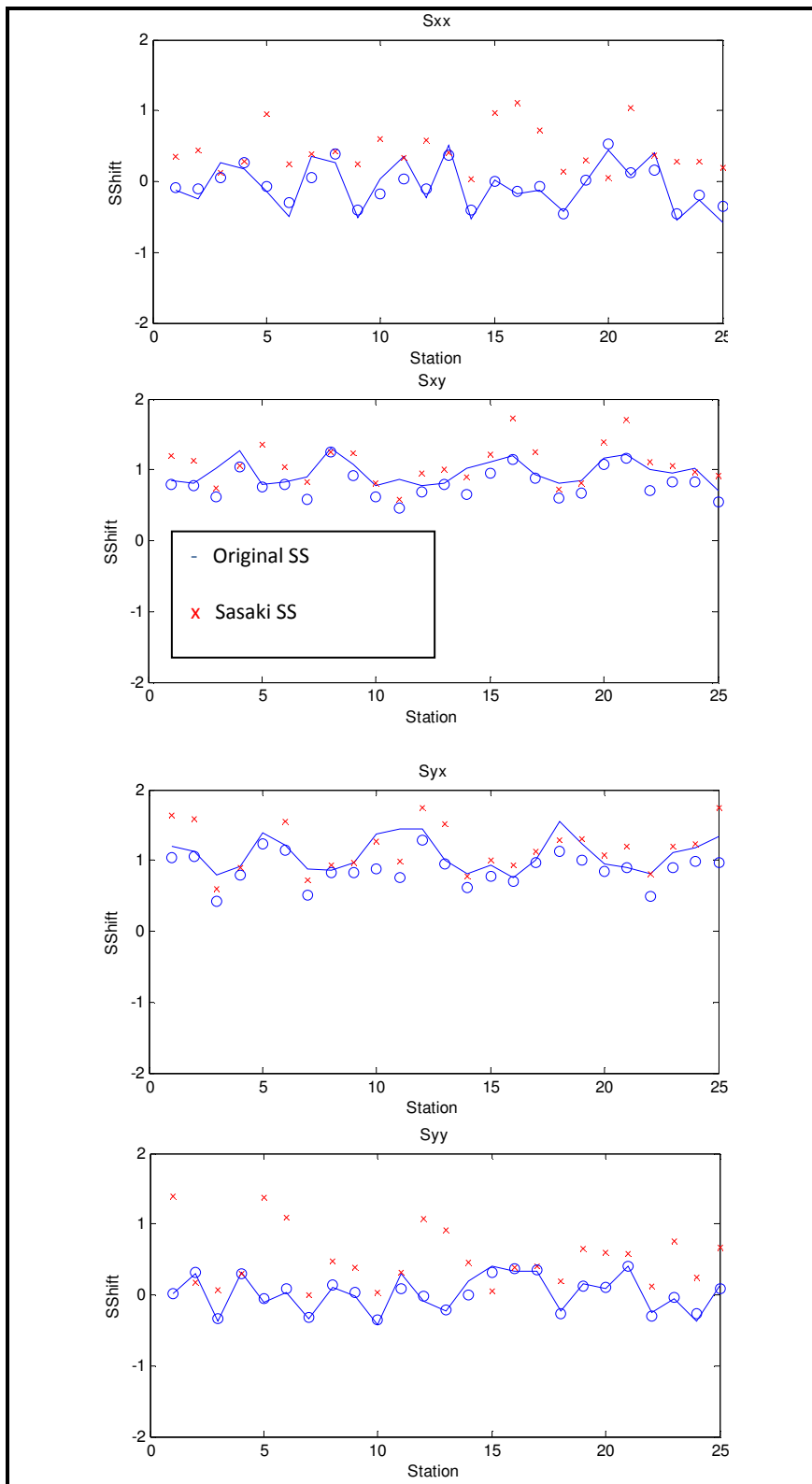


Figura 3.8 Factores de SS usados para distorsionar los datos y factores estimados con modelamiento del SS.

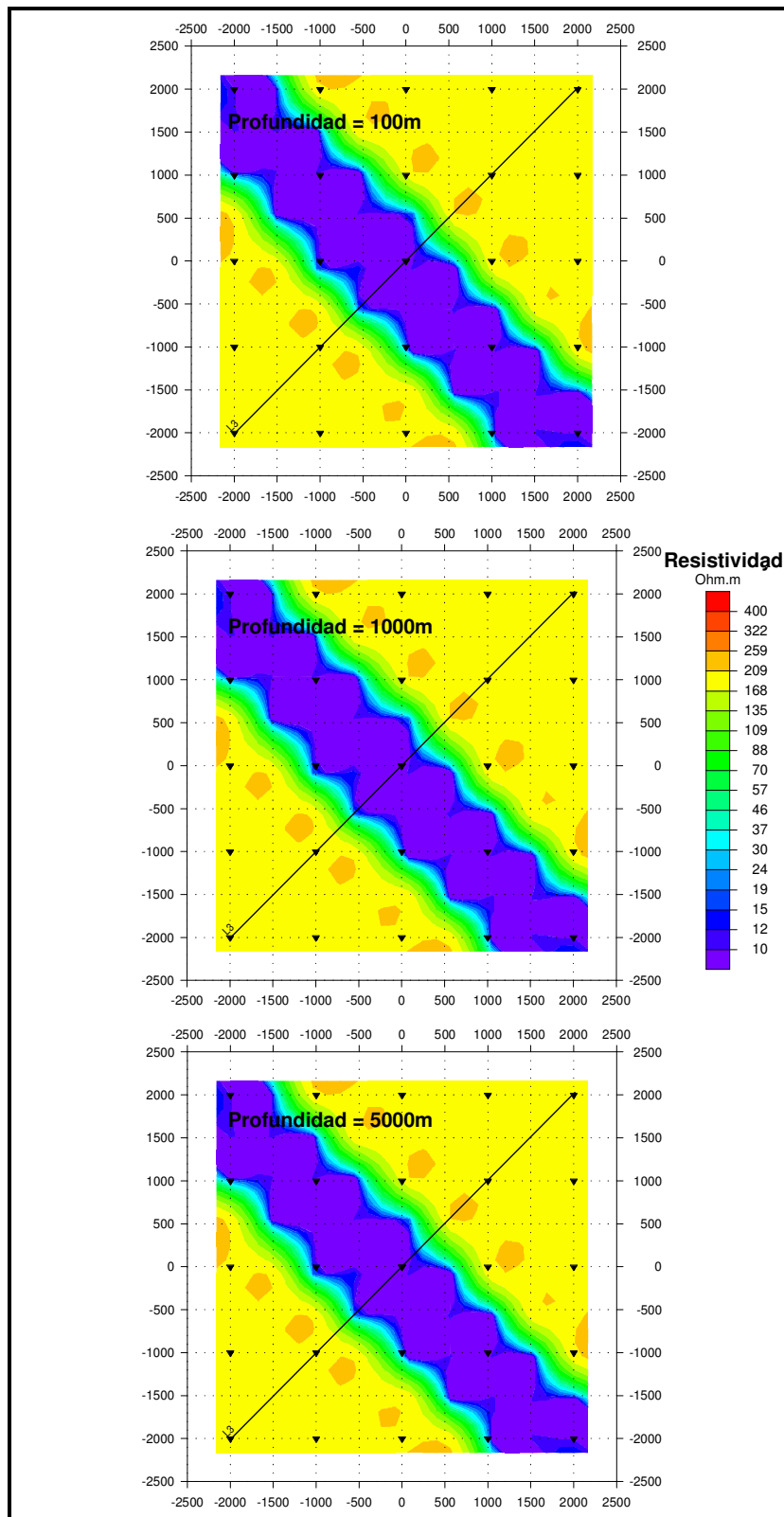


Figura 3.9 Vistas en planta del modelo de resistividad original a 100m, 1000m y 5000m de profundidad.

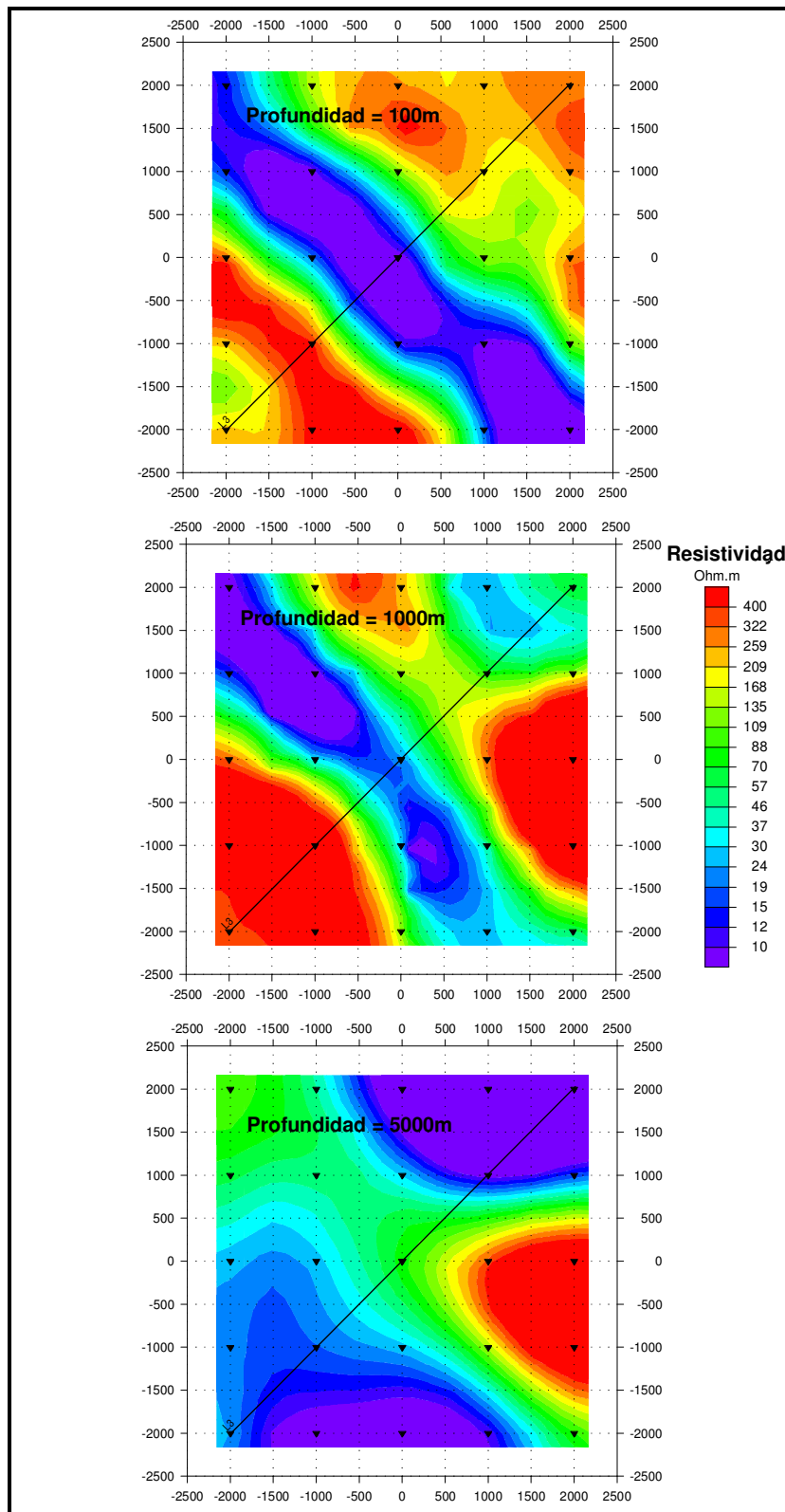


Figura 3.10 Vistas en planta del modelo de resistividad invertido sin corregir el SS a 100m, 1000m y 5000m de profundidad.

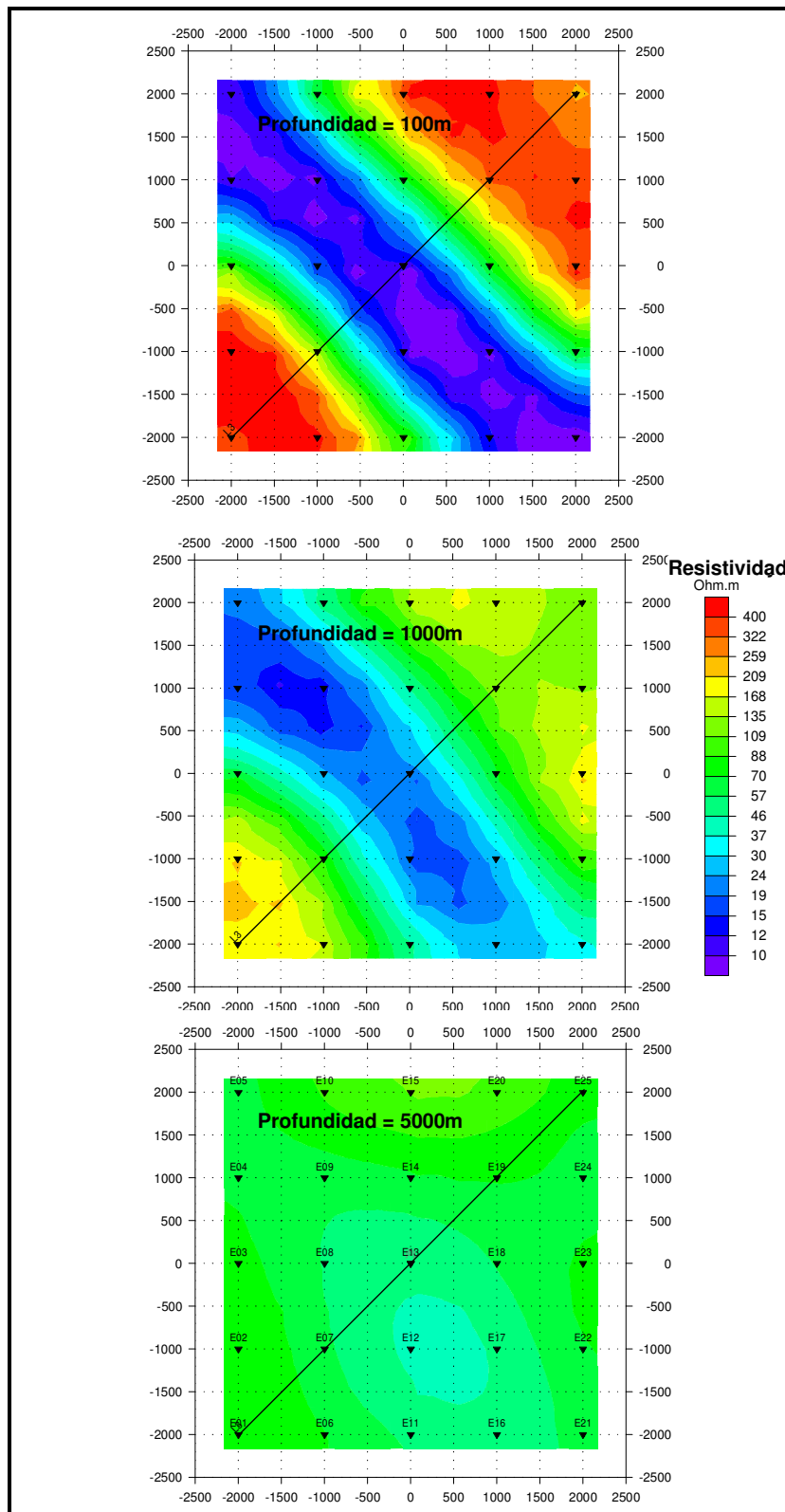


Figura 3.11 Vistas en planta del modelo de resistividad invertido usando modelamiento del SS (Sasaki).

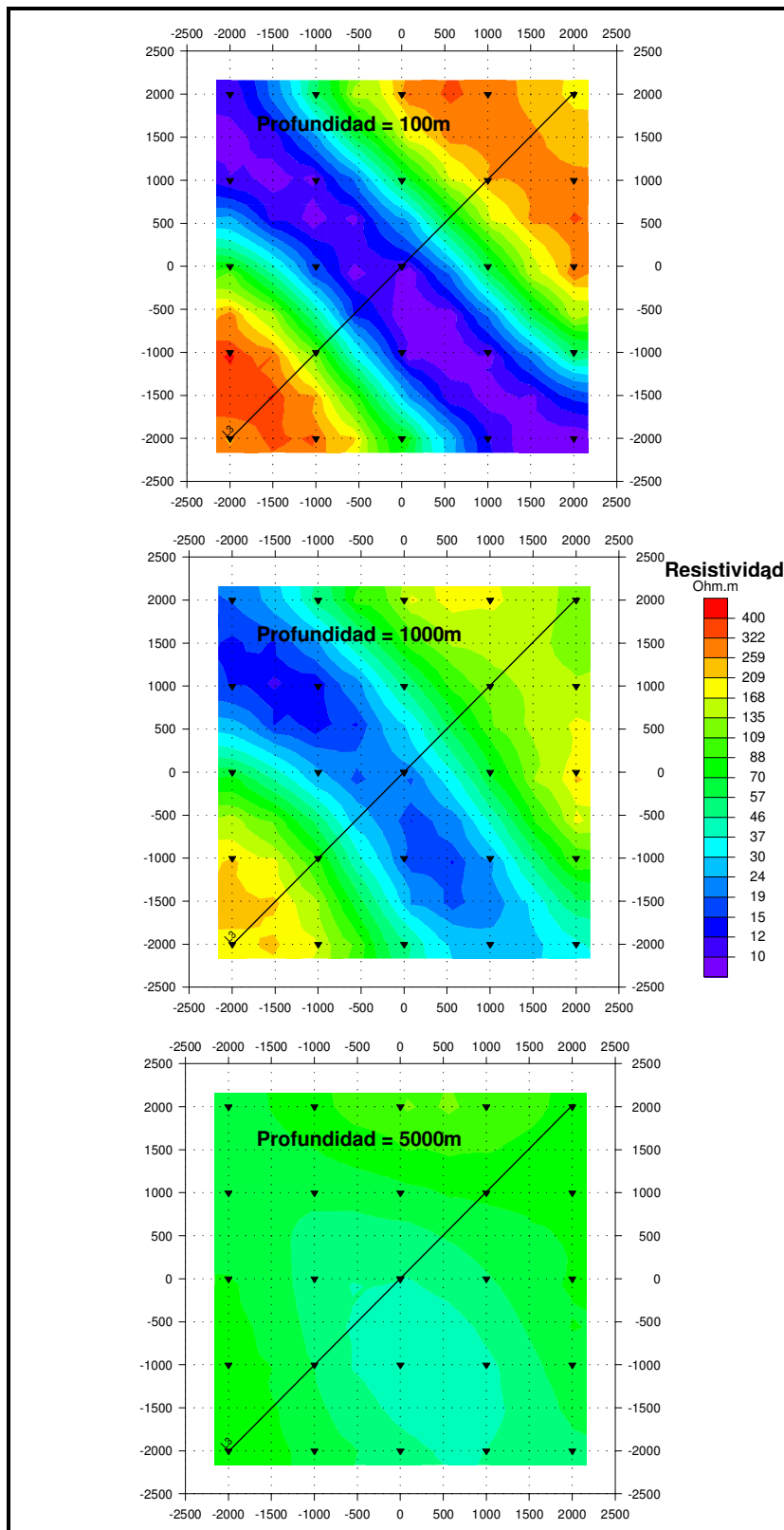


Figura 3.12 Vistas en planta del modelo de resistividad invertido usando modelamiento del SS (Matriz Completa de Distorsión).

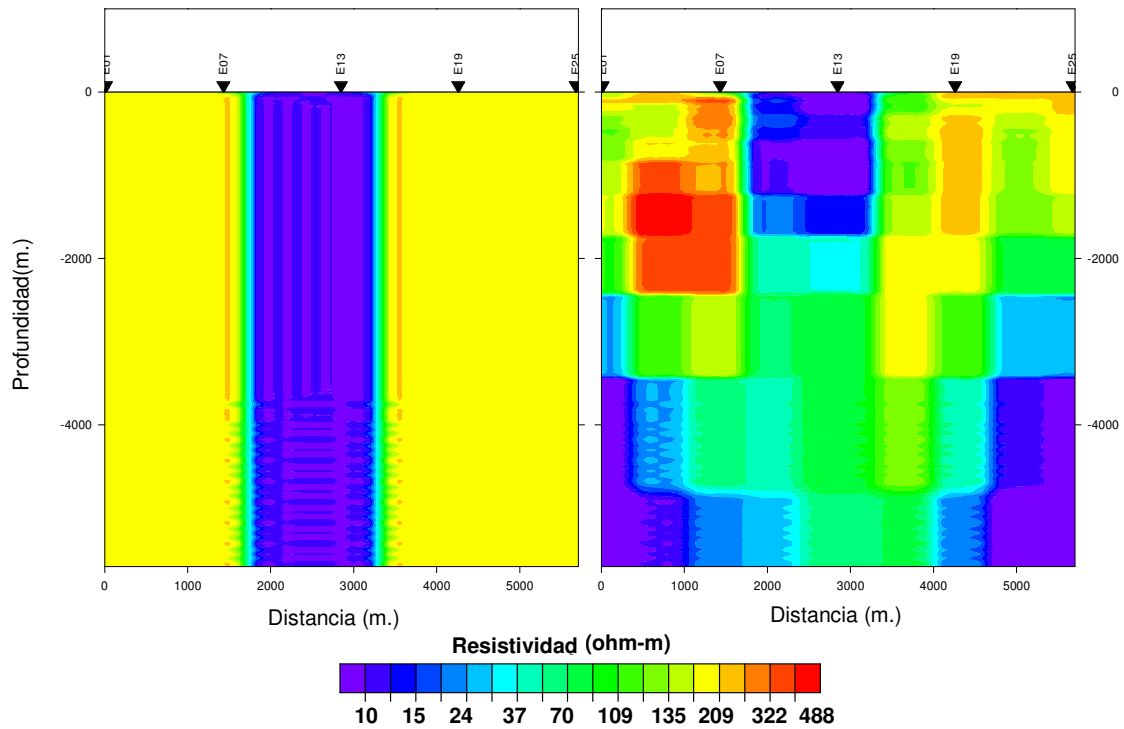


Figura 3.13 Perfil L3 del modelo de resistividades, A.- subsuelo original B.- inversión simple (sin SS)

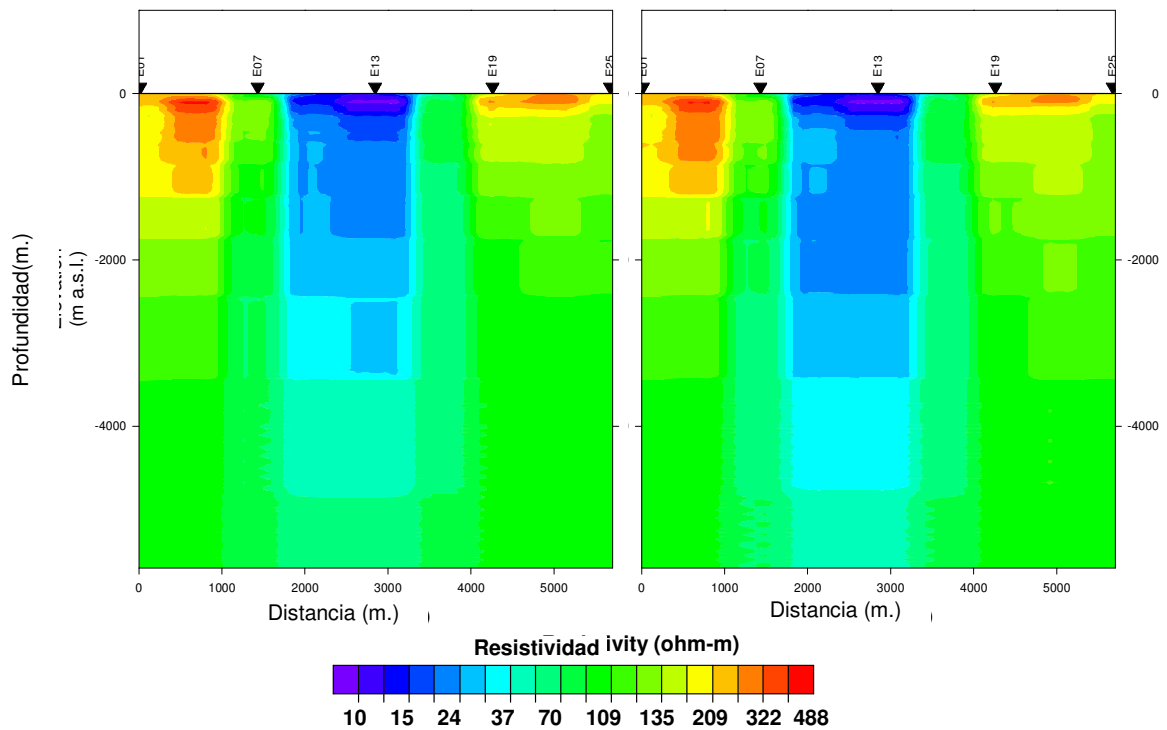


Figura 3.14 Perfil L3 del modelo de resistividades, A.- inversión con SS (Sasaki) B.- inversión con SS (Matriz Completa de Distorsión)

- Datos con SS (ρ_{xy}, ϕ_{xy}) - Datos con SS (ρ_{yx}, ϕ_{yx}) - Datos con SS (ρ_{xy}, ϕ_{xy}) - Datos con SS (ρ_{yx}, ϕ_{yx})
- * Inversión Estd. (ρ_{xy}, ϕ_{xy}) * Inversión Estd. (ρ_{yx}, ϕ_{yx}) * Inversión Estd. (ρ_{xy}, ϕ_{xy}) * Inversión Estd. (ρ_{yx}, ϕ_{yx})
- o Sasaki SS (ρ_{xy}, ϕ_{xy}) o Sasaki. (ρ_{yx}, ϕ_{yx}) o Sasaki SS (ρ_{xy}, ϕ_{xy}) o Sasaki. (ρ_{yx}, ϕ_{yx})
- . Mat.C.Dist SS (ρ_{xy}, ϕ_{xy}) . Mat.C.Dist SS (ρ_{yx}, ϕ_{yx}) . Mat.C.Dist SS (ρ_{xy}, ϕ_{xy}) . Mat.C.Dist SS (ρ_{yx}, ϕ_{yx})

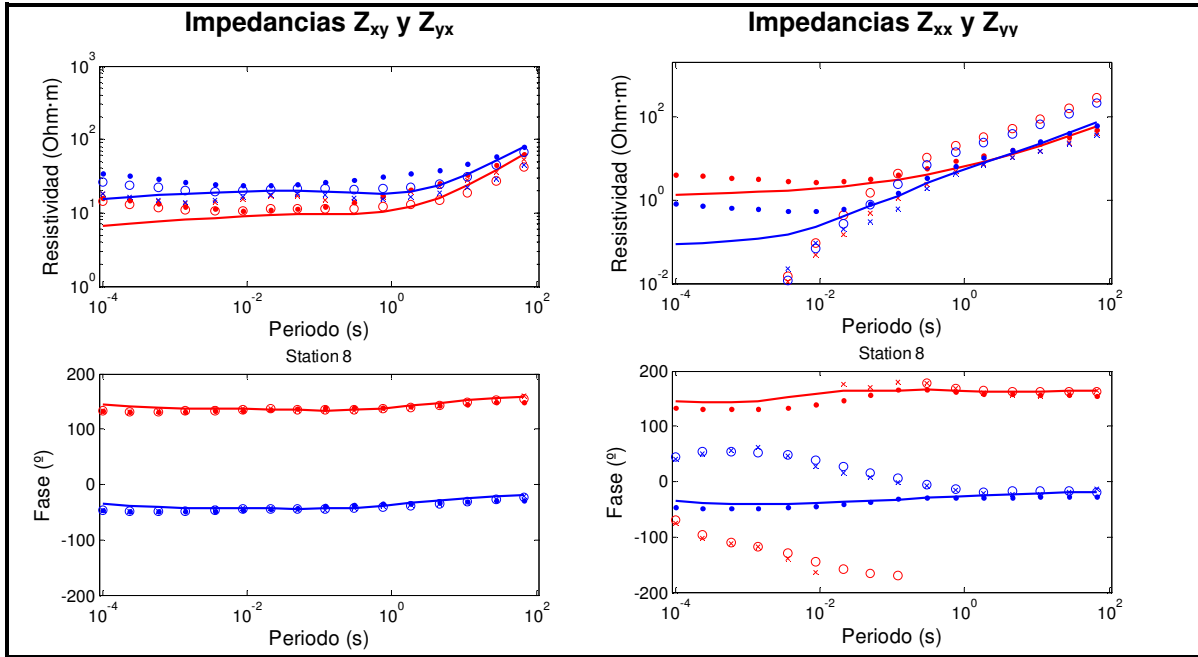


Figura 3.15 Resistividades Aparentes y fases calculadas en la estación E8.

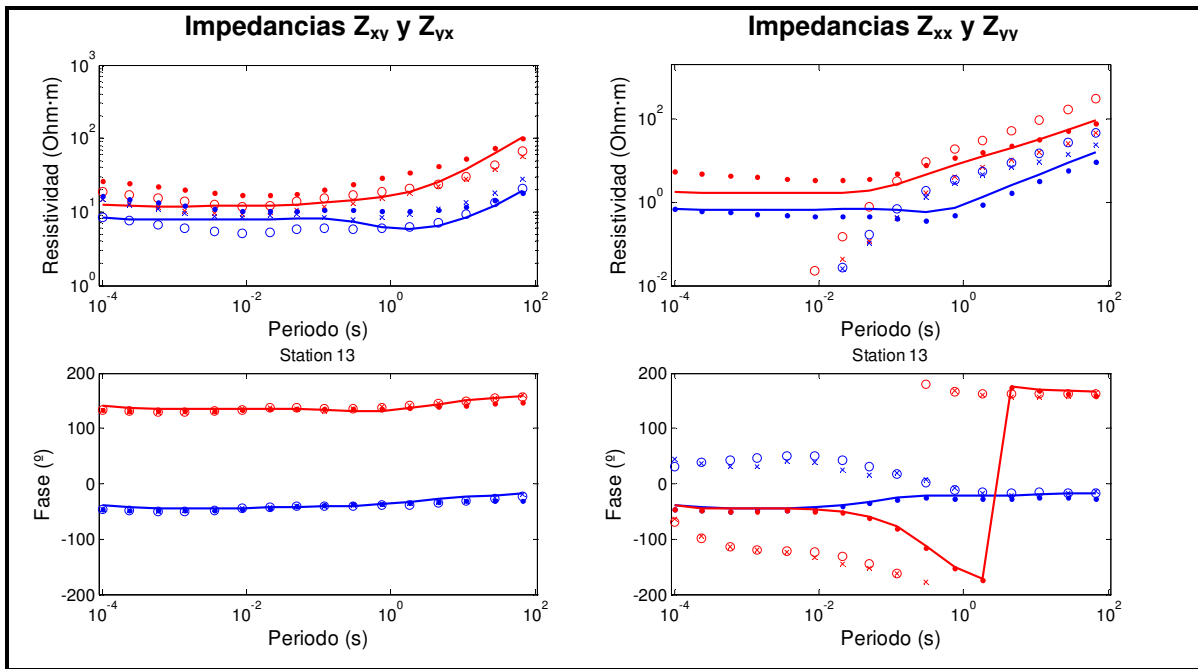


Figura 3.16 Resistividades Aparentes y fases calculadas en la estación E13.

- Datos con SS (ρ_{xy}, ϕ_{xy})	- Datos con SS (ρ_{yx}, ϕ_{yx})	- Datos con SS (ρ_{xy}, ϕ_{xy})	- Datos con SS (ρ_{yx}, ϕ_{yx})
* Inversión Estd. (ρ_{xy}, ϕ_{xy})	* Inversión Estd. (ρ_{yx}, ϕ_{yx})	* Inversión Estd. (ρ_{xy}, ϕ_{xy})	* Inversión Estd. (ρ_{yx}, ϕ_{yx})
o Sasaki SS (ρ_{xy}, ϕ_{xy})	o Sasaki (ρ_{yx}, ϕ_{yx})	o Sasaki SS (ρ_{xy}, ϕ_{xy})	o Sasaki (ρ_{yx}, ϕ_{yx})
. Mat.C.Dist SS (ρ_{xy}, ϕ_{xy})	. Mat.C.Dist SS (ρ_{yx}, ϕ_{yx})	. Mat.C.Dist SS (ρ_{xy}, ϕ_{xy})	. Mat.C.Dist SS (ρ_{yx}, ϕ_{yx})

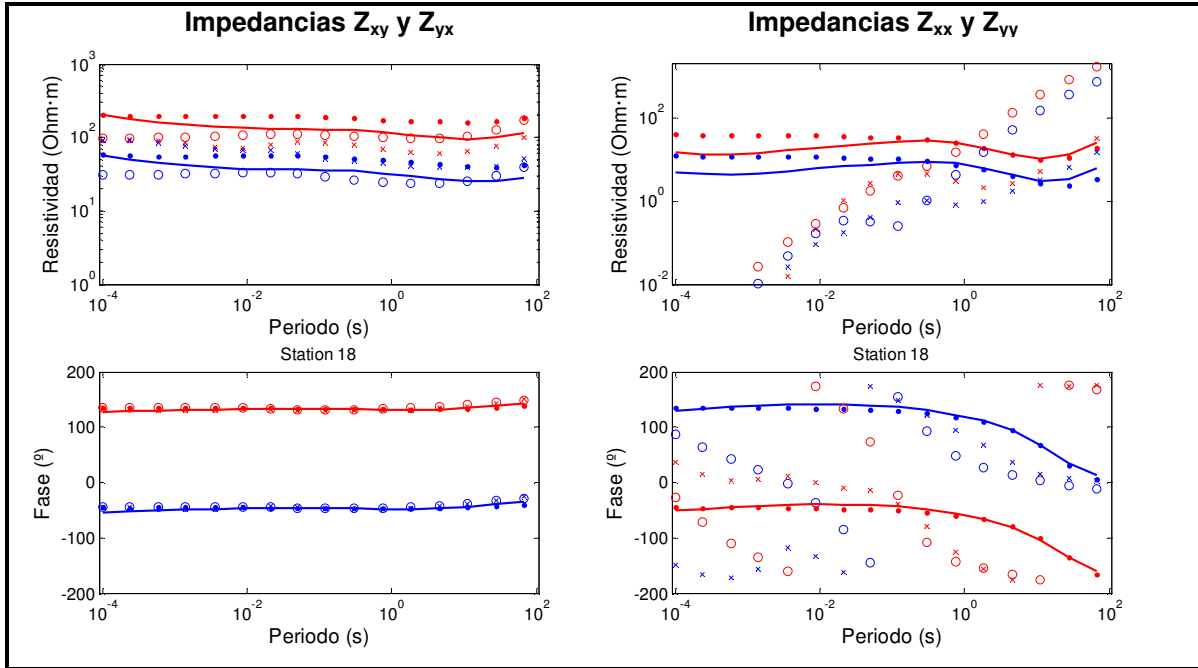


Figura 3.17 Resistividades Aparentes y fases calculadas en la estación E18.

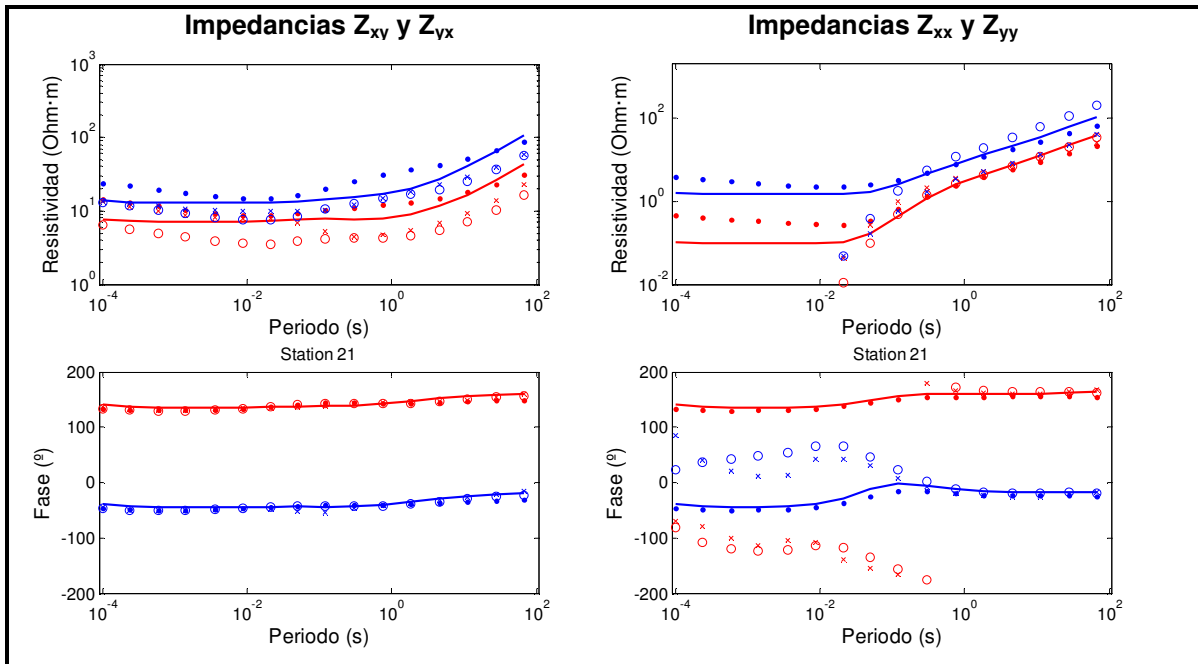


Figura 3.18 Resistividades Aparentes y fases calculadas en la estación E21.

CAPÍTULO 4:

ESTUDIO MT y TDEM EN EL SECTOR DE PISAGUA

Un estudio geofísico con 21 estaciones de magnetotelúrica (MT) y transiente electromagnético (TDEM) fue realizado en Junio de 2014 en el sector de Pisagua, Región de Atacama, Chile.

Los objetivos de este estudio fueron obtener mayor información sobre la geometría de la Falla de Pisagua y evaluar la efectividad de las metodologías descritas en este trabajo (modelamiento del corrimiento estático y MT/TDEM) para corregir el corrimiento estático en datos MT.

En el área de estudio, la falla de Pisagua se expresa a través de un prominente escarpe de falla con su cara orientada hacia el Norte. Este presenta alturas entre 160 a 260m y se extiende aproximadamente 25 Km en dirección EW (N65E°) desde el acantilado costero hasta el valle central (Allmendinger 2005, Silva 1977).

Las estaciones del estudio MT y TDEM fueron distribuidas en un área de 28 Km² cubriendo tanto las superficies inferior y superior del Escarpe de la Falla de Pisagua. A partir de los datos MT registrados se obtuvo un modelo tridimensional de la resistividad eléctrica del subsuelo, cuyas principales estructuras son investigadas para determinar características geométricas de la Falla de Pisagua en profundidad.

Por otro lado, en la superficie de la zona de estudio se detectan depósitos de nitratos (“caliche”) cuyas potencias varían entre cm a decenas de metros (Vega, 1997). Estos tienen propiedades de aislador eléctrico y generan discontinuidades en la distribución de resistividad eléctrica. Estas características son causas potenciales para producir corrimiento estático en datos MT (2.4). Un ejemplo modelando la eventual distorsión asociada al “Caliche” se presenta en el capítulo 2 sección 2.4.

Los datos del estudio MT y TDEM de la Falla de Pisagua presentan corrimiento estático (sección 4.5) y es necesario corregirlos para obtener un modelo de resistividad del subsuelo libre de distorsión que permita interpretar características sobre la Falla de Pisagua. Para esto se aplicaron las técnicas de modelamiento del corrimiento estático (*Sasaki* y Matriz Completa de Distorsión) y calibración con TDEM (MT/TDEM) en conjunto con la inversión 3D numérica, obteniéndose diferentes modelos de resistividad del subsuelo para cada método. Los resultados de estos procesamientos son analizados comparando el ajuste entre sus respuestas calculadas y los datos medidos,

efecto de corrimiento estático estimado y modelos de resistividad del subsuelo invertidos. A partir del análisis comparativo se decide cual de los modelos de resistividad es más adecuado para su interpretación.

El modelo de resistividad eléctrica del subsuelo resultante de este estudio es interpretado asociando sus principales estructuras con la geología reportada del área de estudio (Silva 1977, Valenzuela 2015). El rasgo más importante del modelo de resistividad, corresponde a la zona de conductora de Falla (FZC) que indicaría la ubicación de la zona de daño generada por la actividad Falla. Utilizando la morfología del escarpe observado en superficie y la posición de la zona de daño detectada, se investigan, a través del modelamiento estático, geometrías de fallas que permitan explicar la forma y ubicación de ambas estructuras. Con los resultados de éste análisis se concluye sobre las características geométricas de la Falla de Pisagua.

4.1 Ubicación

El estudio geofísico fue realizado a 12 Km al Este del puerto de Pisagua (19.58°S y 70.10°W), en la Región de de Tarapacá, Chile (Figura 4.1).

El sector de estudio define una área de 28 Km², la cual es atravesada centralmente por la Falla de Pisagua. Las estaciones del estudio MT y TDEM fueron ubicadas en este sector cubriendo las superficies inferior y superior del escarpe del terreno.

En la figura 4.1 se muestra el sector estudiado se delimita con un recuadro negro y la ubicación de las estaciones MT/TDEM se presentan con círculos rojos. El escarpe de la falla de Pisagua se destaca con línea segmentada gris.

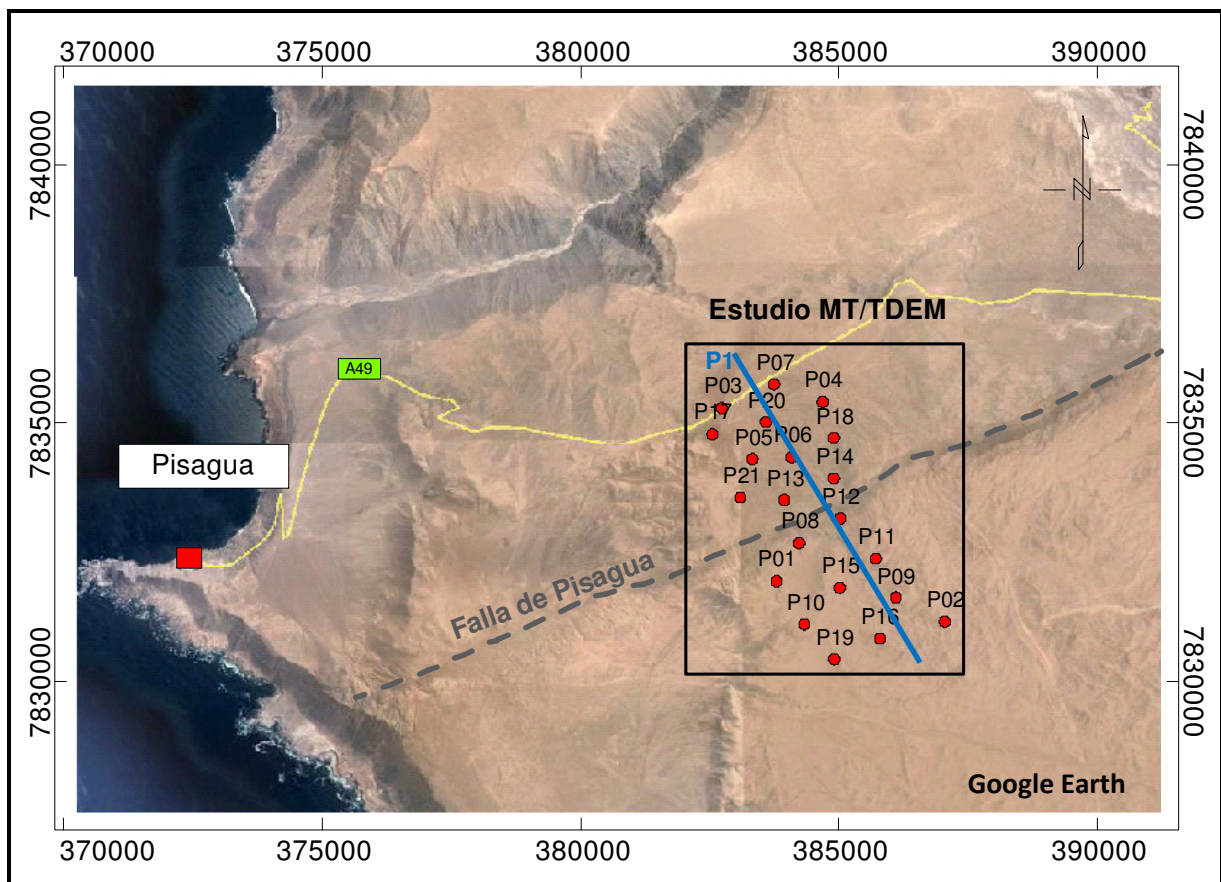


Figura 4.1 Mapa del Sector de Estudiado con el Levantamiento MT (cuadro negro). Estaciones MT en círculos rojos y falla de Pisagua en línea gris segmentada.

4.2 Marco Geológico.

El sector de Pisagua fue estudiado por Silva (1977). En este se describe un basamento compuesto por lavas y brechas volcánicas andesíticas del período Jurásico inferior y sobrepuesto por rocas sedimentarias marinas (calizas, oolíticas, lutitas y areniscas) provenientes de los períodos del Jurásico medio al superior. Esta secuencia se divide en tres formaciones Oficina Viz (Jurásico Inferior al Bajociano), Caleta Lígata (Bajociano media a Caloviano inferior), Huantajaya (Bajociano medio a Orfordiano superior).

En discordancia con la secuencia anterior en la pampa del Tamarugal, al Este del área de estudio MT, se encuentra cubierta por depósitos continentales, compuestos por limos, arcillas, conglomerados y diatomitas del Mioceno Inferior al Cuaternario (formaciones Altos de Pica y Diablo). Hacia la costa, al Oeste de la Pampa del Tamarugal, se observan en la superficie sedimentos clásticos cuaternarios de origen coluvial (Qcin) que forman cuencas interiores y/o intramontañas.

El intrusivo de Pisagua (JKgd) cubre un área de 450 km², rodeando el área del estudio MT y cubriendo totalmente el acantilado costero, cuya altura bordea los 1000m sobre el nivel del mar. El Intrusivo de Pisagua se compone principalmente de granodioritas y dioritas. Su edad máxima se estima en el período Jurásico Superior, debido a que instruiría la formación Caleta Lígata. Los afloramientos del intrusivo de Pisagua se observan a lo largo de lo principales fallas Norte-Sur y Este-Oeste de la zona de estudio.

En la superficie la mineralización de nitratos se emplaza rellenando fracturas en todos tipo de rocas tanto las del período Mesozoico (Intrusivo Pisagua, Oficina Viz, Caleta Lígata y Huantajaya) como las del período cuaternario (Altos de Pisagua, Sedimentos clásticos). El caliche (depósitos de nitratos) se distribuye en profundidad paralelo a la estratificación de las rocas con potencias desde decenas de centímetros hasta metros (Vega, 1997).

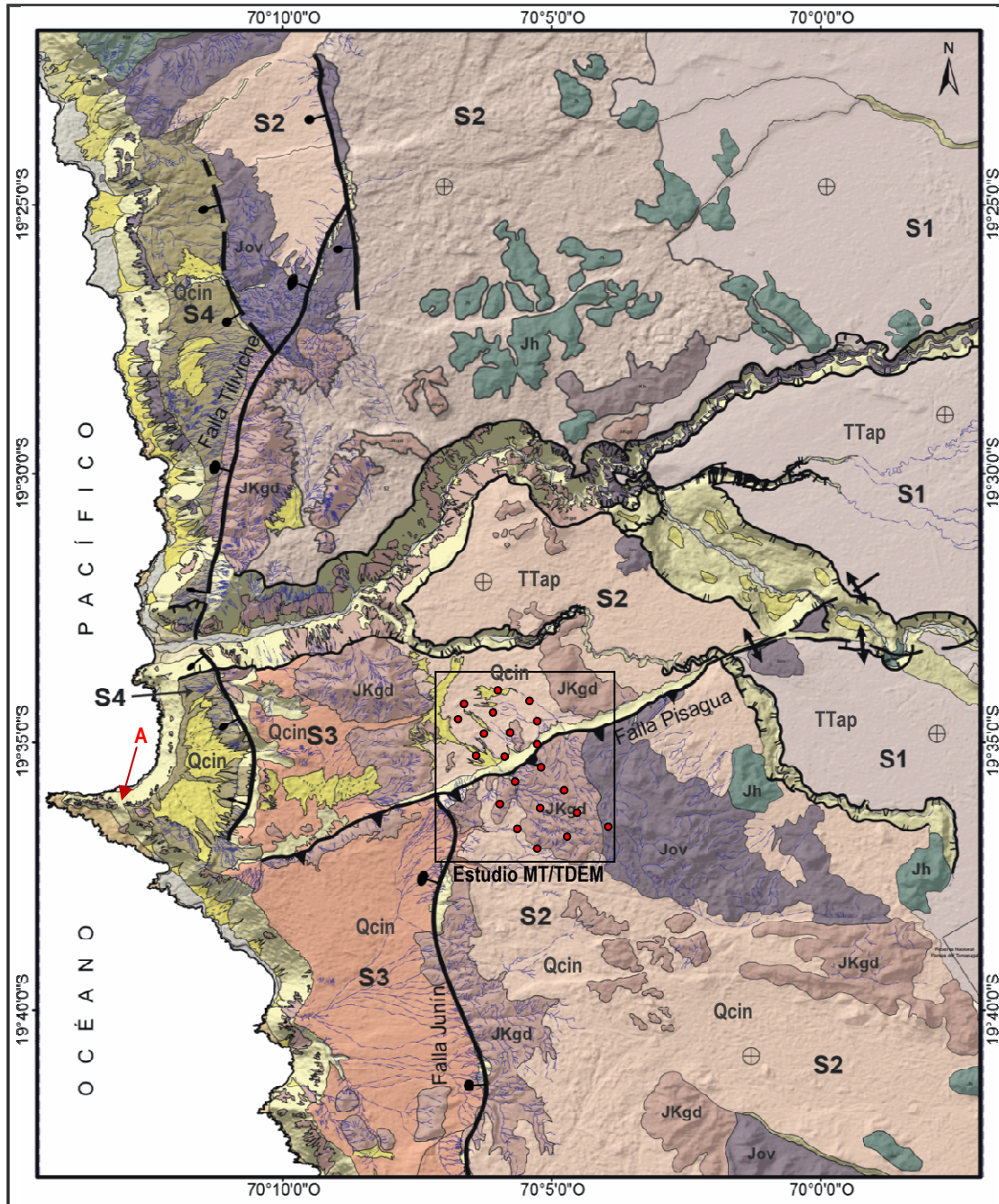


Figura 4.2 Mapa Geológico de Pisagua (Valenzuela, 2015). Litologías más relevantes (Jov: Formación Oficina Viz; JKgd: Intrusivo de Pisagua; Jh: Formación Huantajaya; TTap: Formación Altos de Pica; Qcin : Depósitos coluviales cuaternarios). S1, S2, S3 y S4 indican pediplanicies de la cordillera de la Costa en orden cronológico.

4.3 La Falla de Pisagua

La Falla de Pisagua pertenece a un sistema de Fallas Este-Oeste de la Cordillera de la Costa que se evidencia entre la Quebrada de Camarones (19°S) y el río Loa (21.6°S) (Allmendinger et al. 2005, Quezada et al. 2003, Carrizo et al. 2008).

Este sistema de Fallas fue descrito por Allmendinger et al. (2005), en donde a través de los planos de falla expuestos en el acantilado costero se reconoció su cinemática inversa. Estas últimas acomodarían un acortamiento horizontal de la corteza paralelo al margen continental.

La Falla de Pisagua se ubica a 65 Km al Norte de Iquique y se expresa a través un escarpe de Falla y/o pliegue de Falla, cuya cara se presenta orientada hacia el Norte. El escarpe se extiende aproximadamente 25 Km siguiendo un rumbo de N65°E desde el acantilado costero hasta el extremo Oeste del valle central mostrando elevaciones verticales entre 160m a 260m (Allmendinger et al, 2005).

En Valenzuela (2015) se describe el escarpe de la Falla de Pisagua, el cual presenta una morfología levemente suavizada representado por un escalón principal con un talud dominado por detritos. En el pie del escarpe se detectan escarpitas que deforman los depósitos del talúd. La cresta del escarpe tiene forma redondeada y presenta abundantes grietas abiertas que en su mayoría se orientan paralelas a la dirección del escarpe.

Valenzuela (2015) reporta pediplanicies desplazadas por la actividad de la Falla de Pisagua, cuyos depósitos continentales provienen de los períodos Oligoceno y Mioceno, pudiendo estimar una edad máxima para la Falla del período Mioceno (~20 Ma). Allmendinger et al. (2005) a través de la datación isotópica de tobas volcánicas plegadas del extremo Este del escarpe, estimaron que la Falla habría estado activa durante el tardío Plioceno (3.49 Ma). Adicionalmente, Quezada et al. (2010) y Allmendinger et al. (2005) asocian la Falla de Pisagua con el alzamiento de una terraza marina aislada (A en Figura 4.2) de origen Pleistoceno. Esta terraza marina habría sido desplazada de la traza de la Falla de Pisagua por la Falla de Tiliviche con orientación Norte-Sur.

Carrizo et al. 2008 investigaron las Fallas del sector del Salar Grande (20°30'-21°5'S), ubicado en el extremo Sur del sistema de Fallas EW de la Cordillera de la Costa. En estas se observaron pliegues en cenizas volcánicas, originadas en el Pleistoceno Superior según dataciones radiométricas (Ar^{40}/Ar^{39}), que sugieren que el sistema de Fallas EW se habría mantenido activo durante el período Cuaternario.

El sismo de mayor magnitud en el sector de estudio asociable a la Falla de Pisagua se observó el 24 de marzo de 2007. Este corresponde a un evento sísmico cortical cuyo

epicentro se ubicó a 20 Km al Sur del puerto de Pisagua y con una profundidad estimada entre 20 a 30 Km de profundidad. La magnitud reportada por el catalogo NEIC fue 5.7 (Mw) y su mecanismo de foco presenta un plano nodal (NEIC) con una inclinación hacia el Sur de 39° y un rumbo de $N53^\circ E$, el cual es similar a la traza de la Falla de Pisagua en Superficie. En Allmendinger et al. (2009) se investigó el sector de Pisagua un mes después, en donde se observaron fracturas superficiales que se habrían producido por la actividad del sismo, las cuales presentaban trazas con decenas de metros y aperturas de algunos milímetros.

