



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estudio geofísico de resistividad para
la caracterización hidrogeológica del
subsuelo en el Bosque de Chapultepec
de la Ciudad de México**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Luis Adrián López Martínez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Martín Cárdenas Soto



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicatorias.

A **Camila**, a **Leilany** y **Jean†**, por ser mis maestras en la vida, por forjar mi madurez y mi responsabilidad que hoy poseo, por darme mis grandes alegrías, juegos, su compañía y por mi gran motivación para superarme todos los días de mi vida. Las Amo muchoté HIJAS.

A **Susana** Por tu gran amor, tu enorme sacrificio, por confianza que me brindas, por siempre creer en mí, por la educación y los valores que me enseñaste y por tu incondicional apoyo, que medas todos los días. Gracias y Te Amo MAMÁ.

A **José Luis**, por tu amistad, tu fe que siempre depositas en mí, y por todo el apoyo. Gracias PAPÁ, Te Amo.

A **Wendy**, por tu apoyo, cariño y haber soportado las noches donde hacia mis trabajos escolares, Te Amo HERMANA.

A Ing. **Alfredo Victoria Morales**, Por tu amistad y el valioso apoyo que me brindaste durante mi etapa de padre y estudiante, por ser mi profesor y mi padre en la geología, Gracias por tu gran influencia.

Y en memoria de

Mi Abuelo **Cuco (Mario)†**, mi abuelita **Martha†** y a **Mamá Petra†**, por sus sabios consejos, cariño y cuidados que me brindaron, y por anhelar y esperar este momento, además de vivir una maravillosa vida, Los extraño y quiero.

A mi **Prima Hermana (Ivón Alondra)**: por tu apoyo y el amor fraternal e incondicional que me brindaste, por anhelar este gran momento y la gran vida que nos brindaste, no sabes cuánto te extraño prima.

Sin ustedes no lo hubiese logrado, este título también es suyo.

L. Adrián. L. M.



Todo lo puedo en Cristo Que me Fortalece

"Para percibir a la naturaleza, debemos comprender que la razón no conoce más de lo que ella produce. Por lo que nos instruye y nos da esa razón de recurrir a ella, buscarla conformemente, para que nos bosqueje lo que hay que aprender de ella, de lo cual por sí mismos no sabríamos nada, por lo que abrir nuestra razón con conciencia en nuestros juicios, principios y leyes que nos proporciona, nos da la libertad a obligarla a contestar nuestras Preguntas.";

Emanuel Kant

Agradecimientos:

Este estudio fue patrocinado por el Fondo CONACYT-GDF (Proyecto121119).

Agradezco a la Dirección del Bosque de Chapultepec por las facilidades para la realización de los trabajos de campo.

También se agradece el apoyo del proyecto UNAM-DGAPA-PAPIME-PE107823

Al Dr. Martin Cárdenas Soto, por su dirección y apoyo a este trabajo de tesis y su contribución a mi formación como Geofísico.

Agradezco al Ing. Jesús Méndez Gaytán, por el apoyo instrumental, su valiosa confianza y enseñanzas.

Mi jurado integrado por: la Ing. Francisco Alejandro Arroyo Carrasco, Ing. Alejandro García Serrano, M.C. David Escobedo Zenil, Dr. Martín Cárdenas Soto y el Ing. Martín Vidal por sus grandes aportaciones a este trabajo de grado.

A la oportunidad que el Ing. Alfredo Victoria me dio para participar en actividades docentes e involucrarme de manera motivacional a las Ciencias de la Tierra, sobre todo a la geología.

El Ing. Martin Vidal, por su amistad e invitarme a varias investigaciones geológicas y ser mi influencia en la Hidrogeología.

A Ana Landa, Jesús Becerril (Syrú) y Armando Cruz, por esa motivación, su amistad, compañerismo, y levantarme y empujarme en superarme en lo profesional, mis mejores amigos en la actualidad.

Arturo Uribe Almazán (Tin Tan), Javier Ibarra, y Ángel Jiménez, por el apoyo en el la Exploración Geofísica de campo en el BCH.