Este último sismo sumado a las evidencias de actividad hasta el período Pleistoceno del Sistema de Fallas EW sugiere que éste podría estar activo hasta el presente.



Figura 4.3 Escarpe de la Falla de Pisagua.

4.4 Levantamiento MT/TDEM

En la Figura 4.1 se muestran las 21 estaciones registradas con los métodos magnetotelúrico (MT) y transiente electromagnético (TDEM) en el sector de Pisagua. Estas fueron adquiridas entre el 29 de mayo al 1 de Junio de 2014. Las coordenadas de estas estaciones se muestran en la Tabla 4.1.

En la figuras 4.4 a 4.6 se muestran fotos de la campaña de terreno con la instalación y mediciones de estaciones MT/TDEM. Para el registro del método MT se usaron siete sistemas de adquisición (4 MTU-5, 2 V8 y 1 RXU-3E Phoenix Geophysics) registrando los períodos entre 0.0001 seg. hasta 1000 seg. por al menos 18 horas de registro. Los sondeos TDEM fueron medidos en cada estación utilizando un sistema Terratem (Monex Geoscope) con una configuración de loop coincidente y un tamaño de 100x100m². Se registraron los decaimientos de voltaje entre 100 useg hasta 100 mseg.

Tabla 4.1: Coordenadas UTM de las estaciones del estudio MT/TDEM (Zona 19, WGS84).

ESTACIÓN	ESTE (m.)	NORTE (m.)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)
P01	383799.034	7831934.44	1159
P02	387061.172	7831152.92	1306
P03	382739.907	7835287.79	938
P04	384694.419	7835408.06	965
P05	383329.142	7834298.62	948
P06	384092.314	7834337.39	967
P07	383750.985	7835749.37	940
P08	384234.175	7832675.1	1125
P09	386111.381	7831620.35	1272
P10	384337.573	7831101.71	1168
P11	385722.025	7832371.07	1216
P12	385035.264	7833150.63	1146
P13	383946.156	7833509.45	980
P14	384907.902	7833927.61	1016
P15	385023.494	7831807.08	1183
P16	385801.81	7830825.2	1219
P17	382556.741	7834779.32	944
P18	384908.697	7834711.57	995
P19	384918.751	7830426.03	1165
P20	383595.447	7835019.75	945
P21	383097.964	7833556.2	970



Figura 4.4 Instalación de estaciones MT - Levantamiento MT/TDEM Pisagua.



Figura 4.5 Adquisición de estaciones TDEM - Levantamiento MT/TDEM Pisagua.

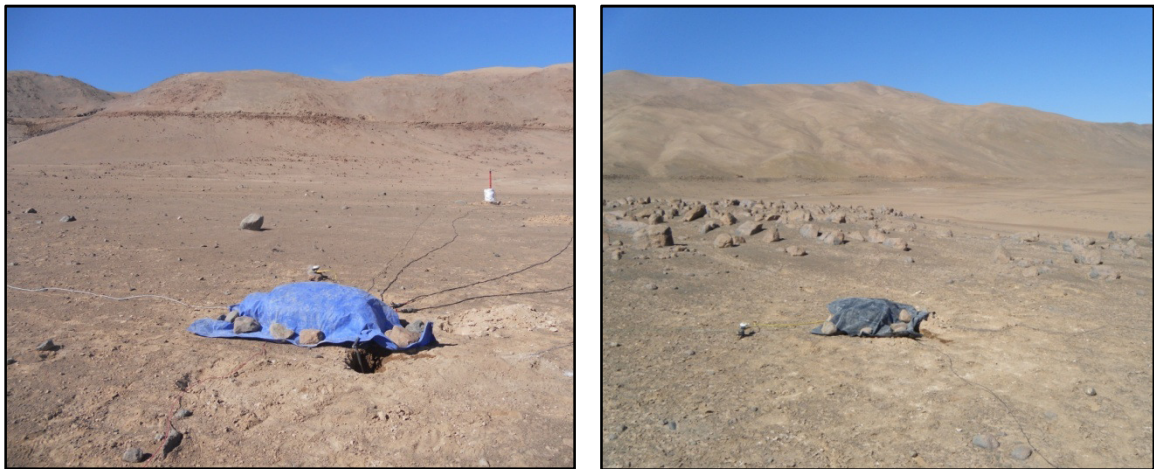


Figura 4.6 Vista Sur al Escarpe de la Falla de Pisagua de las Estaciones MT/TDEM P13 y P21

4.5 Procesamiento

Las series de tiempo de los campos EM registradas en las estaciones MT fueron procesadas para obtener el tensor de impedancia completo y la función de transferencia vertical. Para ello se utilizó el software SSMT2000 (*Phoenix Geophysics*) que utiliza el código de *Bostick* y *Wight* para estimar los espectros de frecuencia y el método de regresión robusta basado en la varianza y/o coherencia (*Rousseeuw* 1984 y 1987). Los tensores de impedancia resultantes fueron guardados en archivos estándar (EDI).

Por cada sondaje TDEM registrado se invirtió un modelo de capas horizontales de resistividad eléctrica (1D), buscando que su respuesta se ajustara a los decaimientos de voltaje registrados. A través de la interpolación de estos modelos de capas se obtuvo la sección de resistividad eléctrica presentada en la Figura 4.14 que atraviesa la falla de Pisagua. Lo anterior se realizó usando el software WinGlink (*Geosystem-Schlumberger*).

Para analizar la dimensionalidad de los datos MT y estimar su rumbo (*strike*) cuando es posible (caso 2D), se utilizó el software WALDIM (Marti et al. 2009) basado en invariantes rotación del tensor de impedancias MT (análisis WAL). Los resultados se analizan en las siguientes secciones.

A partir de tensores de impedancia de las estaciones MT se utilizó la técnica de inversión 3D para estimar la resistividad eléctrica del subsuelo. Debido a que se esperaba que los datos estuvieran distorsionados por el efecto del corrimiento estático, se consideraron los siguientes enfoques analizados anteriormente para corregir este efecto:

- Inversión 3D sin considerar el efecto del corrimiento estático.
- Inversión 3D corrigiendo el efecto del corrimiento estático con TDEM.
- Inversión conjunta 3D de la resistividad del subsuelo y el efecto del corrimiento estático considerando:
 - Representación de *Sasaki* (2004).
 - Representación tensorial completa

El primer método mencionado sólo se utiliza como referencia para evaluar las mejoras de los siguientes tres métodos. En este se intenta obtener un modelo de resistividades del subsuelo que pueda reproducir los datos medidos y no se considera ningún método

especial para corregir el efecto del corrimiento estático. El segundo método, calibra las respuestas MT para corregir el efecto del corrimiento estático usando los modelos 1D del subsuelo obtenidos con el TDEM. El tercero y el cuarto modelan el efecto del corrimiento estático y estiman el modelo de resistividades del subsuelo simultáneamente durante el proceso de inversión. Para ello el efecto del corrimiento estático es modelado considerado usando dos representaciones distintas del efecto: *Sasaki* (2004) y la Matriz completa de distorsión.

Para poder comparar los métodos de corrección del SS propuestos se utilizaron en los procesos de inversión de los datos MT los mismos parámetros del código WSINV3DMT, los cuales fueron:

- Inversión del tensor de impedancia completo:
En cada proceso los datos de entrada correspondieron a las cuatro impedancias $[Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx} \text{ y } Z_{yy}]$ observadas en cada estación MT.
- Error base (*error floor*) del tensor de impedancias del 5%:
Define la desviación estándar de los datos para poder calcular el error RMS (expresión 3.13). Este valor establece en el proceso de inversión el ajuste esperado entre los datos MT observados y las respuestas calculadas del modelo de resistividades, de forma que no supere el nivel de ruido en los datos medidos y que se obtenga un error RMS cercano a uno al finalizar el proceso de inversión.
- *Model Length*: $n=5$ $dx=0.2$ $dy=0.2$ $dz=0.2$
Definen la matriz de covarianza del proceso de inversión que produce la “suavidad” en el modelo obtenido. Se escogió el mismo valor para dx , dy y dz para que la suavización del modelo fuera igual en todas direcciones. Los valores de 5 para n y de 0.2 para dx , dy y dz permiten asegurar que en el modelo no se produzcan variaciones de menor longitud que el espaciamiento entre las estaciones MT, evitando así la formación de artefactos durante el proceso de inversión.

- *Lamda: default.*

Este valor define la relación entre el error RMS de los datos y la suavidad del modelo en la función objetivo de WSINV3DMT. Éste es calculado por el código en cada iteración buscando reducir el error RMS y reducir la suavidad del modelo. En este trabajo se usó la configuración por defecto del código en donde el lamda de la primera iteración es 1 y en cada iteración se evalúan sus resultados variándolo en media década.

4.7 Distorsión en los datos MT Pisagua.

El corrimiento estático (SS) es el efecto de distorsión más importante presente en los datos MT Pisagua. Éste puede detectarse en las estaciones en donde las curvas de resistividad aparente XY e YX se mantienen separadas en los períodos investigados más bajos y se distribuyen con una forma similar. Lo anterior da cuenta, de una matriz de distorsión (C) que escalaría con diferentes factores (s_{xx} y s_{yy}) a cada elemento de la antidiagonal del tensor de impedancias (Z_{xy} y Z_{yx}), resultando en desplazamientos verticales distintos para las curvas de resistividad aparente y generando una separación entre ellas independiente del período.

Las curvas de resistividad aparente y fase adquiridas en el estudio MT Pisagua se muestran en el anexo VI, en donde se presentan en rojo las curvas correspondientes a la impedancia Z_{xy} y en azul a Z_{yx} . En estas, se puede observar que las estaciones P02, P03, P04, P09, P11, P12, P15, P16, P17 y P19 presentan una separación entre sus curvas de resistividad aparente (XY e YX) en el rango de 0.0001 a 1 seg, lo cual es indicativo de SS. En las figuras 4.7 y 4.8 se muestran ejemplos para las estaciones P02 y P09 de este efecto.

En las estaciones restantes (P01, P05, P06, P07, P08, P10, P13, P14, P18, P20 y P21) el SS no es tan evidente, ya que no se observa la separación entre las curvas de resistividad aparente XY y YX en los períodos bajos.

Otro enfoque para analizar el SS en los datos MT Pisagua corresponde al método MT/TDEM (sección 2.6). En éste se calcula una curva de referencia en base a las mediciones de TDEM para calibrar las curvas de resistividad aparente MT y determinar los factores s_{xx} y s_{yy} de la matriz de distorsión del SS. Cuando no hay SS en los datos MT de una estación, la curva de referencia coincide (al menos en un rango de períodos) con las curvas de resistividad aparente XY e YX.

En la figuras 4.20 y 4.21 se presentan los resultados obtenidos al aplicar el método MT/TDEM para investigar el SS. En estas se confirma el SS en las estaciones P02, P03, P04, P09, P11, P12, P15, P16, P17 y P19, en donde sus curvas de resistividad aparente no coinciden la curva de referencia del TDEM en ningún rango de frecuencias. También se nota que en las estaciones P01 y P08 podrían haber SS, ya que a pesar de que no hay separación entre sus curvas de resistividad aparente, si se observa que estas se distancian de la curva de referencia del TDEM.

Este resultado es importante, ya que indica que al menos el 57% de los datos MT adquiridos en Pisagua (12 estaciones) podrían estar afectados por el SS y, por lo tanto, dada la magnitud del efecto es necesario considerarlo en la interpretación de los resultados.

Por otro lado, durante la adquisición se detectaron resistencias de contacto con el subsuelo mayores a 2k Ohm en algunas estaciones MT, debido principalmente a la ausencia de humedad y al caliche presente en el área de estudio. Esto además de empobrecer la razón señal-ruido del campo eléctrico, permite el acoplamiento capacitivo entre el suelo y los cables produciendo que en algunos casos que se modifiquen los valores resistividad aparente y fase medidos (*Zonge & Hughes 1985*). Este efecto de distorsión se presenta como una leve disminución de las resistividades aparentes y fases en los períodos más bajos (entre 0.0001 a 0,001 seg), por lo que sólo afecta las observaciones más superficiales del método (primeros 100m de profundidad) y, por lo tanto, no se considera crítico para los resultados de este estudio MT. En las estaciones P02 y P09 (Figuras 4.7 y 4.8) se muestran ejemplos de este tipo de distorsión.

Debido a la cercanía de algunas estaciones con el pueblo de Pisagua, se observa interferencia con la red eléctrica en los datos MT en las frecuencias múltiples de 50Hz. En la figura 4.9 se presenta un ejemplo de serie de tiempo del campo eléctrico norte registrada en la estación P17 en donde se puede apreciar la señal sinusoidal de 50 Hz que interfiere las mediciones. Los datos de las frecuencias inteferidas fueron removidos de los resultados.

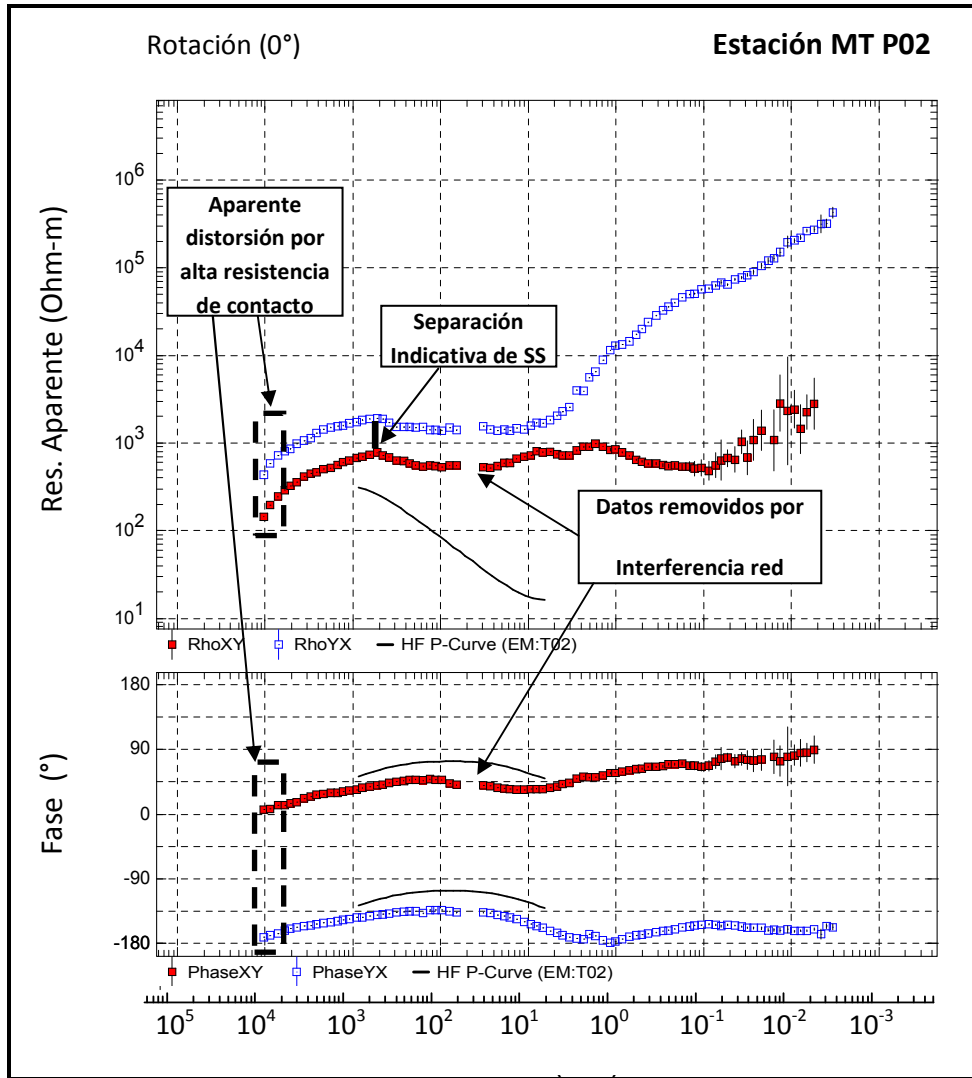


Figura 4.7 Resistividades aparentes (Rho_{xy} y Rho_{yx}) y curvas de fase (Fase XY y Fase YX) de la Estación P02 del MT Pisagua. Curva de referencia TDEM se muestra en negro. El corrimiento estático se puede apreciar en la separación que hay entre Rho_{xy} y Rho_{yx} para los períodos bajos (<0.001 seg). Con flecha y recuadro se detacan los principales efectos de distorsión identificados en los datos MT.

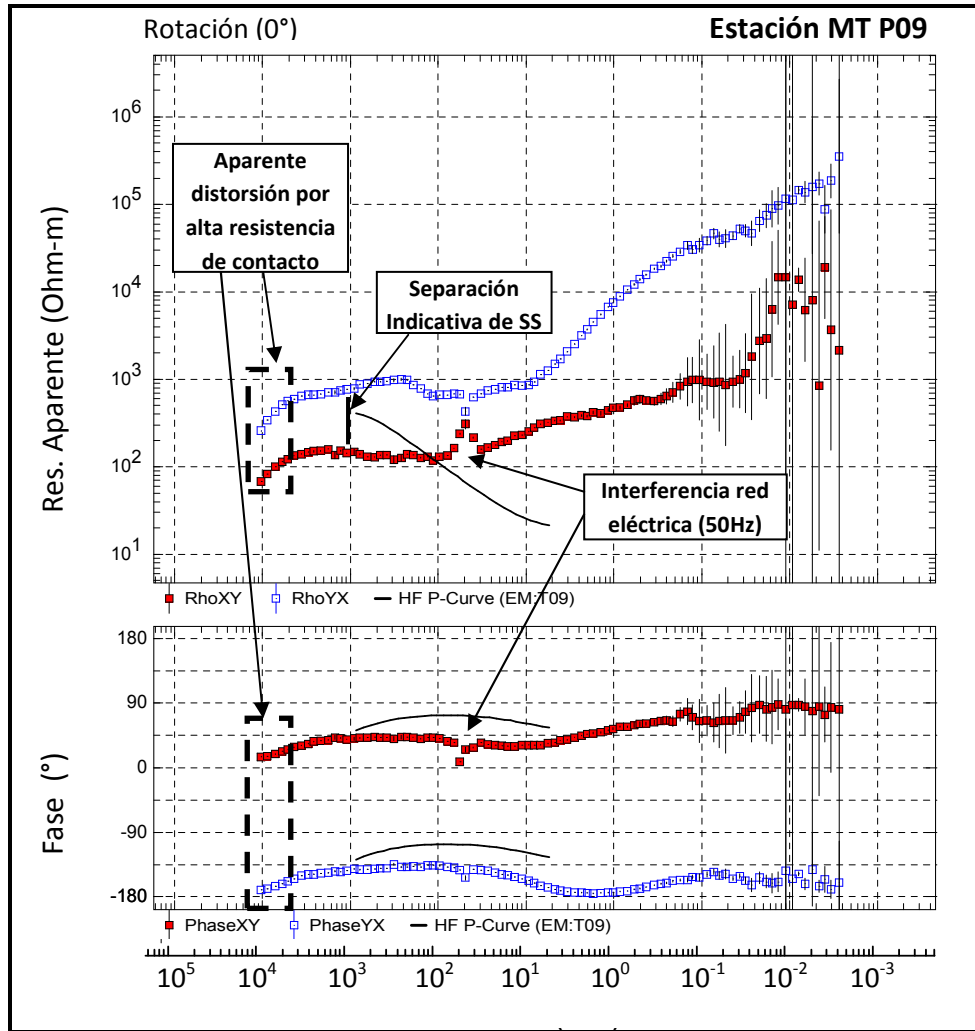


Figura 4.8 Resistividades aparentes (Rho_{xy} y Rho_{yx}) y curvas de fase (Fase XY y Fase YX) de la Estación P09 del MT Pisagua. Curva de referencia TDEM en negro. El corrimiento estático se aprecia en la separación entre Rho_{xy} y Rho_{yx} en períodos bajos (<0.001 seg).

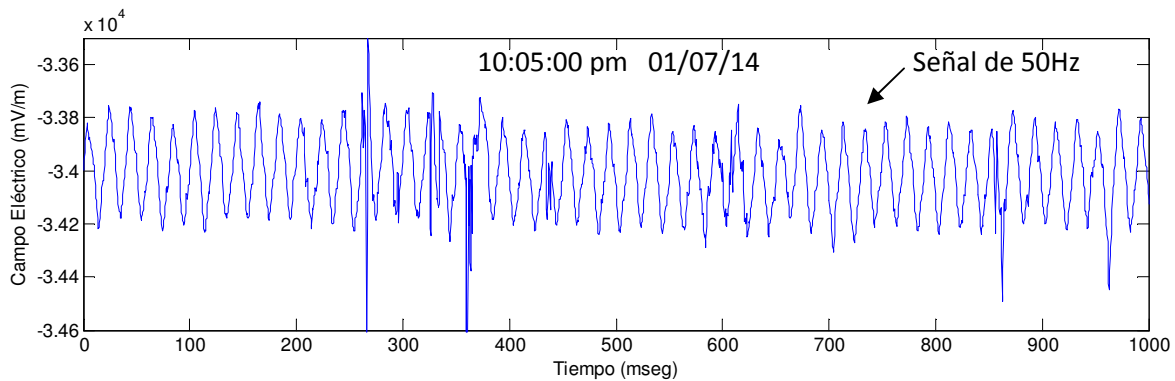


Figura 4.9 Serie de Tiempo del Campo eléctrico Norte registrada en la Estación P17 a las 10:05:00 del 01/07/14. En la figura se aprecia una señal de 50 Hz proveniente de la red de alimentación eléctrica del pueblo de Pisagua.

4.6 Dimensionalidad en los datos MT

Análisis WAL

Se realizó el análisis dimensional WAL basado en invariantes rotacionales (*Weaver et al.* 2000) sobre los tensores de impedancia medidos en Pisagua, utilizando el software WALDIM de *Marti* (2004). En este análisis se evalúan siete invariantes rotacionales del tensor de impedancia, que permiten determinar la dimensionalidad (1D, 2D y/o 3D) de la distribución de resistividad eléctrica del subsuelo a la cual corresponden los datos. Dicho análisis es importante, ya que permite determinar la técnica de modelamiento y/o inversión más adecuada para interpretar los datos, conocer cómo serán afectados los datos por el corrimiento estático.

En WAL se utilizan ocho categorías de dimensionalidad para clasificar los datos MT:

- No determinado: No es posible clasificar o reconoce la dimensionalidad de los datos.
- 1D: El tensor de impedancia indica que el subsuelo está compuesto de capas horizontales de distinta resistividad eléctrica y los datos no tienen corrimiento estático.
- 2D: El tensor de impedancia indica que las variaciones de resistividad eléctrica del subsuelo varían predominantemente en una dirección y con la profundidad (dimensionalidad 2D). También indica que los datos no tienen corrimiento estático.
- 3D/2D *twist*: El tensor de impedancia indica que la distribución de resistividad regional del subsuelo es 2D y que esta distorsionada por un de corrimiento estático dominado por la matriz de *twist* (sección 2.2).
- 3D/2D *diagonal tensor*: El tensor de impedancia indica que la distribución de resistividad regional del subsuelo es 2D. y que está distorsionada por un de corrimiento estático con un tensor diagonal (sección 2.08).
- 3D/2D *general*: El tensor de impedancia indica que la distribución de resistividad regional del subsuelo es 2D. y que está distorsionada por el corrimiento estático por una Matriz Completa de Distorsión (con los cuatro elementos distintos de cero)
- 3D: El tensor de impedancia indica que no hay una simetría predominante en la distribución de eléctrica del subsuelo. El tensor datos también podría afectado por el corrimiento estático.

- 3D/1D o 3D/2D: El tensor de impedancia indica que hay corrimiento estático y que la distribución de resistividad de general subsuelo puede ser 1D o 2D.

En la Figura 4.10 se muestra un histograma que indica la cantidad de datos del levantamiento MT de Pisagua que corresponden a cada una de las categorías del descritas anteriormente usando el análisis WAL. En éste se requiere definir un nivel de ruido mínimo, bajo el cual los invariantes son cero. En la Figura 4.10 se consideran 2 valores distintos para este parámetro (0.15 y 0.3). Se puede apreciar, que en ambos casos la categoría que contiene la mayor cantidad de datos corresponde a la dimensionalidad 3D, dando cuenta que esta sería la dimensionalidad predominante en los datos MT Pisagua.

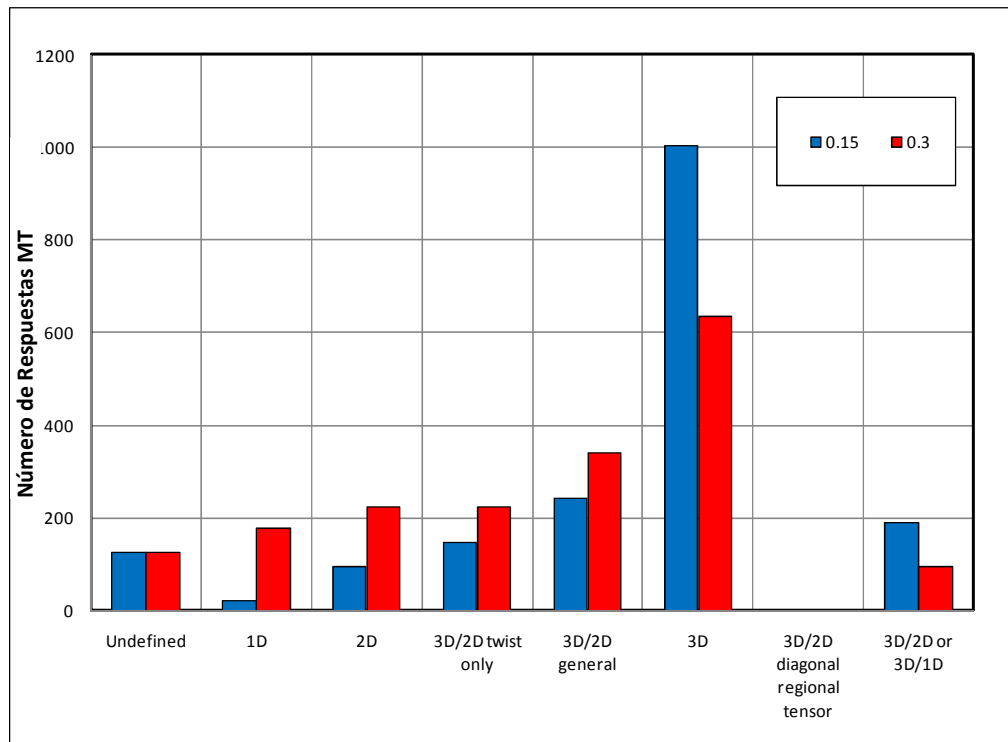


Figura 4.10 Histograma con las clasificaciones del análisis WAL para los datos del levantamiento MT Pisagua. En rojo se presentan las clasificaciones considerando un nivel de ruido de 0.3 y en azul considerando 0.15.

En la Figura 4.11 se presenta otro histograma mostrando la cantidad de datos que presentan dimensionalidad 1D, 2D y/o 3D según el análisis WAL (usando un nivel de ruido 0.15) en función del período del tensor de impedancia, el cual es inversamente proporcional a la profundidad de investigación del método MT en el subsuelo. Se aprecia que los datos con dimensionalidad 1D se encuentran en los períodos más bajos que corresponden a los sectores más superficiales (~0.001 seg.), los datos 2D se ubican en las frecuencias intermedias y los datos 3D predominan principalmente bajo

los 0.1 seg hasta los 100 seg. En todas las frecuencias el comportamiento 3D de los datos es importante, observándose que en al menos en un tercio de ellos predomina esta conducta.

Además se puede apreciar en la Figura 4.10 que por lo menos la mitad de los datos con dimensionalidad 1D o 2D presentan algún corrimiento estático, debido a que se encuentran en las categorías 3D/2D *general*, 3D/2D *twist*, 3D/2D o 3D/1D (con corrimiento estático). El análisis WAL no permite reconocer si los datos con dimensionalidad 3D tienen corrimiento estático, pero debido a que este efecto se observa en los períodos más superficiales y es independiente del período registrado (definición del corrimiento estático), se infiere que el corrimiento estático estaría presente al menos en los datos 3D de los períodos mayores (>0.1 seg.). En resumen, los datos del levantamiento MT de Pisagua presentan corrimiento estático, el cual estaría presente en datos con dimensionalidad 1D, 2D y 3D.

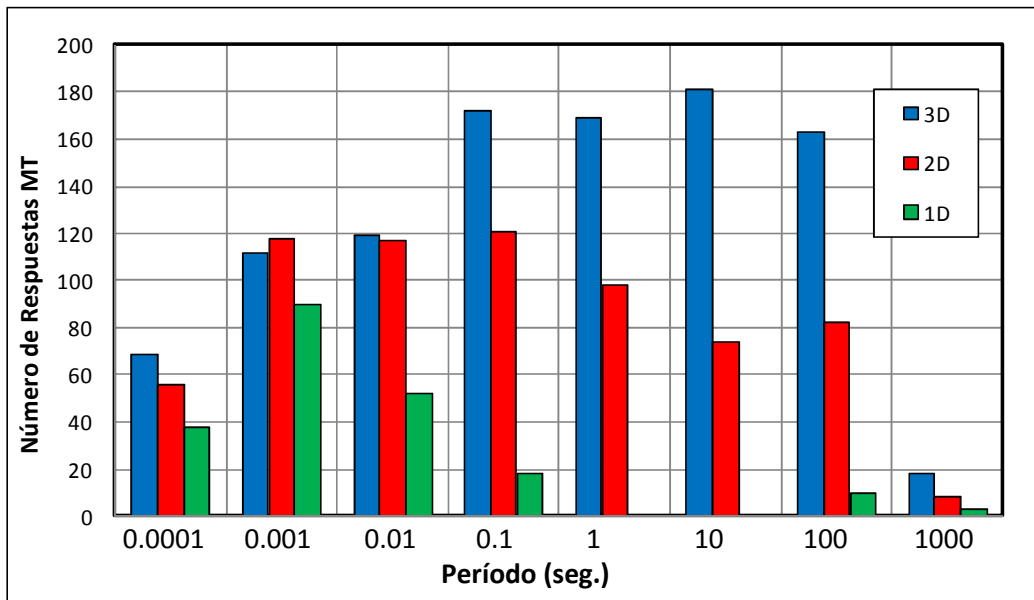


Figura 4.11 Histograma clasificando los datos del levantamiento de Pisagua en función de su frecuencia. En azul se presentan los datos con dimensionalidad 3D, en rojo los datos con dimensionalidad 2D y en el verde los datos con dimensionalidad 1D.

Los resultados del análisis dimensional indican que la dimensionalidad de los datos es mayormente 3D y por lo tanto se recomienda utilizar la técnica de inversión 3D para su interpretación. A la vez, el análisis WAL indica que más de la mitad de los datos tienen algún grado de corrimiento estático o comportamiento 3D directamente. Debido a esto para corregir la distorsión estática, es necesario considerar al menos cuatro parámetros que modelen el efecto por cada componente del tensor de impedancias (Sección 2.10).

Análisis del Tensor de Fase

Adicionalmente al análisis WAL, se investigan los datos MT de Pisagua a través del Tensor de Fase (Caldwell et al. 2004). En la Figura 4.12 se grafican las elipses del Tensor de Fase en la posición de cada estación MT sobre el modelo de elevación de la zona de estudio considerando los períodos entre 0.00025 seg a 0.01 seg. Los ejes de estas elipses se alinean en la dirección preferencial de las corrientes de inducción, inclusive en el caso 3D (Caldwell et al. 2004), lo cual permite investigar la orientación de las principales estructuras de resistividad eléctrica en el subsuelo detectadas por el estudio MT. El color de cada elipse en la Figura 4.12 corresponde al Skew Beta (Booker 2013), cuyos valores mayores a 3° o menores a -3° son indicadores de una dimensionalidad 3D en los datos.

En los períodos más superficiales entre 0.00025 a 0.04 seg, las elipses del Tensor de Fase del MT Pisagua (Figura 4.12) se orientan en varias direcciones sin mostrar una tendencia en común. El Skew Beta (B) indica que la dimensionalidad de los datos MT en este rango de frecuencias es variada, ya que se observan estaciones MT 1D ($B \sim 0^\circ$), 2D ($-3^\circ < B < 3^\circ$) y 3D ($B > 3$ o $B < -3^\circ$).

A mayor profundidad, entre los períodos de 0.0025 a 0.158 seg, el eje mayor de todas las elipses del Tensor de Fase (Figura 4.12) se tiende a orientar con un rumbo entre 60° y 70° NE (rumbo eléctrico), el cual indicaría la dirección de las principales estructuras de resistividad eléctrica en el subsuelo del tramo investigado por este rango de períodos. Utilizando la fórmula del Skin Depth (2.9) con una resistividad de 250 ohm-m (promedio de todas resistividades aparentes medidas bajo 0.158 seg), se obtiene que la profundidad de investigación para los períodos entre 0.0025 a 0.158 seg varía entre 450m a 2800m. Cabe notar que el rumbo eléctrico detectado coincide con la orientación de la traza del escarpe de Falla de Pisagua observado en superficie. Por otro lado, en este rango de períodos se evidencia un aumento del Skew Beta en los Tensores de Fase, el cual revela un incremento en la dimensionalidad de los datos de las estaciones MT. En general las estaciones ubicadas a lado Sur del escarpe de la Falla de Pisagua presentan un Skew Beta con valores menores a 3 o mayores a -3, por lo que pueden considerarse con una dimensionalidad 2D o cuasi 2D. En cambio las estaciones ubicadas al Norte del escarpe muestran en su mayoría un Skew Beta mayor a 3 (~ 5), lo cual indica una dimensionalidad 3D.

En los períodos superiores a 1 seg la orientación de las elipses de los Tensores de Fase (Figura 4.12) cambia nuevamente, alineando su eje mayor con un rumbo entre 80° NE a 90° NE. Estas elipses muestran una forma alargada, lo cual sería producto del aumento significativo de la fase en las impedancias XY sobre el período de 1 seg (Figura 4.13). Además, el Skew Beta de la mayoría de los tensores de Fase aumenta

considerablemente en todas las estaciones indicando que la dimensionalidad predominante es 3D.

El rumbo de las elipses del Tensor de Fase y el aumento de fase en la impedancia Z_{xy} observados en los períodos superiores a 1 seg serían causados por el efecto de costa, la cual se encuentra a aproximadamente 10 Km al Oeste de la zona de estudio, en donde el alto contraste de resistividad eléctrica entre el agua de mar (0.3 ohm-m) y el continente (~1000 ohm-m) generaría un encausamiento de corriente (*current channeling*) (Lezaeta 2001).

El análisis de Tensor de Fase confirma el resultado del análisis WAL, en donde se observan abundantes datos MT con dimensionalidad 3D, los cuales comenzarían a predominar en los períodos sobre 0.1 seg. Además, se detecta que los datos presentan un rumbo eléctrico entre 60°NE a 70°NE para los períodos entre 0.004 y 0.125 seg, el cual coincide con la traza del escarpe de la Falla de Pisagua. La existencia de este rumbo eléctrico es indicativa de una dimensionalidad 2D en la distribución de resistividad eléctrica entre los 450 m a 2800 m de profundidad, lo cual puede ser contradictorio con dimensionalidad 3D observada en las estaciones MT al lado Norte del escarpe de la Falla de Pisagua entre 0.025 a 0.125seg. Se supone que el origen de esta dimensionalidad 3D, sería producida por la superposición del efecto de la costa (evidente en los datos sobre 1 seg) con las respuestas MT de una distribución local de resistividad eléctrica 2D bajo la zona de estudio. Esta distribución 2D de resistividad eléctrica estaría asociada con la Falla de Pisagua, ya que el rumbo eléctrico detectado (~65°NE) coincide con la traza del escarpe con que esta falla se expresa en superficie.

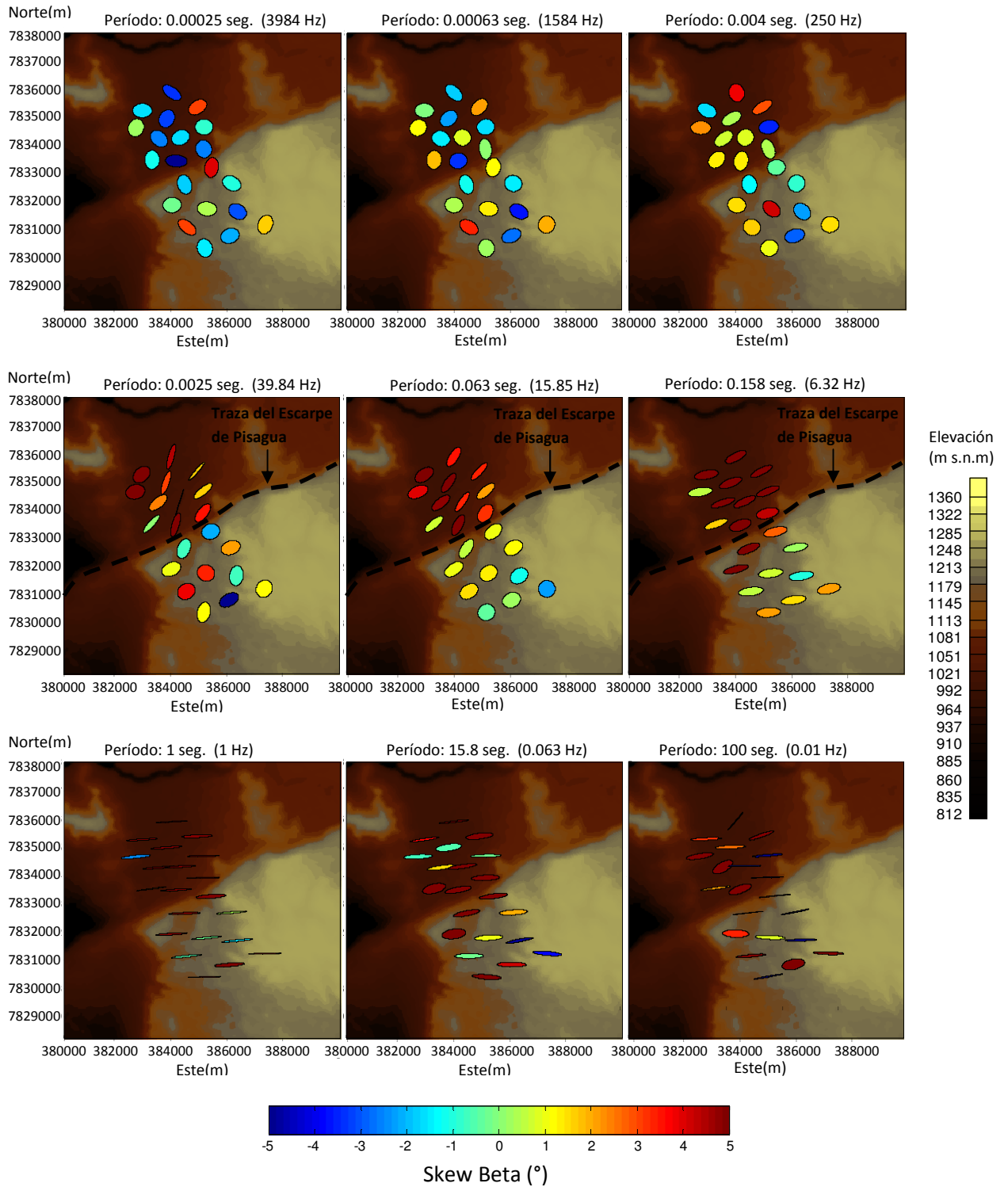


Figura 4.12 Mapa de elevación con las elipses del Tensor de Fase en las estaciones MT del estudio Pisagua. Los ejes de las elipses indican la orientación de las principales estructuras de resistividad eléctrica en el subsuelo. El color de las elipses representa el Skew Beta cuyos valores >3 o <-3 indican una dimensionalidad 3D. La traza del escarpe de la Falla de Pisagua se presenta con línea negra segmentada para los periodos 0.0025 a 0.158 seg.

4.8 Resultados datos MT y TDEM

Los valores de resistividad aparente y fases medidos en el levantamiento MT Pisagua se presentan en el Anexo VI. Las curvas de resistividad aparente registradas con el método TDEM en cada una de las estaciones se presentan en el Anexo VII.

Las estaciones MT adquiridas presentan datos de buena calidad (bajo ruido) al menos en el rango de períodos entre 0.0001 seg a 100 seg. Los valores de resistividad aparente registrados (ρ_{xy} y ρ_{yx}) oscilan principalmente entre 10 a 10^4 Ohm-m.

Utilizando una resistividad promedio de 250 ohm-m, se puede estimar una profundidad de investigación, con el *Skin Depth* (2.9), de 70 Km para los datos MT de Pisagua. Esto indica que los datos MT adquiridos pueden investigar profundidades que son considerablemente mayores a la separación con que se distribuyeron las estaciones MT en la superficie (a lo más 7 Km). En los períodos en donde lo anterior sucede (con profundidad de investigación > 10 Km), las impedancias registradas por las estaciones son muy similares o iguales, ya que la diferencia de posición no es suficiente para permitir observar variaciones de las respuestas inductivas (campos EM) del subsuelo en la superficie. En este caso, en donde todas las estaciones registran repetidamente la misma información, se pierde la capacidad de investigar lateralmente la distribución la resistividad eléctrica y los datos no serían adecuados para producir un modelo 2D y/o 3D. Para el estudio MT de Pisagua, se consideraron generar imágenes de la distribución de resistividad eléctrica desde la superficie hasta los 10 Km de profundidad, el cual sería el rango máximo para detectar tanto cambios laterales como verticales de la resistividad eléctrica.

En la Figura 4.13 se muestran pseudosecciones construidas con las curvas de resistividad aparente y fase registradas en cada estación MT, cuyas ubicaciones se refieren al perfil P1 indicado en la Figura 4.1. En el eje vertical se presenta el período registrado para cada dato MT, el cual es inversamente proporcional a la profundidad investigada en el subsuelo. En el eje horizontal se indica la posición proyectada de las estaciones MT a lo largo del perfil P1 (Figura 4.1). Los valores de resistividad y fase se muestran mediante escala de colores.

En la figura 4.13, no se presentan las resistividades aparentes y fases de los modos TM y TE, tradicionales usados en la interpretación 2D, debido a que existen abundantes respuestas con dimensionalidad 3D y no es posible realizar esta descomposición en una parte importante de los datos. Alternativamente, se presentan las resistividades aparente correspondientes a la antidiagonal del tensor (Z_{xy} y Z_{yx}) orientado hacia el norte geográfico.

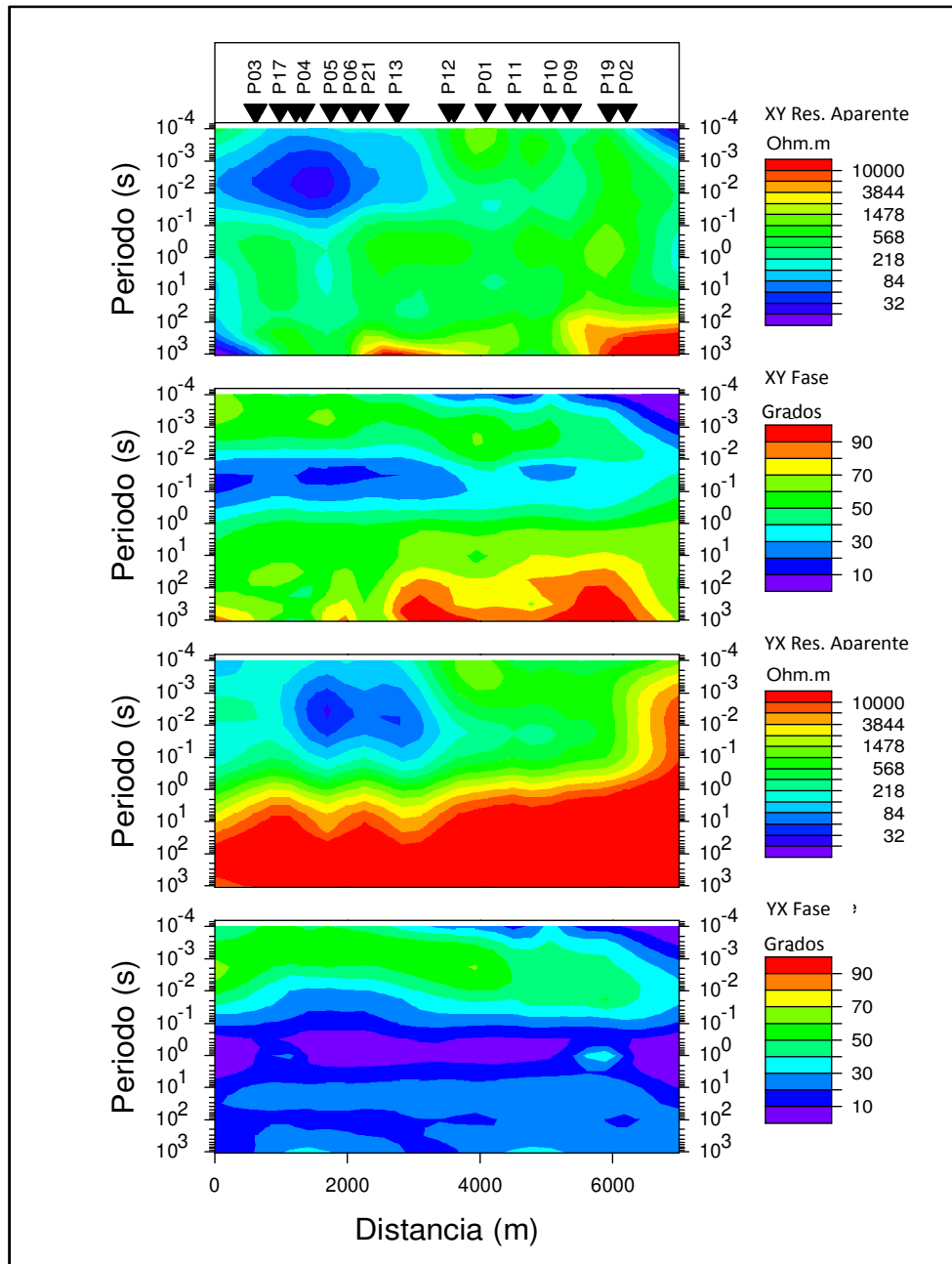


Figura 4.13 Perfil P1 (Figura 4.1) de Resistividad Aparente y Fase construida con los datos de levantamiento MT Pisagua.

En la Figura 4.14 se muestra la sección de resistividad aparente registrada con las estaciones TDEM siguiendo el trazado del perfil P1 (Figura 4.1). En esta última se presenta la distribución de resistividad eléctrica del subsuelo estimada interpolando los modelos 1D invertidos de en cada estación de TDEM. Las resistividades son mostradas a través de la escala de colores. Los modelos 1D para cada estación de TDEM se presentan en el anexo VII.

En la sección de resistividad aparente TDEM de la Figura 4.14, se presenta en el eje vertical el tiempo en que cada voltaje fue registrado y en el eje horizontal la posición cada estación TDEM (proyectada sobre el perfil P1). Los valores de resistividad

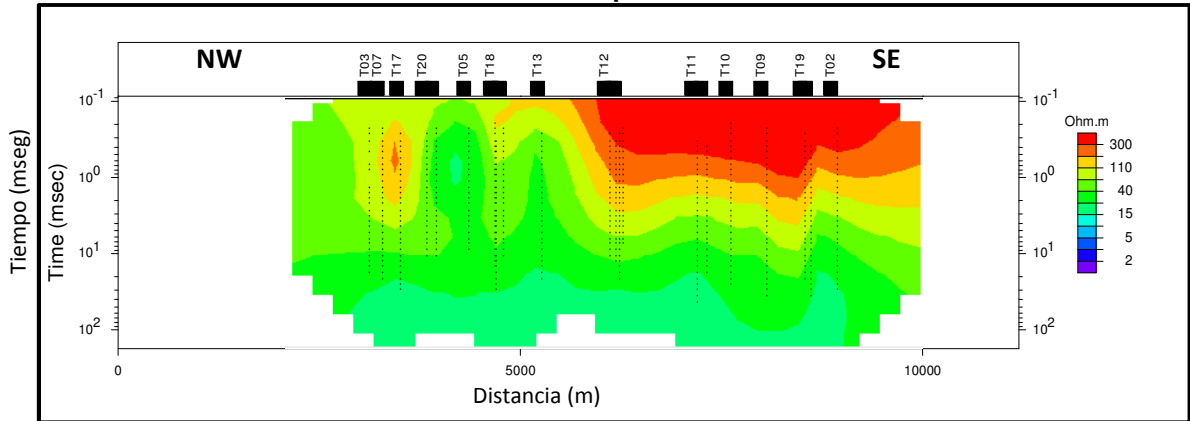
aparente se presentan a través de escala de colores. El tiempo registrado es, en una primera aproximación, proporcional a la profundidad investigada por cada dato.

En la sección de resistividades interpolada se muestran altas resistividades (>300 ohm-m) en los primeros metros bajo la superficie, lo cual se correlaciona bien con la ausencia de humedad del sector y la presencia de caliche. Entre las estaciones T6 a T13, se nota una estructura vertical de baja resistividad al pie del escarpe de la Falla de Pisagua que podría indicar la detección de la falla de Pisagua por el método TDEM.

Debido a que en el modelamiento del TDEM se utilizaron aproximaciones 1D y que la distribución de resistividad en la zona de estudio asociada a la Falla de Pisagua, debería ser al menos 2D presentando una mayor complejidad. Se espera que en la sección de resistividad, obtenida con TDEM, las principales estructuras se deberían mostrarse desplazadas o distorsionadas de su posición real. En la caso de la Figura 2.10, se presenta un ejemplo de este tipo de distorsión y/o desplazamiento para un TDEM en un entorno de falla.

Los datos de MT aquí presentados son modelados en las secciones siguientes usando las técnicas de inversión 3D considerando en efecto del corrimiento estático a través del modelamiento o la calibración con TDEM.

Resistividad Aparente TDEM.



Modelos 1D de Resistividad Interpolados.

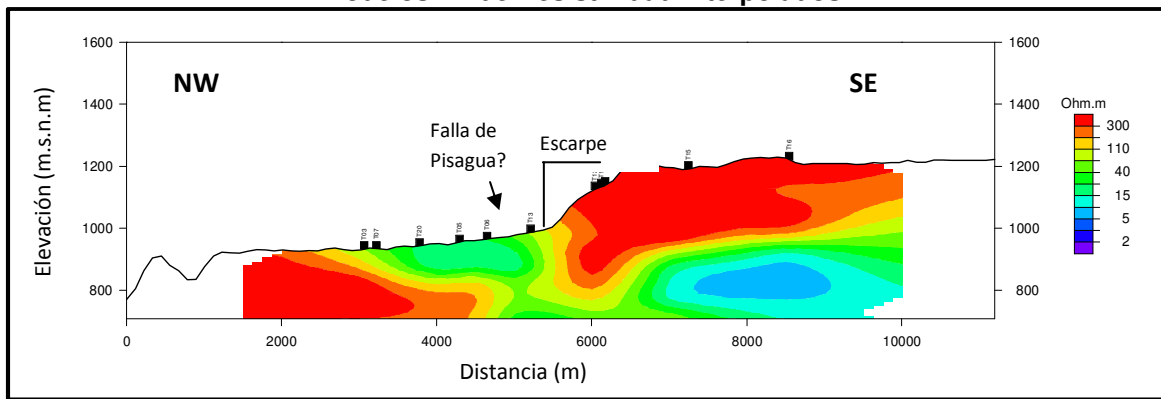


Figura 4.14 Perfil P1 (Figura 4.1) de Resistividad Aparente y Resistividad Invertida 1D de Pisagua TDEM.

4.9 Inversión 3D sin efecto SS

El modelo de resistividad del subsuelo fue estimado usando los datos MT del levantamiento de Pisagua sin realizar ninguna corrección previa del corrimiento estático. Para ello se usó el código WSINV3DMT (Siripunvaraporn 2005) con los siguientes parámetros:

- Modelo de resistividad inicial homogéneo con 100 ohm-m.
- Modelo de referencia igual al inicial.
- Error base (*error floor*) del 5% en los tensores de impedancia.
- Inversión del tensor de impedancia completo
- *Model Length*: $n=5$ $dx=0.2$ $dy=0.2$ $dz=0.2$
- *Lambda*: *default*.
- No se consideró corregir la topografía.

El modelo de resistividades obtenido se presenta en las Figuras 4.15 a 4.18, que indican la distribución de resistividad en vistas en planta y una sección vertical (Figura 4.18) correspondiente al perfil P1 indicado en la Figura 4.1. En estas la resistividad es presentada a través de escala de colores. En las Figuras 4.15 a 4.17 las vistas en planta corresponden a las elevaciones sobre el nivel del mar (m.s.n.m) de 0m, -500m, -2000m, -6000m y -10000m.

El modelo presentado corresponde a la 3ra iteración, cuyas respuestas calculadas presentan la mejor similitud obtenida con los datos medidos. En este caso se consiguió un error RMS de 3.07 (3.13), lo cual equivale a un error de 15% aproximadamente entre las respuestas calculadas y los datos medidos. Las secciones en planta y vertical muestran con la misma paleta de colores para representar los valores de resistividad (33 a 15000 ohm-m).

La comparación entre los datos y las respuestas del modelo se presenta en el anexo I de este capítulo. Se puede observar que en el ajuste con las respuestas modeladas y los datos, hay bastante similitud para los elementos anti-diagonales del tensor de impedancias (Z_{xy} y Z_{yx}), tanto en fase como en amplitud. En los elementos diagonales del tensor (Z_{xx} y Z_{yy}) se observa que las diferencias se incrementan entre los datos calculados y los observados, especialmente en la fase de varias estaciones.

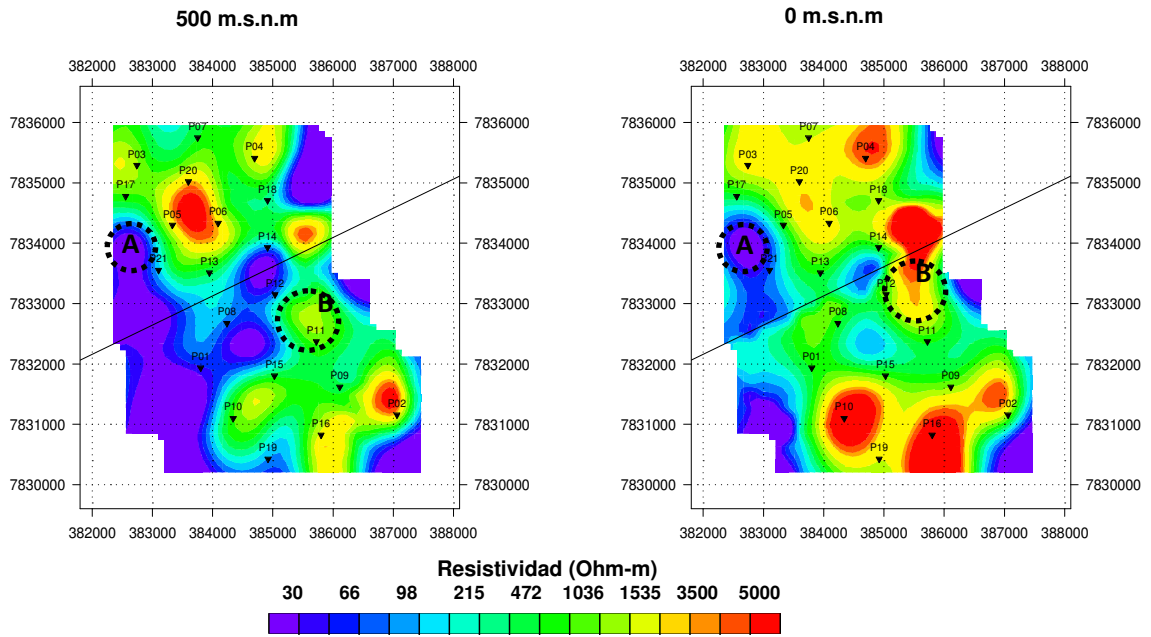


Figura 4.15 Vistas en planta del modelo de resistividades a 500 y 0 m.s.n.m invertidas con WSINV3DMT sin SS

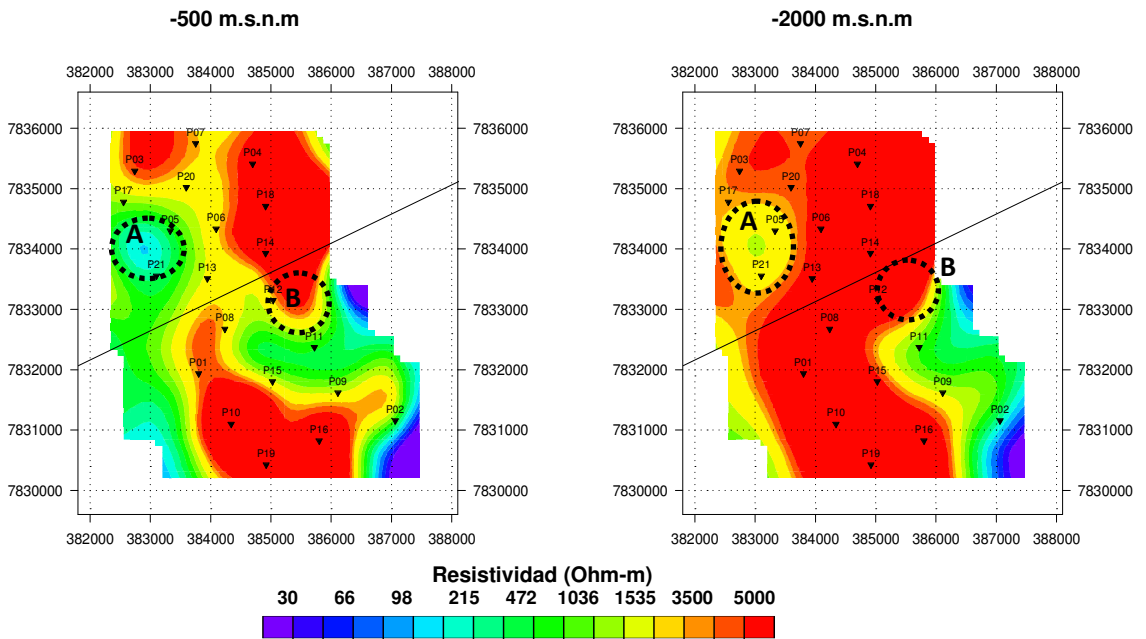


Figura 4.16 Vistas en planta del modelo de resistividades a -500 y -2000 m.s.n.m invertidas con WSINV3DMT sin SS

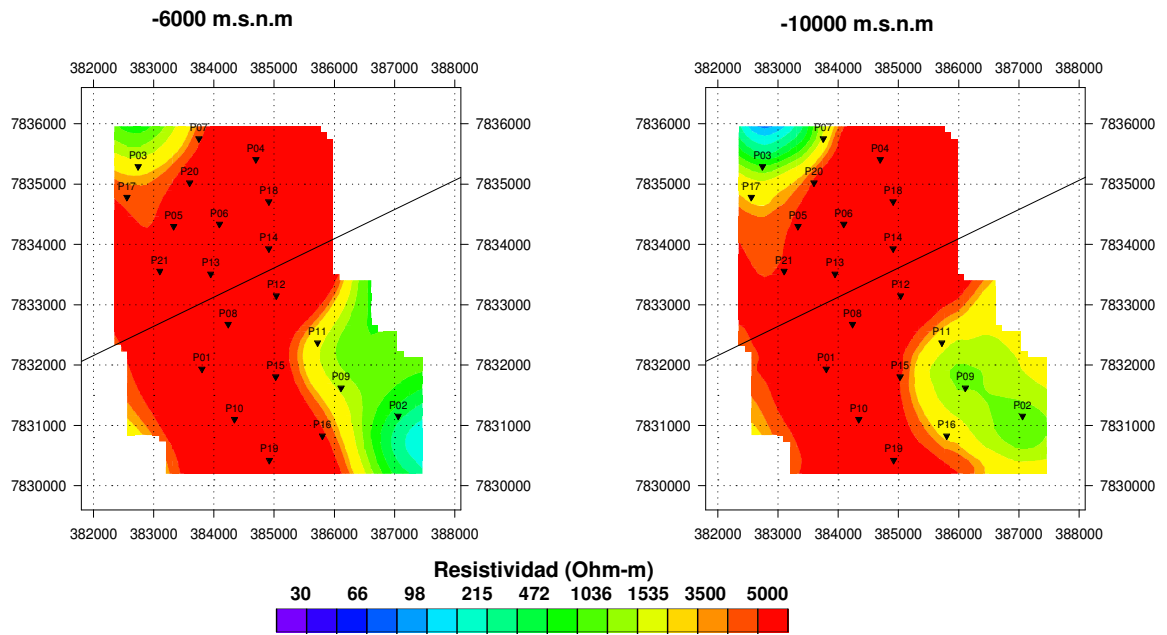


Figura 4.17 Vistas en planta del modelo de resistividades a -6000 m.s.n.m y a 10000 m.s.n.m invertidas con WSINV3DMT sin SS

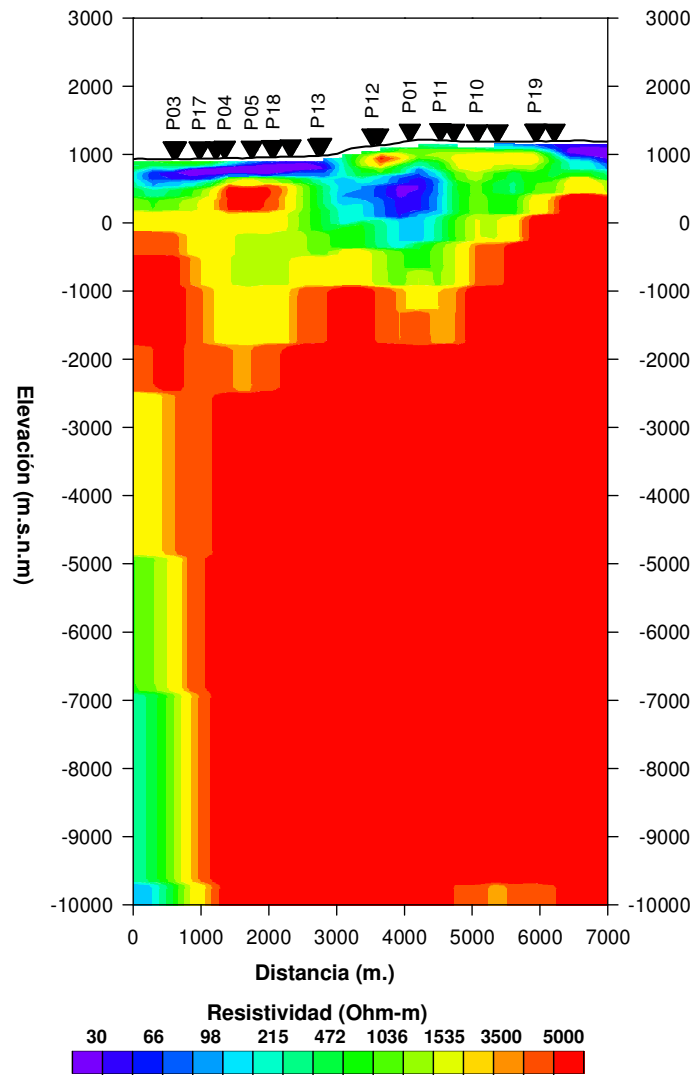


Figura 4.18 Sección vertical del perfil P1 (figura 4.1) del modelo de resistividades invertido con WSINV3DMT sin SS

4.10 Inversión 3D con calibración TDEM (MT/TDEM)

El modelo de resistividad del subsuelo fue calculado usando los datos MT del levantamiento de Pisagua efectuando una inversión 3D con WSINV3DMT (Siripunvaraporn 2005).

El efecto del corrimiento (SS) estático en los datos MT fue corregido usando el método MT/TDEM (sección 2.6). En este procedimiento se determinan los factores de SS escalando las resistividades aparentes para hacerlas coincidir con las curvas de referencia calculadas de los modelos 1D TDEM (Anexo VII). Estas curvas referencia y las resistividades aparentes corregidas se muestran en las Figuras 4.20 a 4.21. Los factores de SS resultantes (s_{xy} y s_{yx}) se presentan en la figura 4.19. Para corregir los tensores de impedancia de las estaciones se utilizó la formulación del tensor diagonal presentada en la ecuación 2.34 (Knútur et al. 2010), la cual no considera los factores s_{xx} y s_{yy} (razón por la cual no se presentan).

Las curvas de referencia obtenidas con el TDEM sólo son consistentes con las resistividades aparente y fase observadas en las estaciones MT en el tramo entre 0.001 seg a 0.01 seg. Este rango de coincidencia no es más extenso, debido a que el método MT/TDEM únicamente puede aplicarse a datos MT con dimensionalidad 1D o 2D (Pellegrin & Hohmann 1990). Esta condición en los datos MT sólo se aproximaría, de acuerdo con el análisis dimensional WAL (sección 4.7), en el rango entre 0.001 a 0.01 seg, ya que en los períodos superiores habría un incremento a una dimensionalidad 3D.

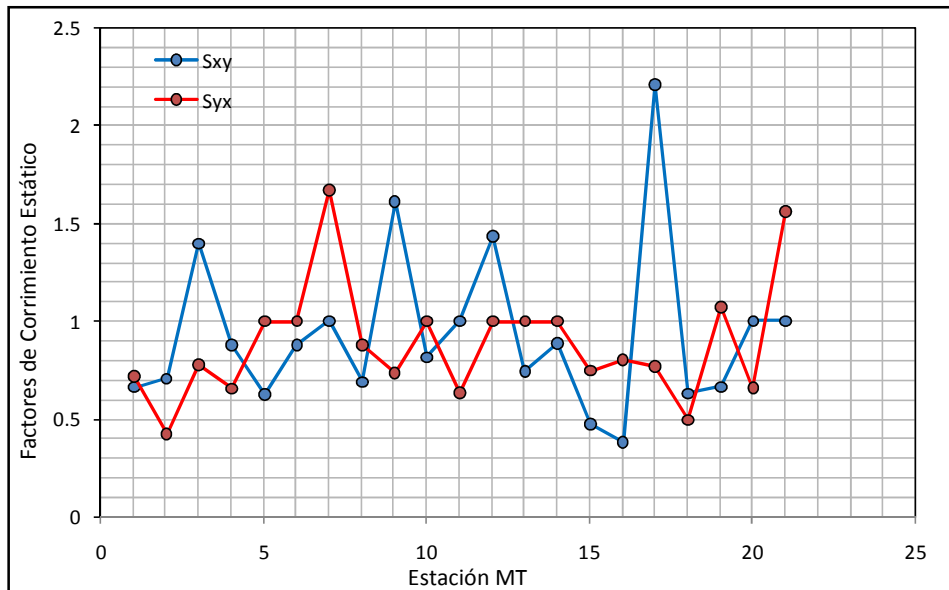


Figura 4.19 Factores de corrimiento estático calculados usando método MT/TDEM para el levantamiento MT Pisagua.

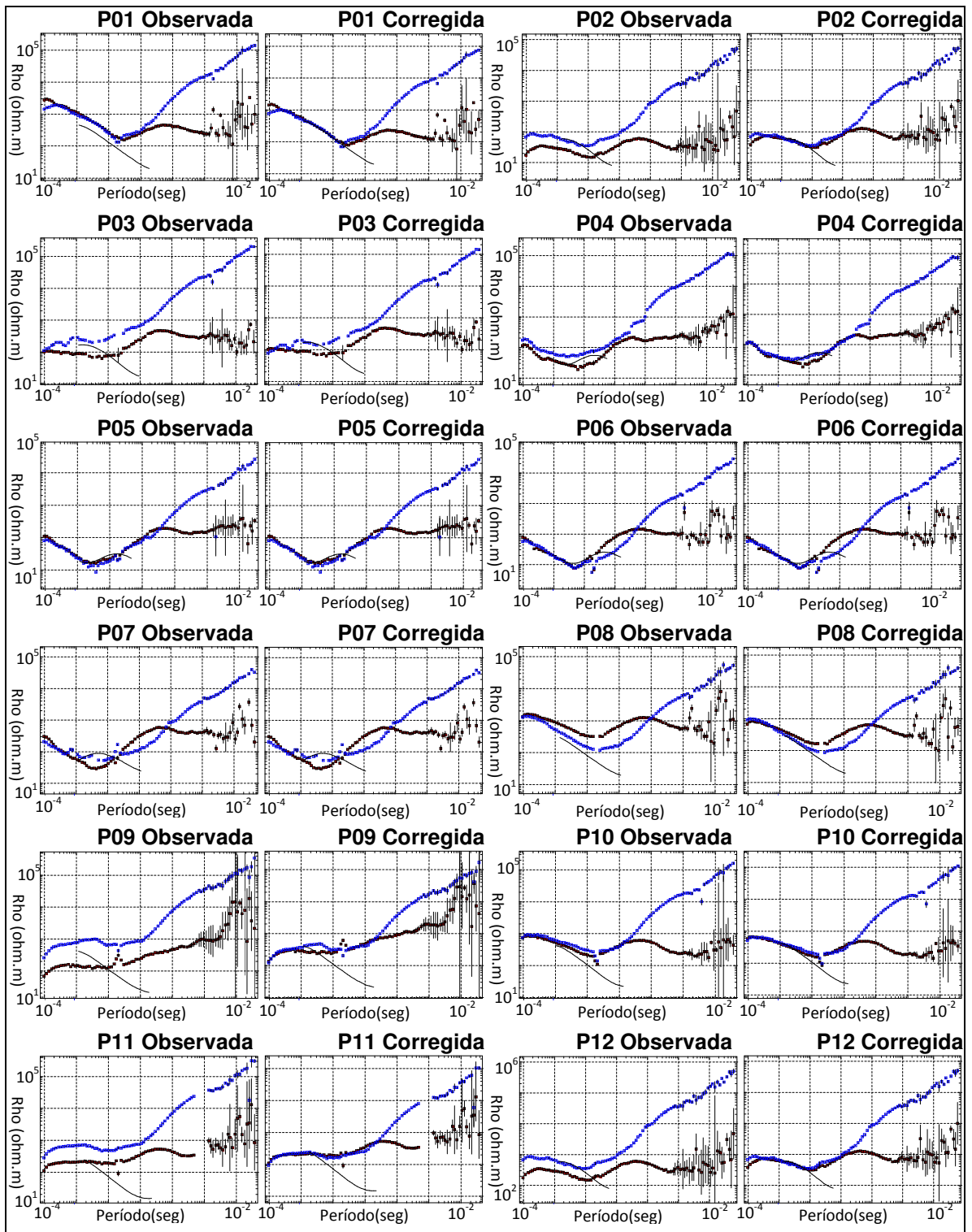


Figura 4.20 Corrección del Corrimiento Estático usando MT/TDEM en las curvas de resistividad aparente de las estaciones P1 a P12.

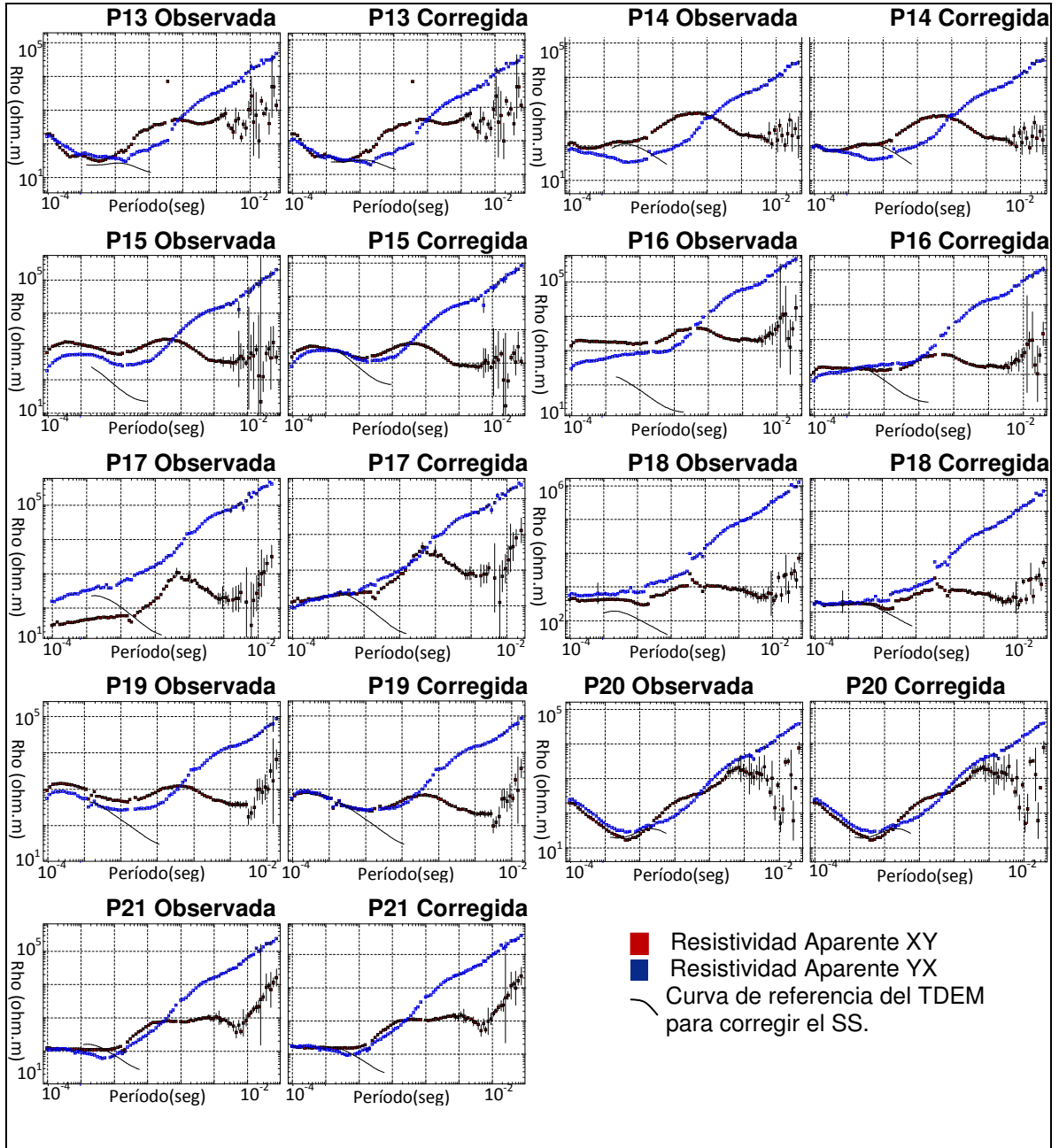


Figura 4.21 Corrección del Corrimiento Estático usando MT/TDEM en las curvas de resistividad aparente de las estaciones P13 a P21.

Posteriormente a la corrección del SS con MT/TDEM, se realizó la inversión del modelo de resistividades 3D a partir los datos MT habiendo corregido el SS con el método MT/TDEM. En este proceso se utilizaron los siguientes parámetros:

- Modelo de resistividad inicial homogéneo con 100 ohm-m.
- Modelo de referencia igual al inicial.
- Error base del 5% en los tensores de impedancia.
- Inversión del tensor de impedancia completo
- Model Length: $n=5$ $dx=0.2$ $dy=0.2$ $dz=0.2$
- Lamda:default
- No se consideró corregir la topografía.

El modelo de resistividades obtenido se presenta entre las Figuras 4.22 a 4.25. Se presentan vistas en planta del modelo de resistividad entre las Figuras 4.22 a 4.24 con elevaciones de 500m, 0m, -500m, -2.000m, -6.000m y -10.000m (m.s.n.m). En la figura 4.25 se presenta la sección vertical de resistividad correspondiente al perfil P1 (Figura 4.1). En las figuras la resistividad se representa con tonalidades de colores.

El modelo de resistividades aquí presentado corresponde a la 4ta iteración y obtuvo un error RMS de 2.39 entre las respuestas calculadas y los datos MT. Lo anterior corresponde a una diferencia de 12% entre los datos medidos y los calculados.

La comparación entre los datos y las respuestas del modelo se presenta en el anexo II. En estas se nota que hay un mejor ajuste en la frecuencias altas (>100 Hz) de los elementos antidiagonales del tensor (Z_{xy} y Z_{yx}) que en el caso de inversión 3D Normal. Esto se debe a que la calibración con TDEM junta sus valores a estas frecuencias siendo más fácil modelar para el algoritmo de inversión. Las mayores diferencias entre respuestas y datos están en las frecuencias bajas (< 0.1 Hz), lo cual genera que el modelo invertido es menos preciso en los sectores más profundos. En el caso de los elementos diagonales (Z_{xx} y Z_{yy}) el ajuste sigue siendo pobre para las frecuencias altas, el cual mejora gradualmente mientras disminuye la frecuencia.

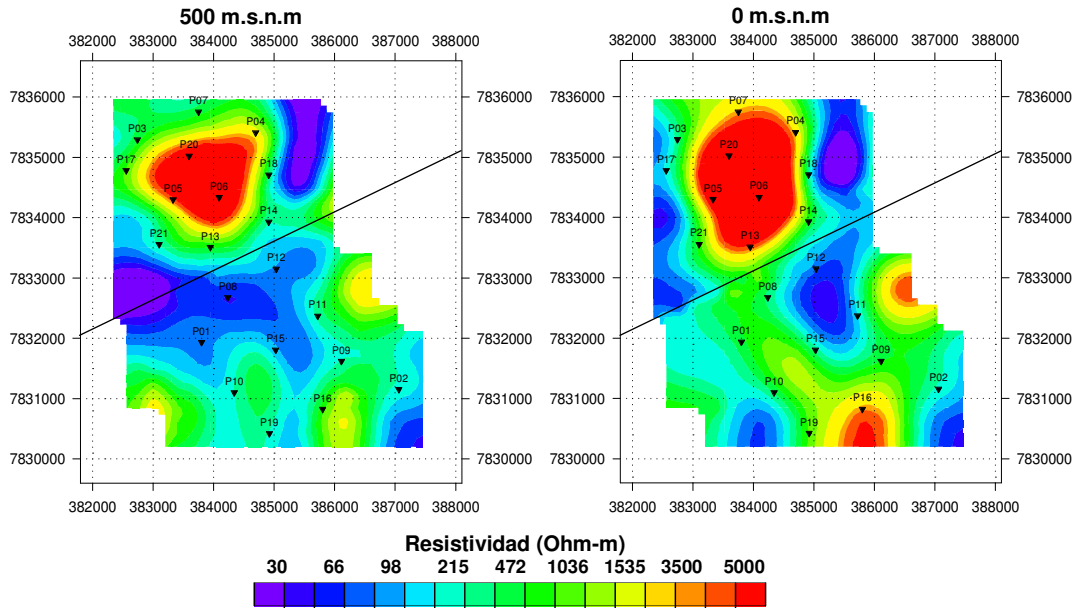


Figura 4.22 Vistas en planta del modelo de resistividades a 500 y 0 m.s.n.m Invertidas con WSINV3DMT usando datos calibrados con TDEM

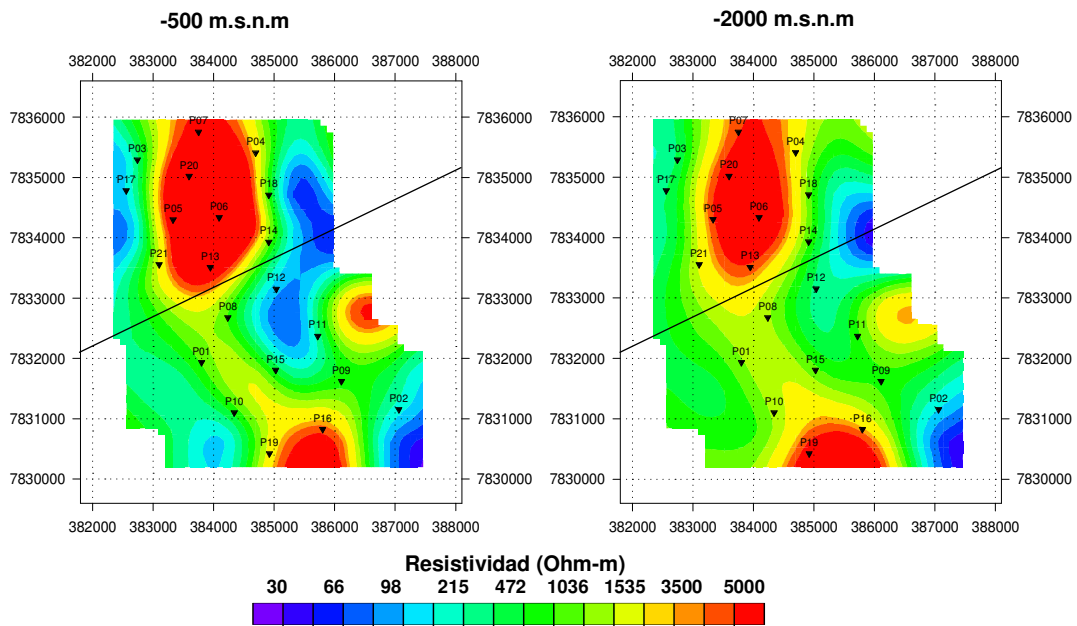


Figura 4.23 Vistas en planta del modelo de resistividad a -500 y -6000 m.s.n.m Invertidas con WSINV3DMT usando datos calibrados con TDEM

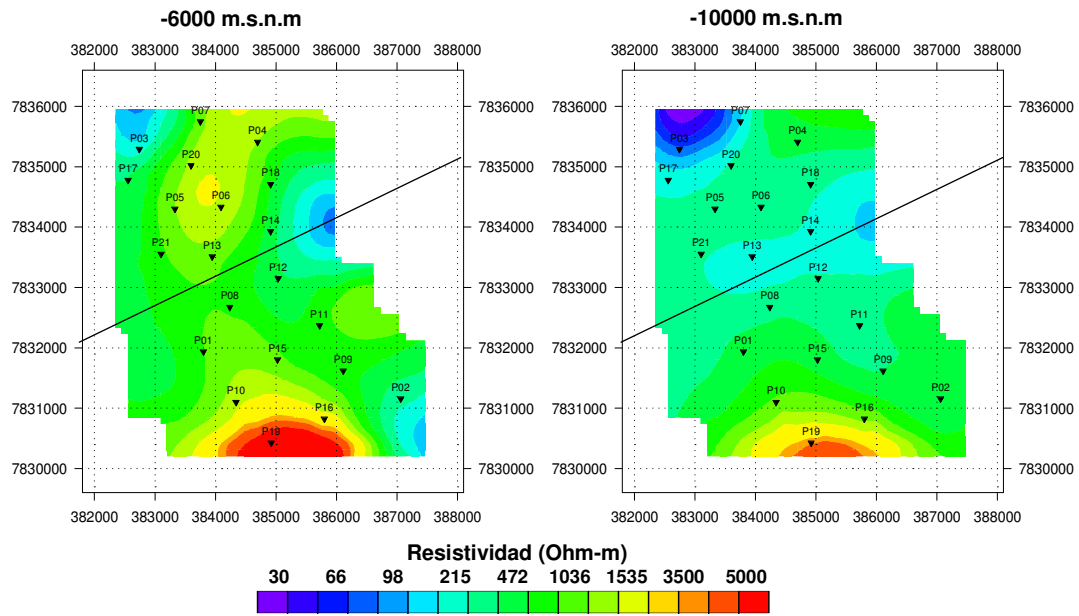


Figura 4.24 Vistas en planta del modelo de resistividades a -6000 y 10000 m.s.n.m invertidas con WSINV3DMT usando datos calibrados con TDEM

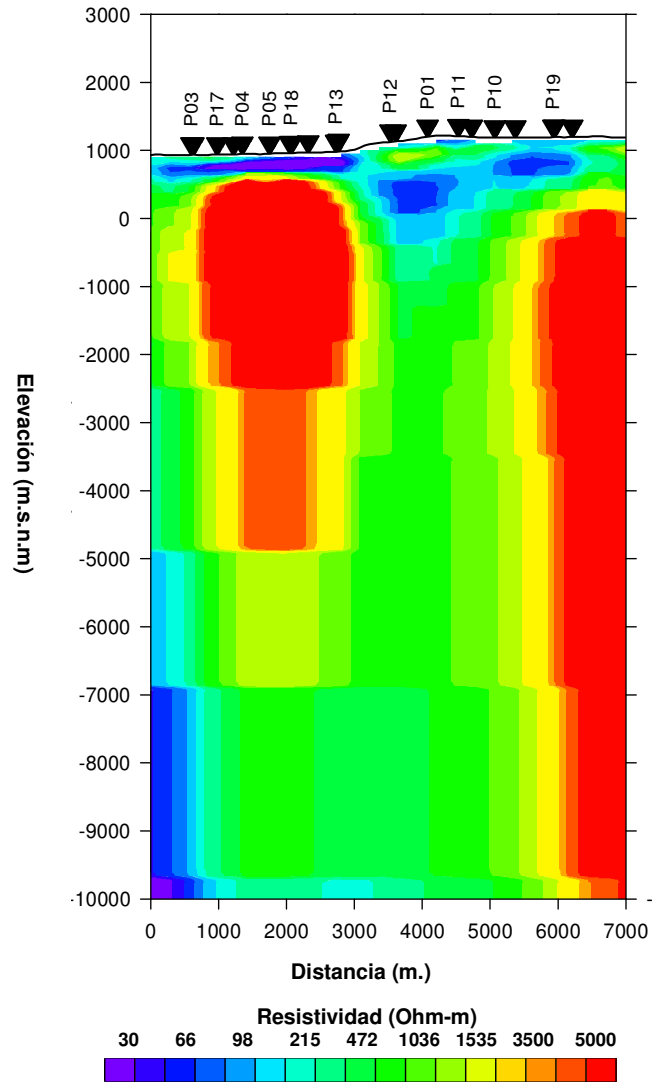


Figura 4.25 Sección vertical del perfil P1 del modelo de resistividades invertido con WSINV3DMT usando datos calibrados con TDEM

4.11 Inversión 3D con modelamiento del efecto SS (Sasaki)

El modelo de resistividad del subsuelo fue calculado usando los datos MT del levantamiento de Pisagua efectuando un proceso de inversión que modela el efecto del corrimiento estático usando la representación de Sasaki (2004). Para ello se usó el código WSINV3DMT (W. Siripunvaraporn, 2005) modificado en este trabajo con los siguientes parámetros:

- Modelo de resistividad inicial homogéneo con 100 ohm-m.
- Modelo de referencia igual al inicial.
- Error base del 5% en los tensores de impedancia.
- Inversión del tensor de impedancia completo
- Model Length: $n=5$ $dx=0.2$ $dy=0.2$ $dz=0.2$
- $\lambda = 1$
- No se consideró corregir la topografía.

El modelo de resistividades obtenido se presenta entre las Figuras 4.26 a 4.29. Este corresponde a la 3ra iteración y obtuvo un error RMS de 1.6, el cual equivale a un error de 8% entre las respuestas calculadas y los datos medidos. En las Figuras 4.26 a 4.28 se presentan vistas en planta con elevaciones (m.s.n.m) de 500m, 0m, -500m, -2000m, -6000m y -10000m de profundidad. En la Figura 4.29 se muestra el perfil P1 indicado en la Figura 4.1. Los valores de resistividad se muestran utilizando escala de colores.

La comparación entre los datos y las respuestas del modelo se presenta en el anexo III. En estas se nota que para los elementos antidiagonales del tensor (Z_{xy} y Z_{yx}) existe un ajuste similar, entre las respuestas calculadas (resistividad aparente y fase) y los datos, que el obtenido con MT/TDEM e inversión normal. Sin embargo para los valores correspondientes a la diagonal del tensor (Z_{xx} y Z_{yy}), el ajuste tiende a empeorar en algunas estaciones (como P02 y P07) y como a mejorar en otras (como P08).

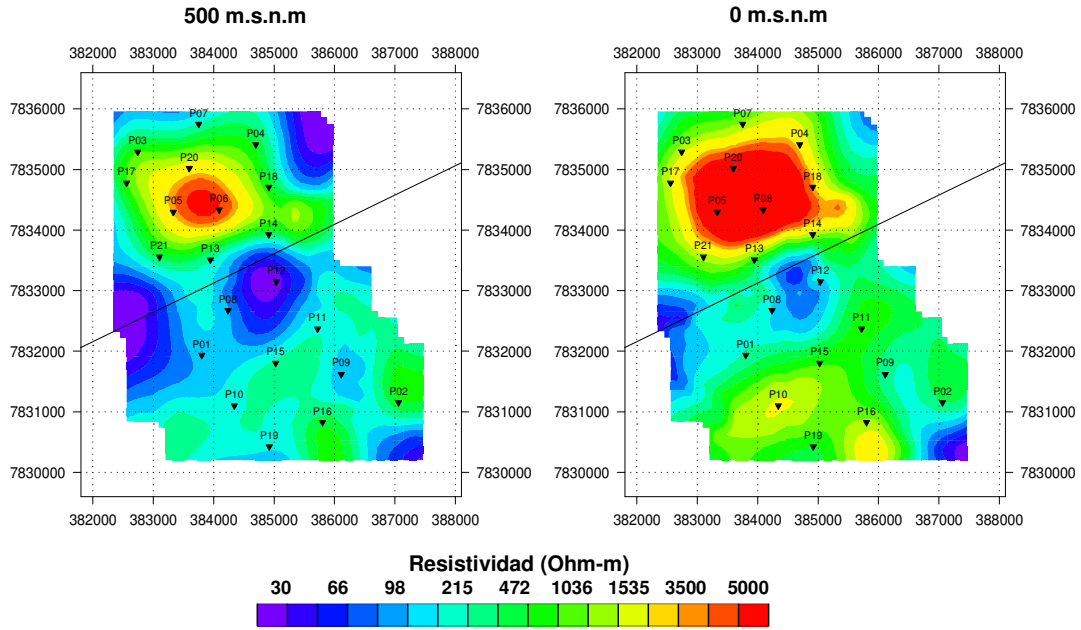


Figura 4.26 Vistas en planta del modelo de resistividades a 500 y 0 m.s.n.m invertidas con WSINV3DMT con SS (Sasaki)

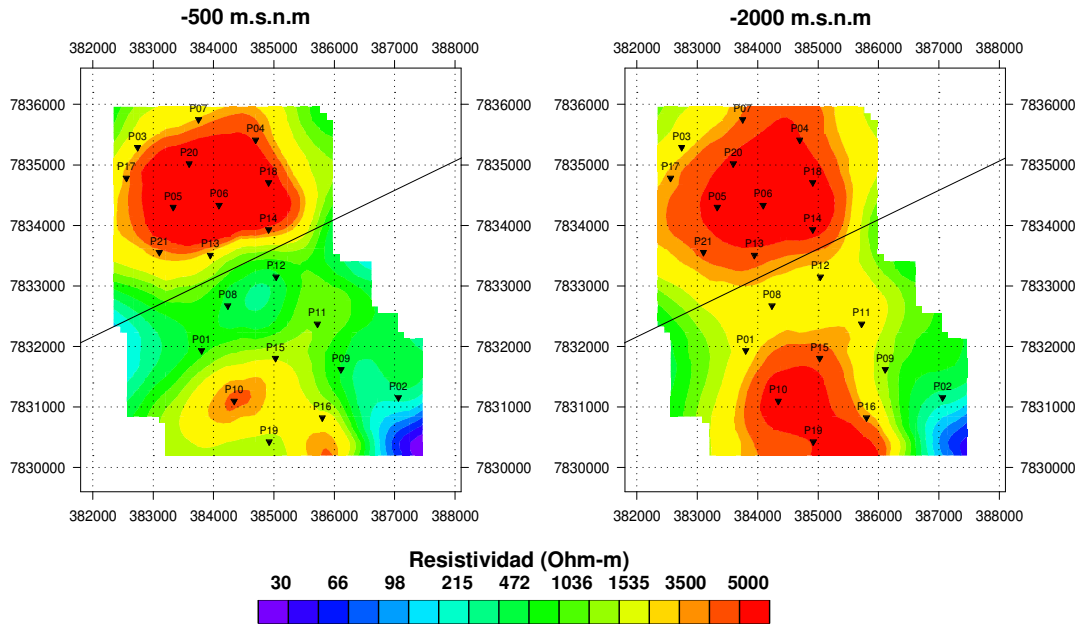


Figura 4.27 Vistas en planta del modelo de resistividades a -500 y -2000 m.s.n.m invertidas con WSINV3DMT con SS (Sasaki)

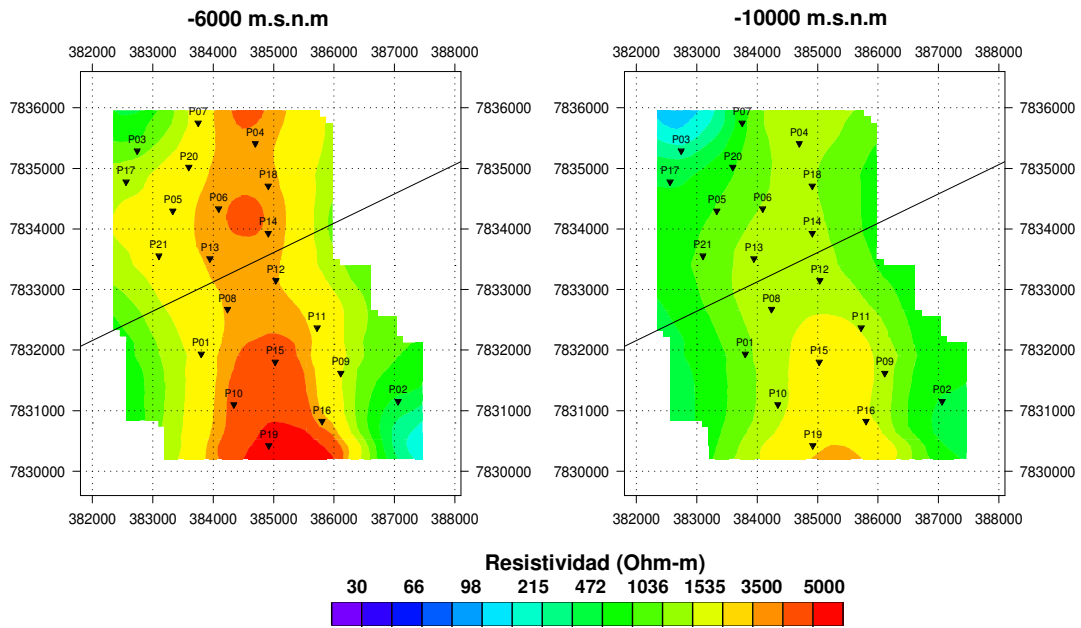


Figura 4.28 Vistas en planta del modelo de resistividades a -6000 y -10000 m.s.n.m invertidas con WSINV3DMT con SS (Sasaki)

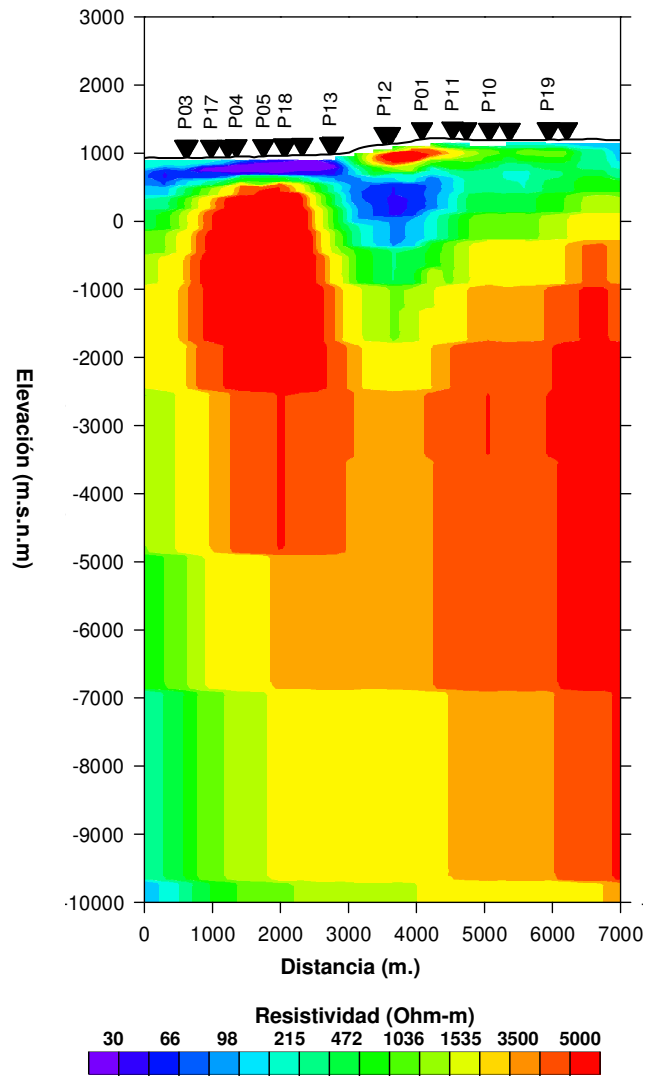


Figura 4.29 Sección vertical del perfil L1 del modelo de resistividades invertido con WSINV3DMT con SS (Sasaki)

4.12 Inversión 3D con modelamiento del efecto SS (Matriz Completa de Distorsión)

El modelo de resistividad del subsuelo fue estimado usando los datos MT del levantamiento de Pisagua efectuando una inversión que modela el efecto del corrimiento estático con la representación del tensor completo. Para ello se usó el código WSINV3DMT (*Siripuvaporn* 2005) modificado en este trabajo con los siguientes parámetros:

- Modelo de resistividad inicial homogéneo con 100 ohm-m.
- Modelo de referencia igual al inicial.
- Error base del 5% en los tensores de impedancia.
- Inversión del tensor de impedancia completo
- Model Length: $n=5$ $dx=0.2$ $dy=0.2$ $dz=0.2$
- Lamda: primeras cuatro iteraciones con 1 y luego 0.1
- No se consideró corregir la topografía.

El modelo de resistividades obtenido se presenta entre las Figuras 4.30 a 4.33. Este corresponde a la 3ra iteración y obtuvo un error RMS de 1.47, el cual equivale a un error de 7.35% entre las respuestas calculadas y los datos medidos. En las Figuras 4.30 a 4.32 se presentan vistas en planta con elevaciones (m.s.n.m) de 500m, 0m, -500m, -2000m, -6000m y -10000m de profundidad. En la Figura 4.33 se muestra el perfil P1 indicado en la Figura 4.1. Los valores de resistividad se muestran utilizando escala de colores.

La comparación entre los datos y las respuestas del modelo se presenta en el anexo V. En estas se aprecia que el ajuste en los datos de la antidiagonal (Z_{xy} y Z_{yx}) es similar al conseguido en las otras inversiones, aunque en este último caso hay mejor similitud en los períodos más altos, lo que permitiría reconstruir con mayor precisión las secciones más profundas del modelo. Para los elementos de la diagonal (Z_{xx} y Z_{yy}) el ajuste es considerablemente mejor que los conseguidos anteriormente, en donde se logran reproducir las respuestas en resistividad aparente y fase.

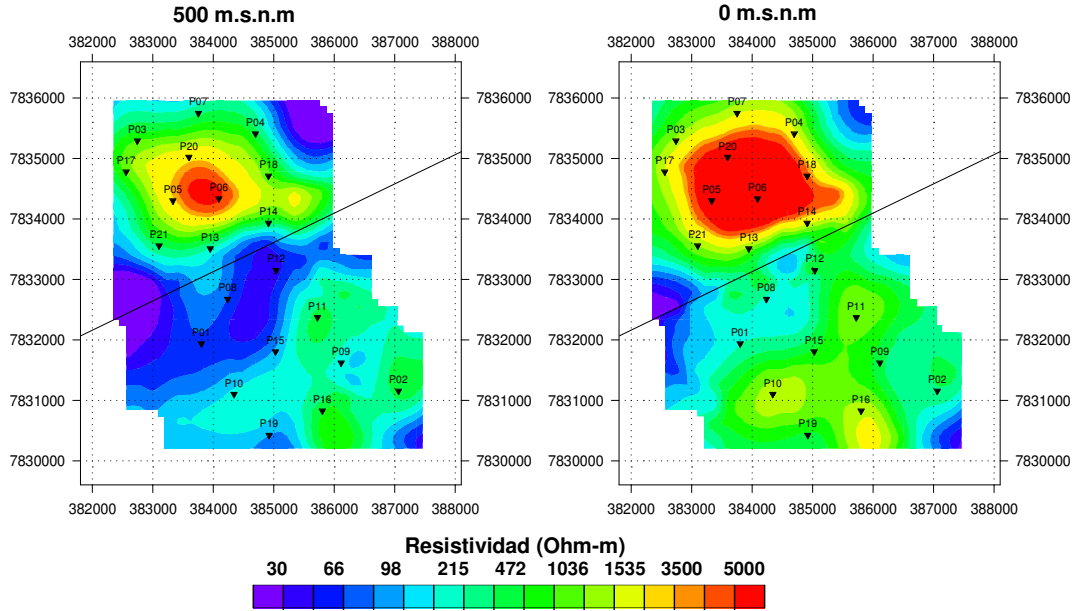


Figura 4.30 Vistas en planta del modelo de resistividades a 500 y 0 m.s.n.m invertidas con WSINV3DMT con SS (Matriz Completa de Distorsión)

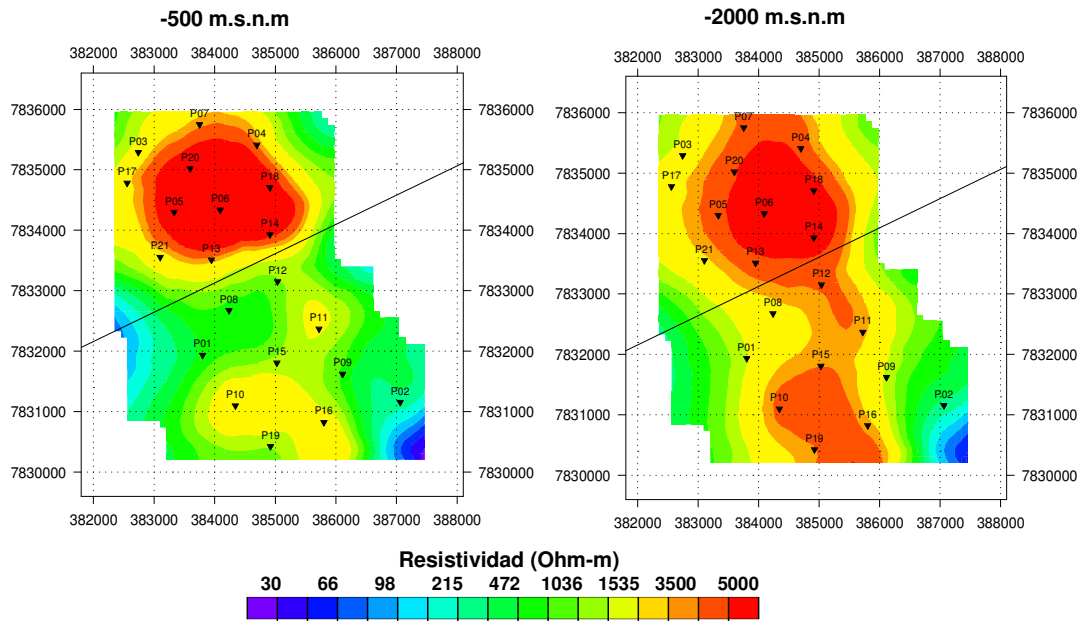


Figura 4.31 Vistas en planta del modelo de resistividades a -500 y -2000 m.s.n.m invertidas con WSINV3DMT con SS (Matriz Completa de Distorsión)

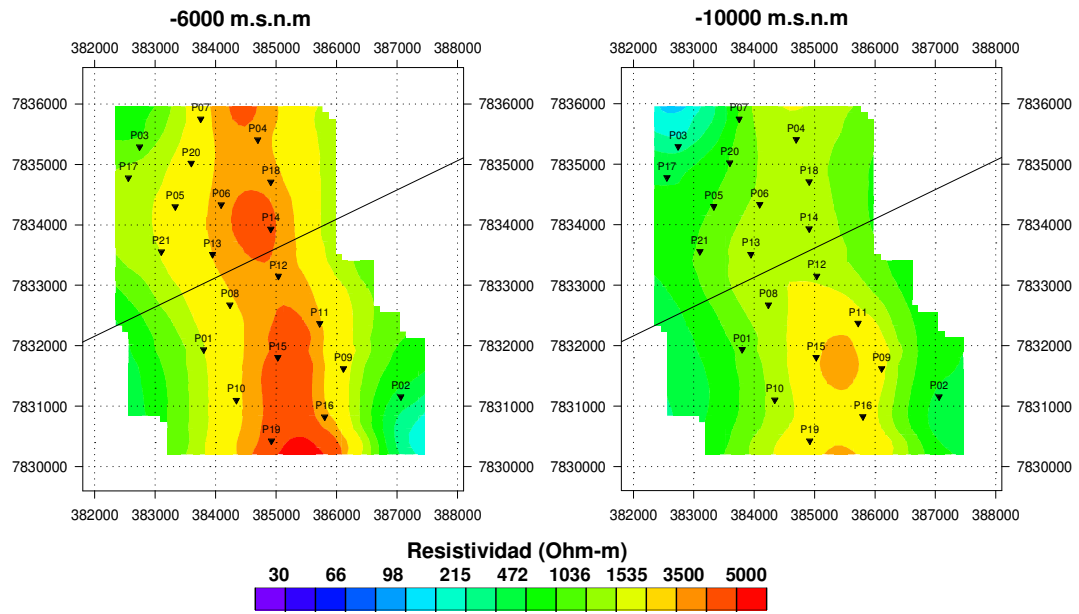


Figura 4.32: Vistas en planta del modelo de resistividades a -6000 y -10000 m.s.n.m invertidas con WSINV3DMT con SS (Matriz Completa de Distorsión)

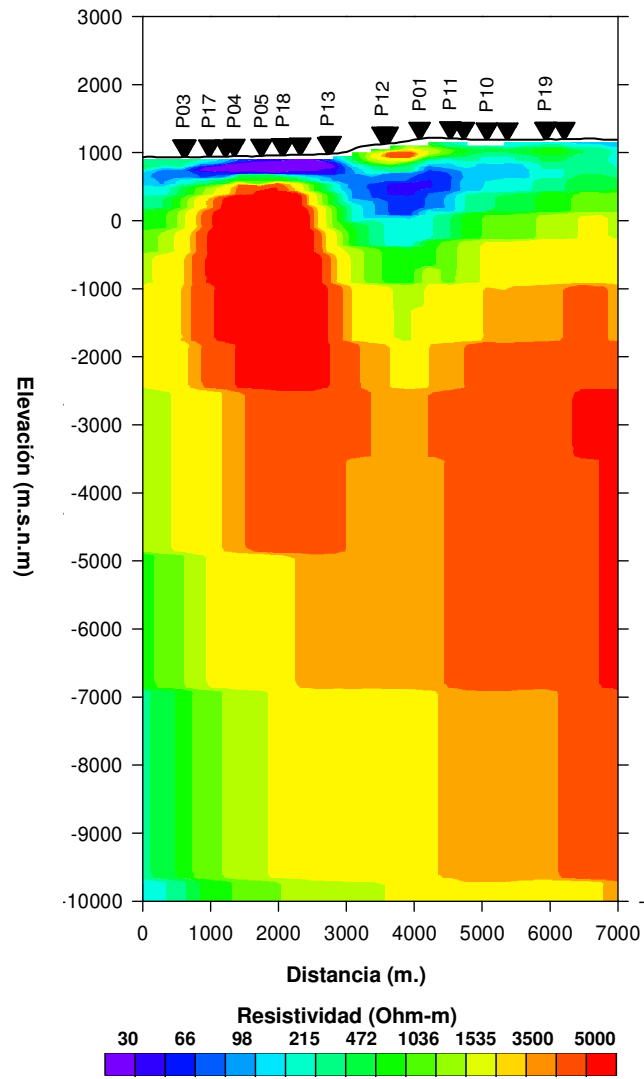


Figura 4.33: Sección vertical del perfil P1 del modelo de resistividades invertido con WSINV3DMT con SS (Matriz Completa de Distorsión)

4.13 Modelamiento del corrimiento estático.

A continuación se compara el efecto del corrimiento estático estimados con los métodos de modelamiento (Sasaki y Matriz Completa de Distorsión) y el MT/TDEM.