A mis Tías, Tíos, Primas y Primos, en especial a Mi hermano Osmany, Josué, Iván, Monse, Imelda. Por ser mas que primos, por ser hermanos.

El equipo de Geofísicos de GSU, Pam, Chivis y Joako (CHE), Jacobo Grondona, Ariadna (Psyco) y Belmont, por su motivación e intercambio de conocimientos y ese compañerismo que tuvimos en de nuestra trayectoria en GSU.

Al Cubil 400, al Dr. Gilberto Silva, al M.C. Emiliano Campos M., a la Dra. Claudia Mendoza, a la Dra. Mayumi Amparo, Ing. José Luis Arcos, M. C. Noé Santillán, Ing. Juan Carlos Cruz Ocampo, por ser mis profesores, lo más importante por sacar el geólogo que se encuentra en mí.

A Adán Castro†. Por sus enseñanzas y por su amistad, gracias Babón donde estes.

A Jazmín (TAZ), A Marcos (Compadre), Manuel Isaac, Martín Eduardo (Ojos) y a Fernando, por ser mis mejores amigos y hermanos, hemos logrado esa meta que nos propusimos.

A la Facultad de Ingeniería y la el alma mater, la UNAM, por brindarme la sabiduría y el conocimiento de la ingeniería Geofísica, y embalsamarme de ese espíritu Azul y Oro, que nos hace únicos.

L. Adrián. L. M 



ESTUDIO GEOFÍSICO DE RESISTIVIDAD PARA LA CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL SUBSUELO EN EL BOSQUE DE CHAPULTEPEC DE LA CIUDAD DE MÉXICO



Resumen

El presente trabajo de tesis propone el modelo hidrogeológico conceptual del subsuelo del Bosque de Chapultepec (BCH) de la Ciudad de México (CDMX) con base en un estudio geofísico de resistividad, aplicando el método de transitorios electromagnéticos (TEM) y asociando los resultados con las condiciones geológicas existentes del BCH. Este importante parque recreativo se encuentra constituido por andesitas fracturadas de la Formación Sierra de las Cruces, secuencias vulcanoclásticas (tobas, ceniza, piroclásticos y aglomerados) de la Formación Tarango, una secuencia aluvial y una porción pequeña de depósitos lacustres. El análisis de resultados de la prospección geofísica aplicada muestra diferentes contrastes de resistividad; Resistividades bajas para los materiales arena limosos y arena arcillosos; resistividades medias para las arenas y gravas; y altos resistivos para los materiales piroclásticos semicompactos y andesitas fracturadas. La interpretación del subsuelo del BCH se realizó de acuerdo con los resultados geofísicos correlacionando con la litología de pozos cercanos al BCH, y el análisis de la integración de información geológica- geofísica. La relación medio rocoso e hidrogeológico del BCH, se caracteriza por tres diferentes acuíferos: 1) Acuífero somero caracterizado como un acuitardo superior lacustre; 2) Acuífero principal, caracterizado por la secuencia aluvial y en su mayoría por la Formación Tarango, se caracteriza por una intercalación de materiales permeables y semipermeables, y 3) Acuífero profundo saturado, caracterizado por las andesitas fracturadas de la Formación Sierra de las Cruces, el cual representa un acuífero de permeabilidad secundaria. La aplicación del método transitorio electromagnético (TEM) permitió cuantificar la detección de dos zonas altamente saturadas y permeables dentro de la Formación Tarango, y de acuerdo con la zona saturada inferior, su nivel freático se localiza a 120 m de profundidad de la superficie; mientras que la zona saturada somera su nivel de saturación, en tiempos de estiaje (lluvias), se encuentra a algunos metros de la superficie del BCH.



Abstract

This thesis presents a conceptual hydrogeological model of the subsoil of the Chapultepec Forest (BCH) in México City (CDMX). The model is based on a geophysical resistivity study using the electromagnetic transients (TEM) method. The study also considers the geological conditions of the BCH. The recreational park consists of fractured andesites from the Sierra de las Cruces Formation and volcanoclastic sequences such as tuff, ash, pyroclastics, and agglomerates from the Tarango Formation. Additionally, the park has an alluvial sequence and short section of lake deposits. The study of the results from the geophysical prospecting reveals varying resistivity contrasts. Silty and clay sand materials exhibit low resistivities, while sands and gravels show medium resistivities. Semi-compact pyroclastic materials and fractured andesites display high resistivities. The subsurface of BCH was analyzed by correlating geophysical results with the lithology of nearby wells and integrating geological-geophysical information. The link between the geological composition and the presence of water in the BCH is defined by three distinct aquifers. 1) The shallow aquifer is described as a layer of sediment that restricts water flow; 2) the principal aquifer is made up of a mixture of materials that allow varying degrees of water flow, with the Tarango Formation being the most prominent. It consists of alternating layers of materials that are either highly permeable or partially permeable; 3) The Deep aquifer is composed of fractured andesites from the Sierra de las Cruces Formation, which allows water to flow through it due to its secondary permeability. The electromagnetic transient method (TEM) enabled the measurement and identification of two extensively saturated and permeable areas inside the Tarango Formation. Furthermore, based on the less saturated area, the water table is 120 meters below the surface. The shallow saturated zone near the BCH, located at a relatively shallow Depth, experiences a high saturation level during the dry season due to rainfall.



Contenido

ESTUDIO GEOFÍSICO DE RESISTIVIDAD PARA LA CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL SUBSUELO EN EL BOSQUE DE CHAPULTEPEC DE LA CIUDAD DE MÉXICO.....	1
Resumen.....	2
Abstract.....	3
Introducción.....	11
CAPÍTULO 1	12
ANTECEDENTES Y GENERALIDADES	12
1.1 Objetivo del trabajo de tesis	13
1.2 Trabajos anteriores de la zona de estudio	14
1.3. Localización	15
1.4. Fisiografía, hidrología y clima.....	15
1.5. Metodología de trabajo	17
CAPÍTULO 2	19
FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO.....	19
2.1. Conceptos Fundamentales de la Teoría Electromagnética.....	20
2.1.1 El concepto de campo y el descubrimiento del electromagnetismo.....	20
2.1.2. Ecuaciones de Maxwell	21
2.1.3. Relaciones constitutivas.....	22
2.1.4. Ecuaciones de Maxwell en el dominio del tiempo.....	23
2.1.5. Ecuaciones de Maxwell en dominio de las frecuencias	23
2.1.6. Ecuación de onda	26
2.1.7. Condiciones de frontera	29
2.1.8. Solución de la ecuación de onda.....	30
2.1.9. Propagación de ondas electromagnéticas	33
2.2. Fundamentos Básicos del Método de Transitorios Electromagnéticos en el dominio del tiempo (TEM)	36
2.2.1. Principios físicos del método transitorio electromagnético (TEM).....	36
2.2.2 Señal del método (TEM).....	38
2.2.3 Respuesta transitoria del campo electromagnético vertical	39