En la figura 4.34 se muestra un gráfico mostrando los factores de corrimiento estático obtenidos para cada estación del levantamiento MT - Pisagua con los métodos MT/TDEM (sección 2.6) y el modelamiento del SS usando la Matriz Completa de Distorsión (sección 3.4). Los factores en la figura presentados (s_{xy} , s_{yx}) se muestran utilizando la notación de la matriz de distorsión indicada en la ecuación 4.1. En el caso del MT/TDEM sólo se pueden observar los términos s_{xy} , s_{yx} de la matriz de distorsión (sección 2.9), por lo que los factores s_{xx} y s_{yy} no se comparan.

$$Z^c = \begin{bmatrix} s_{xy} & s_{xx} \\ s_{yy} & s_{yx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Z^c : Tensor de impedancias con SS corregido.

Z_{ij} : Tensor de impedancias medido.

s_{ij} : Matriz Completa de Distorsión del corrimiento estático.

Se observa en la figura 4.34 que los factores de s_{xy} y s_{yx} del MT/TDEM y la Matriz Completa de Distorsión siguen una misma tendencia y tienen valores similares. Esto se evidencia en la poca diferencia (<10%) entre los promedios obtenidos para s_{xy} y s_{yx} entre ambos métodos, en donde para el MT/TDEM son 0.93 y 0.85 respectivamente y para la Matriz Completa de Distorsión son 0.91 y 0.82. También se aprecia la alta correlación entre los resultados de estos dos métodos, en donde para s_{xy} se obtiene un coeficiente de correlación (4.2) de 0.70 y para s_{yx} de 0.54.

$$\text{Coef. de correlación} = \frac{\sum_{k=1}^N (s_{ij}^0(k) - \widehat{s_{ij}^0})(s_{ij}^1(k) - \widehat{s_{ij}^1})}{\sum_{k=1}^N (s_{ij}^0(k) - \widehat{s_{ij}^0})^2 \sum_{k=1}^N (s_{ij}^1(k) - \widehat{s_{ij}^1})^2} \quad (4.2)$$

N: número de estaciones.

$s_{ij}^m(k)$: factor de corrimiento estático ij correspondiente a la estación MT “k” y obtenido con el método “m”.

En la figura 4.35 se presentan los factores del SS obtenidos con el modelamiento del corrimiento estático con la representación de *Sasaki* en comparación con los resultados del MT/TDEM. En *Sasaki* los factores de corrimiento se aplican de manera distinta a la Matriz Completa de Distorsión, ya que estos escalan individualmente los elementos del tensor de impedancias MT. La formulación indicada anteriormente y a la cual corresponden los valores de la figura 4.35, se indican en la expresión 4.3.

$$Z^c = \begin{bmatrix} s_{xx}Z_{xx} & s_{xy}Z_{xy} \\ s_{yx}Z_{yx} & s_{yy}Z_{yy} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Z^c : Tensor de impedancias con SS corregido.

Z_{ij} : Tensor de impedancias medido.

s_{ij} : Factores de corrimiento estático de la representación de *Sasaki*.

De la misma manera que el caso anterior (con Matriz Completa de Distorsión) hay similitud entre los factores s_{xy} y s_{yx} obtenidos con MT/TDEM y con el modelamiento con *Sasaki*. En donde los promedios de todas las estaciones para los factores s_{xy} y s_{yx} , en *Sasaki* son 0.92 y 0.85 y para el MT/TDEM son 0.93 y 0.85 respectivamente. También la correlación es alta entre estos resultados, en donde los coeficientes de correlación (4.2) estimados son para s_{xy} 0.56 y para s_{yx} 0.43.

Las similitudes y alta correlación obtenidas entre los resultados de los tres métodos de corrección del SS son importantes de destacar, ya que el método MT/TDEM consiste en una medición empírica de los factores s_{xy} y s_{yx} (comparando resultados de dos técnicas geofísicas), y, por otro lado, el modelamiento del corrimiento estático (ya sea con la Matriz Completa de Distorsión y/o *Sasaki*) determina estos factores indirectamente a través del proceso de inversión y sólo usando los datos MT. Que los resultados de ambos métodos sean similares, indica que el método de modelamiento del SS, a pesar de ser un método de determinación indirecta, también podría ser una

manera efectiva de determinar el corrimiento estático sin necesidad de mediciones adicionales al MT (TDEM).

Para que lo anterior se cumpla, es decir observar el corrimiento estático usando la Matriz Completa de Distorsión y/o *Sasaki*, es necesario que el efecto del corrimiento estático no modifique la resistividad aparente promedio de todas las estaciones MT, lo cual es una condición impuesta en el proceso de modelamiento del corrimiento estático (Sección 3.5).

Con respecto a los factores s_{xx} y s_{yy} , estos sólo son observados por las técnicas del modelamiento del SS (*Sasaki* y Matriz Completa de Distorsión). En las figuras 4.36 y 4.37 se presentan respectivamente estos factores obtenidos con la Matriz Completa de Distorsión y *Sasaki* para las estaciones del levantamiento MT Pisagua. Cabe notar que los factores del SS de la Matriz Completa de Distorsión obedecen a la formulación indicada en 4.1 y los de *Sasaki* a la indicada a 4.3. En las Figuras también se indican los valores de referencia (neutro) para los cuales los términos s_{xx} y s_{yy} tienen un efecto neutro sobre los datos, en el caso de la Matriz Completa de Distorsión este valor es cero y en el caso de *Sasaki* es uno.

Los términos de s_{xx} y s_{yy} obtenidos en el modelamiento del corrimiento estático con Tensor Complet de Distorsión varían alrededor de cero (valor de referencia) entre las estaciones MT y sus valores se mantienen entre -0.5 a 0.5, siendo siempre menores en magnitud que los términos s_{xy} y s_{yx} . Esto indica que los factores antidiagonales de la matriz de distorsión actuarían complementariamente a los diagonales en el efecto del corrimiento estático en el levantamiento MT de Pisagua. Los resultados del proceso de inversión con esta metodología muestran que ella es efectiva removiendo el corrimiento estático de los términos diagonales del tensor de impedancia (Z_{xx} y Z_{yy}) de las estaciones MT, ya que se logra un buen ajuste entre las respuestas del modelo y los datos de estas impedancias diagonales.

Por otro lado, los factores s_{xx} y s_{yy} para el modelamiento de SS con *Sasaki* muestran valores casi siempre menores que la referencia (valor neutro). Esto produce que se atenúen los términos diagonales del tensor de impedancia en las estaciones durante el proceso de inversión, lo cual disminuiría artificialmente la influencia de estos en el proceso de inversión y tendería a reducir la dimensionalidad de los datos MT de 3D (con diagonal distinta de cero) a 2D (con diagonal igual a cero).

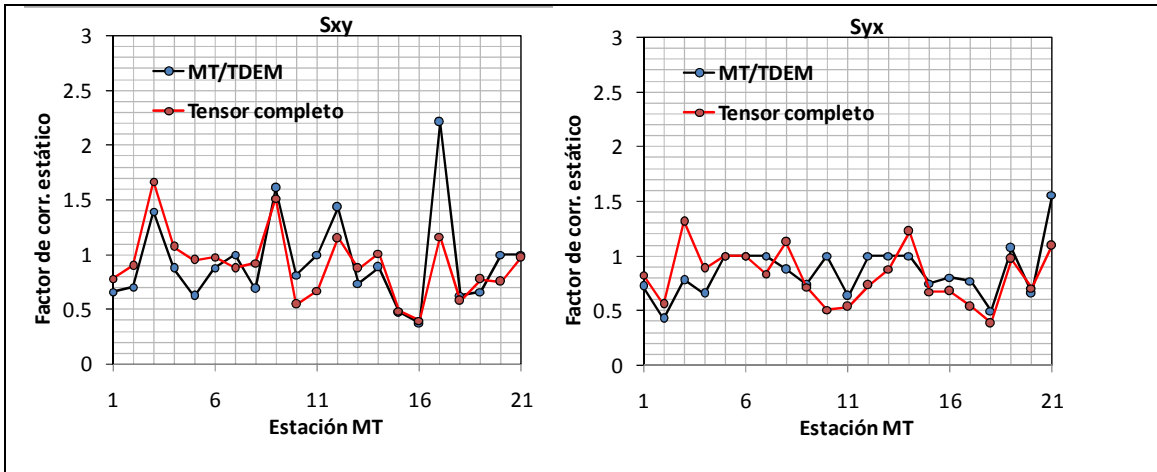


Figura 4.34 Factores de corrimiento estático (SS) estimados usando los métodos MT/TDEM (azul) y modelamiento del SS usando Matriz Completa de Distorsión (rojo). Los factores S_{xy} y S_{yx} corresponden a la diagonal de la matriz de distorsión indicado en 4.1.

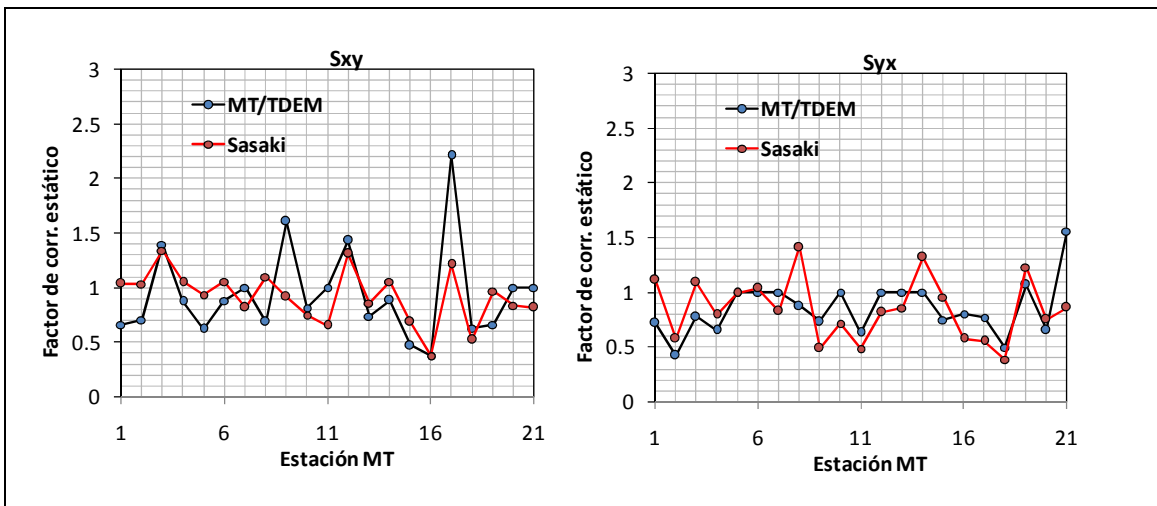


Figura 4.35 Factores de corrimiento estático (SS) estimados usando los métodos MT/TDEM (azul) y modelamiento de SS con *Sasaki* (rojo). Los factores S_{xy} y S_{yx} corresponden a la diagonal de la matriz de distorsión indicado en 4.2.

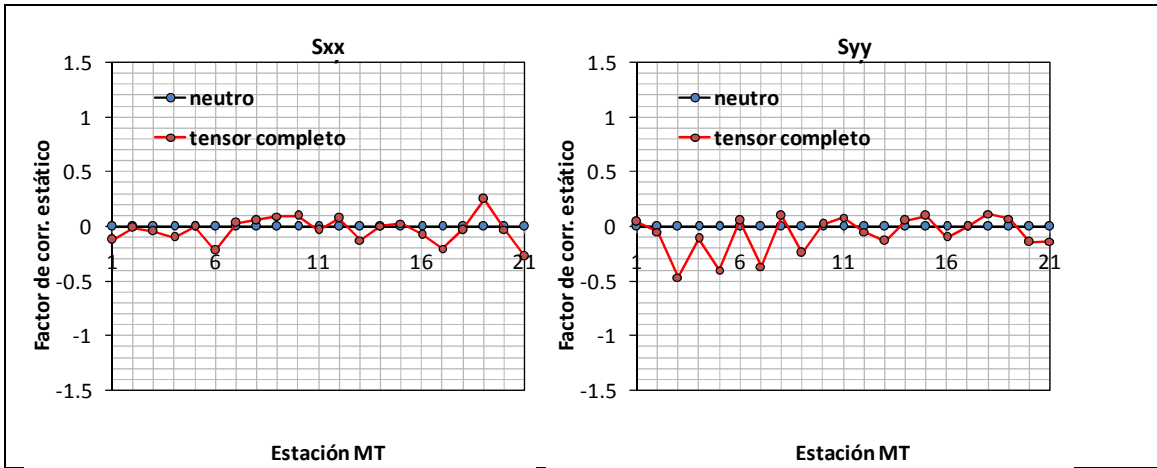


Figura 4.36 Factores del corrimiento estático diagonales (S_{xx} y S_{yy}) obtenidos usando modelamiento de SS con la Matriz Completa de Distorsión (expresión 4.1).

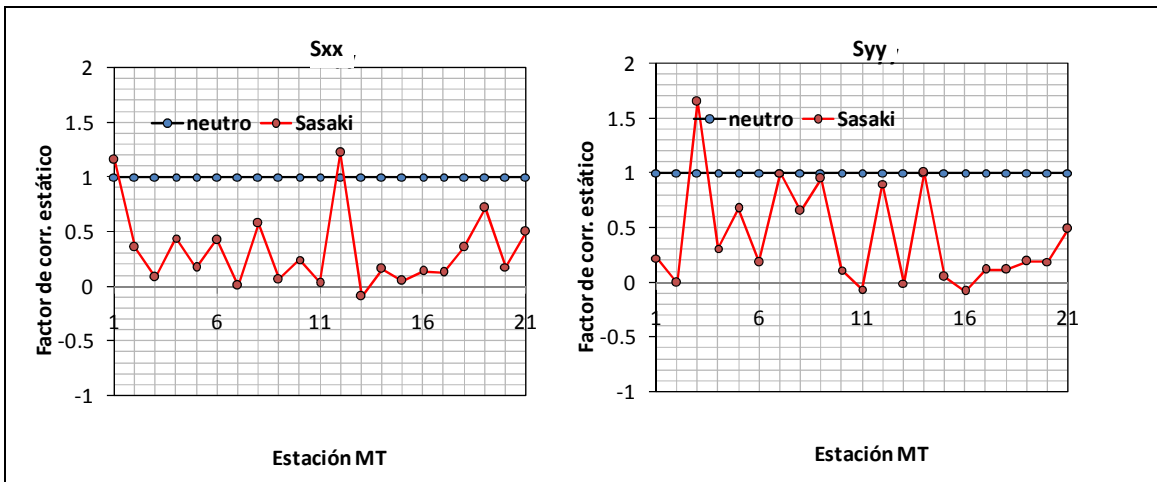


Figura 4.37 Factores del corrimiento estático diagonales (S_{xx} y S_{yy}) obtenidos usando modelamiento de SS con *Sasaki* (expresión 4.3).

4.14 Análisis de los Resultados.

Comparación de modelos de resistividad invertidos y respuestas MT calculadas

En las Figuras 4.38 y 4.39 se presentan las pseudosecciones con las respuestas MT (resistividades aparentes y fases) calculadas de los modelos de resistividad invertidos y los datos medidos en el estudio MT. En la Figura 4.38 se presentan las resistividades aparentes correspondientes a las impedancias antidiagonales (Z_{xy} y Z_{yx}) y en la Figura 4.39 las respectivas a las impedancias diagonales (Z_{xx} y Z_{yy}). Para construir las pseudosecciones se ha proyectado la posición de las estaciones MT sobre el perfil P1 indicado en la Figura 4.1. Los valores de resistividad y fase se representan en las pseudosecciones mediante escalas de colores.

El primer aspecto a considerar entre los resultados corresponde al error RMS (expresión 3.13), que mide el ajuste entre respuestas MT calculadas y los datos medidos, que fue obtenido en cada proceso de inversión. Este parámetro se calcula como la diferencia promedio entre las respuestas y los datos normalizada por el error base o nivel de ruido de cada medición (5%). El modelo con inversión normal (sin corregir SS) obtuvo un error RMS de 3.07 (15%), el modelo de MT/TDEM un error RMS de 2.4 (12%), el modelo de *Sasaki* un error RMS de 1.6 (8%) y el modelo de la Matriz Completa de Distorsión consiguió un error de 1.4 (7%). De acuerdo con este criterio, el modelo que mejor explicaría las mediciones del estudio MT de Pisagua sería el correspondiente a la Matriz Completa de Distorsión. Sin embargo, en todos los casos los errores RMS obtenidos son bastante bajos (<15%) indicando que todos los procesos de inversión considerados producen modelos que explican adecuadamente las mediciones. Debido a lo anterior se analizan los modelos y sus respuestas por separado para investigar en más detalle la observación anterior.

El modelo obtenido con inversión 3D normal (sin corrección del SS) presenta anomalías que no se observan en los demás modelos (que utilizan corrección del SS) y, además, presenta una mayor heterogeneidad en su distribución espacial de resistividad. Por ejemplo en las vistas en planta entre 0 m.s.n.m a -2000 m.s.n.m (A en las Figuras 4.15 a 4.16) y en la sección vertical correspondiente al perfil P1 (Figura 4.18) se observa que bajo las estaciones P05 y P21 se forma una anomalía que contrasta con menores resistividades y que no está presente en ninguno de los demás modelos invertidos. Esta anomalía se trataría de un artefacto creado durante la inversión, para ajustar el corrimiento estático de la estación P17, ubicada inmediatamente al Norte de esta anomalía (la Figura 4.15) y que presenta una separación de una década entre sus curvas de resistividad aparente XY e YX que es reproducida por las respuestas del modelo (Anexo I). Otro caso similar, se presenta en la estación P11, la cual también tiene un corrimiento estático importante en sus curvas de resistividad aparente y es ajustado por las respuestas del modelo. Inmediatamente al Norte de estación P11 se observa una anomalía de alta resistividad (B en Figuras 4.15 y 4.16) en los primeros

1000 metros de profundidad y que se tiende a fusionar al incrementar la profundidad con una estructura de alta resistividad de mayor tamaño. Esta anomalía también se trataría de un artefacto, ya habría sido introducida en el modelo durante el proceso de inversión para ajustar la distorsión de la estación P11 (corrimiento estático). También esta anomalía no se observa en ninguno de los resultados de los procesos de inversión que consideran corregir el corrimiento estático. Las anomalías descritas (A y B) se presentan con circunferencias con línea puntada en las Figuras 4.15 y 4.16.

Por otro lado, también en el modelo obtenido con inversión normal, se aprecia que las resistividades aparentes y fase calculadas para las estaciones P19 y P02 tienen valores anómalos que difieren totalmente de los datos medidos (Anexo I).

Debido a lo anterior, se considera que el modelo obtenido con inversión 3D normal presenta distorsión debido al corrimiento estático en los datos. Para que este modelo se pueda interpretar es necesario distinguir en él, los artefactos asociados al corrimiento estático de los datos y las anomalías o estructuras que corresponden efectivamente a la distribución de resistividad del subsuelo. Esto significa que se debe resolver sobre el origen (Distorsión o Subsuelo) de cada anomalía o estructura observada. Los resultados de este modelo en la sección vertical de resistividad eléctrica del perfil P1 (Figura 4.16) son muy similares a los obtenidos en los otros procesos que corrigen el corrimiento estático. Sin embargo, en el resto del modelo, como dan cuenta la vistas en planta (Figuras 4.13 a 4.15), esta similitud ya no es tal. Se prefiere no interpretar este modelo obtenido con inversión 3D simple, debido a que identificar los artefactos generados por el corrimiento estático es difícil y no hay un procedimiento establecido de cómo hacerlo.

Los modelos obtenidos corrigiendo el SS usando MT/TDEM, *Sasaki* y con Matriz Completa de Distorsión son muy similares especialmente en su parte más superficial. En la Figura 4.40 se muestran los resultados de estos modelos bajo el perfil P1 (indicado en la Figura 4.1) hasta los 3000m de profundidad, en donde estos repiten principalmente las mismas estructuras de resistividad eléctrica. También en las pseudosecciones de las Figuras 4.38, se observa que las respuestas calculadas (resistividad aparente y fase) para impedancias antidiagonales (Z_{yx} y Z_{xy}) son bastante similares entre estos modelos y no difieren significativamente.

Las diferencias más relevantes entre los resultados del MT/TDEM, *Sasaki* y el Matriz Completa de Distorsión se aprecian en las respuestas calculadas de los modelos invertidos para las impedancias diagonales (Z_{xx} e Z_{yy}) que se presentan en las pseudosecciones de la Figura 4.39.

En el caso del MT/TDEM, en los períodos bajo 1 seg, se obtienen valores resistividades aparentes (para Z_{xx} y Z_{yy}) que son un orden magnitud menores que los datos medidos y, además, su fase tampoco sigue la tendencia observada en los datos medidos.

En el caso de *Sasaki*, la resistividad aparente asociada a las impedancias diagonales es similar a los datos medidos (especialmente para Z_{xx}), pero en sus fases difieren. Por ejemplo, en *Sasaki* las fases correspondientes a las estaciones P12 y P11 tienden a presentar valores menores a los 90° para Z_{yy} y valores mayores a -90° para Z_{xx} en los períodos menores a 1 seg, lo cual no se aprecia ni en las pseudosecciones de los datos medidos ni en los resultados de la Matriz Completa de Distorsión.

En los resultados de la Matriz Completa de Distorsión, las resistividades aparentes calculadas tienen la misma similitud con los datos medidos que la obtenida con los resultados de *Sasaki*, pero adicionalmente sus respuestas de fase se ajustan mejor con las mediciones. Por ejemplo, en Z_{xx} se observa en los datos medidos que hay un aumento de la fase entre los períodos de 0.1 a 1 seg para las estaciones entre P17 a P10, la cual sólo se reproduce en las respuestas del modelo de la Matriz Completa de Distorsión.

Para reforzar las comparaciones anteriores en la Figura 4.39, bajo los títulos de los métodos de inversión, se muestra el error RMS (ajuste entre respuestas y datos medidos) calculado sólo considerando las impedancias diagonales (Z_{xx} y Z_{yy}). En este caso también son los resultados de la Matriz Completa de Distorsión los que muestran un mejor ajuste con las mediciones (0.98 RMS).

Reuniendo los argumentos expuestos anteriormente, se concluye que el modelo de resistividad más adecuado para interpretar sus resultados en el estudio MT Pisagua, correspondería al obtenido por la inversión 3D con la Matriz Completa de Distorsión. Esto debido a que la corrección del corrimiento estático de este método permite un mejor ajuste entre las respuestas calculadas y los datos medidos, tanto en las impedancias diagonales (Z_{xx} y Z_{yy}) como las anti-diagonales (Z_{xy} y Z_{yx}) para todas las estaciones MT registradas.

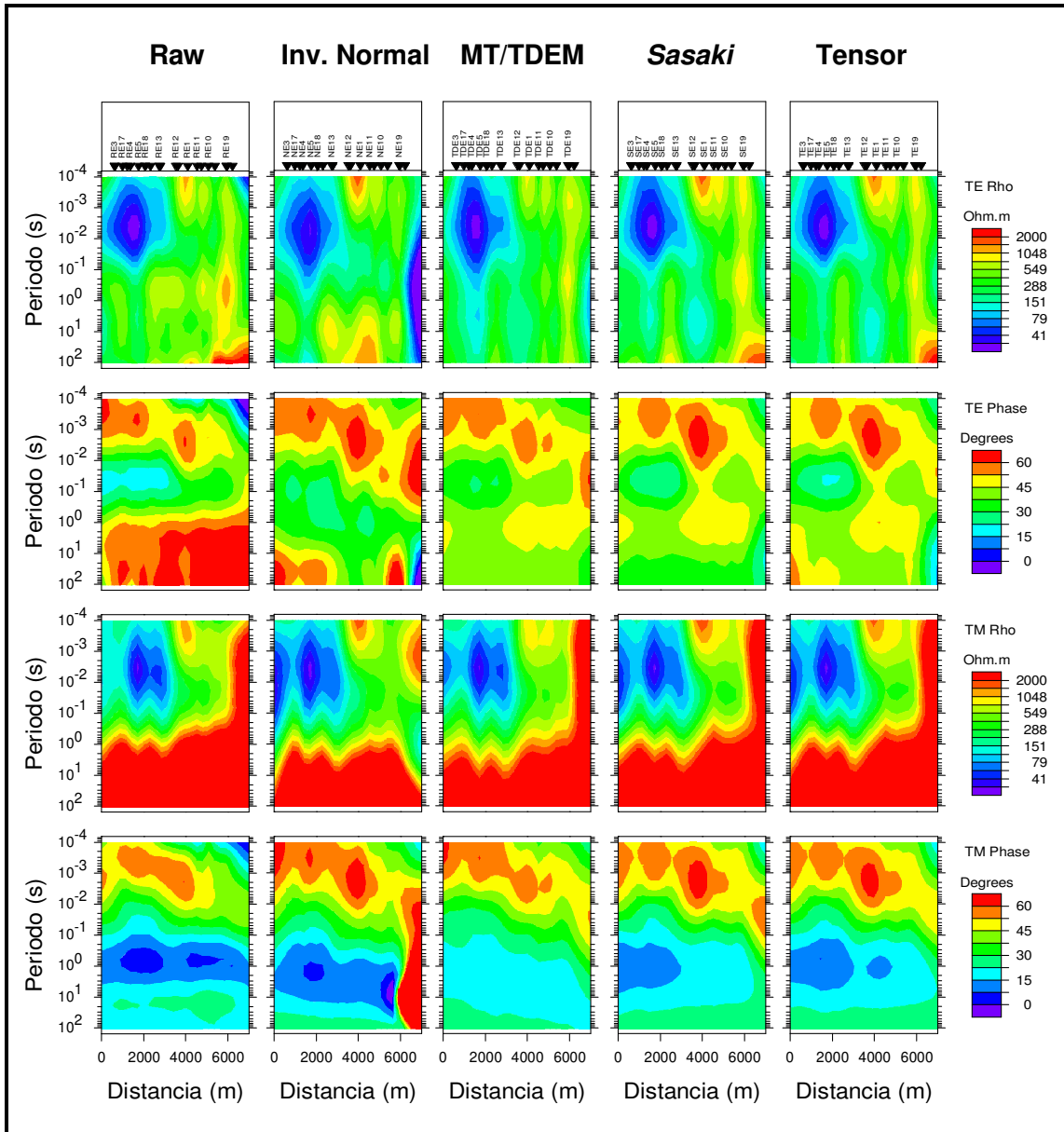


Figura 4.38 Pseudosecciones con las respuestas antidiagonales (Z_{xy} y Z_{yx}) calculadas (resistividad aparente y fase) para las estaciones del estudio MT Pisagua con los modelos 3d de resistividad invertidos. En la columna Raw se presentan los datos medidos. En la columna Inv. normal se presentan los datos calculados de la inversión 3D sin corregir el corrimiento estático. En las columnas MT/TDEM, Sasaki y Matriz Completa de Distorsión se muestran los datos calculados considerando corregir el corrimiento estático.

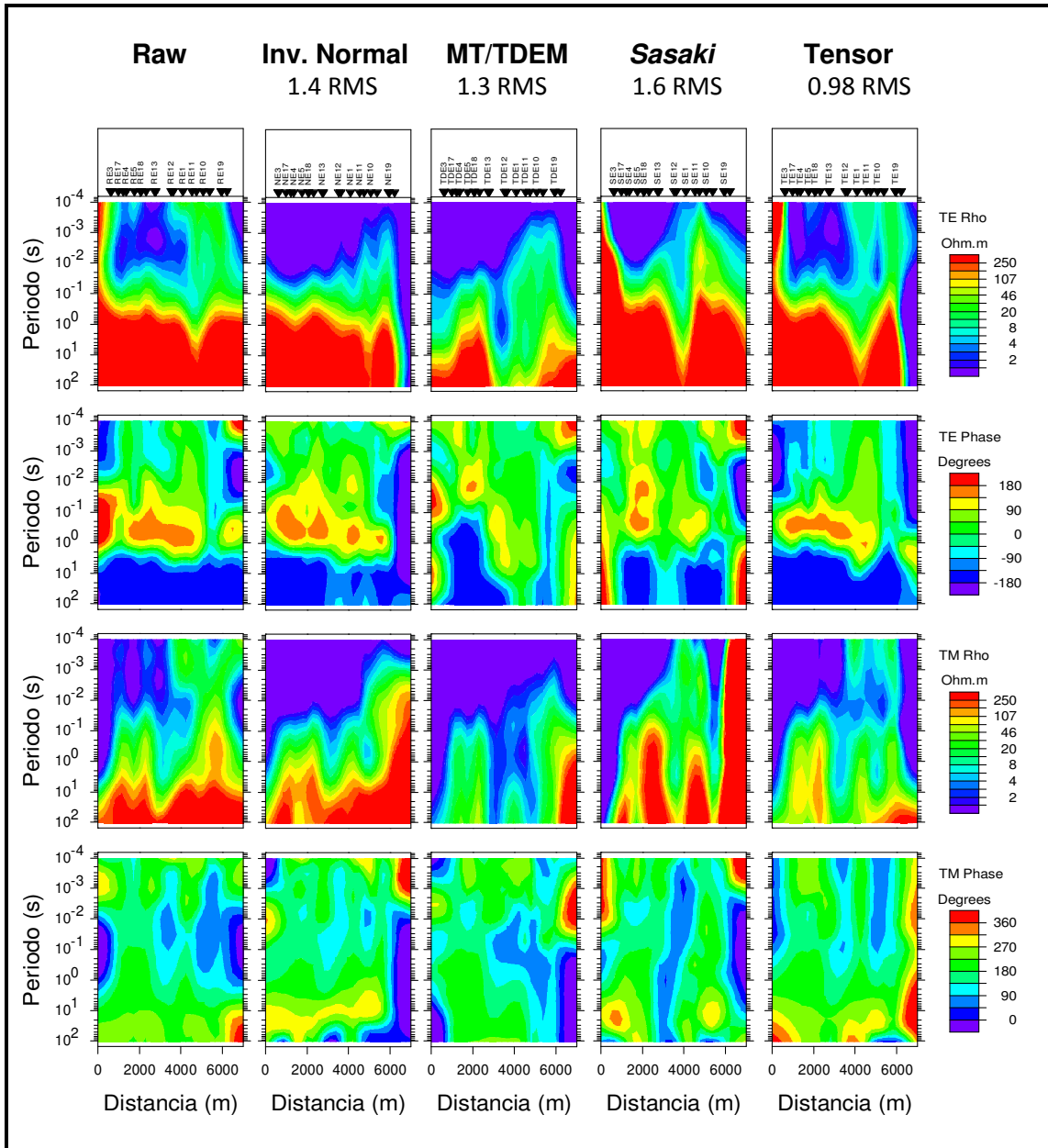


Figura 4.39 Pseudosecciones con las respuestas diagonales (Z_{xx} y Z_{yy}) calculadas (resistividad aparente y fase) para las estaciones del estudio MT Pisagua con los modelos 3d de resistividad invertidos. En la columna Raw se presentan los datos medidos. En la columna Inv. normal se presentan los datos calculados de la inversión 3D sin corregir el corrimiento estático. En las columnas MT/TDEM, Sasaki y Matriz Completa de Distorsión se muestran los datos calculados considerando corregir el corrimiento estático.

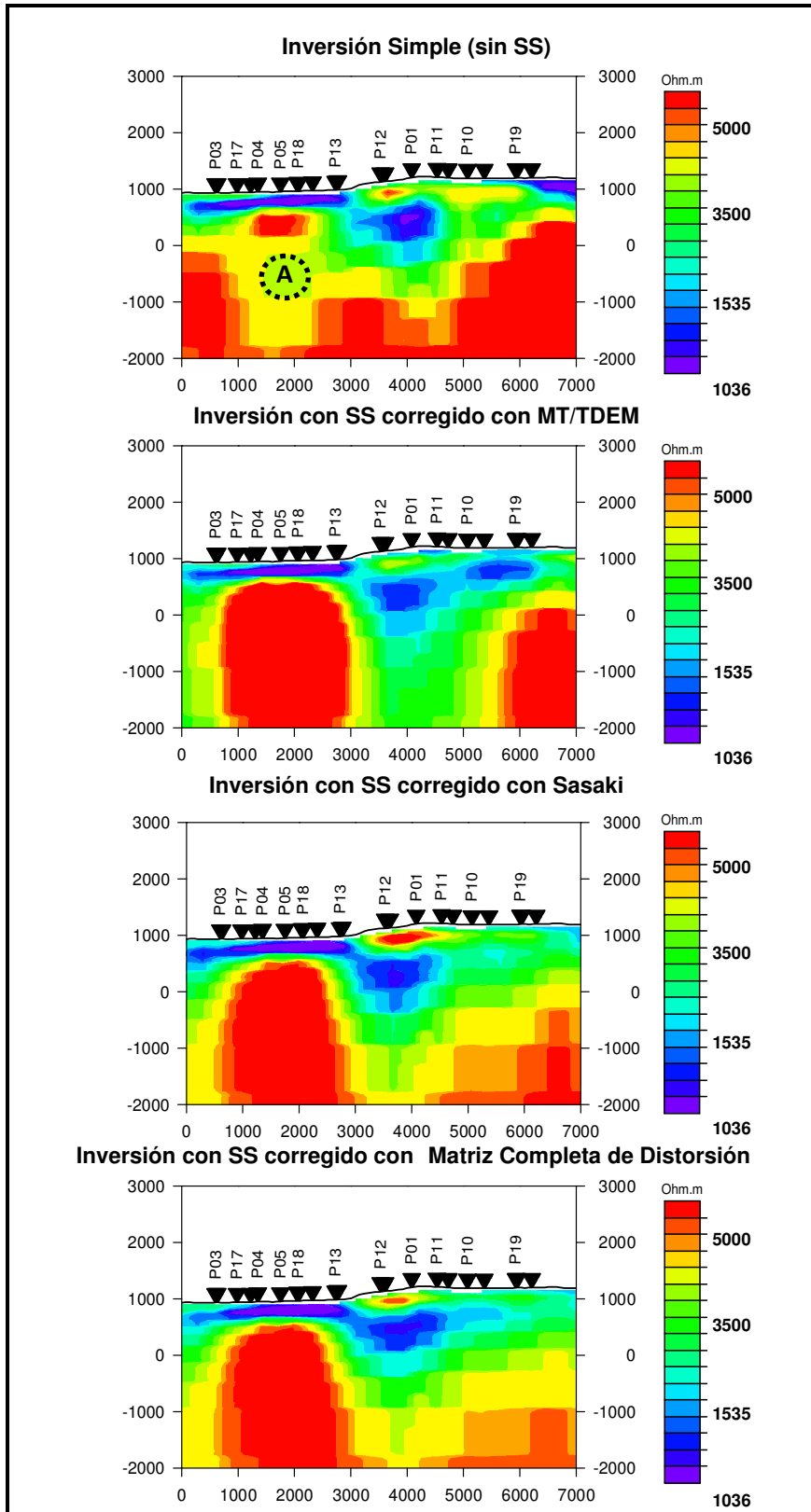


Figura 4.40 Comparación de sección vertical P1 (Figura 4.1) de modelos de resistividad invertidos con (MT/TDEM, *Sasaki*, Matriz Completa de Distorsión) y sin remover el corrimiento estático (Inv. Normal). Los resultados se presentan hasta 3000m de profundidad

4.15 Interpretación del Modelo de Resistividad 3D.

Relación entre resistividad eléctrica y Fallas geológicas.

En la corteza superior la resistividad eléctrica de las rocas está principalmente determinada por la conducción electrolítica del agua contenida en sus poros. En este caso, el comportamiento de la resistividad eléctrica sigue la ley de Archie (Archie 1942), en donde sus valores tienden a disminuir cuando hay un aumento del agua contenida en los poros y/o hay una mejora de la comunicación entre estos.

Ley de Archie

$$\rho = \rho_w \phi^{-n} s^{-m} \quad (4.4)$$

ρ : Resistividad de la roca.

ρ_w : Resistividad del agua.

ϕ : Porosidad (volumen de poros/volumen de Roca).

s : Saturación (porción del volumen de poros lleno de agua).

n : factor de cementación (comunicación entre poros).

m : factor de saturación.

Las rocas con baja porosidad y/o contenido de humedad presentan elevadas resistividades eléctricas (>1000 ohm-m) y en el caso más extremo no tienen conductividad eléctrica.

El fracturamiento y/o agrietamiento que sufren las rocas en la zona de daño de Falla, aumentan el tamaño y la comunicación de su volumen poroso, el cual al ser ocupado por el agua produce una reducción de la resistividad eléctrica. Esto genera un sector de baja resistividad alrededor del plano de falla, comúnmente denominada como zona conductora de falla (FZC) (Ritter et al. 2005, Bedrosian et al. 2004, Unsworth et al. 1998, Hoffman et al. 2004, Tank 2012). La FZC se caracteriza por la ausencia de sismicidad y se supone que es reológicamente muy débil para acumular esfuerzos (Unsworth et al. 2000).

En algunos casos, como se supone en la falla de San Andres, el contenido de fluidos con presión y/o temperatura en la FZC podrían debilitar las rocas, ubicadas alrededor de ésta, favoreciendo la liberación de esfuerzos y generación de actividad sísmica (Becken & Ritter, 2012).

La producción de arcillas en una zona de falla (principalmente en el núcleo) también reducen la resistividad eléctrica, debido a que al entrar en contacto con el agua producen un mecanismo adicional de conducción eléctrica (Winsauer & MacCardell, 1953).

La zona de daño de la falla así como los sedimentos generados por la actividad de la falla con mayor porosidad pueden a ser vía preferenciales para la circulación hídrica. El drenaje a través de la zona de falla también genera una disminución de la resistividad eléctrica, ya que aumenta la saturación de fluido en las rocas.

Debido a que en el núcleo de falla se producen los mayores esfuerzos y deformaciones, así como la producción de arcillas, los sectores de menor resistividad en la FZC podrían ser indicadores de la ubicación de esta estructura.

Por otro lado, los sectores de la zona de falla en donde la porosidad de las rocas no admite un contenido hídrico importante (o éste no está presente), no es posible detectarlos a través de la resistividad eléctrica por la falta de contraste con su entorno. Debido a lo anterior, en general es esperable que el plano de falla pueda extenderse más allá de la FZC detectada con un estudio de resistividad eléctrica.

La Falla de Pisagua, objeto de este estudio, se encuentra en la Cordillera de la Costa del Norte de Chile que cubre desde el acantilado costero hasta el Valle Central. El sector de la Falla de Pisagua se caracteriza por un clima desértico con casi nulas precipitaciones y drenajes escasamente desarrollados, lo cual ha permitido la preservación del relieve y establece condiciones de baja erosión. El principal aporte de humedad al sector de la Falla de Pisagua provendría del mar ubicado a 10 Km al Oeste de la zona de estudio. Esta podría provenir del contacto directo de la Falla de Pisagua con el mar en el acantilado costero como de la brisa mariza (Camanchaca) que ingresa hacia el continente. La principal unidad desplazada por la Falla corresponde al intrusivo Pisagua (Silva, 1977), el cual tendría una baja porosidad y sólo admitiría un contenido relevante al estar fracturado o dañado. El origen de fluidos con temperatura o presión podría estar asociado a la zona de contacto entre las placas de Sudamérica y Nazca, ubicada aproximadamente entre 30 a 40 Km de profundidad en el sector de la Falla de Pisagua (Allmendinger, 2009). Comte et al. (2014) obtuvieron un modelo de velocidades 3D, basado en los registros sísmicos de los últimos 25 años del Norte de Chile, con el cual posicionaron los hipocentros de los sismos registrados en la localidad de Pisagua. Los resultados indican que bajo los 20 Km de profundidad en el sector de la Falla de Pisagua, hay actividad sísmica y que se aprecian anomalías $V_p/V_s \sim 1.85$ que se asocian con cuerpos frágiles y/o fracturados y/o con presencia de fluidos o minerales hidratados (Valenzuela, 2015). Basado en la correlación entre los fluidos con presión y la actividad sísmica indicada en varios trabajos (Miller, 1996; Becken & Ritter, 2012; Unsworth et al., 1997; Ritter et al., 2005), se propone que los resultados de Comte et al. (2014) podrían sugerir la presencia de fluidos con presión bajo los 20 Km de profundidad en la Falla de Pisagua.

Descripción del Modelo de Resistividad

Se describen las principales estructuras de resistividad eléctrica observadas en el modelo 3D del subsuelo del estudio MT Pisagua. Sólo se consideran los resultados del modelo de resistividad hasta los 3000m de profundidad que es donde se presentarían las principales estructuras asociables a la Falla de Pisagua y a la geología local del área de estudio.

En la Figura 4.41 se muestra un mapa de ubicación con el trazado en superficie de las secciones verticales que presentan los resultados, las cuales se orientan transversalmente al trazado del escarpe de la falla de Pisagua. Estas se presentan entre las Figuras 4.42 a la 4.47 y sus coordenadas se indican en la tabla 4.2. En la Figura 4.48 se presentan vistas en planta del modelo resistividad considerando elevaciones entre 850 m.s.n.m hasta los -2000 m.s.n.m.

En las secciones verticales y vistas en planta se nota que la distribución de resistividad eléctrica es diferente bajo las superficies inferior (bloque Norte) y superior (bloque Sur) del escarpe de la falla de Pisagua.

Al lado norte del escarpe, en las secciones verticales se aprecia una secuencia de tres capas con resistividad eléctrica diferente que se extienden casi horizontalmente. La primera de estas (A), tiene 100 ohm-m de resistividad y se detecta apenas entre la superficie hasta los 30 metros de profundidad. Inmediatamente bajo ella hasta los 150 metros de profundidad, se aprecia otra capa (B) con 10 ohm-m. La tercera capa (C) se extiende entre los 150 metros de profundidad hasta por lo menos los 3000 metros de profundidad mostrando resistividades mayores a los 1000 ohm-m.

Al lado Sur del escarpe, bajo la superficie superior, se interrumpe la continuidad de las capas horizontales detectadas al lado Norte y se aprecian nuevas estructuras de resistividad eléctrica. Inicialmente bajo la superficie se observa una capa (D) que se extiende hasta los 250 metros de profundidad cuyas resistividades que bordean los 500 ohm-m. En las secciones verticales N1, N2 y N3 se nota que esta capa tiende a disminuir sus valores de resistividad (~200 ohm-m) bajo las estaciones P09, P10 o P15 y que en el perfil N6 casi no se observa bajo la estación P11. Otra estructura (E) de baja resistividad eléctrica (50-100 ohm-m) se observa bajo 250 metros de la superficie superior del escarpe y se extiende verticalmente hasta al menos los 750m de profundidad. Esta estructura de baja resistividad (E) se distribuye casi paralela al trazado del escarpe de Pisagua con orientación con 65° NE, tal como puede observarse en la Figura 4.48 de la vista en planta a 600 m.s.n.m del modelo resistividad ("E" es destacada con línea segmentada roja). Bajo las estructuras mencionadas anteriormente, se observa otro cuerpo (F) de alta resistividad (>1000 ohm-m). La elevación del contacto con este cuerpo se observa variable y oscila aproximadamente entre los 0 m.s.n.m y los -500 m.s.n.m a lo largo de las secciones verticales.

Bajo los -1000 m.s.n.m, como indican las vistas en planta del modelo de resistividad, sólo se aprecian los sectores de alta resistividad (>1000 ohm-m) tanto en el lado Norte y el lado Sur del escarpe, por lo que no se detectarían nuevas estructuras de resistividad eléctrica.

En las secciones verticales N4 a N6 (Figuras 4.42 a 4.47) se observa una tendencia a disminuir la resistividad eléctrica hacia el extremo Sur. Esta es una zona límite del modelo de resistividad con baja convertura de estaciones MT (sólo P02), por lo que podría estar influenciada por efectos de borde y su precisión es inferior a los otros sectores del modelo. Debido a lo anterior se prefiere no interpretar esta sección del modelo.

Tabla 4.2 Coordenadas de los perfiles presentados en las Figuras 4.28 a 4.32 (UTM Zona 19, WGS84).

Perfil	Inicio		Final	
	Este (m.)	Norte (m.)	Este (m.)	Norte (m.)
N1	382055	7835626	385103.8	7829325
N2	382505	7835844	385554	7829543
N3	382955	7836062	386004.1	7829761
N4	383405	7836280	386454	7829979
N5	383855	7836498	386904	7830197
N6	384305	7836715	387354	7830414

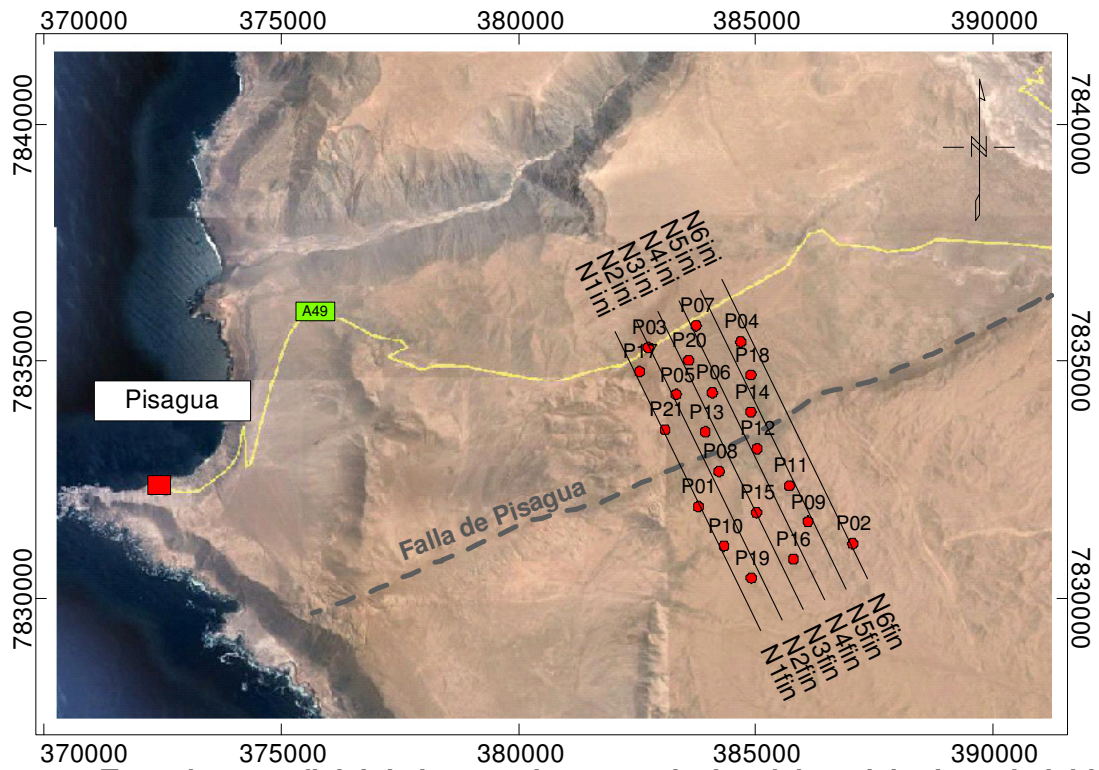


Figura 4.41 Trazado superficial de las secciones verticales del modelo de resistividades presentadas en las Figuras 4.42 a 4.47.

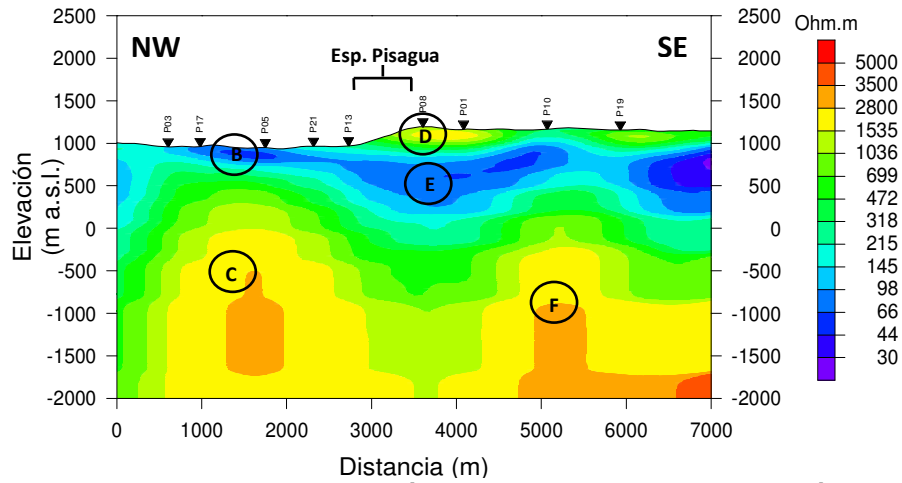


Figura 4.42 Perfil N1 - Sección Vertical de Resistividad Eléctrica.

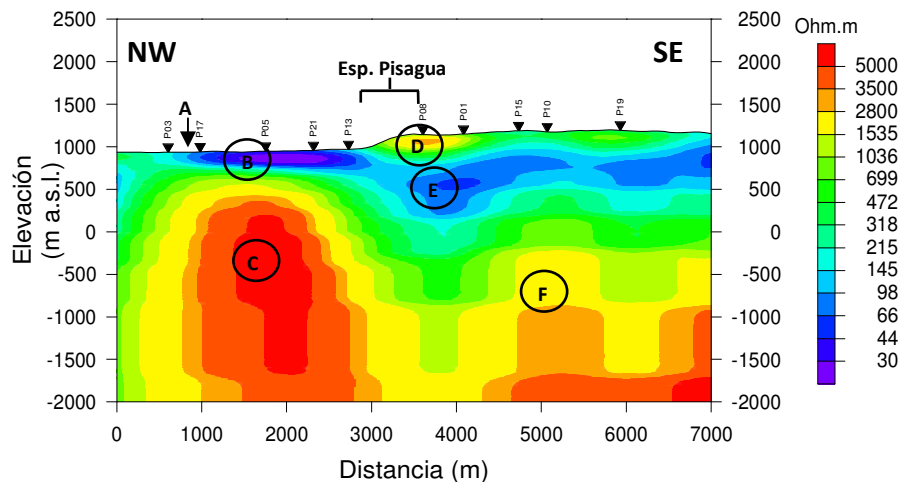


Figura 4.43 Perfil N2 - Sección Vertical de Resistividad Eléctrica.

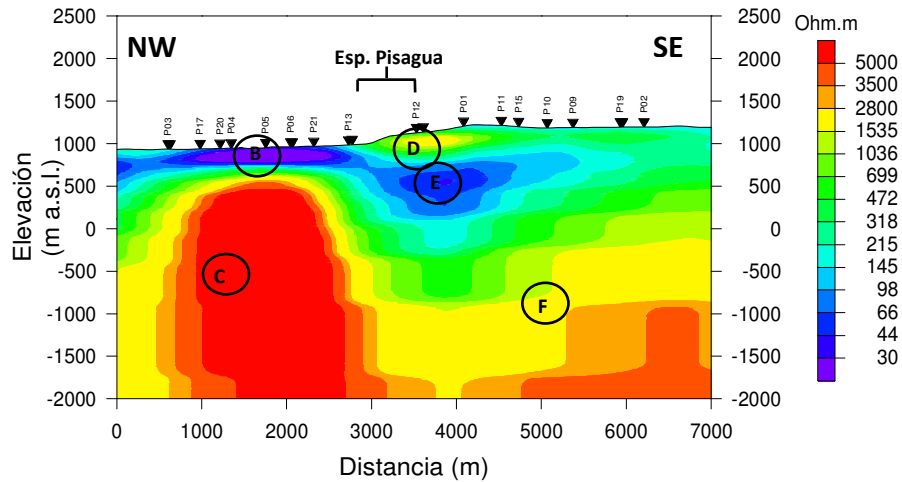


Figura 4.44 Perfil N3 - Sección Vertical de Resistividad Eléctrica.

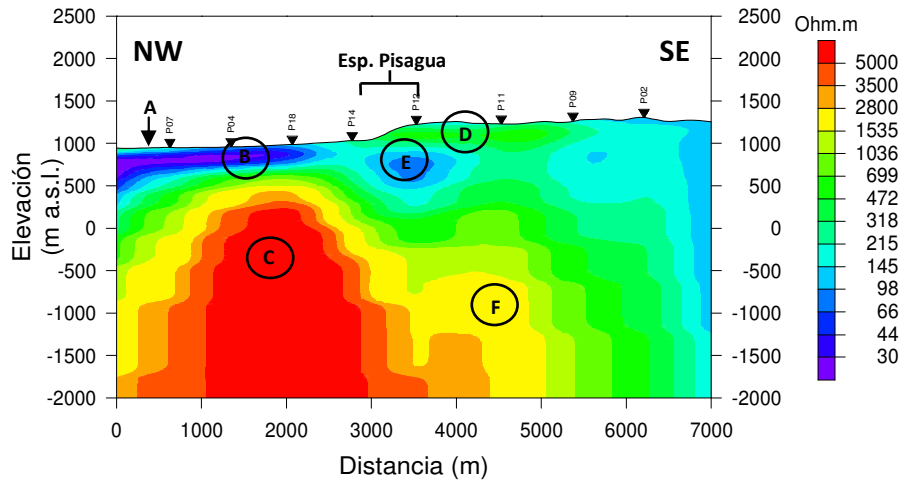


Figura 4.45 Perfil N4 - Sección Vertical de Resistividad Eléctrica.

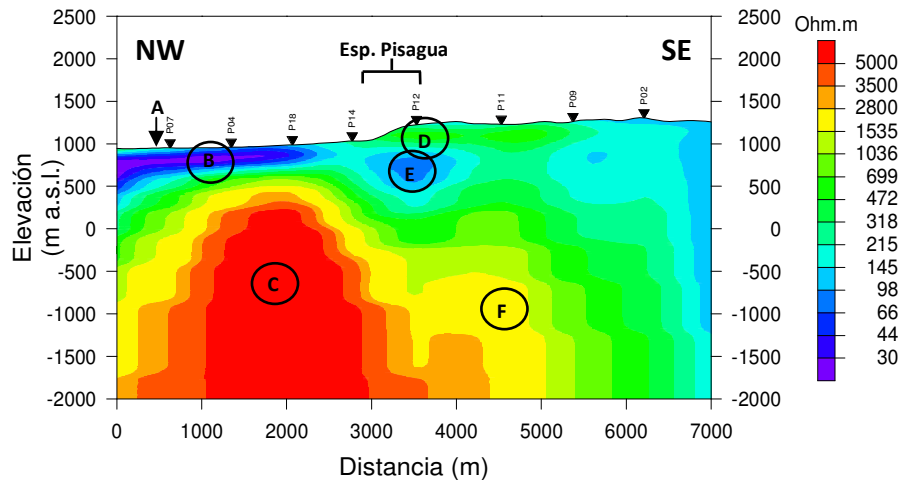


Figura 4.46 Perfil N5 - Sección Vertical de Resistividad Eléctrica.