2.2.4	Resistividad aparente ($\rho_a \Omega \cdot m$)	41
2.2.5	Configuración del sondeo transitorio electromagnético (TEM).....	44
2.2.6	Implicaciones en el tamaño de la bobina en los sondeos transitorios electromagnéticos (TEM)	46
2.2.7	Fuentes de ruido y error en los sondeos transitorios electromagnéticos (TEM).....	47
2.3.	Teoría de la Inversión de Datos Geofísicos Transitorios Electromagnéticos (TEM).....	48
2.3.1	Modelo inverso.....	49
CAPÍTULO 3		54
GEOLOGÍA		54
3.1.	La Cuenca de México.....	55
3.1.1.	Evolución geológica de la Cuenca de México	56
3.2.	Geología de la Ciudad de México (CDMX).....	58
3.2.1.	Geología del poniente de Ciudad de México (CDMX)	62
3.2.2.	Evolución geológica del poniente de la Ciudad de México (CDMX).....	62
3.2.3.	Características litológicas	63
3.2.3.	Geología estructural de la Ciudad de México	65
3.3.	Geología del Bosque de Chapultepec (BCH)	68
3.3.1.	Geomorfología del Bosque de Chapultepec (BCH)	68
3.3.2.	Estratigrafía del Bosque de Chapultepec (BCH)	69
3.3.3.	Secciones geológicas del Bosque de Chapultepec	74
CAPÍTULO 4		78
GEOFÍSICA.		78
4.1.	Metodología de Adquisición de Datos de Resistividad, Mediante Sondeos Transitorios Electromagnéticos (TEM)	79
4.1.1.	Ubicación de sondeos TEM	79
4.1.2.	Tipo de arreglo (bobina coincidente)	79
4.1.3.	Características técnicas del equipo	81
4.1.4.	Adquisición de datos geofísicos de resistividad	82
4.2.	Procesamiento de Datos Geofísicos	84
4.2.1.	Transferencia de datos	85
4.2.2.	Edición de los datos numéricos de resistividad.....	85
4.2.3.	Análisis estadístico y edición de curva de decaimiento de voltaje (nV/AMP vs Tiempo [μs])	86



4.2.4.	Conversión de la curva de decaimiento de voltaje (nV/AMP vs Tiempo [μs]) a Resistividad aparente (Rho [Ω.m] vs Tiempo [μs])	88
4.2.5.	Modelo suavizado (inversión de Occam)	88
4.2.6.	Modelo unidimensional	89
4.3.	Perfiles de Resistividad	90
4.3.1.	Perfil Geofísico Regional SR-01	92
4.3.2.	Perfil Geofísico Regional SR-02	93
4.3.3.	Perfil Geofísico Local S2-01	95
4.3.4.	Perfil Geofísico Local S2-02	98
4.3.5.	Perfil Geofísico Local S2-03	98
4.3.6.	Perfil Geofísico local S3-01	100
4.4.	Mapas de isorresistividades	101
4.4.1.	Mapa de isorresistividades a 2,300 [m.s.n.m]	104
4.4.2.	Mapa de isorresistividades a 2,200 [m.s.n.m]	105
4.4.3.	Mapa de isorresistividades a 2,100 [m.s.n.m]	106
4.4.4.	Mapa de isorresistividades a 2,000 [m.s.n.m]	107
4.4.5.	Mapa de isorresistividades a 1,900 [m.s.n.m]	108
4.5.	Modelo Geofísico Tridimensional (3D)	109
4.5.1.	Resultados.	111
CAPÍTULO 5		114
CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL BOSQUE DE CHAPULTEPEC		114
5.1.	Modelo Conceptual Geofísico-Geológico del BCH	115
5.2.	Integración de Información para la Caracterización Hidrogeológica del BCH.	117
5.3.	Unidades Hidroestratigráficas	117
5.3.1.	Unidad hidroestratigráfica UH-1	119
5.3.2.	Unidad hidroestratigráfica UH-2	119
5.3.3.	Unidad hidroestratigráfica UH-3	120
5.4.	Modelo Conceptual Hidrogeológico del Bosque de Chapultepec	121
CAPÍTULO 6		123
CONCLUSIONES		123
Anexo 1. Correlación de Cortes Litológicos		127
Anexo 2. Curvas de resistividad.		129



Referencias..... 141

Figuras

Figura 1. 1. Localización del Bosque de Chapultepec..... 16

Figura 1. 2. Hidrografía de la subcuenca Dolores-Chapultepec..... 17

Figura 1. 3. Metodología de Investigación del trabajo de tesis. 18

Figura 2 1. Sistema coordinado de onda plana para un campo electromagnético, modificado de Facultad de Ingeniería, curso de prospección electromagnética, semestre 2010-2, apuntes de clase. 30

Figura 2.2. Arreglo del método inductivo TEM (Modificado de ANH, 2009). 37

Figura 2.3. Generación del campo magnético (Modificado de ANH, 2009). 38

Figura 2.4. Señal del método transitorio electromagnético (TEM), a) Pulso de Corriente (I) a treves de el transmisor, b) Pulso de voltaje primario y campo magnético primario, c) Voltaje secundario y campo magnético secundario atraves del receptor (Rx) (Modificada de Schlumberger, 2009). 39

Figura 2.5. Campo magnético y su derivada con respecto al tiempo (Modificado de Nabighian, 1991). 42

Figura 2.6. Configuración del método TEM's, a) Bobina Simple, b) Bobina Coincidente, c) Bobina Central, d) Bobinas separadas, e) Bobina Doble, f) Bobina Receptora Móvil Dentro del Transmisor, g) Bobina de Transmisor Largo, Fijo y Receptor Externo Móvil (Modificado de Geophysical Surveys, 2013 y Modificado de ANH, 2009). 46

Figura 2.7. Fuentes de Ruido en los Sondeos Transitorios Electromagnéticos (TEM's) (Modificado de ANH, 2009). 49

Figura 2.8. Influencia de ruido en la curva de decaimiento de voltaje en un sondeo TEM, a) Efecto de ruido paramagnético, b) Efecto de ruido por una tubería..... 50

Figura 3. 1. Mapa geológico de la Cuenca de México. Modificada de INEGI, 2014. 56

Figura 3. 2. Modelo geológico conceptual de la Cuenca de México. Modificado de Mosser et al en Santoyo y colaboradores, 2005..... 59

Figura 3. 3. Mapa geológico de la Ciudad de México (CDMX). Modificado de Mooser, 1994 y García-Palomo, 2008. 60

Figura 3. 4. Secciones geológicas regionales de la Ciudad de México. Reinterpretado y modificado de SACMEX 1; 2013; Pérez Cruz, 1988 y Mosser et al en Santoyo y colaboradores, 2005..... 61

Figura 3. 5. Sección geológica esquemática del poniente de CDMX. Modificada de Mooser, 1986, en Remigio Morales E, 2013). 63