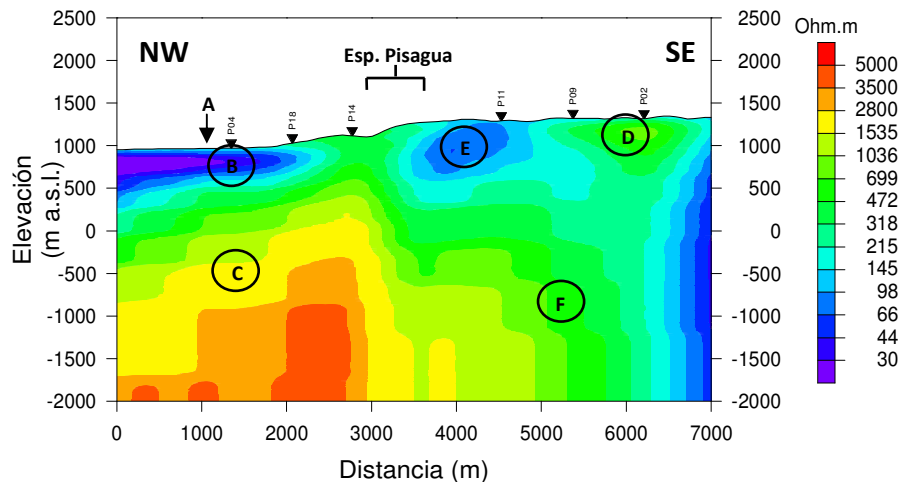


Figura 4.47 Perfil N6 - Sección Vertical de Resistividad Eléctrica.

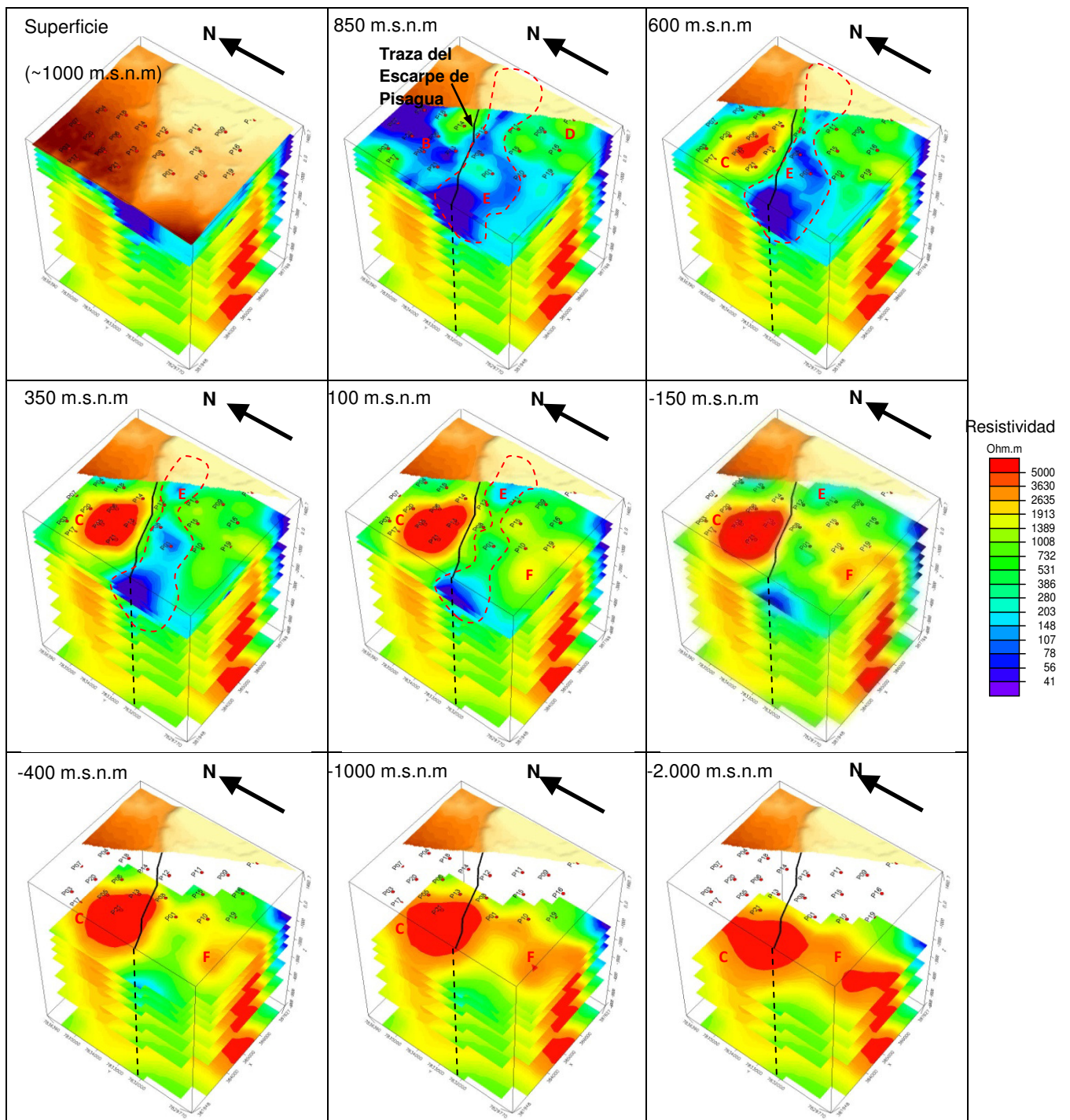


Figura 4.48 Secciones en planta de resistividad eléctrica del estudio MT Pisagua. En línea negra se destaca la traza superficial del escarpe de la Falla de Pisagua. Con letras en rojo se identifican las estructuras de resistividad eléctrica del modelo (B, C, D, E y F). Con línea segmentada roja se destaca la zona conductora de falla (FZC) detectada en el modelo (E).

Correlación entre la Geología y el Modelo de Resistividad.

En la figura 4.49 se muestra el perfil N3 del modelo MT sobrepuesto con la litología asociada a las estructuras de resistividad eléctrica mencionadas en la sección anterior.

El área del estudio MT, el bloque Norte de la Falla de Pisagua, se encuentra cubierto por sedimentos cuaternarios coluviales (Qcin). Su ubicación se correlaciona con las estructuras A y B del modelo de resistividad identificadas anteriormente, cuyos valores se asocian respectivamente con sedimentos secos (100 ohm-m) y saturados (10 ohm-m). La zona de estudio se caracteriza por presentar casi nulas precipitaciones y un drenaje escasamente desarrollado (Quezada et al., 2010). Debido a esto, se propone como hipótesis para explicar el origen de los sedimentos saturados, la infiltración desde la superficie de la humedad transportada por la nevosidad estratiforme costera (Camanchaca) característica del sector de Pisagua (Quezada et al., 2006). De acuerdo con el modelo de resistividad estos sedimentos se extenderían hasta los 150m de profundidad.

El basamento en el sector del levantamiento MT correspondería al Intrusivo de Pisagua presente al menos hasta los 1000m de profundidad a ambos lados de la falla de Pisagua, dado a que se observa a lo largo del acantilado costero (con altura ~1000m) y aflora tanto en la superficie superior del escarpe (Sur) como en los extremos Este y Oeste de la zona de estudio. Debido a lo anterior, la unidad detectada en el modelo de resistividad tanto bajo los sedimentos cuaternarios (C) e inmediatamente al Sur del escarpe (D) correspondería al Intrusivo de Pisagua.

En los sectores en donde el intrusivo de Pisagua no ha sido dañado por la actividad de la Falla, debería presentar una alta resistividad eléctrica (>500 ohm-m) por la baja porosidad y permeabilidad de sus rocas cristalinas. En esta condición se encontraría el intrusivo de Pisagua detectado por la estructura C de alta resistividad (~5000 ohm-m) bajo los 150m de profundidad del lado Norte del escarpe (Figuras 4.42 a 4.48), el cual detendría la infiltración de humedad proveniente de los sedimentos saturados que lo sobreyacen. En una situación similar, aunque con resistividades un poco menores (mayor daño), se detecta el Intrusivo de Pisagua en la superficie superior del escarpe (lado Sur), a través de la estructura de alta resistividad D (500 ohm-m) y en profundidad siguiendo una forma más irregular por la estructura F de resistividad (>2500 ohm-m).

La estructura E con menor resistividad (50-100 ohm), ubicada bajo los 250m de la superficie superior del escarpe, se haya contenida entre las estructuras de resistividad D y F, por lo que se encontraría al interior del intrusivo de Pisagua. Su menor resistividad eléctrica se debería a un aumento en la porosidad de la rocas del Intrusivo de Pisagua y la humedad contenida en ellas (necesaria para reducir la resistividad) parecería provenir de los sedimentos saturados ubicados al lado Norte del escarpe (Figura 4.44).

La estructura de resistividad E se extiende paralelamente a la dirección del escarpe (Figura 4.48), por lo que correspondería a una zona conductora de falla (FZC) indicando los sectores de mayor daño en el intrusivo de Pisagua producidos por el desplazamiento de la Falla. En la discusión de este capítulo se analiza la ubicación de la FZC comparándola con modelamiento elástico de la deformación producto del deslizamiento de la Falla de Pisagua.

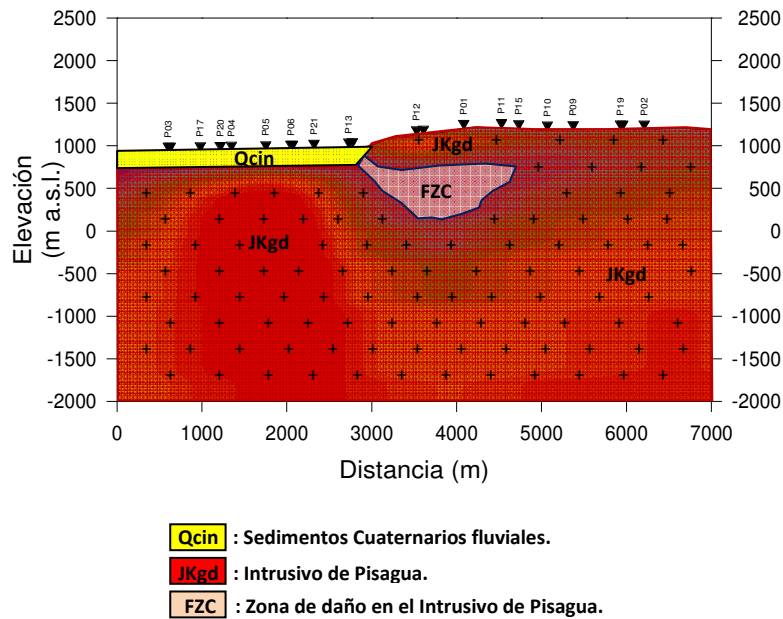


Figura 4.49 Perfil Geológico N3 Interpretado sobre Resistividad Eléctrica.

Sensibilidad de la FZC

La FZC es la estructura del modelo resistividad que guarda mayor relación con la Falla de Pisagua. Debido a esto se analiza su dependencia con las mediciones y su extensión profundidad, para reconocer cuales de sus características tienen menor incertidumbre y permitirían interpretar sobre la geometría de la Falla de Pisagua.

La profundidad que alcanza la FZC en el subsuelo es evaluada a través del modelamiento directo de respuestas MT. Para ello se interrumpe la FZC en el modelo resistividad, bajo la zona de las estaciones MT, introduciendo un semiespacio homogéneo de alta resistividad (5000 ohm-m) con diferentes profundidades y calculando sus respuestas MT. Este semiespacio corresponde a una representación del intrusivo de Pisagua (Basamento) sin daño por la actividad Falla. La profundidad bajo la cual el basamento no afecta el ajuste entre respuestas y datos observados correspondería a la extensión en profundidad hasta donde es posible detectar la FZC. Un análisis similar a éste se realizó Hoffman (2004) con la misma finalidad en el estudio MT de la Falla Oeste.

En la Figura 4.50 se presentan secciones verticales de los modelos de resistividad considerando el semiespacio a diferentes profundidades (150m, 500m, 750m o inf). Bajo estos se muestran sus pseudosecciones de resistividad aparente y fase calculadas, las cuales corresponden al modo TE orientado con un rumbo eléctrico de 65°NE (rumbo de la Falla de Pisagua). En este caso se utiliza esta descomposición, ya que permite observar más claramente los datos asociados a la FZC (rectángulos con línea segmentada). A la izquierda de las pseudosecciones calculadas se muestran las pseudosecciones correspondientes a los datos medidos, cuyo corrimiento estático fue previamente corregido usando los Tensores Completos de Distorsión. Adicionalmente, sobre los modelos de resistividad se indica el error RMS (ajuste entre datos calculados y medidos) obtenido con las respuestas MT de cada modelo.

Los resultados de la Figura 4.50 indican que el semiespacio (intrusivo de Pisagua sin daño) que intercepta la FCZ a partir 150m y a partir de 500m de profundidad altera las respuestas MT del modelo, tanto en resistividad aparente como en fase (recuadros con línea segmentada), produciendo un desajuste con los datos medidos (mayor error RMS) e indicando que FCZ se detectaría a mayor profundidad. En cambio, las respuestas MT del modelo con el basamento a partir los 750m de profundidad, sólo muestra pequeñas diferencias en la fase con respecto al modelo original (sin semiespacio) y no afecta significativamente ajuste con los datos.

El análisis muestra que la FZC es una estructura importante en el modelo de resistividad, siendo su ubicación y extensión en profundidad necesarias para generar un ajuste adecuado con las mediciones. Debido a lo anterior, estas características serían

lo bastante fiables como para utilizarse en la interpretación de la geometría de la Falla Pisagua.

Adicionalmente, se infiere que los datos MT del estudio de Pisagua indican que la FZC se extendería como máximo hasta los 750m de profundidad. Producto que la introducción del basamento no dañado bajo esta profundidad no genera cambios relevantes en el ajuste entre respuestas y mediciones, se deduce que bajo la FZC no se detectan nuevas estructuras de resistividad eléctrica asociadas a la Falla de Pisagua.

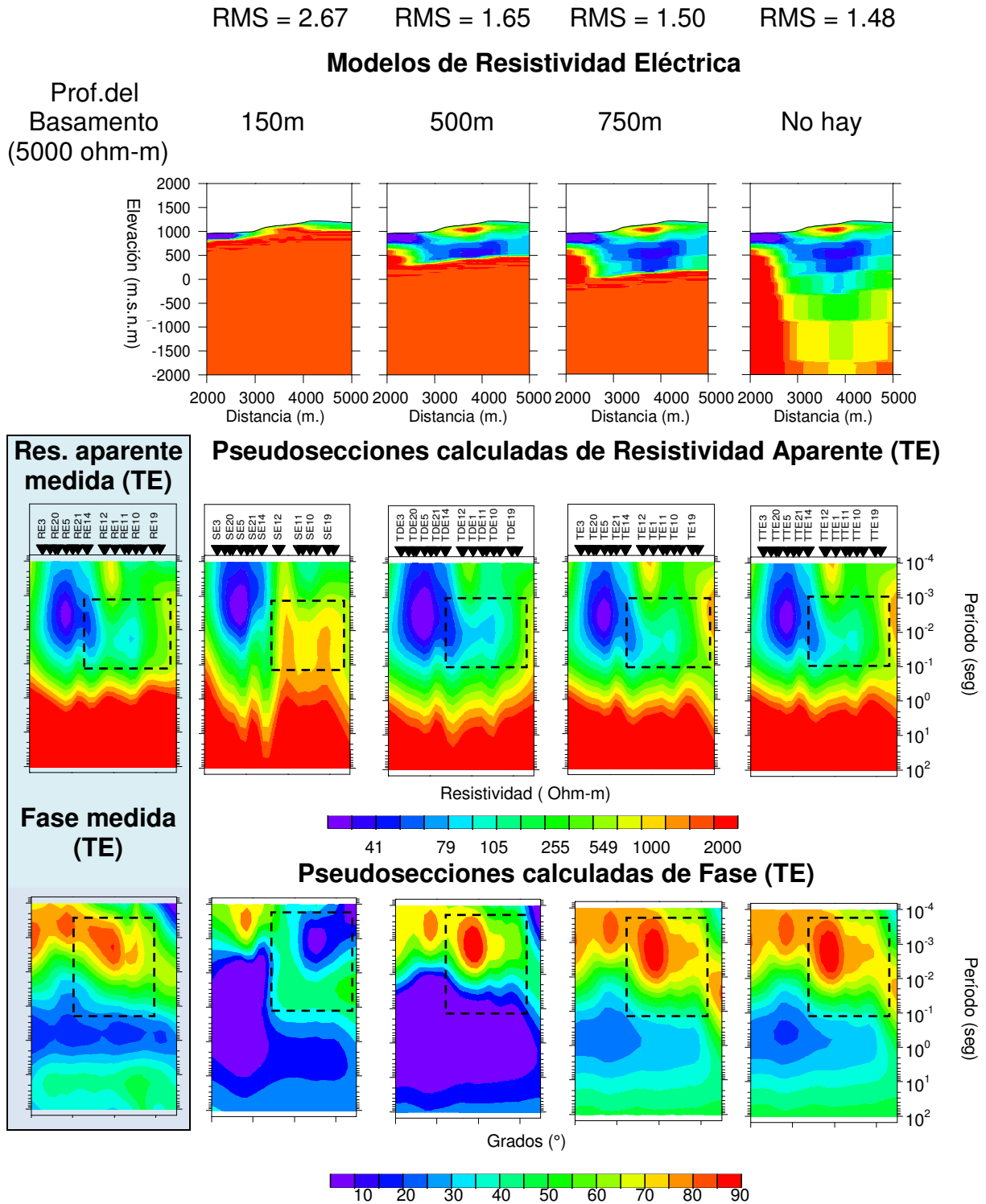


Figura 4.50 Análisis de Sensibilidad para determinar extensión en profundidad de FCZ (*Fault conductor zone*). Arriba modelos de resistividad con basamento a distintas profundidades (150m, 500m, 750m, inf.). Abajo pseudosecciones con resistividades aparentes y fase calculadas de los modelos. A la izquierda Pseudosecciones de resistividad aparente y fase medidas en el estudio MT.

Discusión

Relación entre la Falla de Pisagua y el Modelo de Resistividad.

La principal estructura de resistividad eléctrica del estudio MT relacionada con la Falla de Pisagua corresponde a la zona de conductora falla (FZC), la cual se extiende paralela al escarpe de la Falla Pisagua. El análisis de sensibilidad demuestra que la FZC no se detectaría más allá de los 750m de profundidad y que las variaciones de resistividad observadas bajo ésta no tienen mayor significado por su baja dependencia con las mediciones (impedancias MT).

La FZC sería indicadora de la ubicación de la zona de daño en el Intrusivo de Pisagua que se habría producido por el deslizamiento de la Falla. Esta correspondería al tramo permeable de la zona de daño, en donde el volumen de las fracturas admitiría el contenido hídrico aparentemente infiltrado desde de la briza marina (Camanchaca). La zona de daño efectiva que incluye también las fracturas de menor volumen debería tener mayor tamaño que la FZC detectada, tal como se reporta un estudio similar realizado en la Falla Oeste (Hoffman, 2004). De acuerdo con la ley de Archie, las menores resistividades de la FZC coincidirían con las rocas de mayor porosidad (fracturamiento) y/o contenido de arcilla, por lo que se propone que estas delimitarían los sectores sometidos a mayores esfuerzos y/o deformación durante el deslizamiento de la Falla.

En el modelo de resistividad, la FZC aparece bajo los 250m de profundidad de la superficie superior (lado Sur) del escarpe. Arriba y al Este de la FCZ se observan valores altos de resistividad eléctrica (>500 ohm-m), por lo que estos sectores no habrían sufrido daño considerable. La FZC aparece cubierta en el modelo de resistividad y sólo se podría accederse en superficie en la base del escarpe.

El clima seco del área de estudio ha preservado de la morfología del terreno (Allmendinger et al. 2005, Quezada et al. 2010, Carrizo et al. 2008) permitiendo que se pueda utilizar para investigar el deslizamiento de la Falla que lo habría originado. Usando el modelamiento estático a partir de la solución elástica de una falla rectangular (Okada, 1992), se determinaron soluciones de planos de falla y deslizamientos con diferente inclinación que pudieran reproducir la morfología de la superficie observada localmente. Para ello se utilizó como referencia la superficie del modelo digital de elevación ASTER con 30m de resolución (www.asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp). El desplazamiento y deformación producidos por la Falla se modelaron al interior del Intrusivo de Pisagua, el cual se caracterizó por un cuerpo homogéneo e isotrópico con módulo de Young 40 GPa y Razón de Poisson de 0.25. La formación del escarpe se consideró que se habría generado a partir del intrusivo de Pisagua detectado bajo los

sedimentos cuaternarios del bloque Norte, debido a que en la superficie superior del escarpe sólo se detecta el intrusivo de Pisagua. Los planos de falla y deslizamientos obtenidos se indican en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Planos de Falla y deslizamientos elásticos que reproducen la morfología del terreno alrededor del escarpe de Pisagua.

Geometría de la Falla				Posición extremo superior del plano de Falla		Deslizamiento ¹ (m)
Alto (Km)	Ancho (Km)	Inclinación (con la superficie)	Rumbo (NE)	Elevación (m.s.n.m)	Distancia (m. con respecto a N3)	
20	20	80°	65°	-100m	3025m	500m (inverso)
20	20	60°	65°	-150m	3235m	600m (inverso)
20	20	40°	65°	-220m	3535m	750m (inverso)
20	20	80°	65°	-100m	2950m	600m (normal)
20	20	60°	65°	-50m	2955m	650m (normal)
20	20	40°	65°	100m	3005m	750m (normal)

1: El deslizamiento sigue la inclinación del plano de Falla.

Para discriminar la orientación del plano de la Falla de Pisagua y su deslizamiento dentro de las soluciones obtenidas, se comparan sus deformaciones elásticas calculadas en el Intrusivo de Pisagua con la posición de la FZC del modelo de resistividad eléctrica. De acuerdo con la hipótesis propuesta, los valores mínimos de resistividad de la FZC deberían coincidir con los sectores sometidos a mayor deformación (y esfuerzo) producto del deslizamiento de la Falla.

En la Figura 4.51 se presenta la sección vertical N3 del modelo de resistividad, cuyo trazado en superficie atraviesa en la mitad la zona de estudio MT y correspondería al resultado con mejor resolución y cobertura de datos. Sobre esta sección se sobreponen líneas negras que describen el desplazamiento modelado para cada solución de plano de Falla en el Intrusivo de Pisagua. La deformación en la Figura es representada a través de la dilatancia (suma de la diagonal del tensor de deformación) y se muestra usando contornos de diferentes colores (azul, celeste, naranja y marrón) para los valores de 0.05, 0.1, 0.2 y 0.3 respectivamente. El plano de falla es destacado con una línea gruesa negra y su deslizamiento con línea roja.

El primer aspecto relevante obtenido al comparar el modelamiento elástico y el modelo de resistividad (FZC), es que en todas las soluciones encontradas, la FZC (~1000m) tiende a ubicarse inmediatamente por sobre el plano de Falla. Esto permitiría reafirmar que la actividad de la Falla de Pisagua sería la causante de la zona de daño de la FZC, ya que su ubicación coincide con las mayores deformaciones y esfuerzos predichas por el modelamiento estático, lo cual es un resultado independiente de la inclinación propuesta para el plano de Falla.

Las soluciones con Fallas normales de la Figura 4.51 orientan sus mayores deformaciones hacia el bloque Norte de la Falla de Pisagua, lo cual no coincide con la ubicación de la FZC y sus valores mínimos de resistividad eléctrica. Por otro lado, los resultados de estos fallamientos normales, predicen deformaciones importantes (>0.1) en el techo del escarpe en donde el Intrusivo de Pisagua aflora en superficie. En el modelo resistividad del estudio MT se observa que este sector presenta elevadas resistividades eléctricas (> 500 ohm-m), lo cual es indicador de bajo daño y no coincide con la predicción anterior.

En cambio, las soluciones usando Fallas inversas de la Figura 4.51 tienden a ubicar sus mayores deformaciones hacia el bloque Sur de la Falla de Pisagua y/o extendiéndose verticalmente hacia abajo. Las deformaciones que corresponden a los planos de Falla Inverso de 40° y 60° muestran la mejor coincidencia con la posición de la FZC y sus valores mínimos de resistividad eléctrica. También, el modelamiento de estas fallas inversas muestra que la deformación en superficie tiende a concentrarse en la base del escarpe (en su lado bajo) y, que en el techo del escarpe, está es considerablemente menor con respecto a los fallamientos normales. Esto dos resultados coinciden con las resistividades eléctricas observadas en el modelo MT en donde el techo del escarpe presenta alta resistividad (menor daño) y la base del escarpe baja resistividad (mayor daño).

Los resultados anteriores indican que en el sector estudiado de la Falla de Pisagua, la morfología del terreno (usando el modelamiento elástico) y los valores de resistividad eléctrica obtenidos con el estudio MT, sólo parecen ser explicables a través del deslizamiento de una Falla con orientación inversa. Al hacer coincidir los mínimos valores de resistividad de la FZC con las mayores deformaciones del modelo elástico, se sugiere que la Falla inversa se inclinaría entre 40° y 60° hacia Sur (con respecto a la superficie).

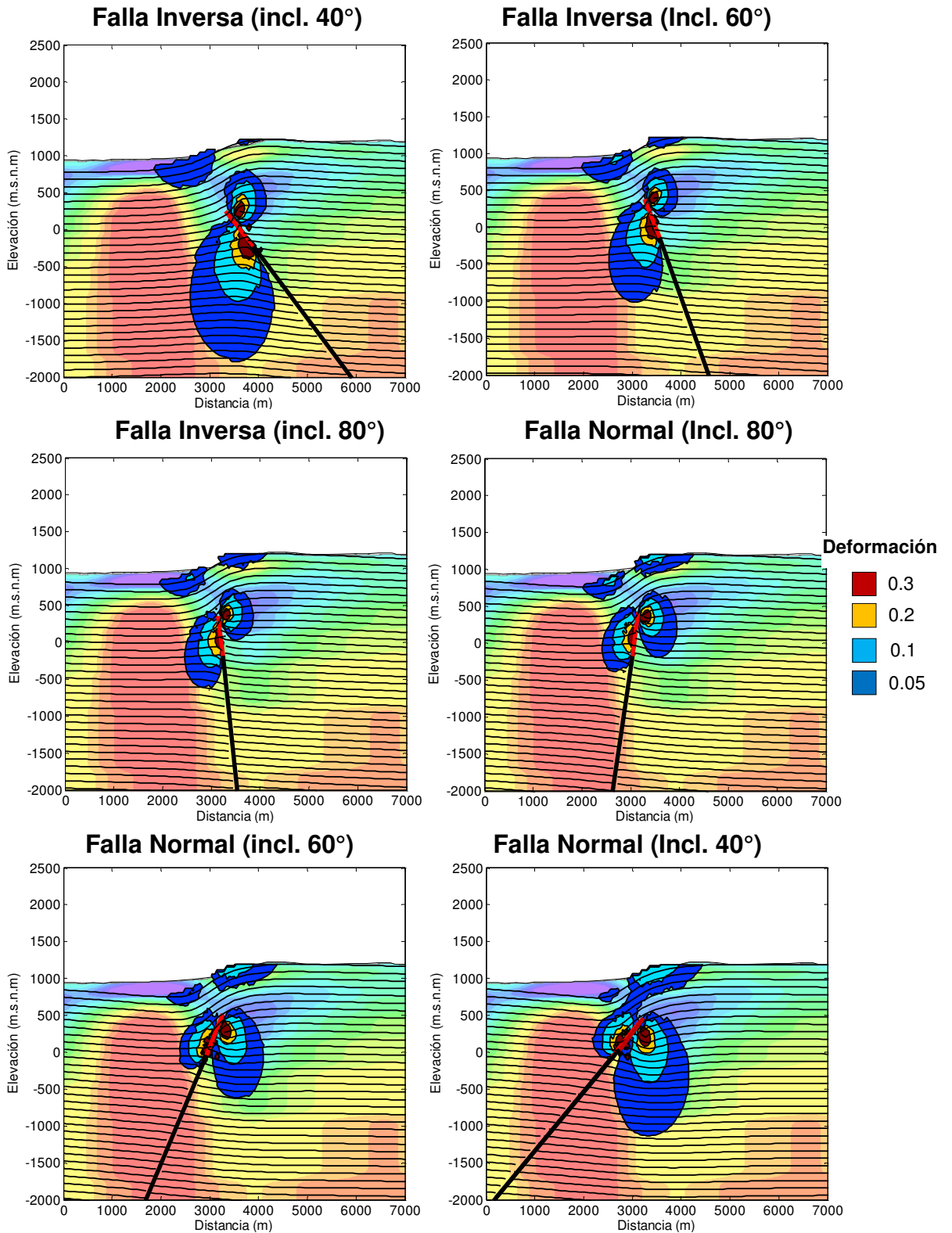


Figura 4.51 Deformación elástica generada por el deslizamiento de Fallas que reproducen el escarpe de Pisagua. Líneas negras continuas muestran el desplazamiento generado por la falla. En el fondo sección N3 de resistividad eléctrica (Figura 4.44)

CAPÍTULO 5:

CONCLUSIONES

1. Corrimiento Estático en Estudios 3D de Magnetotelúrica

El principal objetivo de este trabajo fue determinar una metodología para corregir el corrimiento estático (SS) en los datos del método magnetotelúrico (MT) y que fuera adecuada para su modelamiento tridimensional. Esta metodología consiste en utilizar el modelamiento del SS con la representación de la Matriz Completa de Distorsión (MCD), la cual estima y corrige el efecto del SS como parte del proceso de inversión de los datos MT que determina el modelo tridimensional de resistividades eléctrica del subsuelo. Este método es aplicado directamente sobre los tensores de impedancias medidos en estaciones MT utilizando una modificación, desarrollada de este trabajo, del código de inversión 3D para magnetotelúrica WSINV3DMT (Siripunvaraporn et al., 2009).

Las principal ventaja del método MCD es que permite lograr un mejor ajuste entre los datos medidos y las respuestas calculadas del modelo invertido, lo cual se ve reflejado tanto en los resultados sintéticos y como los del estudio MT 3D de la Falla de Pisagua presentados en este trabajo. Cabe notar, que el mejor ajuste se debería a la capacidad de modelar adecuadamente los elementos diagonales (Z_{xx} y Z_{yy}) de los tensores de impedancia MT distorsionados con SS. Otra ventaja importante, es que en general este método podría ser aplicado utilizando solamente los datos MT (tensores de impedancia completos) sin necesidad de medir otros métodos adicionales como sucede con el MT/TDEM (calibración de datos MT con TDEM). La principal desventaja del método MCD es que requiere asumir que la resistividad aparente promedio de los datos no sea modificada por el corrimiento estático.

Respecto a las otras metodologías evaluadas para la corrección del SS, también se puede concluir con respecto a sus ventajas y desventajas. Estos métodos fueron el MT/TDEM y modelamiento corrimiento estático usando representación de *Sasaki*.

La principal ventaja del método MT/TDEM es que puede medir empíricamente el efecto del corrimiento estático, pudiendo detectar distorsiones que no necesariamente serían observables por los métodos de modelamiento (*Sasaki* y MCD). Sus mayores limitaciones son que requiere que la distribución de resistividad superficial del subsuelo sea 1D (modelo de capas) y que sólo puede remover adecuadamente el SS en la antidiagonal del tensor de impedancia MT. Debido a esto, este método sólo puede

corregir parcialmente el efecto del SS en datos MT provenientes de una distribución de resistividad 3D del subsuelo.

El método de *Sasaki* permite obtener modelos de resistividad, a partir de los datos MT, muy similares a los conseguidos con el método MCD. Sin embargo, el método de *Sasaki* obtiene un ajuste más pobre para las fases de las impedancias diagonales (Z_{xx} y Z_{yy}) del tensor de impedancia entre sus respuestas y los datos MT observados.

2. Características Geométricas de la Falla de Pisagua.

Los resultados del estudio MT Pisagua permiten reconstruir un modelo 3D de resistividad eléctrica del subsuelo que permite investigar la geometría de la Falla de Pisagua.

En este modelo se detecta una estructura de baja resistividad (entre 50 a 100 Ohm-m) que se ubica bajo la superficie superior del escarpe de la Falla de Pisagua y que se extiende paralela a éste (N65E°).

Esta estructura se interpreta como una zona conductora de Falla (FZC) la cual indicaría la ubicación de los sectores con mayor daño en el basamento (Intrusivo de Pisagua) producto de la actividad de la Falla.

La zona de daño y la morfología del terreno se analizan en conjunto simulando las deformaciones elásticas producidas por Fallas rectangulares con distintas geometrías (Okada, 1992). Como resultado se obtiene, que sólo una Falla con orientación inversa e inclinaciones entre 40° a 60° puede explicar la morfología del terreno de la zona de estudio y la zona de daño observada con el MT.

A partir de esto se concluye, que la Falla de Pisagua seguiría una orientación inversa con una inclinación hacia el Sur entre 40° a 60°.

Bibliografía.

- Allmendinger E., González G., Yu J., Hoke G., Isacks B., Trench-parallel shortening in the Northern Chilean Forearc: Tectonic and climatic implications, GSA Bulletin, January/February 2005
- Archie G. E., The electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics, Petroleum Transactions, AIME, 146, 64-62, 1942.
- Avdeeva A., Three Dimensional Magnetotelluric Inversion, National University of Irland, PhD Thesis, 2008.
- Bedrosiana P.A., Unsworth M. J. , Egbert G.D. , Thurberd C.H., Geophysical images of the creeping segment of the San Andreas fault: implications for the role of crustal fluids in the earthquake process, Elsevier Tectonophysics 385, 137 – 158, 2004.
- Becken M. , Ritter O. , Magnetotelluric Studies at the San Andreas Fault Zone: Implications for the Role of Fluids . Surveys in Geophysics, 33 (1), p. 65-105, 2012.
- Cagniard, L., Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting, Geophysics, 18, 605-635, 1953
- Caldwell T. G., Bibby H., et al. The magnetotelluric phase tensor. Geophysical Journal Int., 158, 457-469, 2004.
- Carrizo D., Gonzales G., Dunai Tibor, Constricción neógena en la Cordillera de la Costa, norte de Chile: neotectónica y datación de superficies con ²¹Ne cosmogónico, Revista Geológica de Chile 35, 1-38. Enero, 2008.
- Chave A. & Smith J., On electric and magnetic galvanic distortion tensor decomposition, Journal of Geophysical Research, Vol. 99, 4669-4682, 1994.
- Chave A. & Jones A., The Magnetotelluric Method: Theory and Practice, Cambridge University Press, 2013.
- Comte, D., Ruiz, J., Carrizo, D., Roecker, S. W., Rodzianko, A., Mw=8.2 Pisagua, Northern Chile Foreshocks: Not Limited to the Interplate Contact, AGU Fall Meeting 2014, #S31D-4461, 2014

- Cumming W., Geophysical exploration for geothermal resources: an application for combined MT-TDEM, Unocal Geothermal of Indonesia, 2000.
- Cumming W. & Mackie R., Resistivity Imaging of Geothermal Resources Using 1D, 2D and 3D MT Inversion and TDEM Static Shift Correction Illustrated by a Glass Mountain Case History, Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 2010.
- Desclores M. et al., Improvement in TDEM sounding interpretation in presence of induced polarization. A case study in resistive rocks of the Fogo volcano, Cape Verde Islands, Journal of Applied Geophysics 45 1-18, 2000.
- Groom R. & Bailey R., Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three dimensional galvanic distortion. Journal Geophysical Res., 94, 1913-1925, 1989.
- Groom R. & Bahr K., Corrections for near surface effects: decomposition of the magnetotelluric impedance tensor and scaling corrections for regional resistivities: a tutorial, surveys in geophysics 13: 341-379, 1992.
- Groot-Hedlin C., Removal of static shift in two dimensions by regularized inversion, December 1991 GEOPHYSICSp., 2102-2106.
- Hoffman-Rothe Arne, Combined structural and magnetotelluric investigation across West Fault Zone in northern Chile, PhD Thesis, Postdam, 2002.
- Irabaruta Constantin, Joint 1-D Inversion of Tem and Mt resistivity data, Comparison with Mineral Alteration and Temperature in Drillholes – Case Study: Krýsuvík Area, Sw-Iceland, Geothermal Training Programme United Nations University, Report 2010 nro. 15.
- Farquharson, C.G., Oldenburg, D. W. Haber E. & Shekhtman, R. An algorithm for the three-dimensional inversion of magnetotelluric data. SEG int'l Exposition and 72nd Annual Meeting, Salt Lake City, Utah, 2002.
- Flis M., IP effects in 3-d tem data—theory and case histories, 5th asege conference, 1987.
- Jones A., Three-dimensional galvanic distortion of three-dimensional regional conductivity structures: Comment on “Three-dimensional joint inversion for magnetotelluric resistivity and static shift distributions in complex media” by

Yutaka Sasaki and Max A. Meju', *Journal of Geophysical Research*, vol. 116, 2011

- Kiyon D., Jones A., Vozar J., The inability of magnetotelluric off-diagonal impedance tensor elements to sense oblique conductors in three-dimensional inversion, *Geophysical Journal International*, 196, 1351–1364, 2014.
- Knútur Árnason, The Magneto-Telluric static shift problem. Tech. rep., Iceland, Geosurvey, ÍSOR-08088, 2008.
- Knútur Árnason, State of the art technologies in Iceland, geophysical exploration of the Hengill area SW Iceland, 2010
- Knútur Árnason, , Hjálmar Eysteinnsson, Gylfi Páll Hersir, Joint 1D inversion of TEM and MT data and 3D inversion of MT data in the Hengill area, SW Iceland, Elsevier, *Geothermics*, Volume 39, Issue 1, marzo 2010.
- Lezaeta P., Distortion Analysis and 3-D Modeling of Magnetotelluric Data in the Southern Central Andes, PhD Thesis, Berlin University, 2001.
- Mackie R., Madden T. y Wannamaker P., Three dimensional magnetotelluric modeling using difference equations- Theory and comparisons to integral equation solutions, *Geophysics*, vol. 58, no. 2, p. 215-226, 1993.
- Mackie, R. L., Smith, J. T. ,& Madden, T. R., Three dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: The magnetotelluric example. *Radio Science*, 29, 923-935, 1994.
- Marti A., Queralt P., Ledo J., WALDIM: A code for the dimensionality analysis of magnetotelluric data using the rotational invariants of the magnetotelluric tensor, *Computers & Geosciences*, 35, 2295–2303, 2009
- Miensopust M., Queralt P., Jones A., Magnetotelluric 3-D inversion—a review of two successful workshops on forward and inversion code testing and comparison, *Geophysical Journal International*, Volume 193, Issue 3, p.1216-1238, 2013.
- Miller, S.A., Fluid-mediated influence of adjacent thrusting on the seismic cycle at Parkfield, *Nature*, 382, 799-802, 1996.
- Okada Y., Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040, 2012.

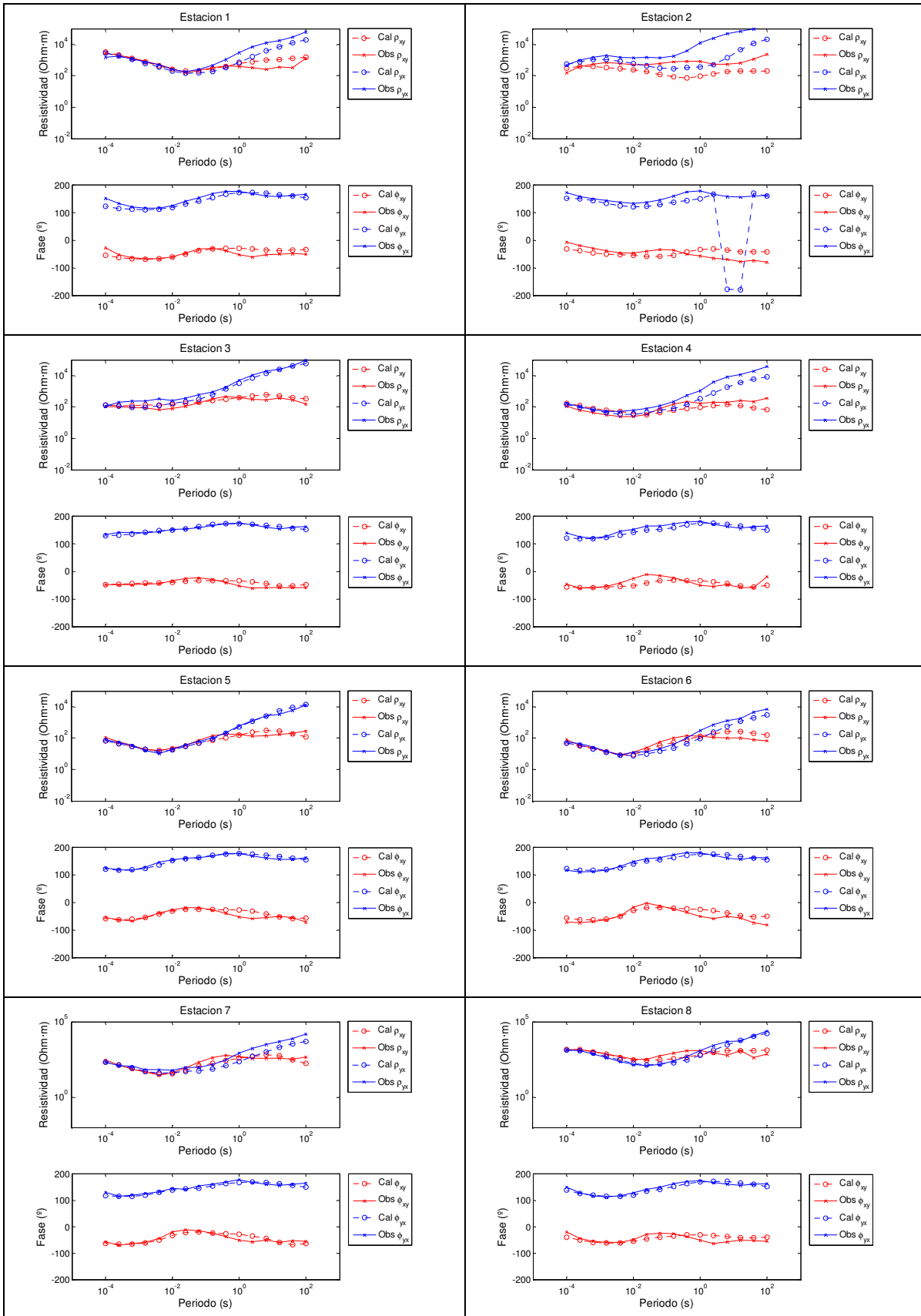
- Oritaglio M., Spies R., Three Dimensional Electromagnetics, Jun 2000.
- Pellegrin L. & Hohmann G., Transient electromagnetic inversion: A remedy for magnetotelluric static shifts, geophysics VOL. 55. NO. 9, 1990
- Quezada J., Gonzales G., Casanueva Y., Interacción entre procesos erosivos, clima y alzamiento tectónico en la configuración del relieve del borde costero del Norte de Chile, X Congreso Geológico Chileno, 2003
- Quezada J., Fenómenos climáticos anómalos en el litoral del Norte de Chile y su impacto en el relieve, XI Congreso Geológico Chileno, 2006.
- Quezada J., Cerda J., Jensen A., Efectos de la tectónica y el clima en la configuración morfológica del relieve costero del norte de Chile, Andean Geology 37 (1): 78-109, 2010.
- Rikitake, T., 1948. 1. Notes on electromagnetic induction within the Earth. Bull. Earthquake Res. Inst., 24, 1-9.
- Ritter O., Hoffmann-Rothe A., Bedrosian P., Weckmann U., Haak V., Electrical conductivity images of active and fossil fault zones. In: Bruhn D, Burlini L (eds) In high-strain zones: structure and physical properties, vol 245. Geological Society of London Special Publications, pp 165–186, 2005.
- Rousseeuw, P.J., Least median of squares regression, Journal of the American Statistical Association, 79, 871-880, 1984.
- Rousseeuw, P. J, L. A.M. Robust Regression and Outlier Detection, Wiley, 1987.
- Sasaki, Y. Three- dimensional inversion of static shifted magnetotelluric data. Earth Planet Space, 56(2), 239-248, 2004.
- Siripunvaraporn W, Egbert G. An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data. Geophysics 65(3):791-803, 2000.
- Siripunvaraporn W. et al, Three-dimensional magnetotelluric inversion: data-space method, Physics of the Earth and Planetary Interiors 150 3–14, 2005.
- Siripunvaraporn W, Egbert G. Data space conjugate gradient inversion for 2-D magnetotelluric data. Geophysical J Int Sep 170(3):986-94, 2007.

- Siripunvaraporn W, An efficient data space conjugate gradient Occam's method for three-dimensional magnetotelluric inversion. *Geophysics Journal Int* Aug, 2011.
- Siripunvaraporn W, Three-dimensional magnetotelluric inversion: An introductory guide for developers and users. *Survey Geophysics* 33, 2012.
- Sasaki, Y. & M. A. Meju (2006). Three dimensional joint inversion for magnetotelluric resistivity and static shift distribution in complex media, *J. geophys. Res. – Solid Earth*, 111 (B5) 11, 2006
- Silva L., Antecedentes Estratigráficos del Jurásico y Estructurales de la Cordillera de la Costa en el Norte Grande de Chile, Primer Congreso Geológico Chileno, 1976.
- Silva L., Carta Geológica de Chile 1:10000 – Hojas Pisagua y Zapigua, Provincia de Iquique – Tarapaca, Sernageomin, 1977.
- Stenberg S., Discussion on: "Removal of static shift in two dimensions by regularized inversion", *GEOPHYSICS*, 1991.
- Swift C. M., A Magnetotelluric Investigation of an Electrical Conductivity Anomaly in the Southwestern United States, *Geology and Geophysics*, Ph.D. Thesis Massachusetts Institut of Technology, Cambridge, 1967.
- Smith R. & West G., Inductive interaction between polarizable conductors: An explanation of a negative coincident-loop transient electromagnetic response, *GEOPHYSICS*. VOL. 53, NO. 5, 1988.
- Soyer et al., Statics in Magnetotellurics - Shift or Model?, 70th EAGE Conference & Exhibition — Rome, Italy, 9 - 12 June 2008
- Tani M. et al, Influence of static effects on 3D magnetotelluric inversion, Extended Abstract, 21st EM Induction Workshop, Darwin, Australia, July 25-31, 2012.
- Tank Bulent S., Fault Zone conductors in Northwest Turkey inferred from audio frequency magnetotellurics, *Earth Planets Space*, 64, 729-742, 2012.
- Tikhonov, A.N. On determining electrical characteristics of the deep layers of the Earth's crust, *Doklady*, 73, 295-297. 1950.