Figura 3. 6. Sección geológica esquemática de La Sierra de Las Cruces. Modificada de CONAGUA, 2009.....	64
Figura 3. 7. Estratigrafía de la Formación Tarango. Modificada de Ruiz González G. 1998.....	66
Figura 3. 8. Mapa estructural de la Ciudad de México. Modificada de García-Palomo et al, 2008 y Mooser et al, 1994.	67
Figura 3. 9. Mapa geológico del Bosque de Chapultepec.	68
Figura 3. 10. Mapa geomorfológico del Bosque de Chapultepec. Modificado de Enrique Santillán, E. A., 2013.	70
Figura 3. 11. Estratigrafía tipo del Bosque de Chapultepec. Modificada de Aguayo C., Marín, 1989.	71
Figura 3. 12. Secciones geológicas esquemática del Bosque de Chapultepec.	77
Figura 4. 1. Localización de los sondeos TEM y secciones geofísicas en el Bosque de Chapultepec.	80
Figura 4. 2. Arreglo de la bobina coincidente (Modificado de ANH, 2009 y Schlumberger, 2009). .	80
Figura 4. 3. Equipo AERM TEM-FAST 48.....	81
Figura 4. 4. Equipo TEM armado, para adquisición de datos.....	83
Figura 4. 5. Adquisición y análisis de datos de campo, a) Curva de decaimiento de voltaje, b) Curva de resistividad aparente, c) Curva de profundidad de investigación.....	84
Figura 4. 6. Edición de datos numéricos de resistividad (a) <i>Apertura de los archivos .TXT con el editor de textos; (b) Visualización de los datos y parámetros iniciales de los registros adquiridos; (c) Limpieza de datos nulos, se puede observar en las elipses los datos con valores nulos y negativos, estos deben ser borrados o reemplazados además de aplicarle el valor absoluto a todos los datos de voltaje; (d) Visualización de los tres registros listos para su análisis estadístico.</i>	86
Figura 4. 7. <i>Edición de puntos en la curva de decaimiento de voltaje. (a) Selección de las curvas a promediar; (b) Puntos a editar o a eliminar, estos se muestran dentro de un círculo; (c) Pasos y opciones para promediar las curvas; (d) Comparación con la curva promediada.</i>	87
Figura 4. 8. <i>Curva de Decaimiento estadística.</i>	87
Figura 4. 9. <i>Curva Resistividad Aparente (Rho [Ω.m] vs Tiempo t [μs]).</i>	88
Figura 4. 10. <i>Procesado Para el Modelo Suavizado, (a) Curva de Resistividad a modelar; (b) condiciones iniciales para nuestro modelo multicapa (# capas, Max. R.M.S [%], Max. # de Iteraciones, profundidad máxima y mínima, valor de resistividad inicial); (c) Evolución del modelo suavizado y multicapas; (d) observación de la evolución de las iteraciones con su respectivo error del modelo; (e) Modelo suavizado de la curva de resistividad y modelo multicapas.</i>	89
Figura 4. 11. <i>Procesado del modelo unidimensional, (a) Modelo suavizado y multicapas; (b) Condiciones iniciales para nuestro modelo unidimensional (# de capas, Max. R.M.S [%], Max de # de iteraciones); (c) Curva a ajustar, aparece de color verde; (d) Aplicando la inversión para el mejor ajuste de la curva; (e) observando de la evolución de las iteraciones con su respectivo error; (f) modelo unidimensional; (g) valores de resistividad y espesores del modelo unidimensional.</i> ...	91
Figura 4. 12. Perfil Geofísico de Isorresistividad Regional SR-01.	94
Figura 4. 13. Perfil Geofísico de Isorresistividad Regional SR-02.	96
Figura 4. 14. Perfil Geofísico de Isorresistividad Local S2-01.	97



Figura 4. 15. Perfil Geofísico de Isorresistividad Local S2-02.	99
Figura 4. 16. Perfil Geofísico de iso-resistividad Local S2-03.	102
Figura 4. 17. Perfil Geofísico de Isorresistividad Local S3-01.	103
Figura 4. 18. Mapa de isorresistividad a 2,300 [m.s.n.m].	104
Figura 4. 19. Mapa de isorresistividad a 2,200 [m.s.n.m].	105
Figura 4. 20. Mapa de isorresistividad a 2,100 [m.s.n.m].	106
Figura 4. 21. Mapa de isorresistividad a 2,000 [m.s.n.m].	107
Figura 4. 22. Mapa de isorresistividad a 1,900 [m.s.n.m].	108
Figura 4. 23. Visualización 3D, a) Mapas de isorresistividad a cada 100 m de profundidad; b) Perfiles de isorresistividad.	110
Figura 4. 24. Visualización 3D de los resultados de la inversión de los iso-valores de resistividad; a) correlación de perfiles de Isorresistividad; b) Vista lateral de bajos resistivos; c) Vista lateral de resistividades medias; d) Vista lateral de altos resistivos; e) Distribución de las unidades resistivas vista lateralmente desde el norponiente (NW); f) Distribución de las unidades resistivas vista lateralmente desde el sureste (SE).	113
Figura 5. 1. Modelo conceptual integrado geofísico-geológico del Bosque de Chapultepec, a) Modelo geofísico; b) Modelo geológico	116
Figura 5. 2. Caracterización hidrogeológica del Bosque de Chapultepec; a) Interpretación hidrogeológica del perfil regional SR-02; b) Interpretación hidrogeológica del mapa a 2200 [m.s.n.m]; c) Interpretación hidrogeológica del mapa a 2000 [m.s.n.m]; interpretación y distribución espacial de las unidades hidroestratigráficas en el subsuelo del Bosque de Chapultepec (BCH). .	118
Figura 5. 3. Modelo conceptual hidrogeológico del bosque de Chapultepec.....	122
Figura A1. 1. Correlación de Cortes litológicos para la sección geológica esquemática A'-A.	127
Figura A1. 2. Correlación de cortes litológicos para la sección geológica esquemática B'-B.....	128
Figura A2. 1. Curva CHP-01. Inversión Unidimensional.	129
Figura A2. 2. Curva CHP-02. Inversión Unidimensional.	129
Figura A2. 3. Curva CHP-03. Inversión Unidimensional.	130
Figura A2. 4. Curva CHP-04. Inversión Unidimensional.	130
Figura A2. 5. Curva CHP-05. Inversión Unidimensional.	131
Figura A2. 6. Curva CHP-06. Inversión Unidimensional.	131
Figura A2. 7. Curva CHP-07. Inversión Unidimensional.	132
Figura A2. 8. Curva CHP-08. Inversión Unidimensional.	132
Figura A2. 9. Curva CHP-09. Inversión Unidimensional.	133
Figura A2. 10. Curva CHP-10. Inversión Unidimensional.	133
Figura A2. 11. Curva CHP-11. Inversión Unidimensional.	134