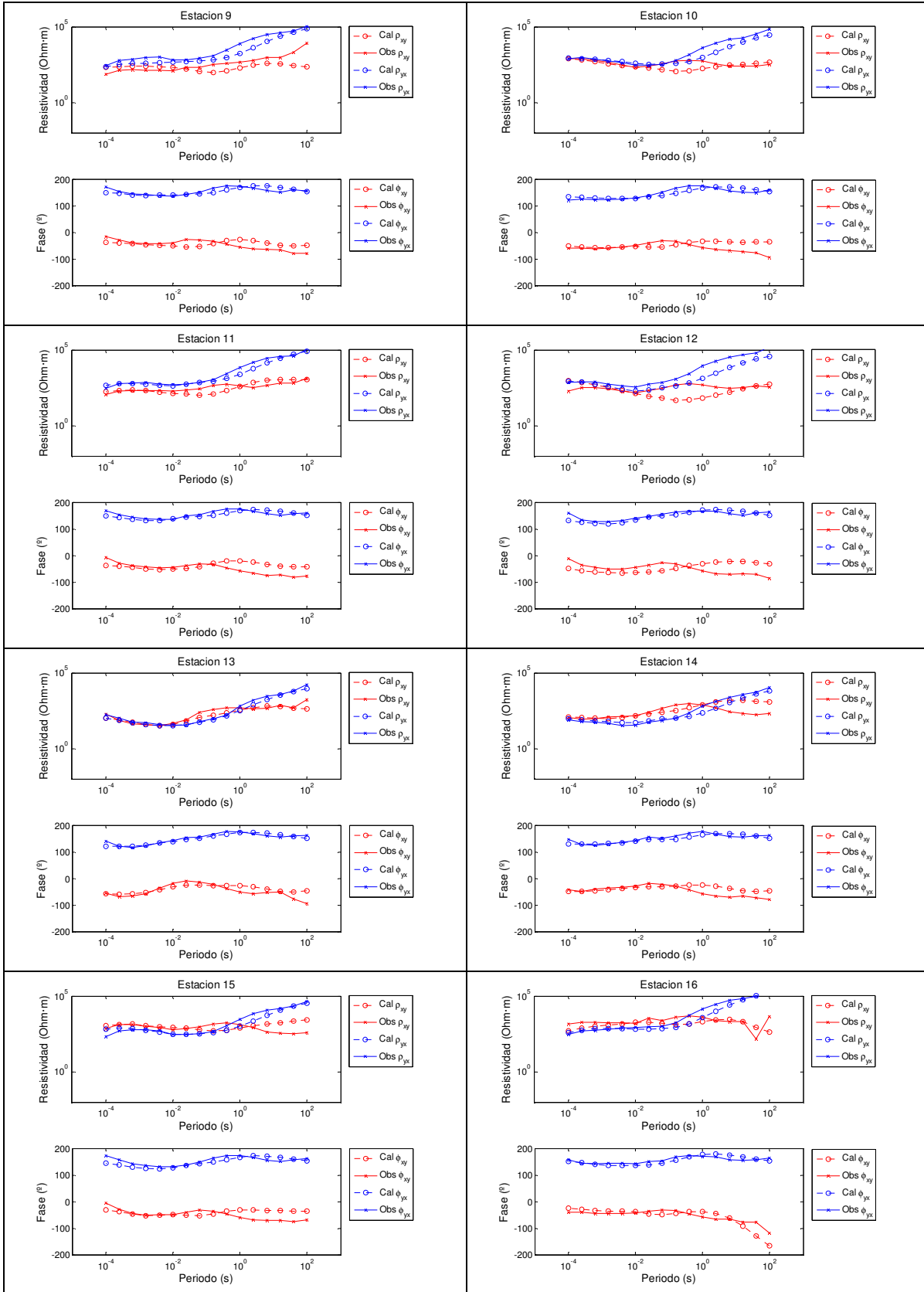
- Unsworth, M., Malin P., Egbert G., and Booker J., Internal structure of the San Andreas fault at Parkfield, California, *Geology*, 25 (4), 359-362, 1997.
- Unsworth M., Booker J., Electromagnetic imaging of fluids in the San Andreas Fault, Geophysics Program, University of Washington ,1434-HQ-97-GR-03157, 1998.
- Unsworth M.J., Bedrosian P., Eisel M., Egbert G., Siripunvaraporn W., Along strike variations in the electrical structure of the San Andreas fault at Parkfield, California. *Geophys. Res. Lett.* 27, 3021 – 3024, 2000
- Urzua L., Powell T., Cumming W., Apacheta, a New Geothermal Prospect in Northern Chile, Geothermal Resources Council, 2002.
- Valenzuela Victoria, Tectónica Activa del Margen Costero en la Laguna Sísmica del Norte de Chile, Tesis de Grado, Departamento de Geología, Universidad de Chile, 2015.
- Vega M., Pueyo J. J., Chong G., Asociaciones minerales y evolución paragénica de los yacimientos de nitrato y yodo de la zona de Zapiga-Dolores (I región de Tarapaca), VIII Congreso Geológico Chileno, 1997.
- Wait. J, Transient Electromagnetic Propagation in a Conducting Medium, *Geophysics* (1951), 16(2), 2013
- Ward S., Hohmann G., Electromagnetic Theory for Geophysical Applications, in M. N. Nabighian, eds., *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Society of Exploration Geophysicists*, 1988,
- Watts, M. D., Mackie, R., Scholl, C., and S. Hallinan, Limitations of MT static shift corrections using time-domain EM data, SEG Houston annual meeting, 2013.
- Weaver J. T., Agarwal A. K., et al., Characterization of the magnetotelluric tensor in terms of its invariants, *Geophysical Journal Intl*, 141, 321-336, 2000.
- Winsauer W. O, McCardell W. M., Ionic Double Layer Conductivity in Reservoir Rock, *Petroleum Transactions, AIME*, 198, 129-134, 1953.
- Zonge K., Hughes L., The Effect of Electrode Contact Resistance On Electric Field Measurements, 55th Annual SEG Convention, Washington, D.C. October 6-10, 1985

ANEXO I:
**RESPUESTAS MODELADAS DE MODELO INVERTIDO
CON WSINV3DMT SIN CORRECCIÓN DEL
CORRIMIENTO ESTÁTICO**

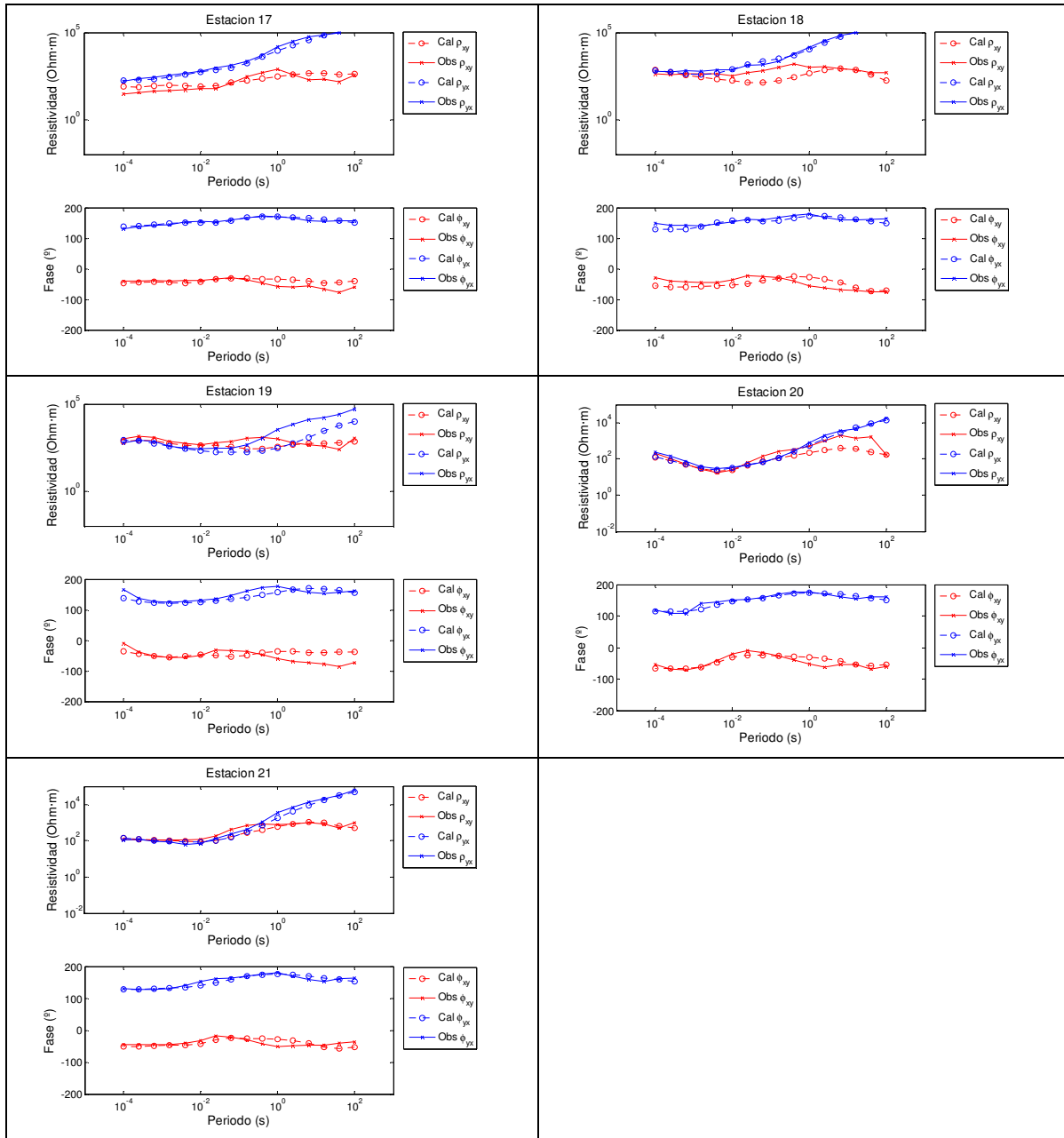
CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO



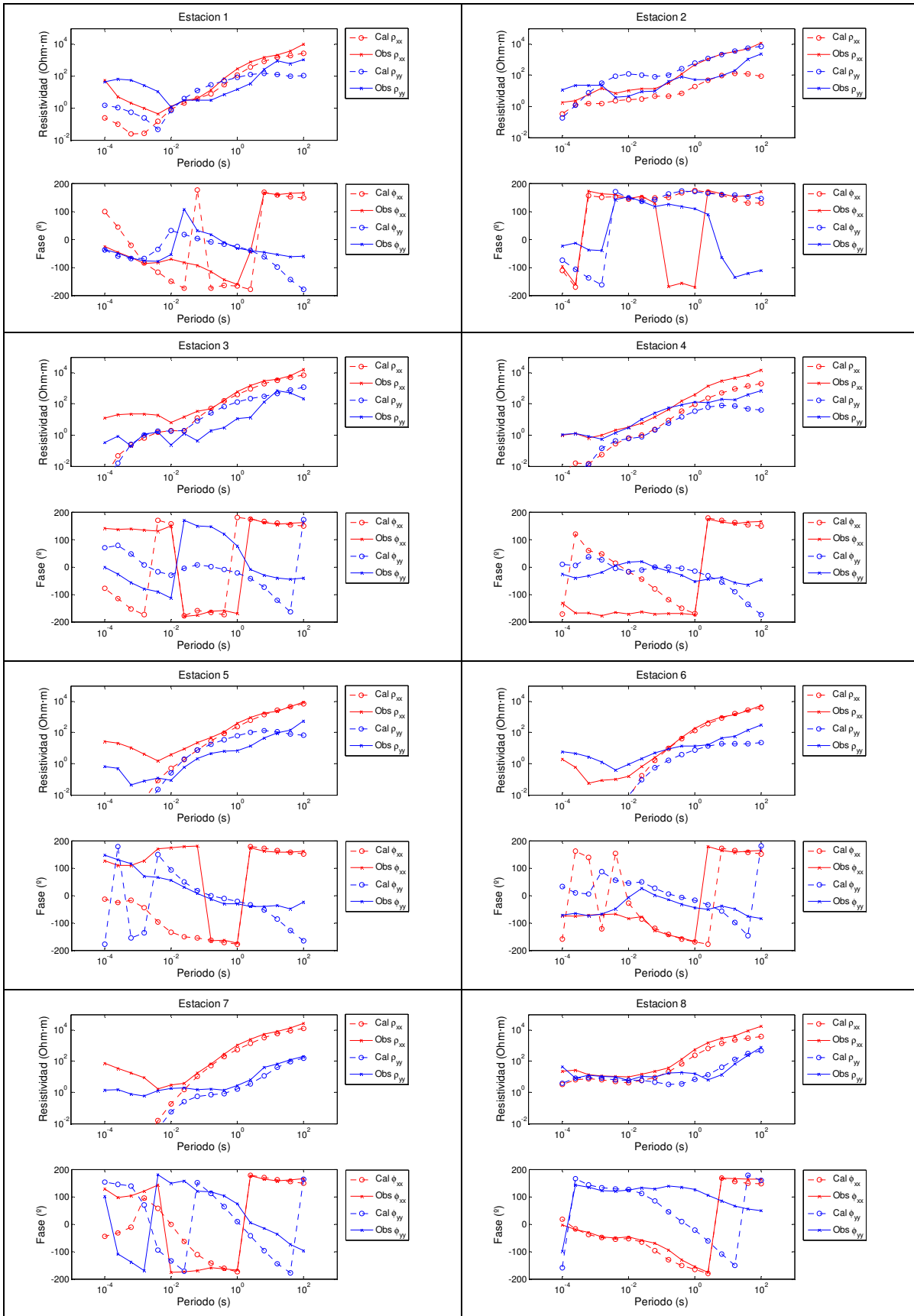
CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO



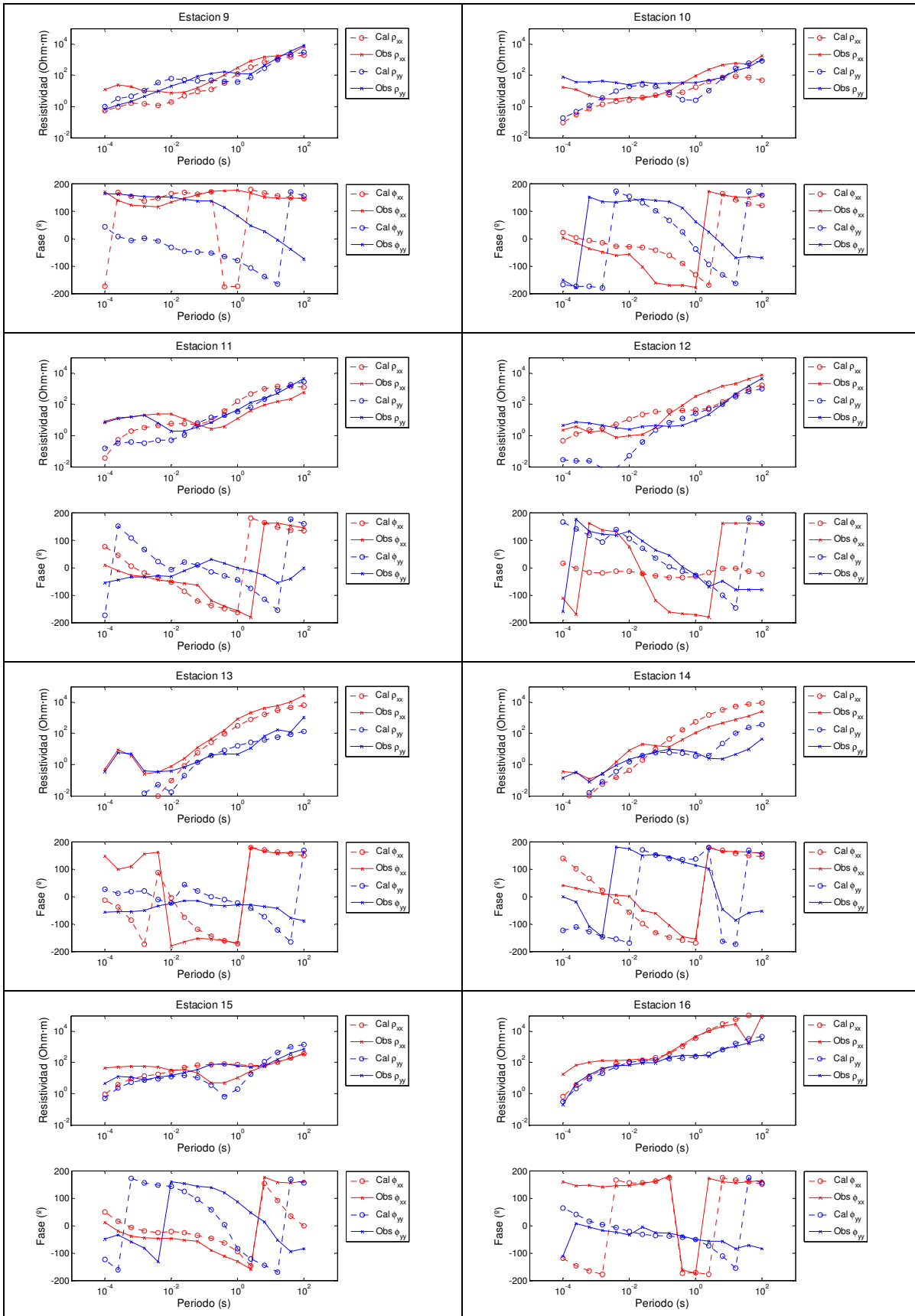
CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO



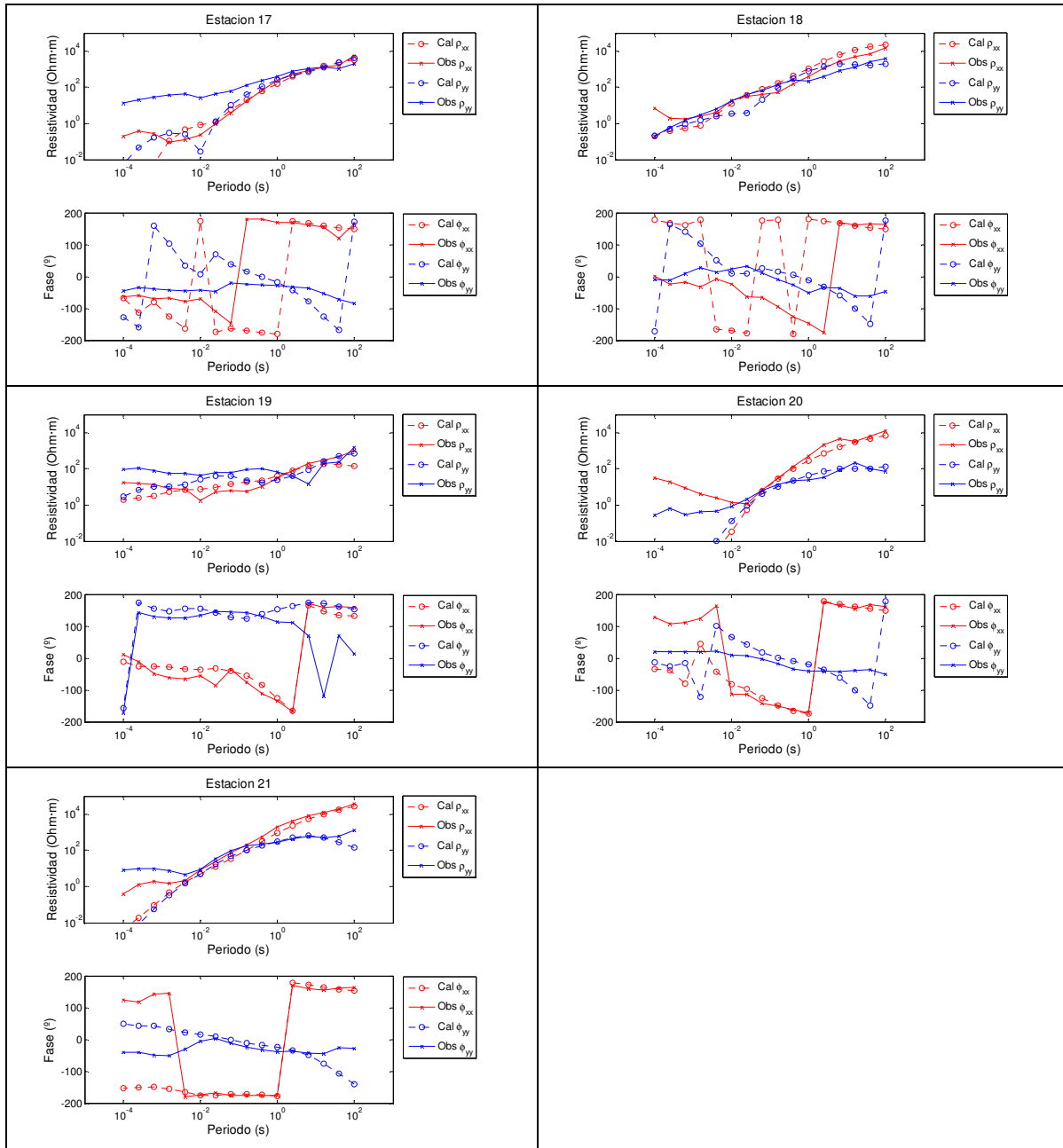
CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO



CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

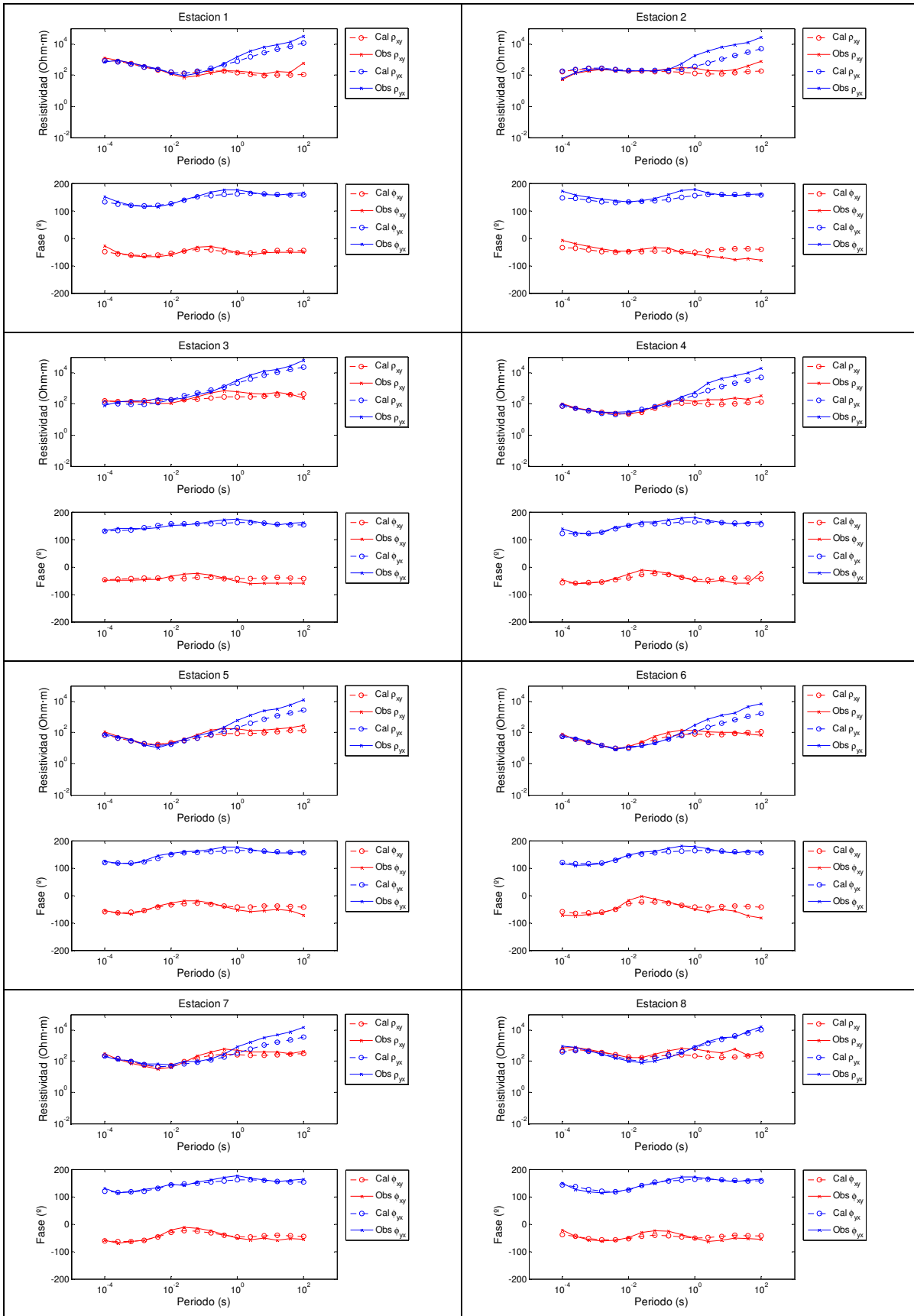


CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

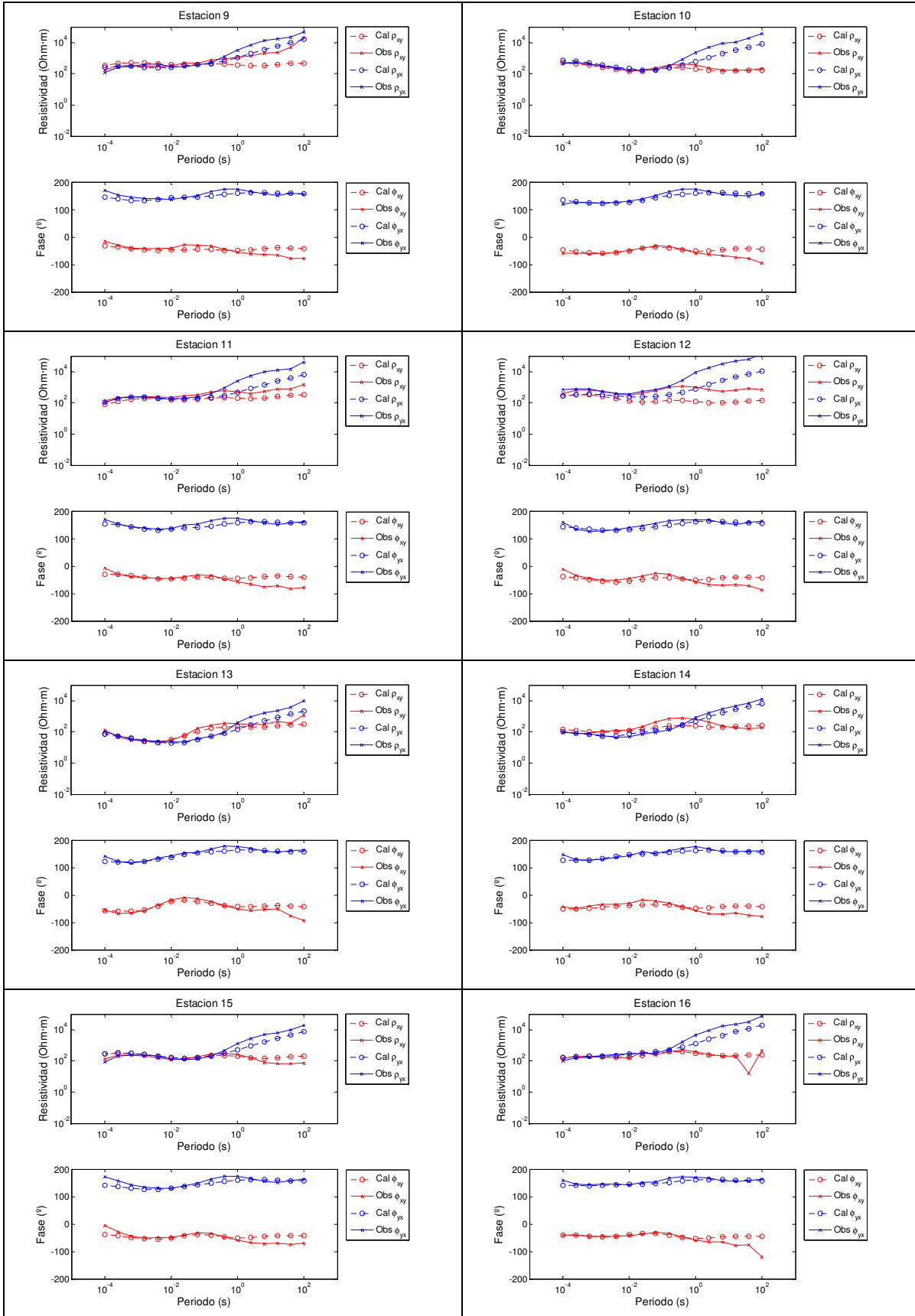


ANEXO II:
RESPUESTAS MODELADAS DEL MODELO INVERTIDO
CON WSINV3DMT USANDO MT/ TDEM

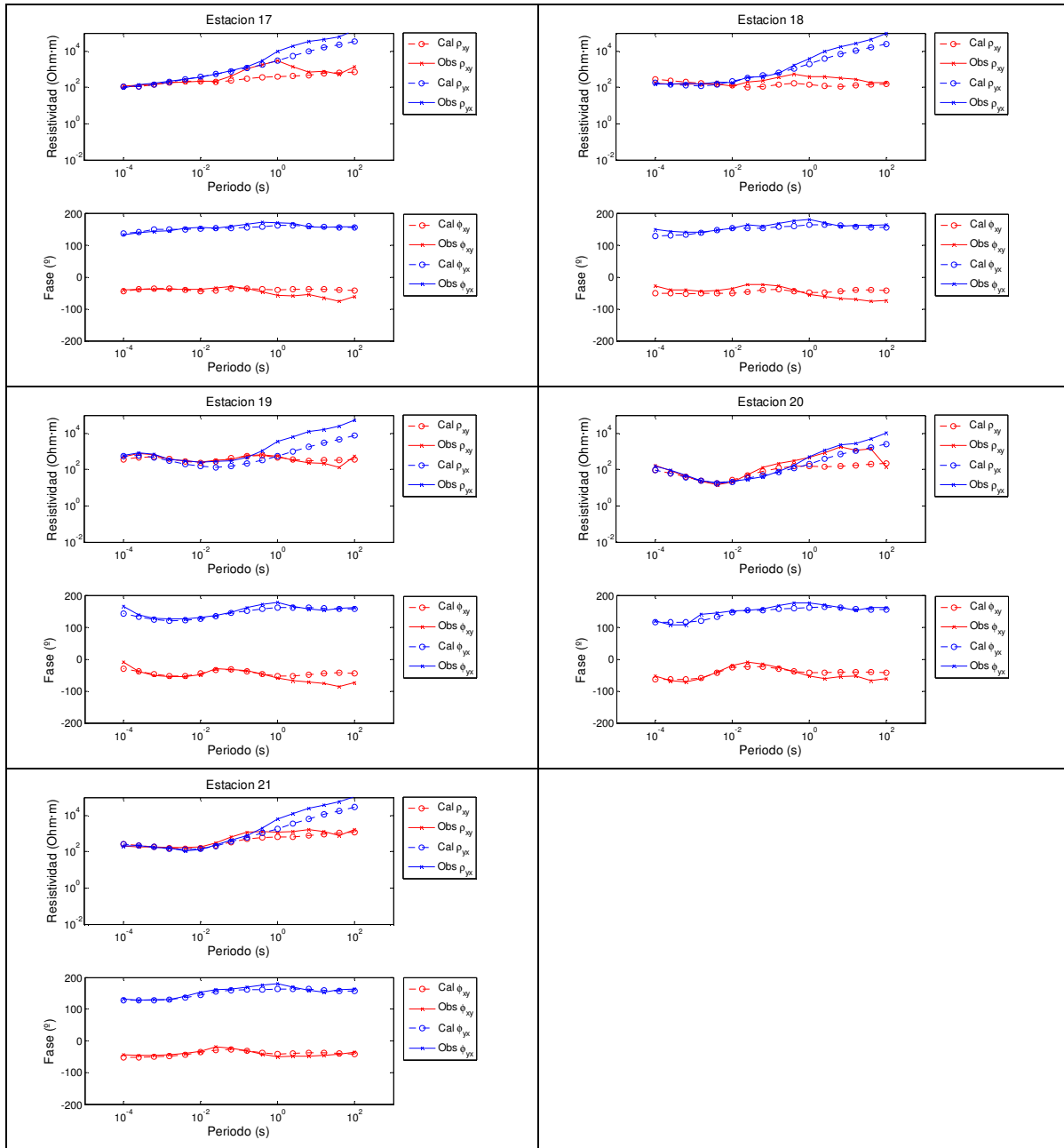
CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO



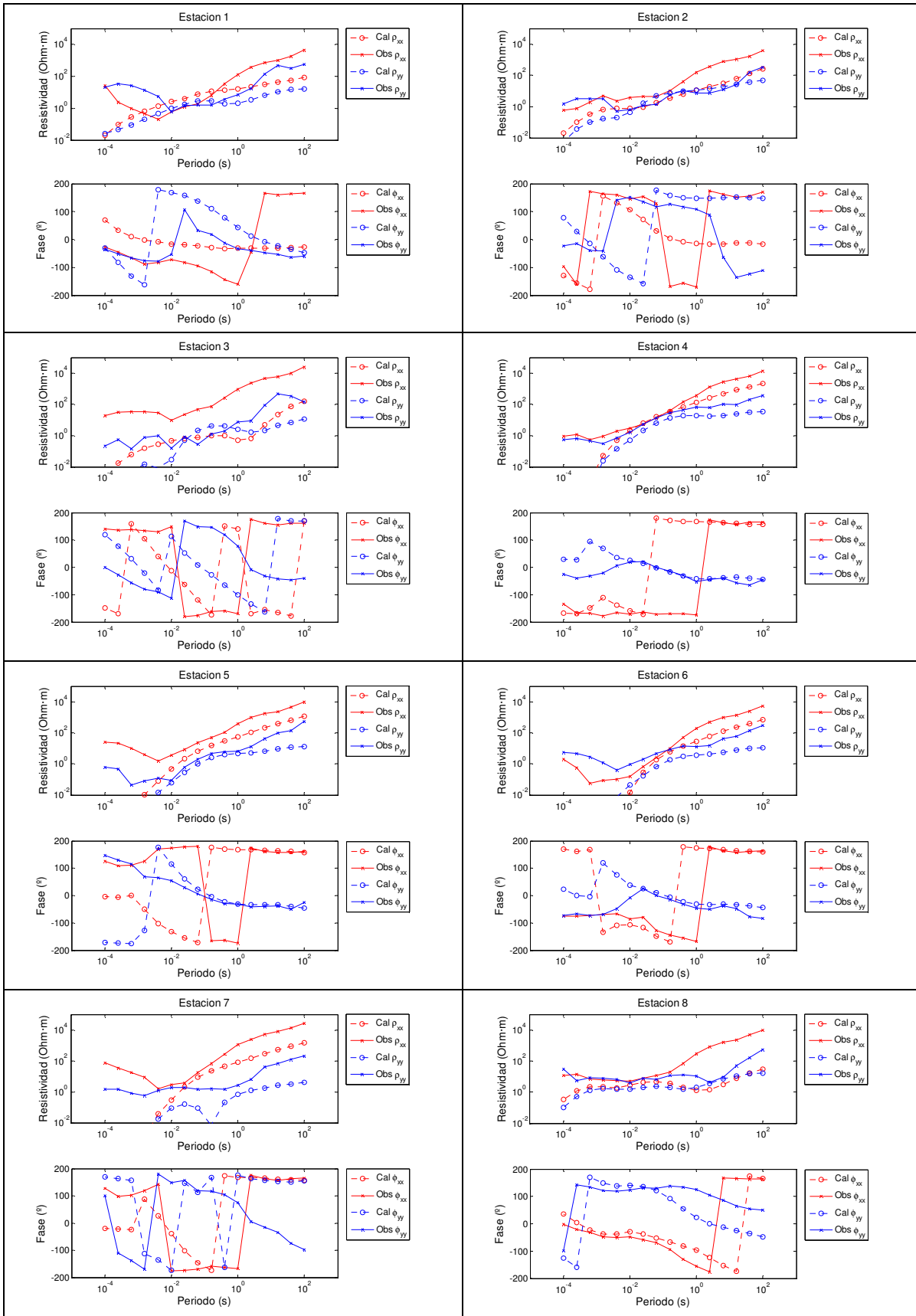
CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO



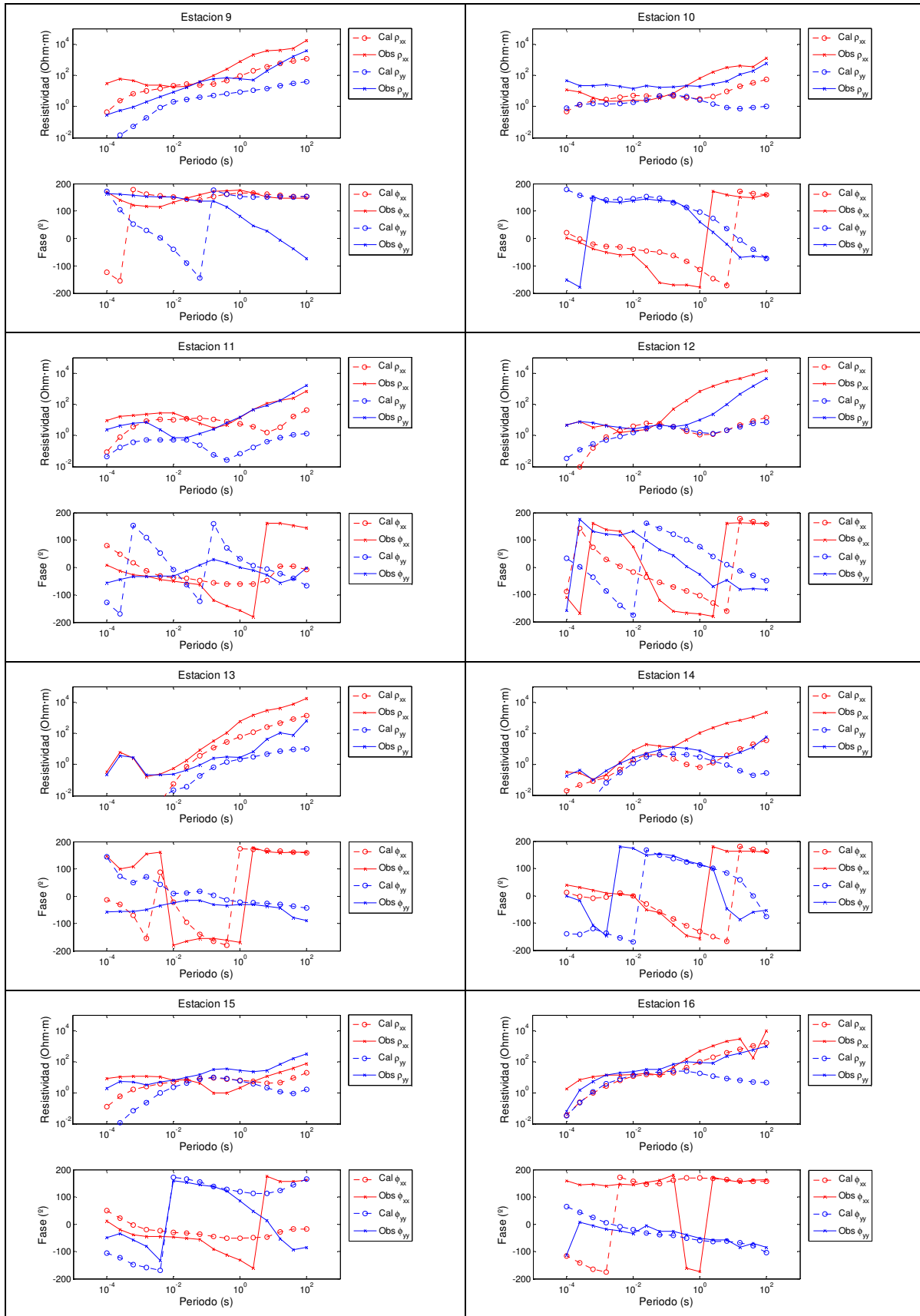
CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO



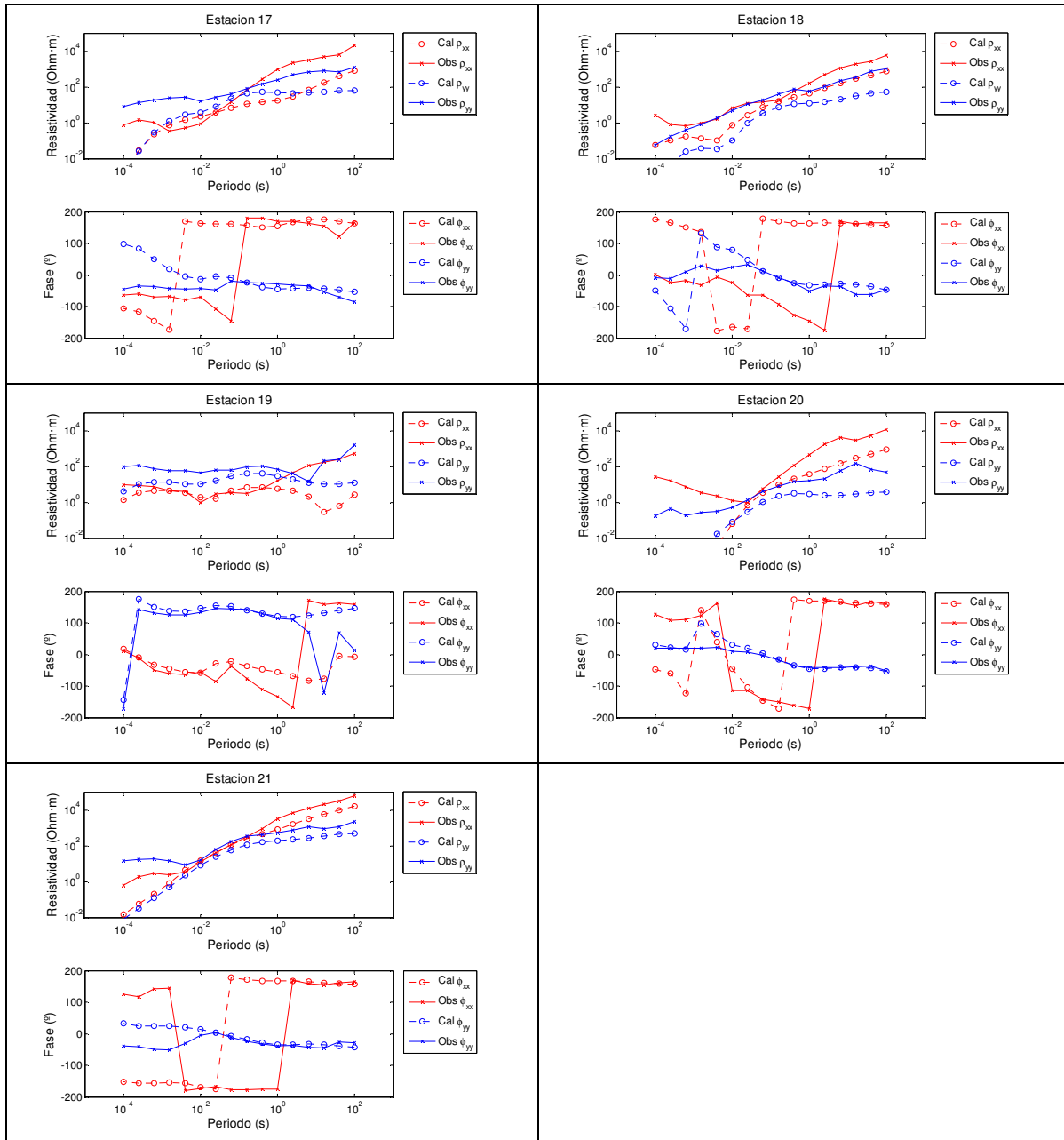
CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO



CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

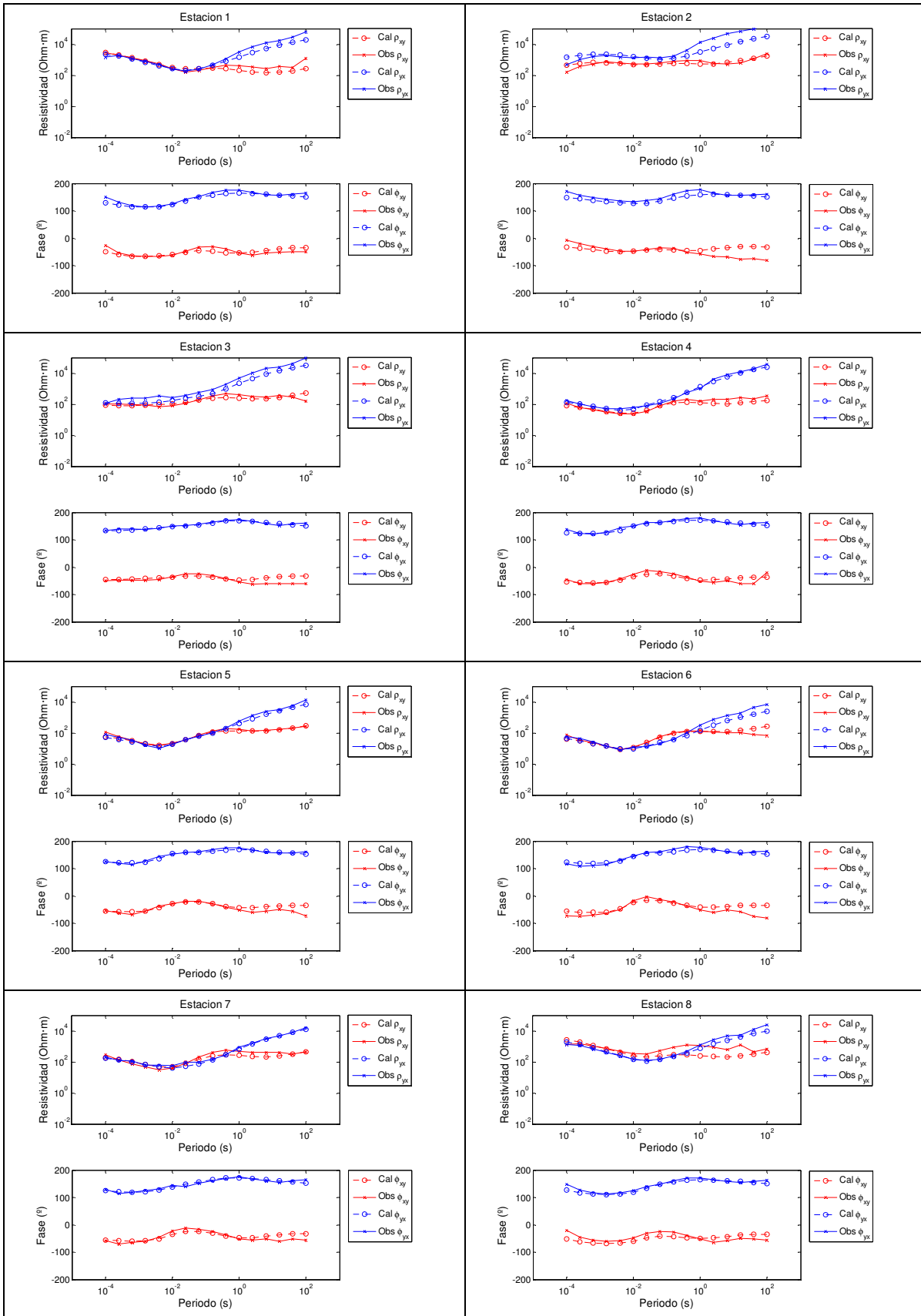


CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

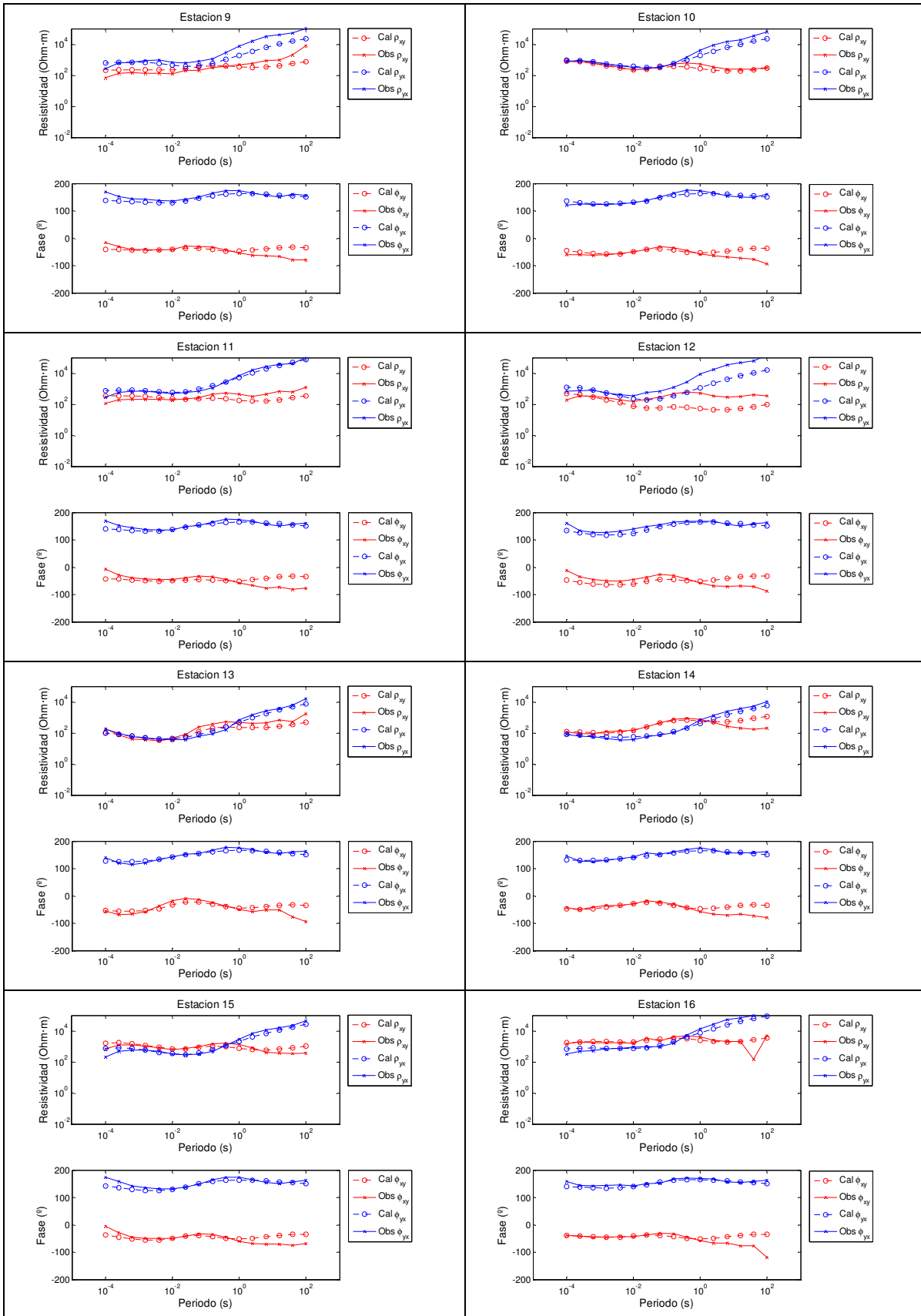


ANEXO III:
**RESPUESTAS MODELADAS DE MODELO INVERTIDO
CON WSINV3DMT CON CORRECCIÓN DEL
CORRIMIENTO ESTÁTICO (SASAKI, 2004)**

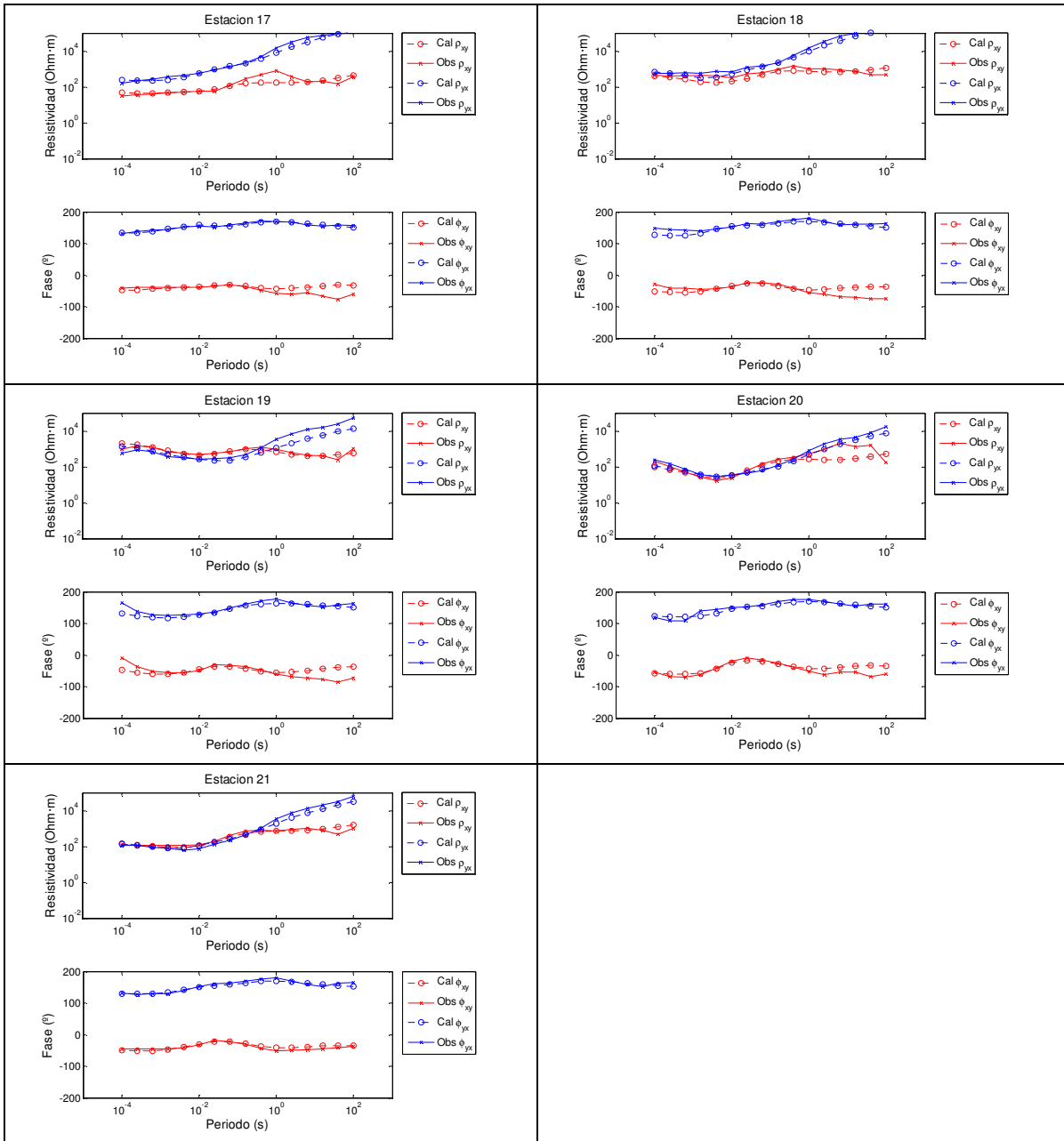
CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO



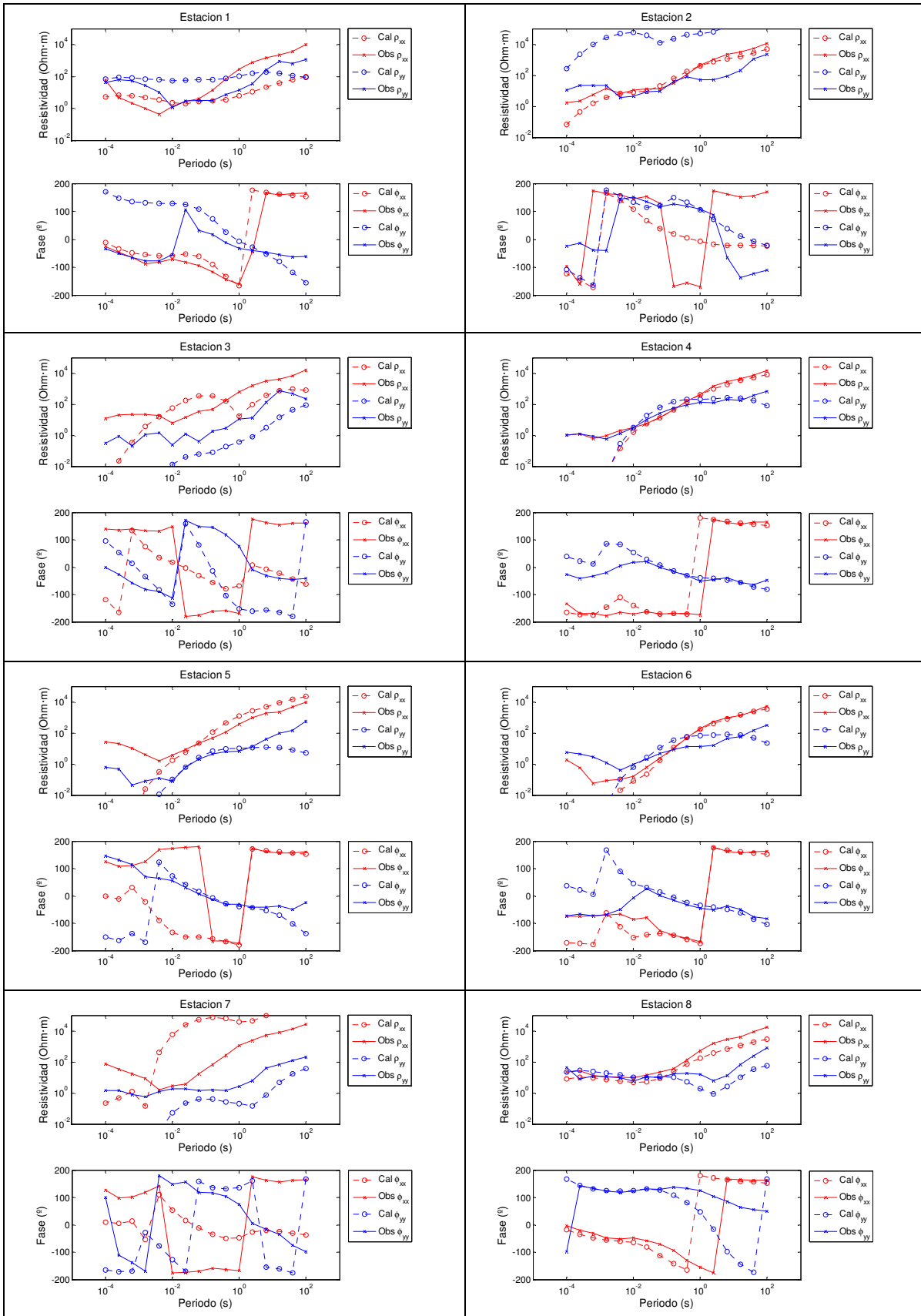
CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO



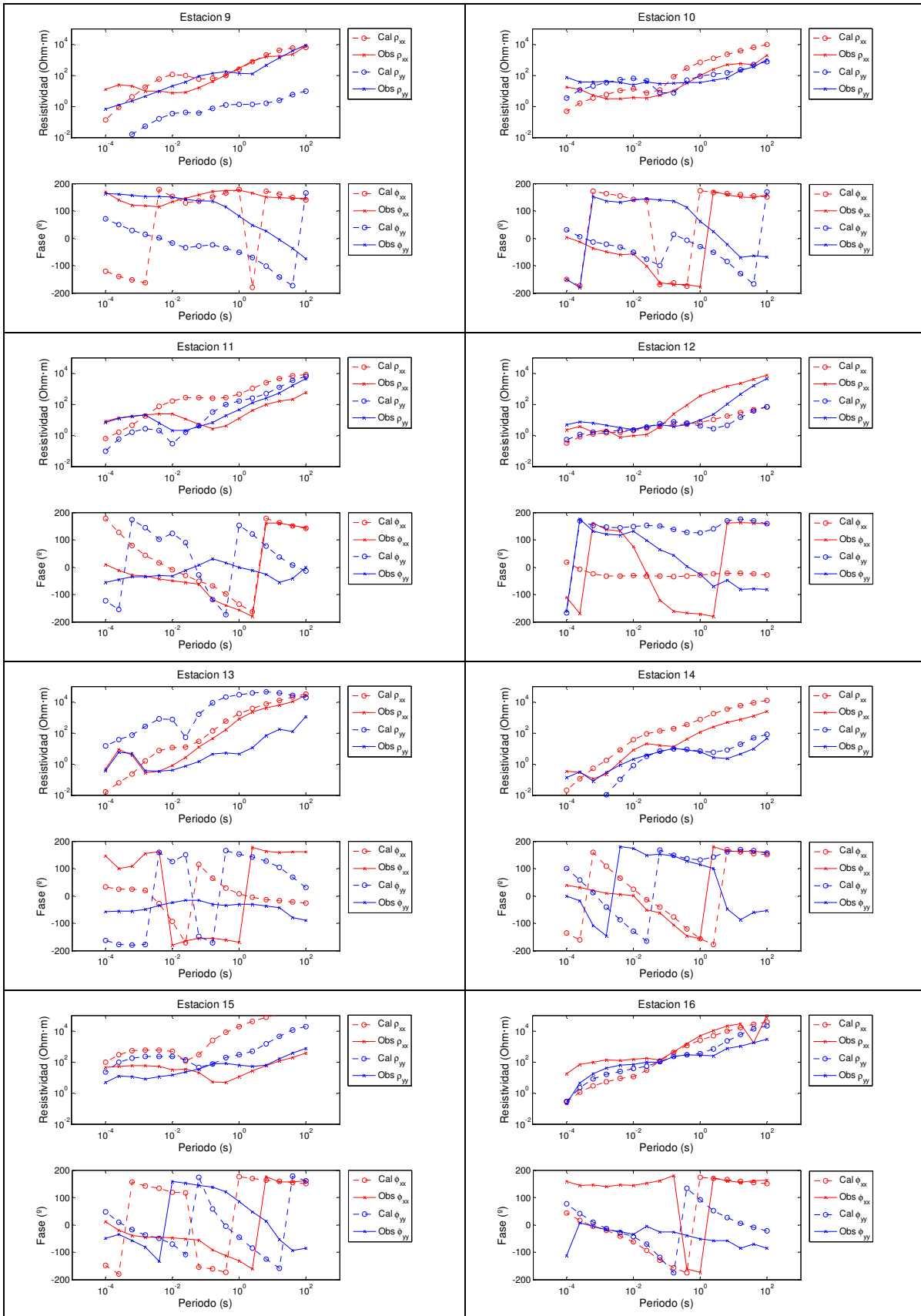
CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO



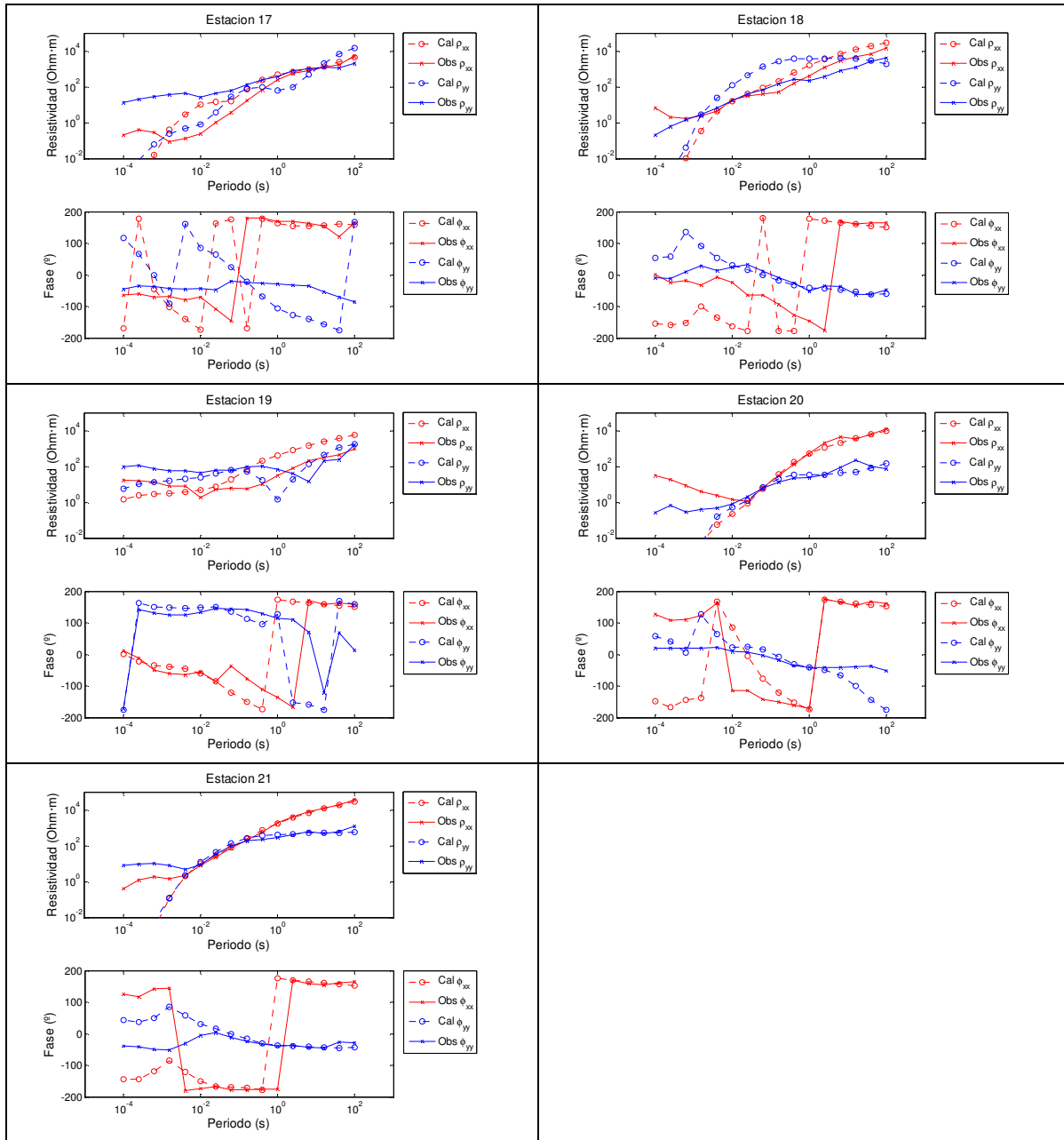
CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO



CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO



CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

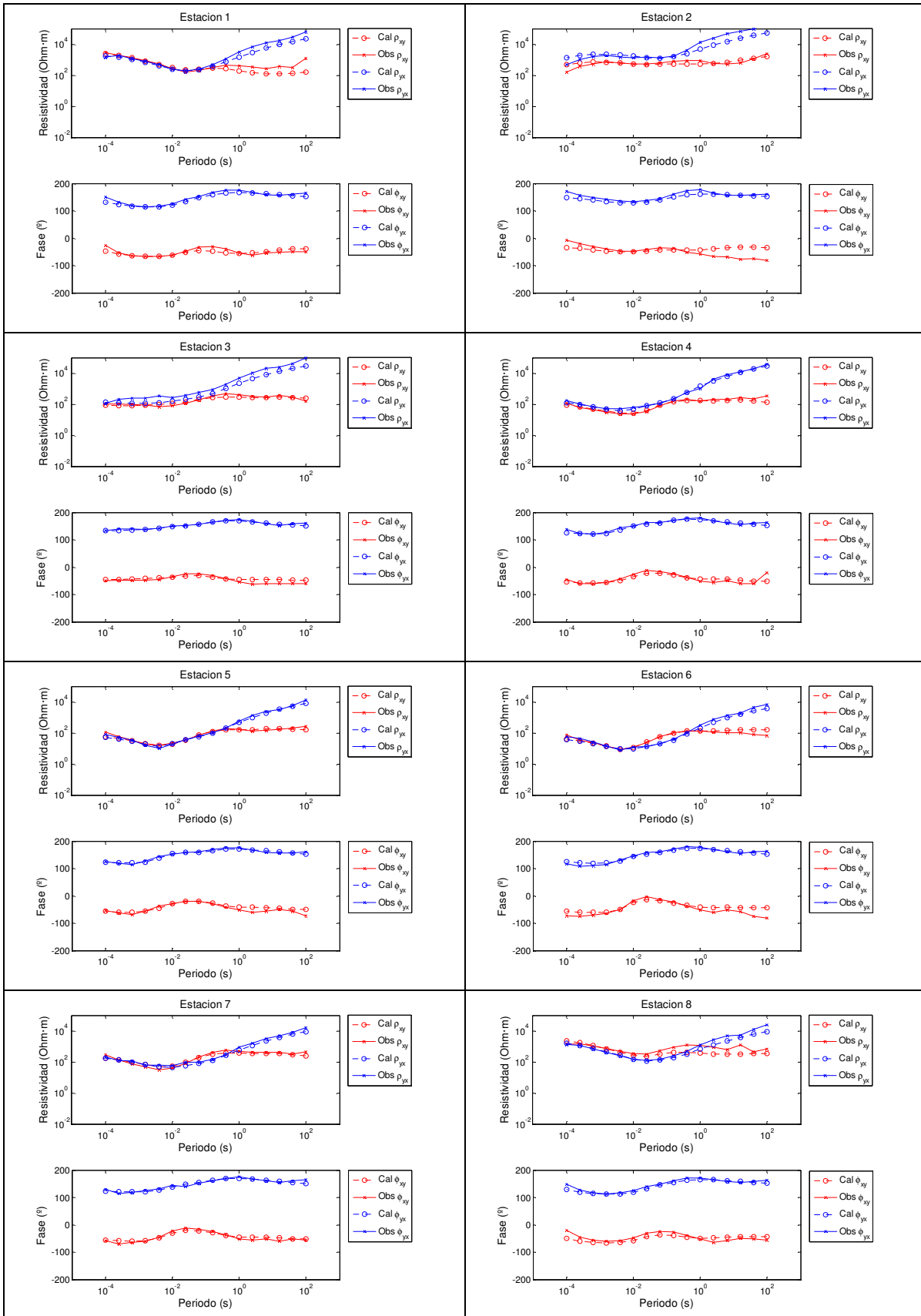


ANEXO IV:

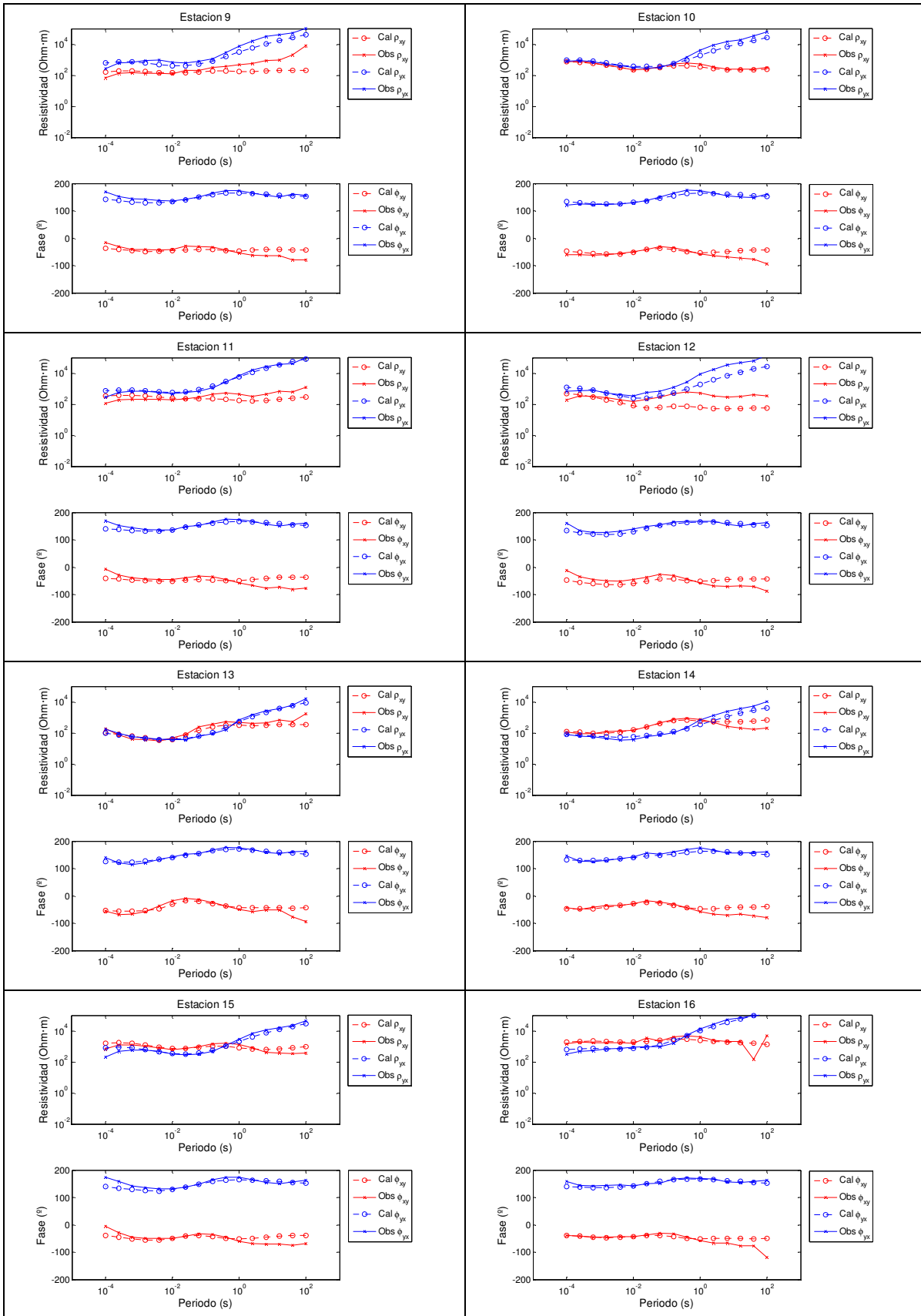
**RESPUESTAS MODELADAS DE MODELO INVERTIDO
CON WSINV3DMT CON CORRECCIÓN DEL
CORRIMIENTO ESTÁTICO**

(MATRIZ COMPLETA DE DISTORSIÓN)

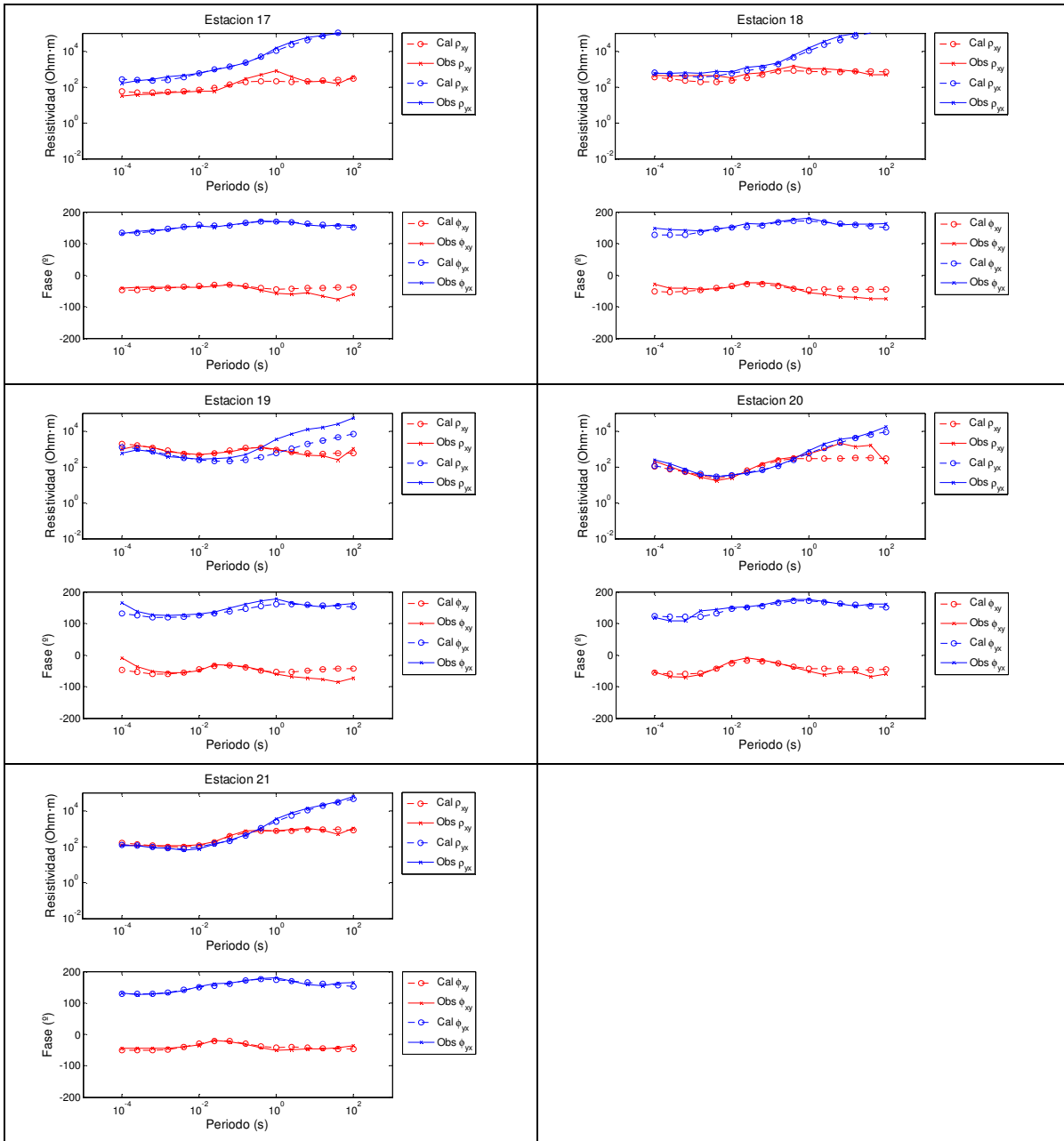
CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO



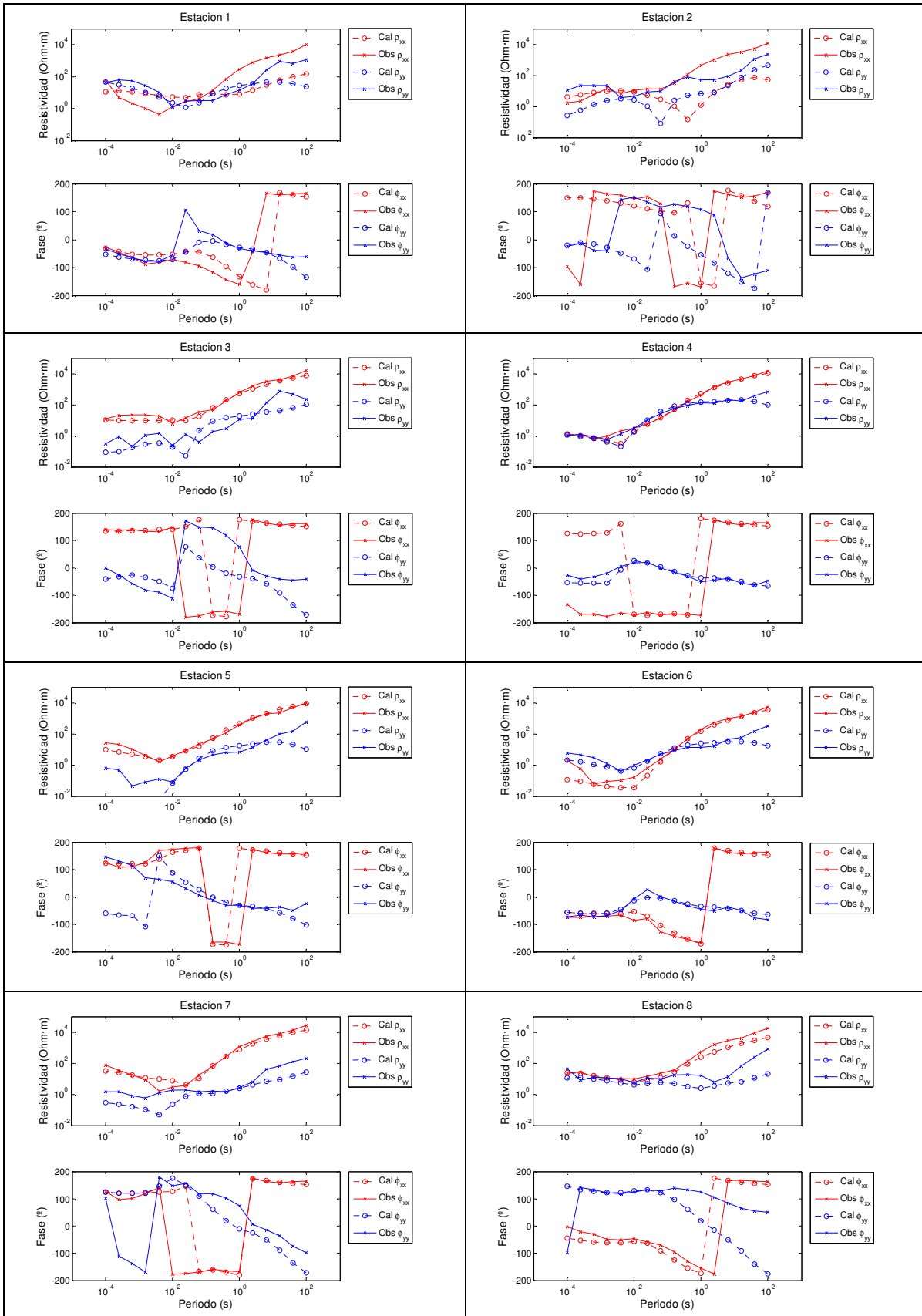
CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO



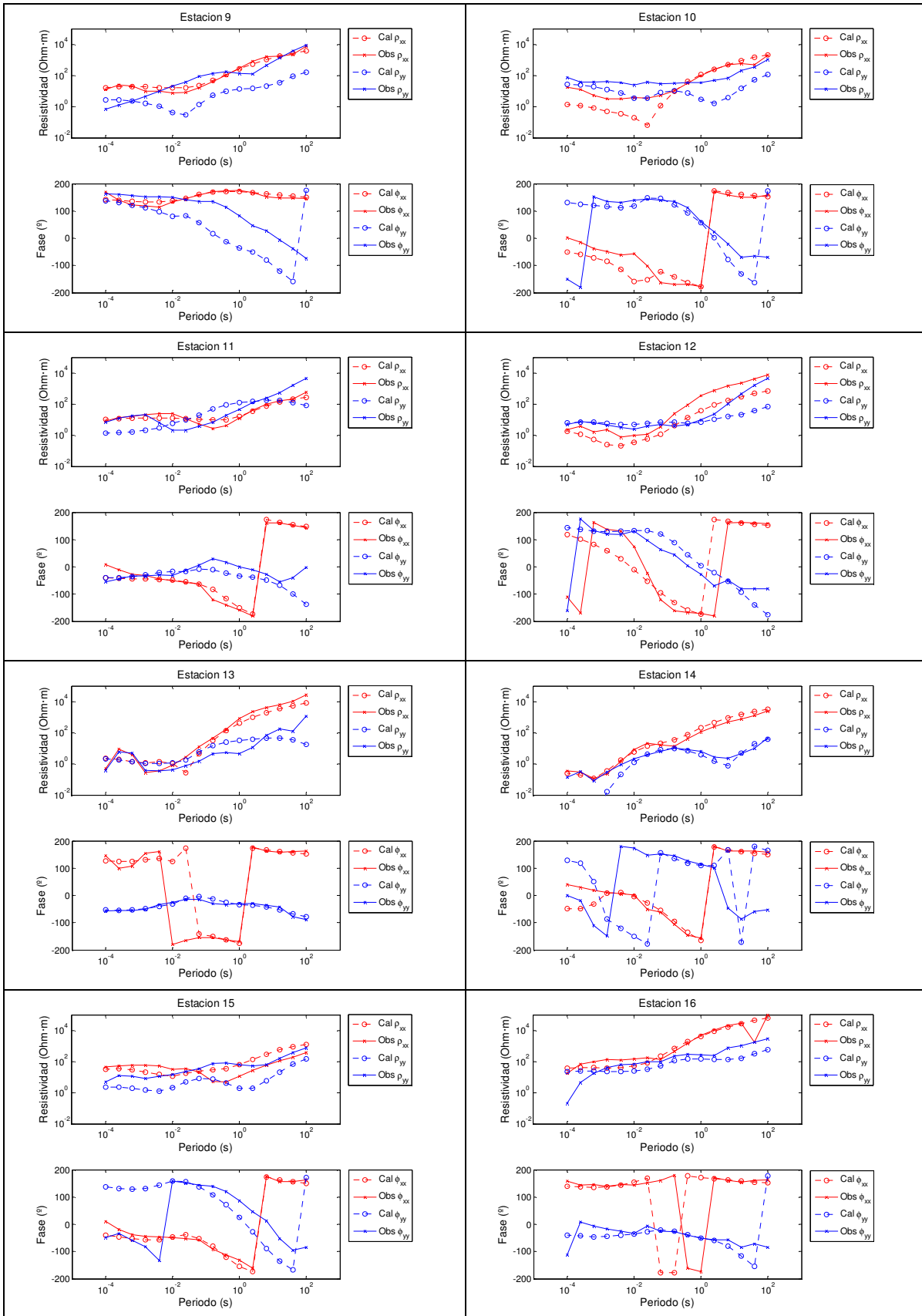
CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO



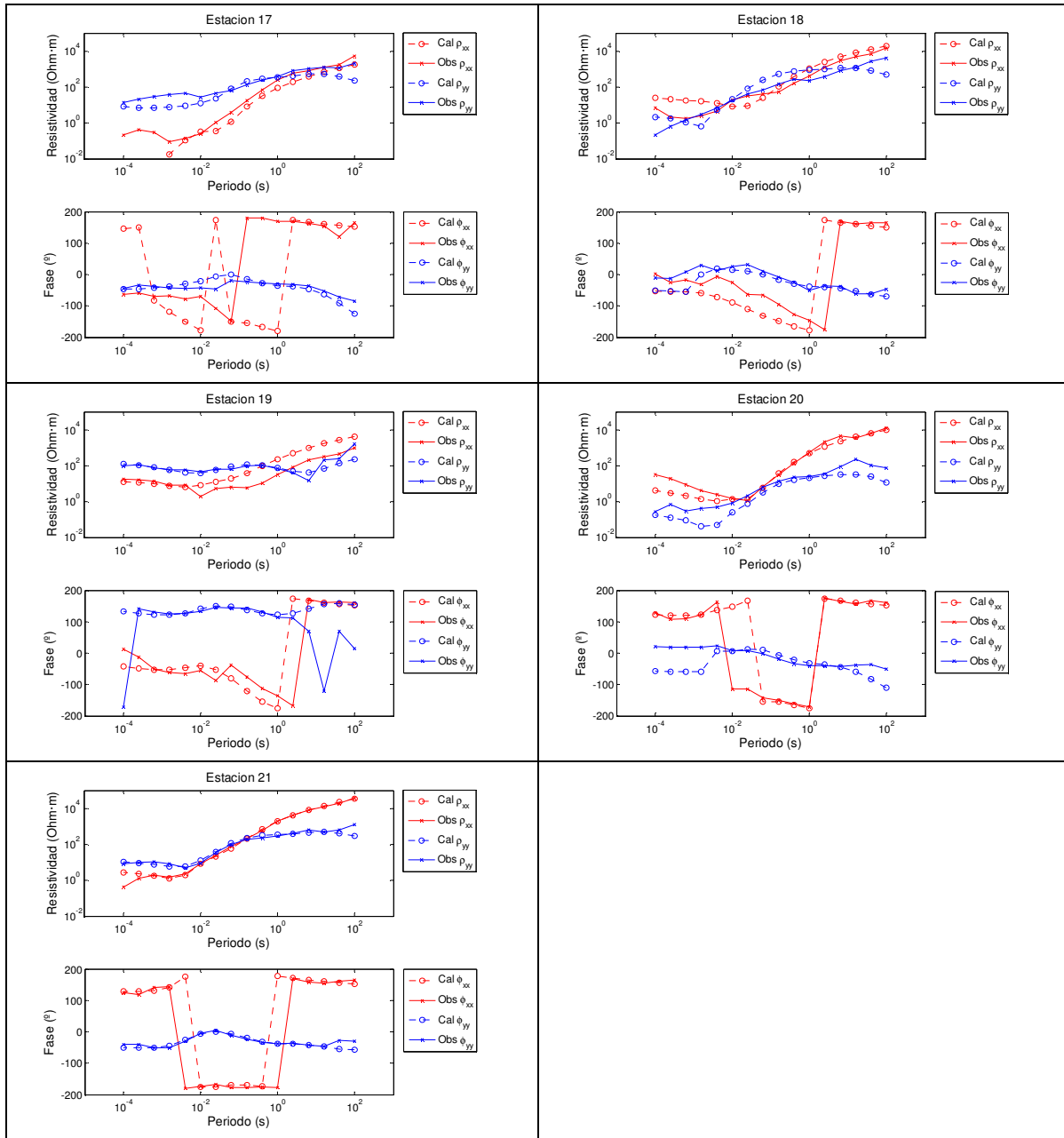
CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO



CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO



CORRECCIÓN DEL CORRIMIENTO ESTÁTICO PARA ESTUDIOS 3D DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO



ANEXO V:

**FORMULACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO DE
INVERSIÓN MT EN TERMINOS DEL CORRIMIENTO
ESTÁTICO**

El problema inverso propuesto en (4.13) se resuelve iterativamente calculando el modelo de resistividades y los factores del corrimiento estático que minimizan la función objetivo que se describe en (1).

$$F_{obj} = (m_{k+1} - m_0)^T C_m^{-1} (m_{k+1} - m_0) + \lambda^{-1} (X_k - J [m_{k+1} - m_0])^T C_d^{-1} (X_k - J [m_{k+1} - m_0]) \quad (1)$$

$$X_k = (fd - F(m_k) + J_k [m_k - m_0]) \quad (2)$$

Donde,

m_{k+1} : Iteración k+1 del modelo de resistividades

m_0 : Modelo de resistividades de referencia

d: Tensor de impedancia de medido en las estaciones de MT para cada frecuencia.

f: Matriz que escala los tensor de impedancias de las estaciones MT para corregir el corrimiento estático.

C_m : Matriz de covarianza en el espacio del modelo.

C_d : Matriz de covarianza de los datos.

J: Jacobiano $\left(\frac{\partial d_{lmn}}{\partial m_{ijk}}\right)$

Para resolver este problema primero se busca el modelo resistividades óptimo que minimiza (1) en función de los factores de corrimiento estático (f). La expresión obtenida permite expresar el modelo de resistividades óptimo en función de f, por lo que la función objetivo puede escribirse sólo dependiendo de los factores de corrimiento estático (f). A partir de esto, se pueden determinan los valores de “f” óptimos que minimizan la función objetivo (1) y luego usando la expresión del primer paso se puede determinar el modelo de resistividades óptimo. Esta estrategia permite separar en dos pasos cada iteración del proceso de inversión conjunta (modelo de resistividades + corrimiento estático), evitando producir no linealidades adicionales asociadas a los factores de corrimiento estático.

El modelo de resistividades que minimiza la función objetivo (1) está dado por (W. Siripunvaraporn et al, 2004):

$$m_{k+1} = m_0 + \left(J^T C_d^{-1} J + \lambda C_m^{-1} \right)^{-1} J^T C_d^{-1} X_k$$

$$M = \left(J^T C_d^{-1} J + \lambda C_m^{-1} \right)$$
(3)

X_k se escribe en función "f", de forma que cada iteración del modelo de resistividades puede quedar expresada en función de los factores del corrimiento estático (f).

$$X_k = (d - F(m_k) + J_k[m_k - m_0]) - d(I - f)$$

$$X_k^0 = (d - F(m_k) + J_k[m_k - m_0])$$

$$X_k = X_k^0 - d(I - f)$$
(4)

$$m_{k+1} = m_0 + M^{-1} J^T C_d^{-1} [X_k^0 - d(I - f)]$$
(5)

Reemplazando (5) y (4) en la función objetivo (1) se obtiene que,

$$F_{obj} = [X_k^0 - d(I - f)] C_d^{-1} J M^{-1} C_m^{-1} M^{-1} J^T C_d^{-1} [X_k^0 - d(I - f)] +$$

$$\lambda^{-1} \left((I - J M^{-1} J^T C_d^{-1}) [X_k^0 - d(I - f)] \right)^T C_d^{-1} \left((I - J M^{-1} J^T C_d^{-1}) [X_k^0 - d(I - f)] \right)$$
(6)

$$F_{obj} = [X_k^0 - d(I - f)]^T A [X_k^0 - d(I - f)]$$

$$A = (C_d^{-1} J M^{-1} C_m^{-1} M^{-1} J^T C_d^{-1} + \lambda^{-1} (I - J M^{-1} J^T C_d^{-1})^T C_d^{-1} (I - J M^{-1} J^T C_d^{-1}))$$
(7)

$$A = C_d^{-1} J M^{-1} C_m^{-1} M^{-1} J^T C_d^{-1} + \lambda^{-1} C_d^{-1} + \lambda^{-1} C_d^{-1} J M^{-1} J^T C_d^{-1} J M^{-1} J^T C_d^{-1}$$

$$- 2\lambda^{-1} C_d^{-1} J M^{-1} J^T C_d^{-1}$$
(8)

$$A = \lambda^{-1} C_d^{-1} J M^{-1} (\lambda C_m^{-1} + J^T C_d^{-1} J) M^{-1} J^T C_d^{-1} + \lambda^{-1} C_d^{-1} - 2\lambda^{-1} C_d^{-1} J M^{-1} J^T C_d^{-1}$$

(9)

$$A = \lambda^{-1}C_d^{-1}J M^{-1}J^t C_d^{-1} + \lambda^{-1}C_d^{-1} - 2\lambda^{-1}C_d^{-1}J M^{-1}J^t C_d^{-1} \quad (10)$$

$$A = \lambda^{-1}C_d^{-1}(C_d - J M^{-1}J^t)C_d^{-1} \quad (11)$$

Usando la transformación al espacio de los datos *Siripunvaraporn & Egbert (2000)*,

$$M^{-1}J^t C_d^{-1} \approx C_m J^t (\lambda C_d + J C_m J^T)^{-1} \quad (12)$$

$$A = \lambda^{-1}C_d^{-1}(C_d - J M^{-1}J^t)C_d^{-1}$$

$$A = \lambda^{-1}C_d^{-1}(I - J C_m J^t (\lambda C_d + J C_m J^T)^{-1})$$

$$A = \lambda^{-1}C_d^{-1}(\lambda C_d + J C_m J^T - J C_m J^t)(\lambda C_d + J C_m J^T)^{-1}$$

$$A = (\lambda C_d + J C_m J^T)^{-1}$$

Reemplazando en (11),

$$F_{obj} = [X_k^0 - d(I - f)]^T (\lambda C_d + J C_m J^T)^{-1} [X_k^0 - d(I - f)] \quad (13)$$

Minimizando (13) en función de f ,

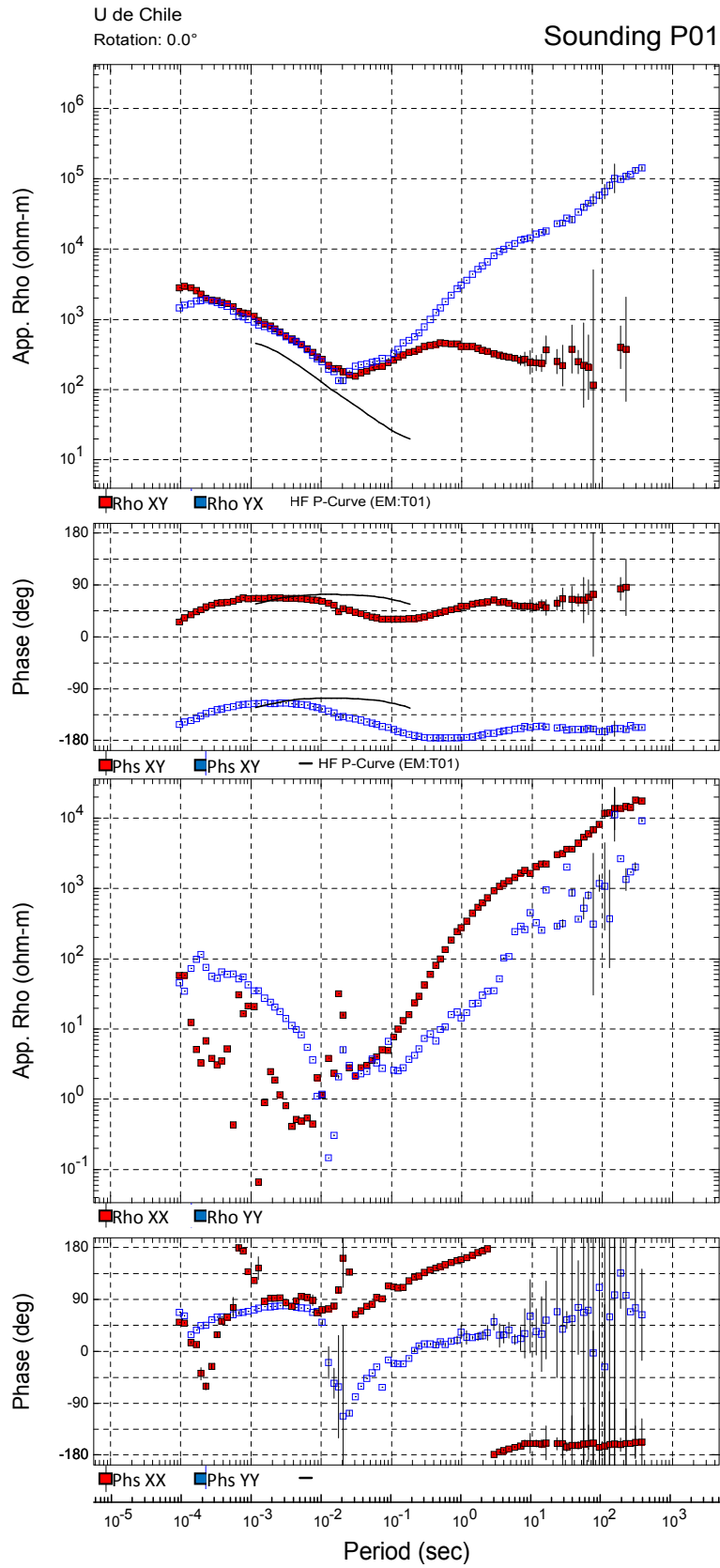
$$\min_f F_{obj} = \min_f [X_k^0 - d(I - f)]^T A [X_k^0 - d(I - f)] \quad (14)$$

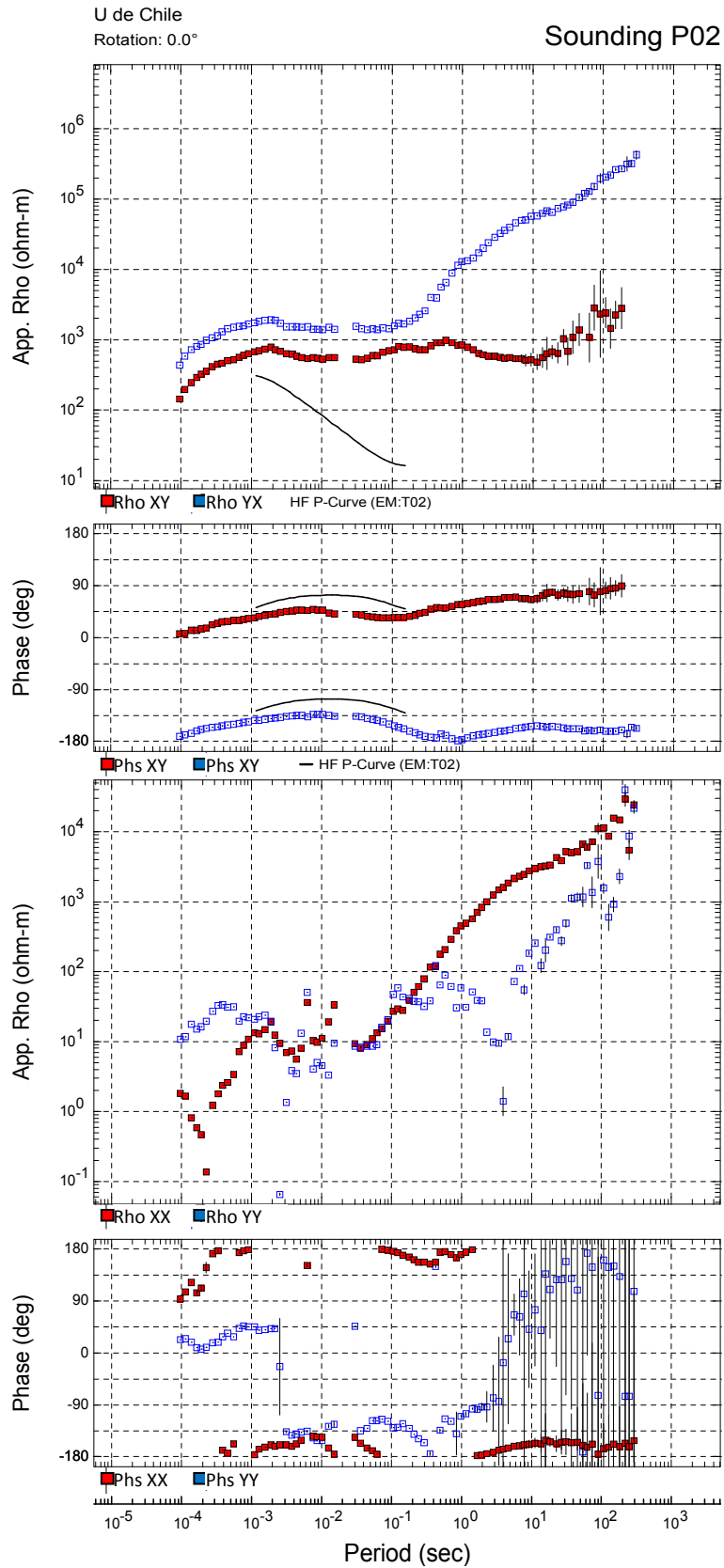
$$f = I - (d^T A d)^{-1} d^T A X_k^0 \quad (15)$$

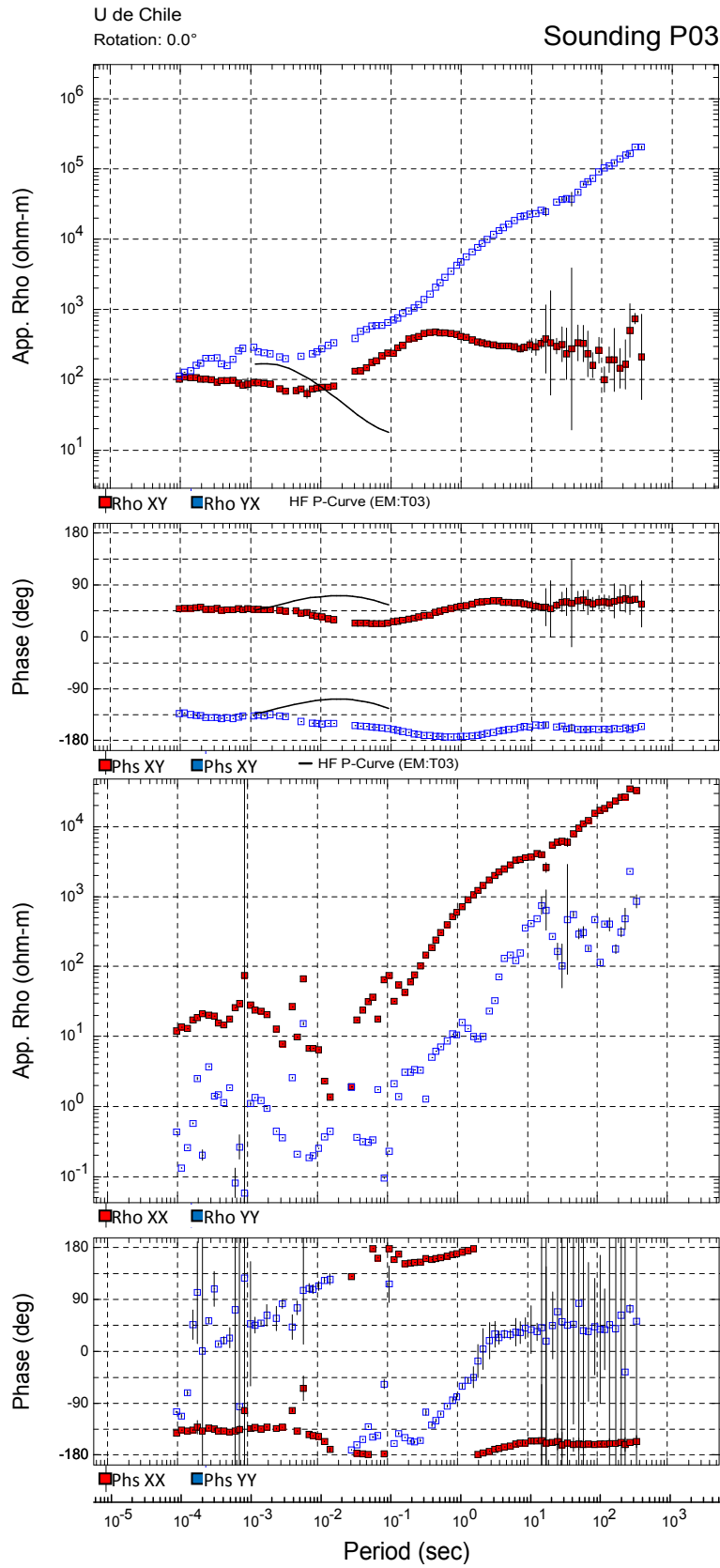
$$A = (\lambda C_d + J C_m J^T)^{-1}$$

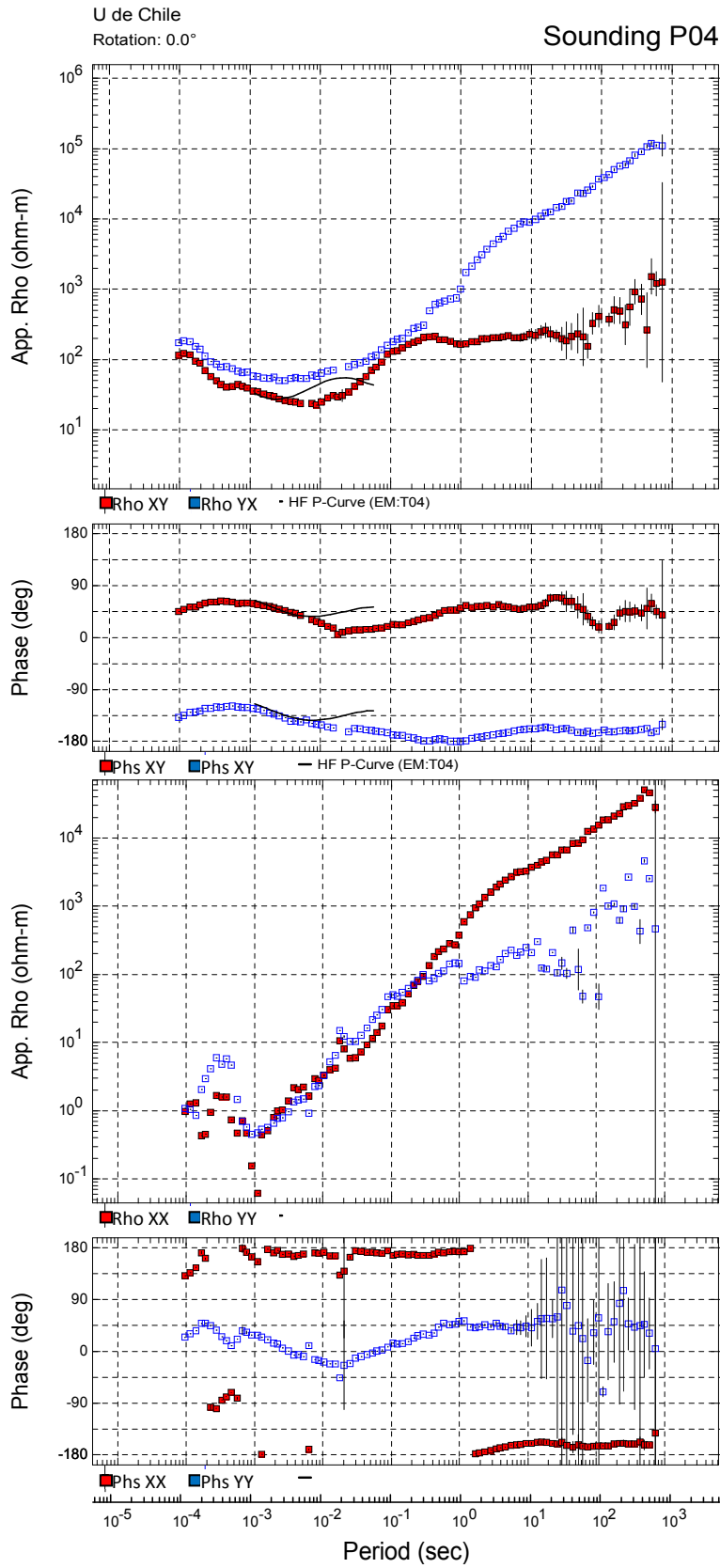
ANEXO VI:

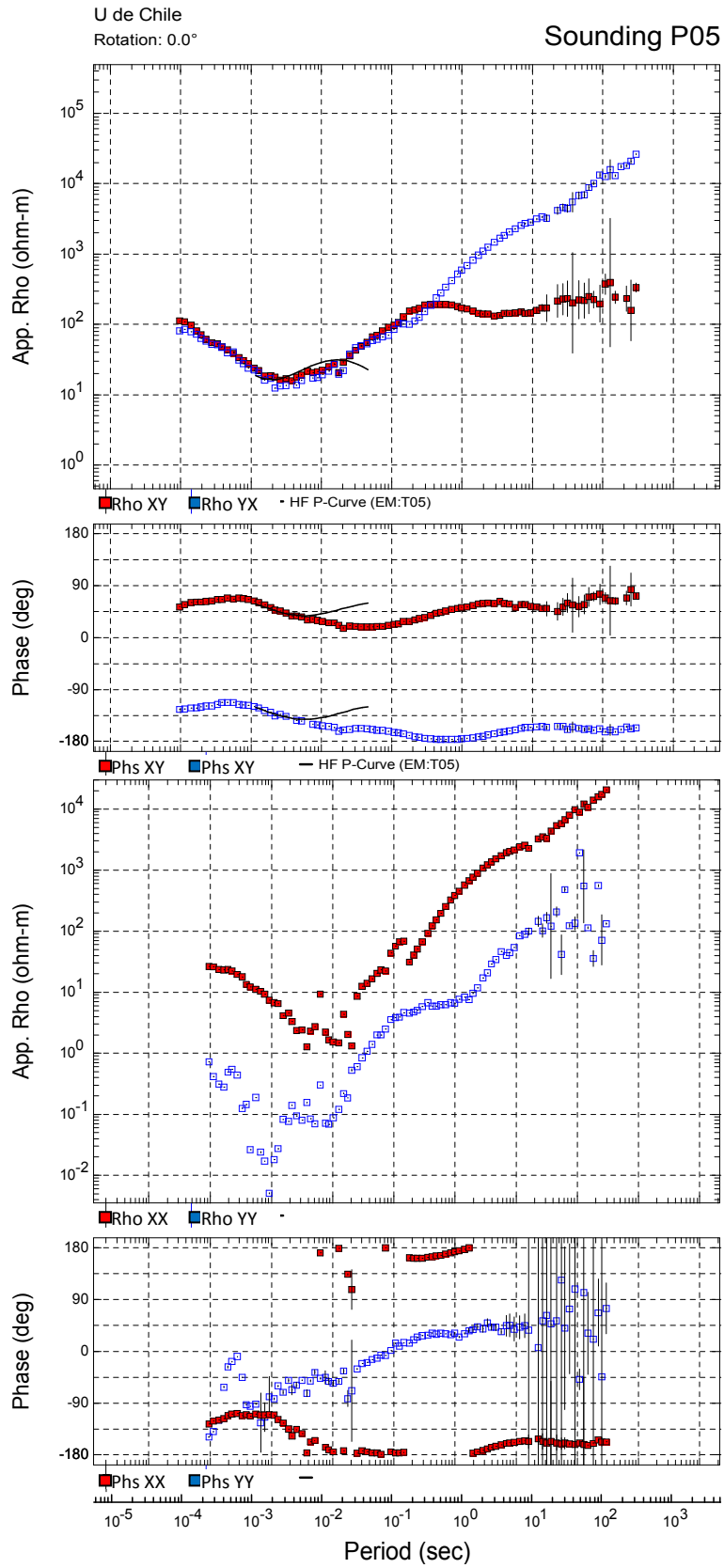
**RESISTIVIDADES APARENTES MT DEL
LEVANTAMIENTO MT/TDEM PISAGUA - 2014.**

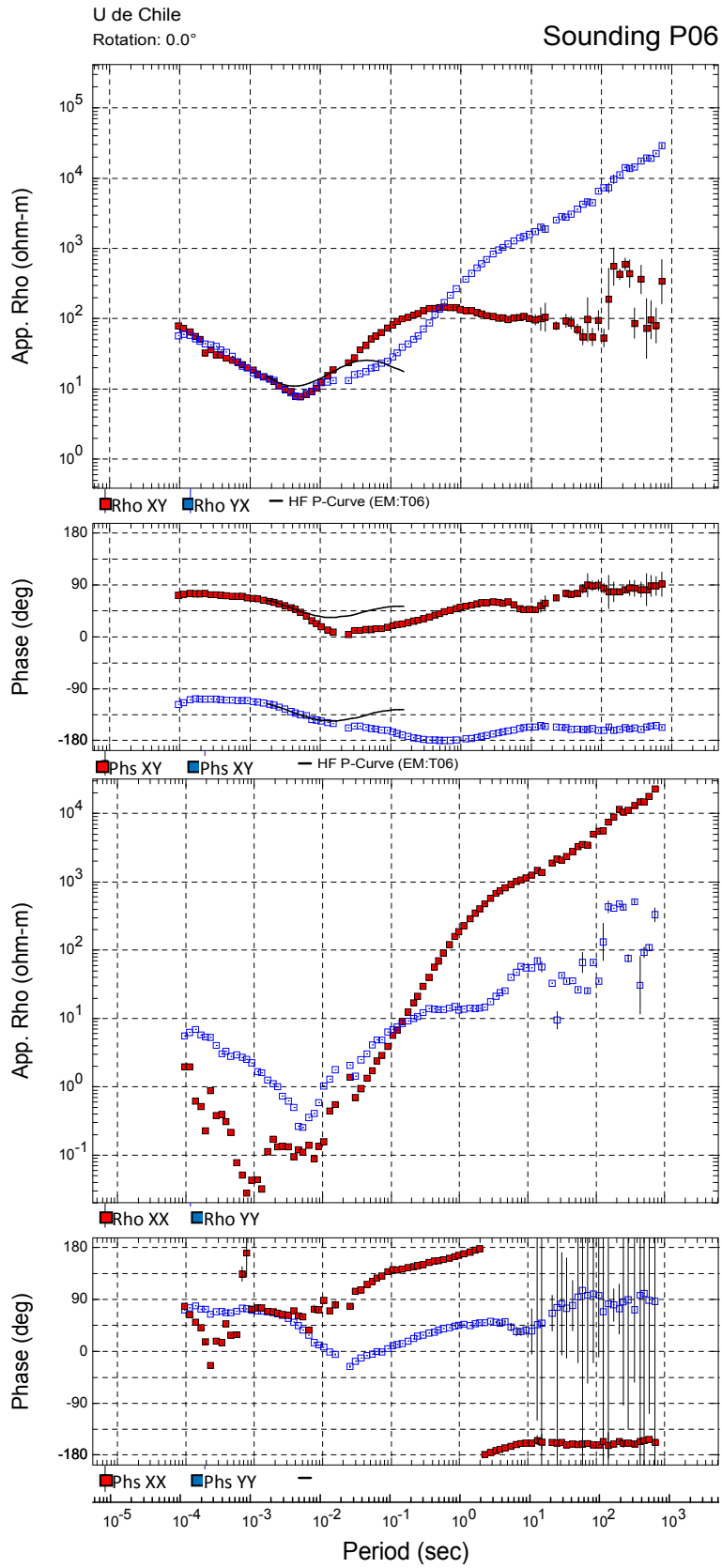


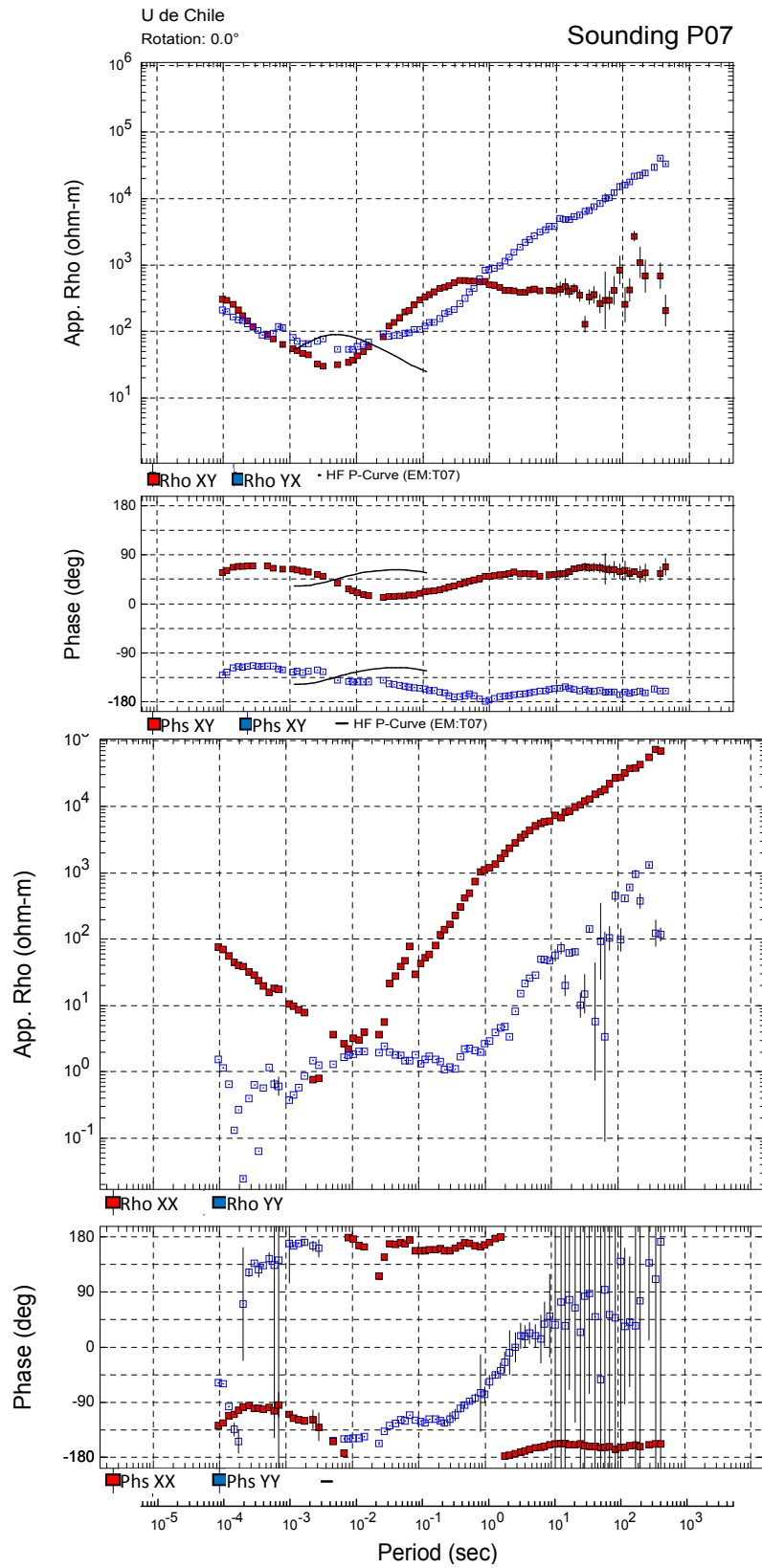


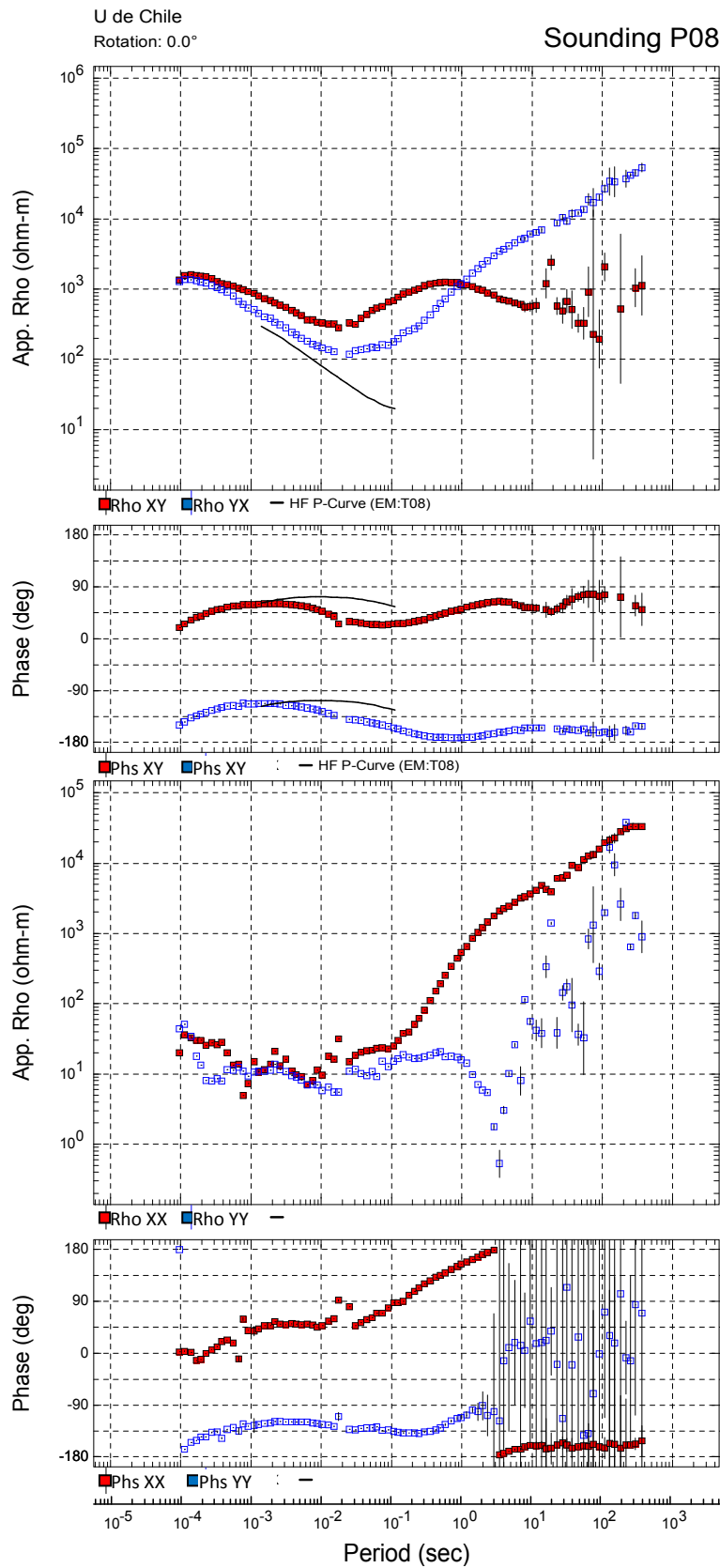


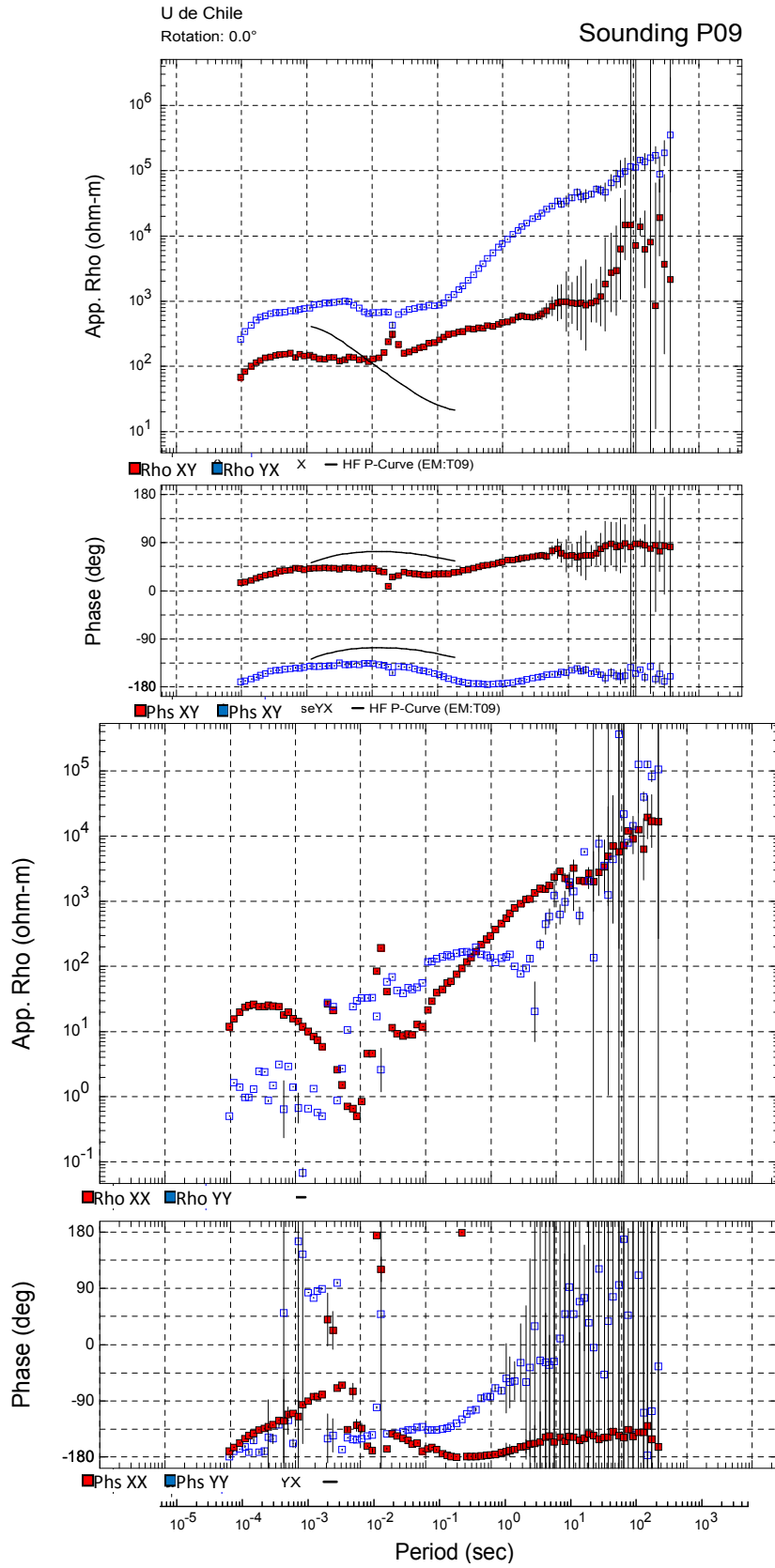


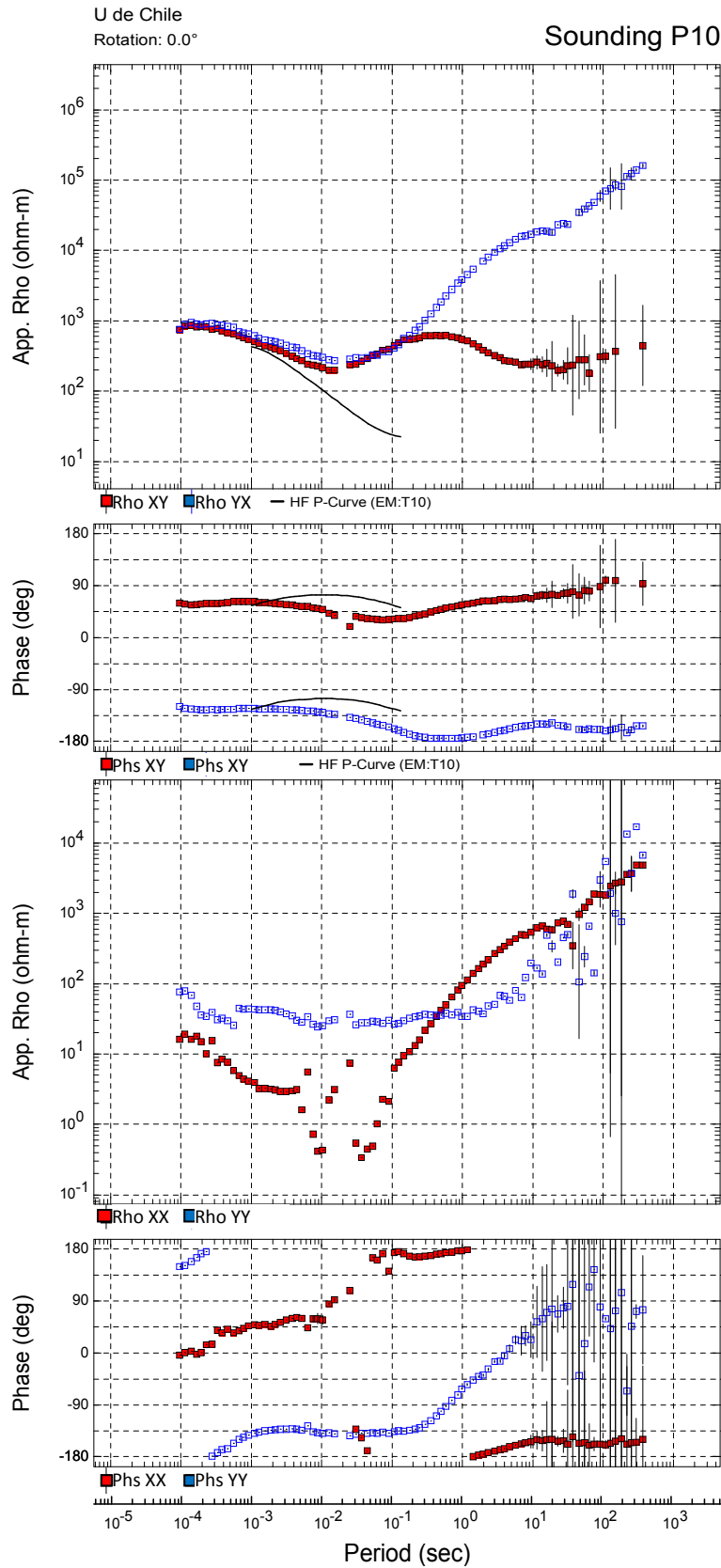


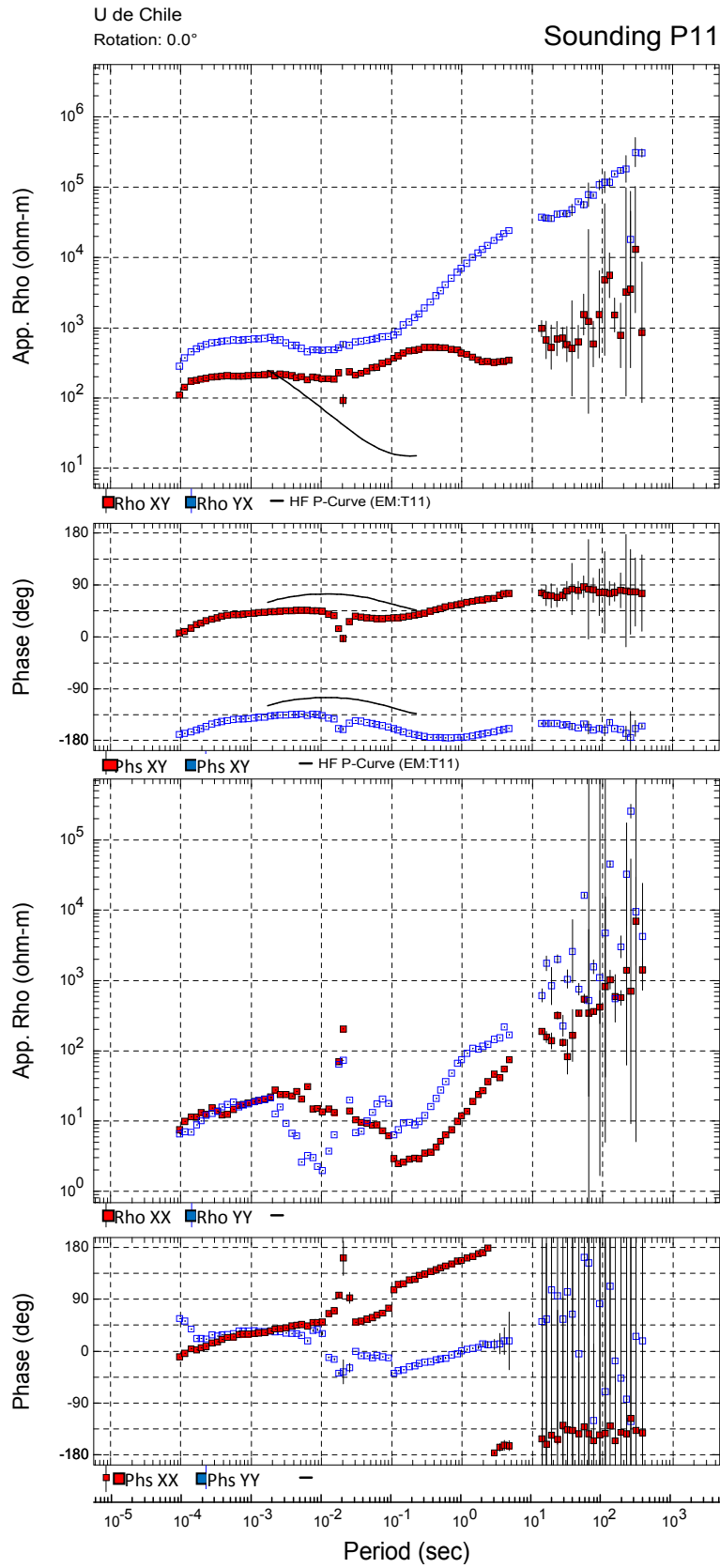


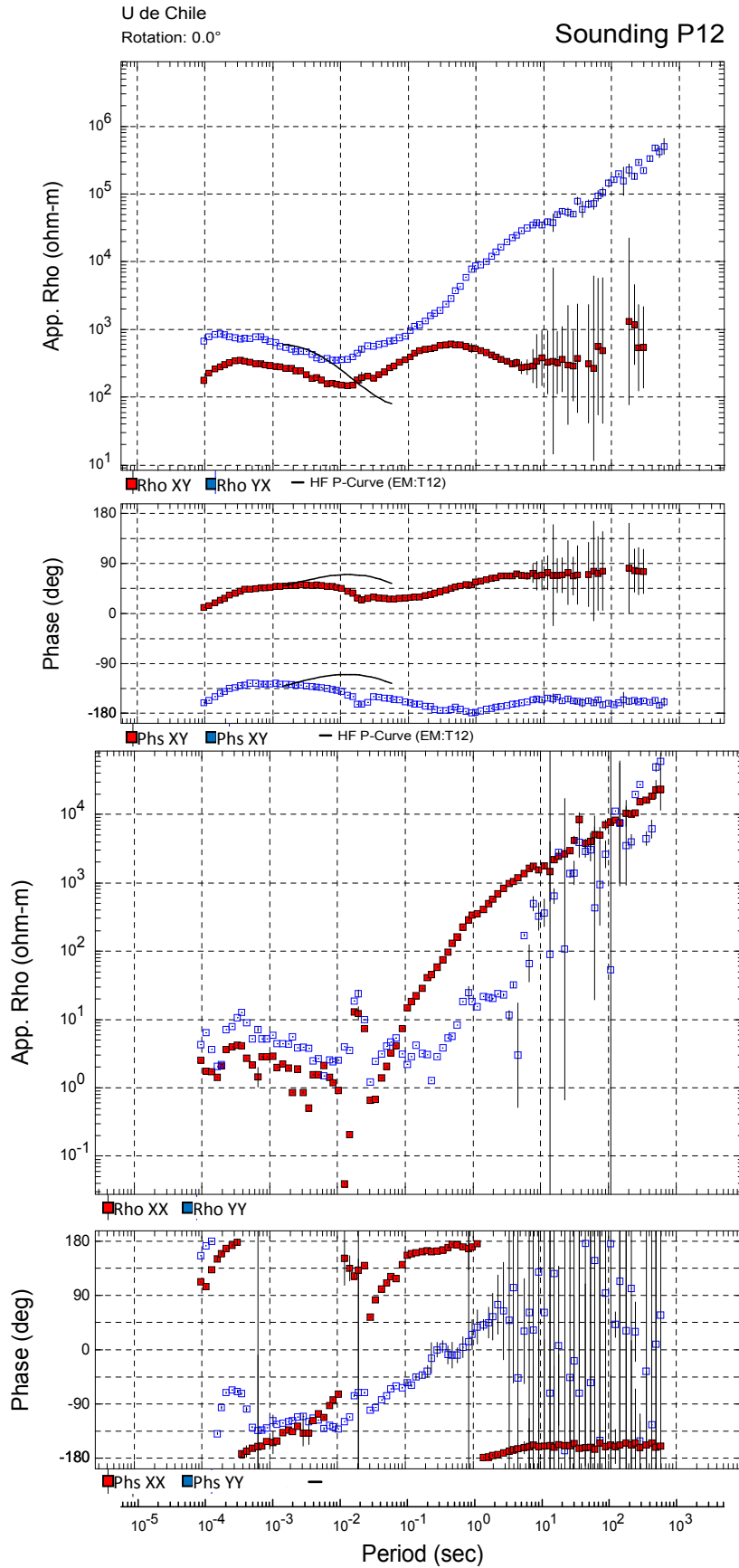


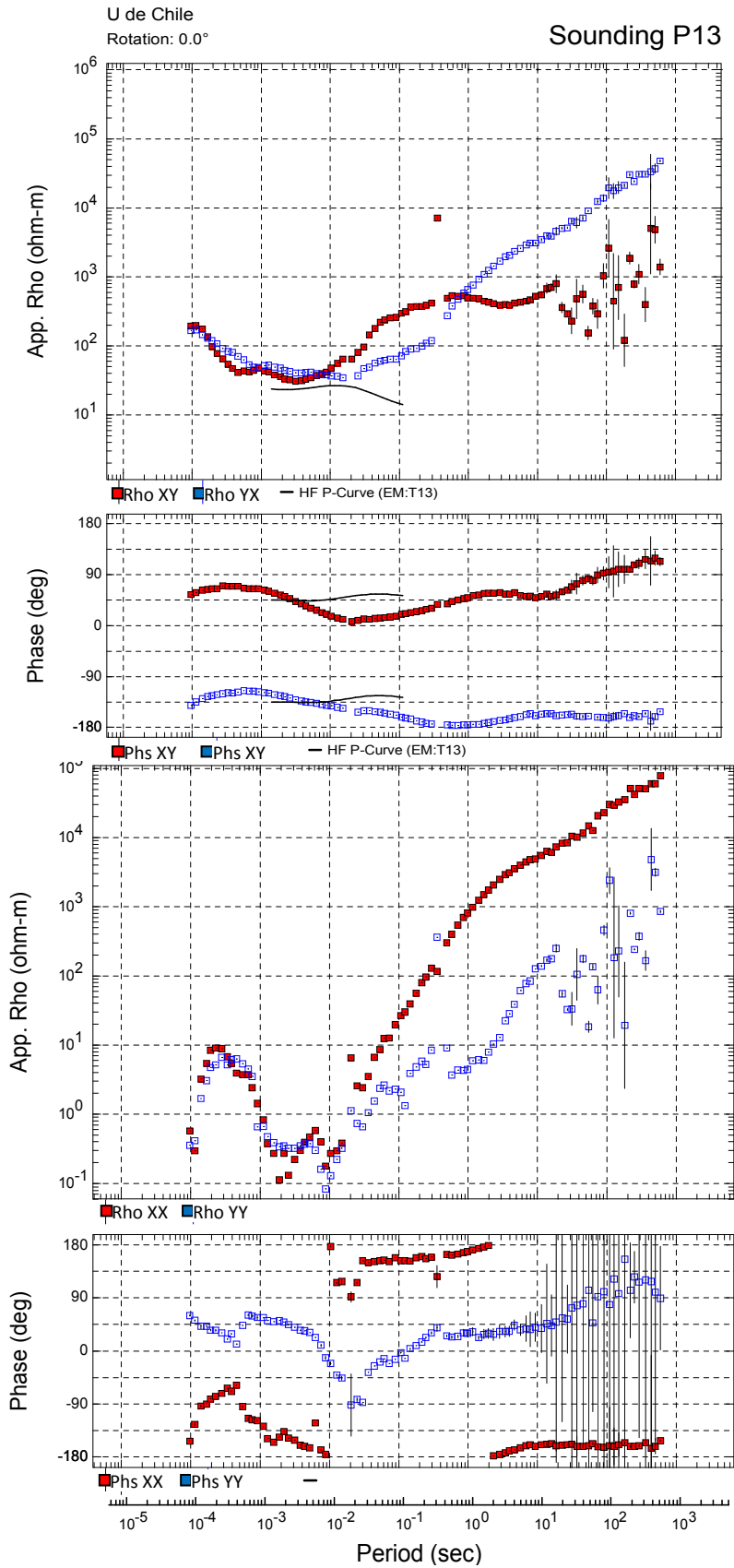


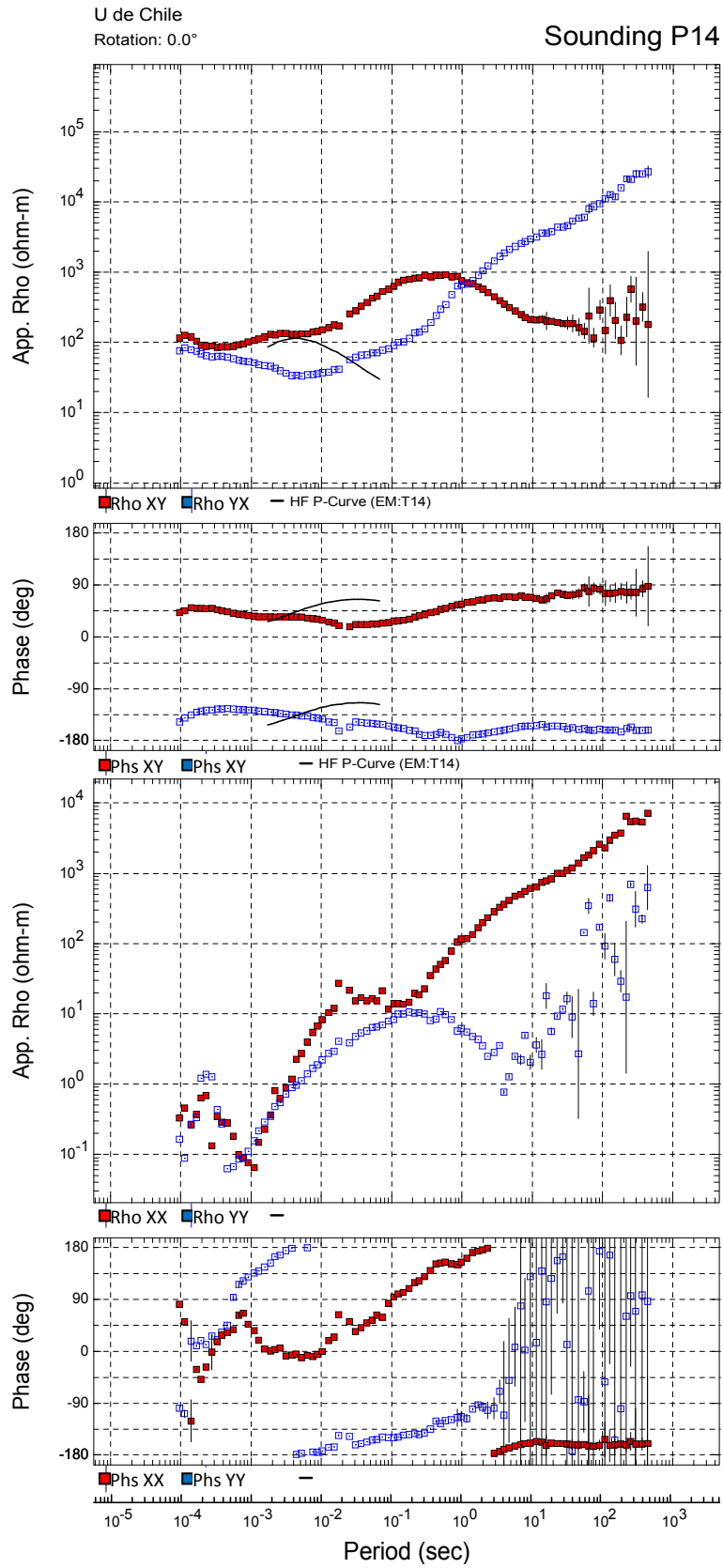


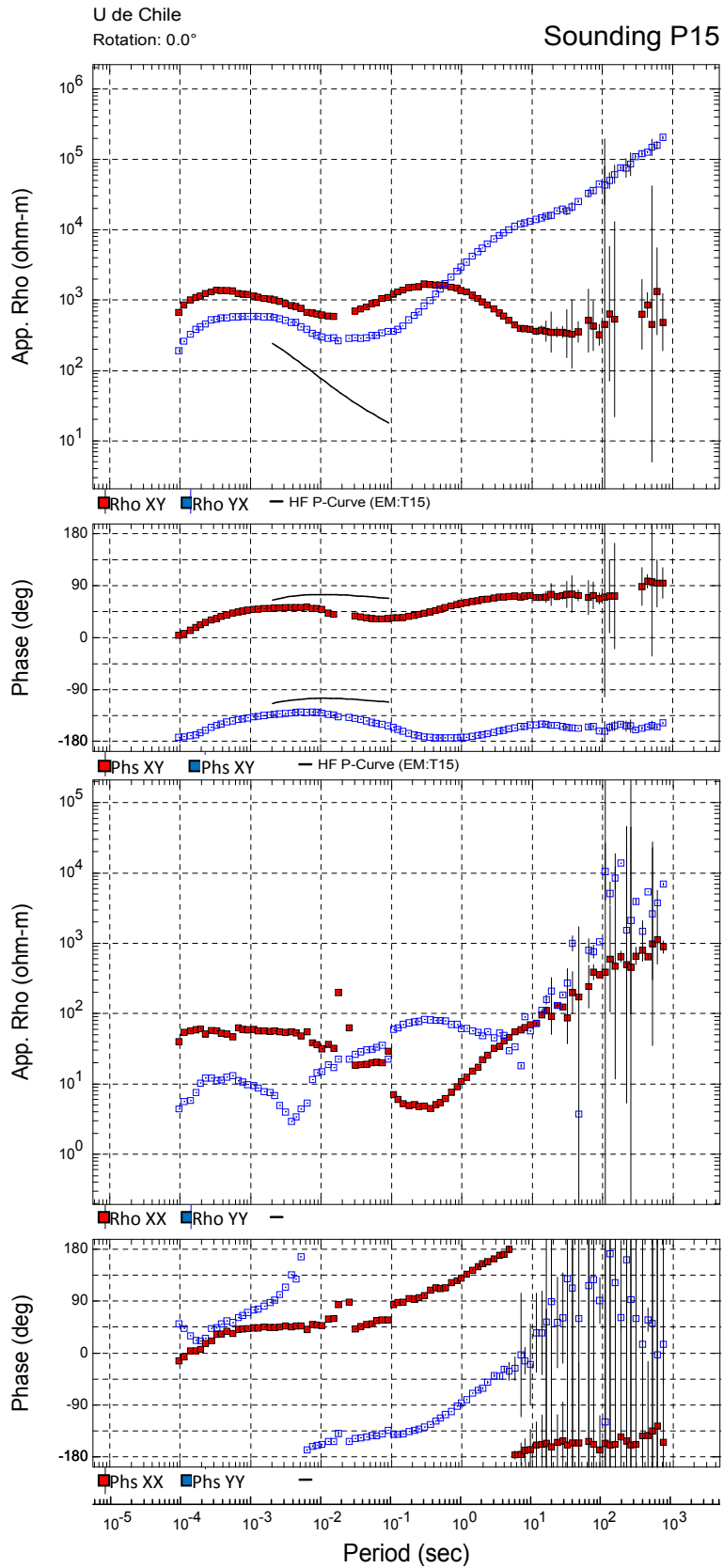


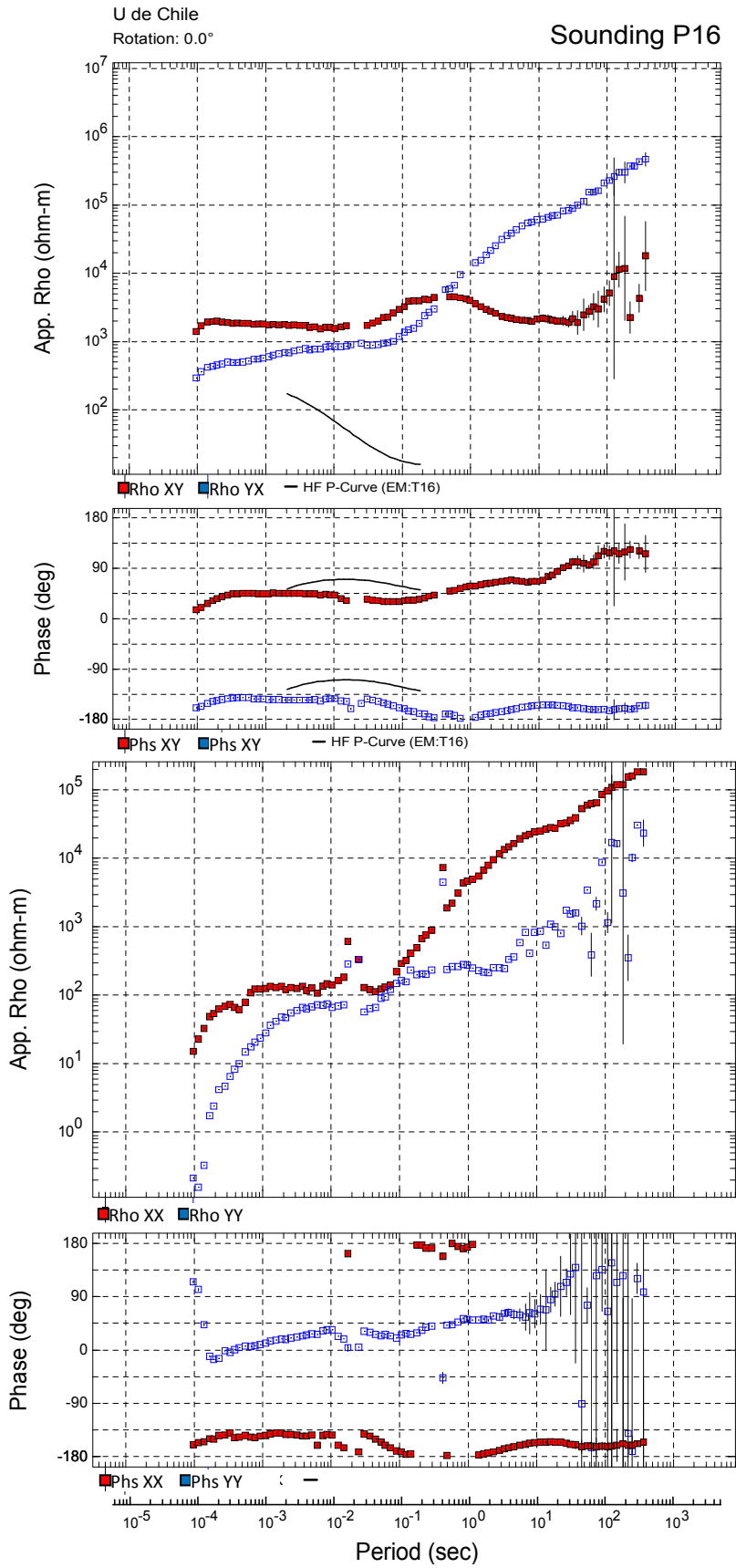


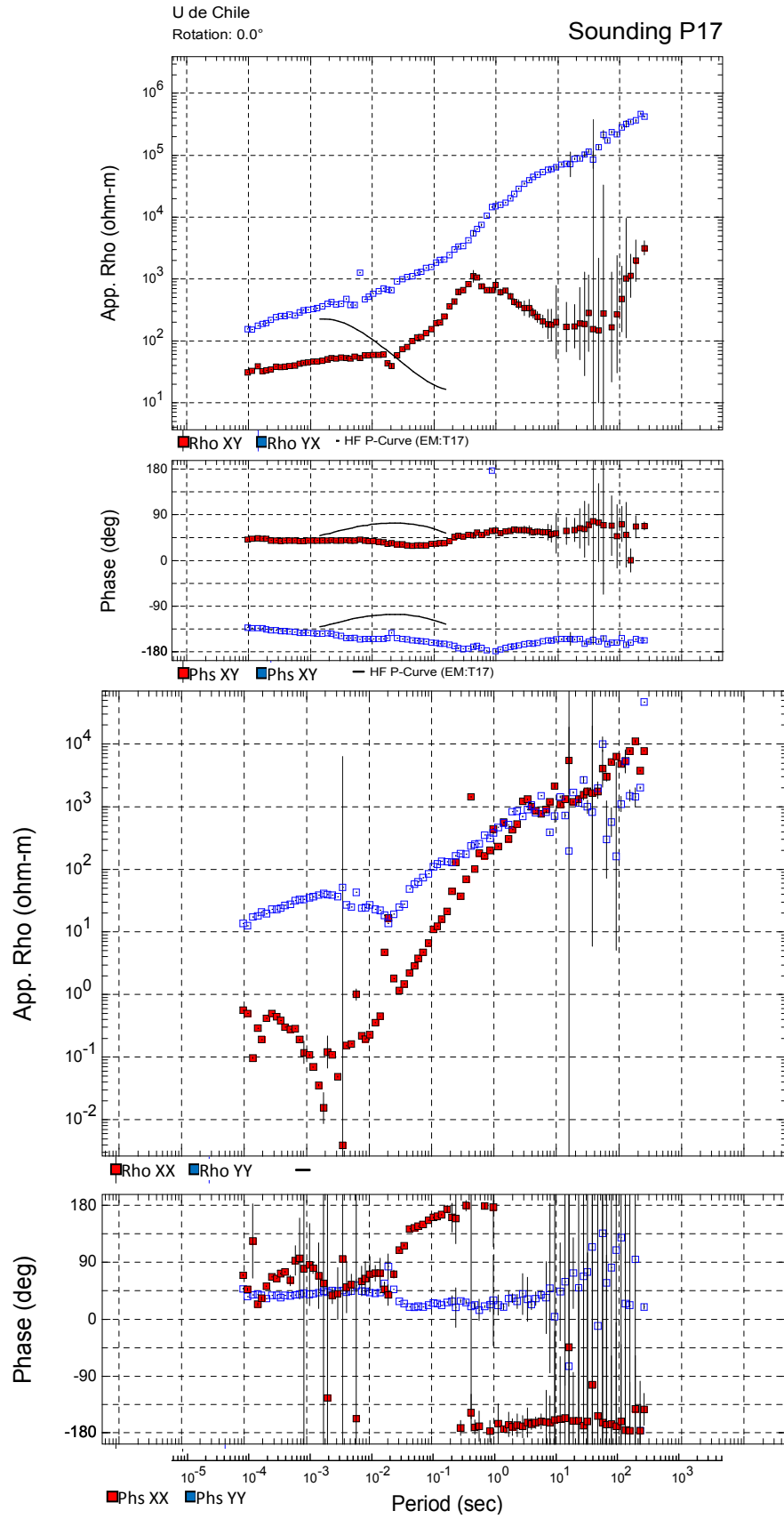


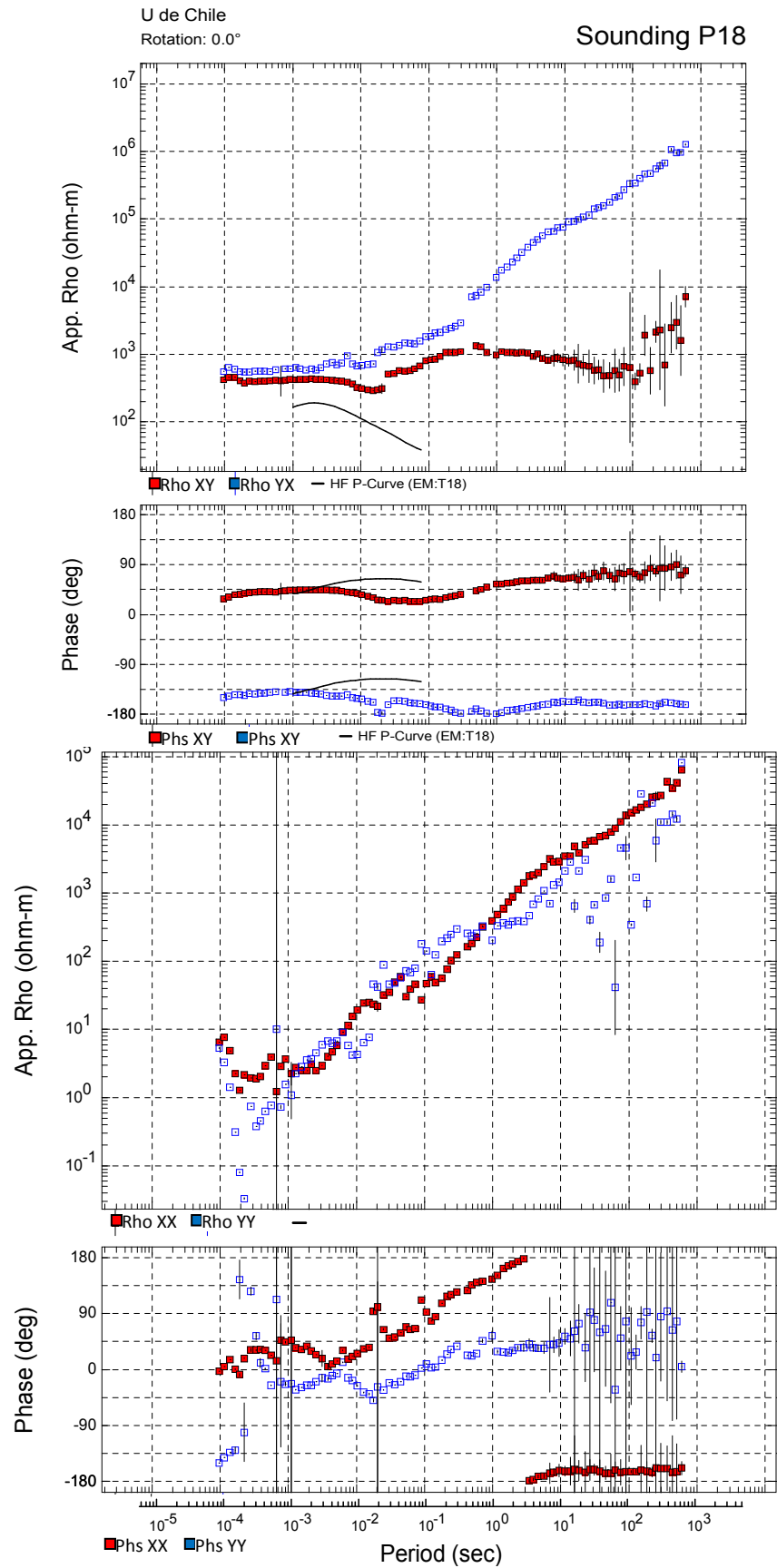


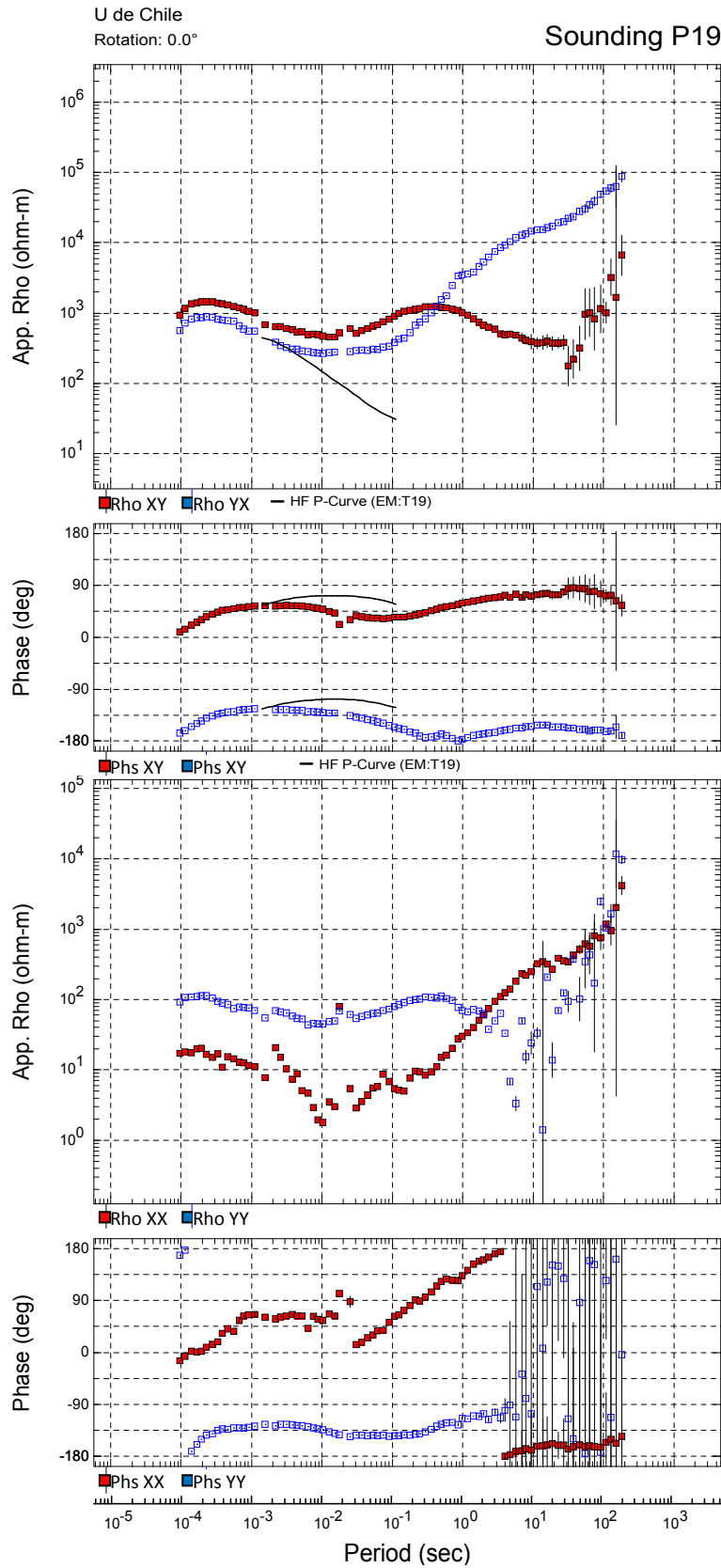


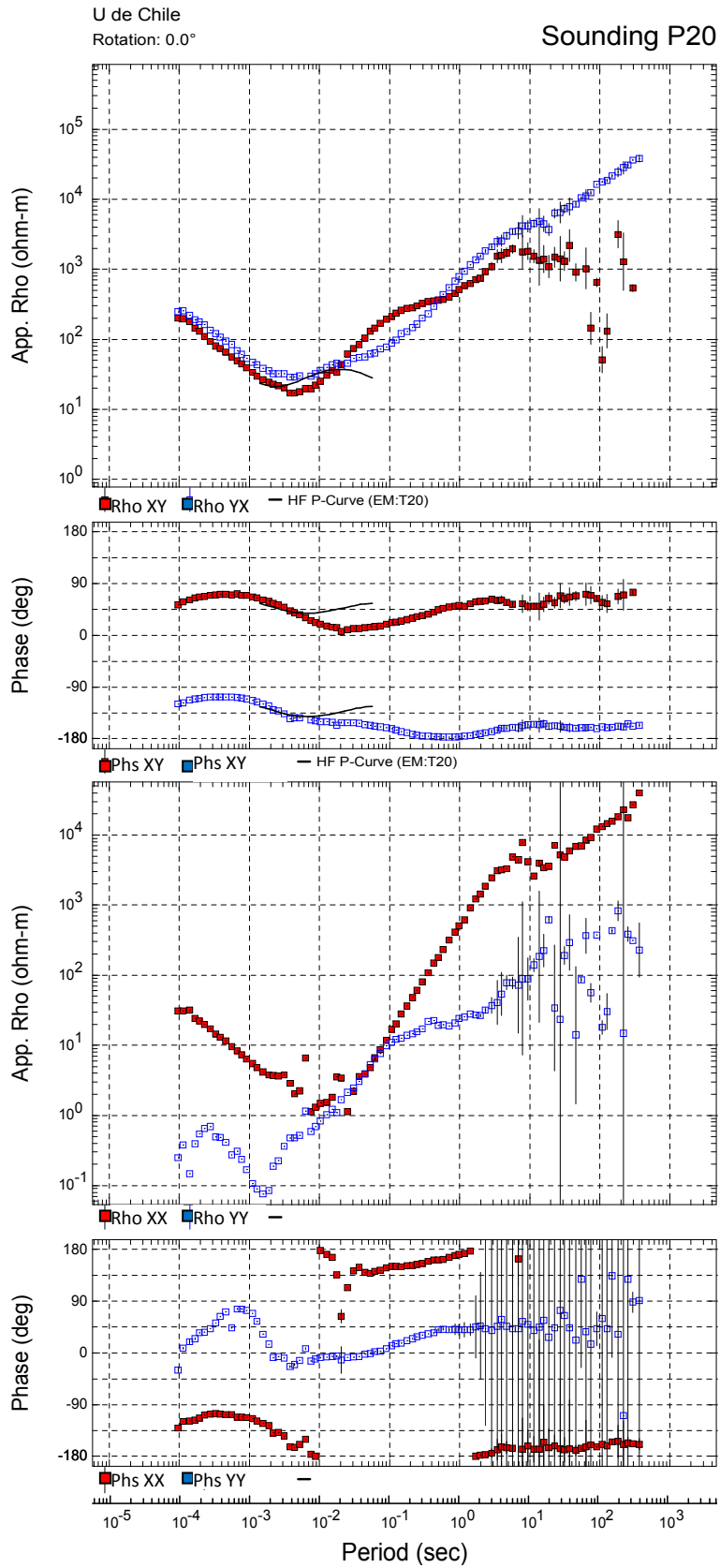


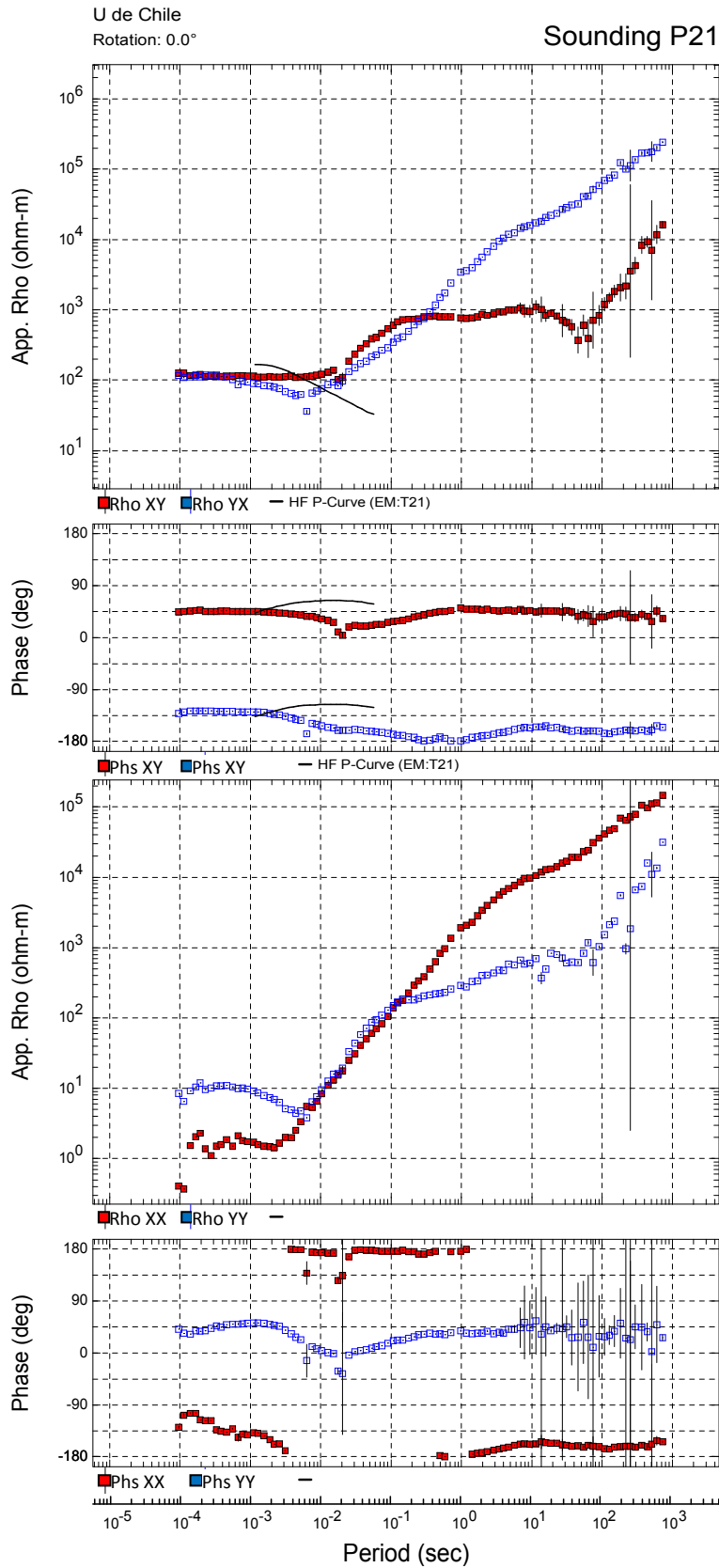












ANEXO VII:
SONDAJES TDEM MEDIDOS EN EL LEVANTAMIENTO
MT/TDEM PISAGUA - 2014.