Figura A2. 12. Curva HG-01. Inversión Unidimensional.	134
Figura A2. 13. Curva HG-02. Inversión Unidimensional.	135
Figura A2. 14. Curva HG-03. Inversión Unidimensional.	135
Figura A2. 15. Curva HG-04. Inversión Unidimensional.	136
Figura A2. 16. Curva HG-05. Inversión Unidimensional.	136
Figura A2. 17. Curva HG-06. Inversión Unidimensional.	137
Figura A2. 18. Curva HG-07. Inversión Unidimensional.	137
Figura A2. 19. Curva HG-08. Inversión Unidimensional.	138
Figura A2. 20. Curva HG-09. Inversión Unidimensional.	138
Figura A2. 21. Curva HG-10. Inversión Unidimensional.	139
Figura A2. 22. Curva HG-11. Inversión Unidimensional.	139
Figura A2. 23. Curva HG-12. Inversión Unidimensional.	140

Tablas

Tabla 2. 1. Relación entre profundidad de investigación y tamaño de la bobina.	47
Tabla 4. 1. Especificaciones técnicas del equipo (AEMR, 2006).....	82
Tabla 4. 2. Zonificación Georresistiva	109
Tabla 5. 1. Descripción de las unidades hidroestratigráficas, correlacionadas con las unidades geoelectricas.	121



Introducción

El Bosque de Chapultepec (BCH) es uno de los parques urbanos más antiguos e importante de México y Latinoamérica, actualmente se conserva como un lugar de carácter público, ecológico, cultural y recreativo para los habitantes de la Ciudad de México (CDMX, 2006).

Debido a que en los últimos años el subsuelo del Bosque de Chapultepec (BCH) ha manifestado fenómenos geológicos como agrietamiento, hundimiento, desprendimiento de material de taludes y colapsos en algunas zonas de la 2ª Sección. Esto ha preocupado a las autoridades y a los visitantes del parque, debido a la importancia que representa el bosque para los capitalinos, se tomaron medidas y circunstancias de riesgo geológico, por lo cual se emprendió el proyecto de caracterización del subsuelo del Bosque de Chapultepec (BCH) (Proyecto FOMIX, CONACyT-GDF, realizado por la Facultad de Ingeniería de la UNAM, 2012).

Con base a los datos geológicos y geofísicos realizados en torno al lago mayor, mediante este trabajo de tesis se busca contribuir y resolver parte de la problemática que aqueja el subsuelo del Bosque de Chapultepec (BCH) y darle un carácter de reservorio hidrogeológico, caracterizándolo mediante un análisis geológico-geofísico.

En la primera parte del presente trabajo de tesis se revisó el estado del conocimiento geológico de la Cuenca de México, de la Ciudad de México (CDMX) y en particular del Poniente de la Ciudad, mediante el análisis de la información e ideas que plantean la evolución geológica de la zona de estudio y con los cortes litológicos de pozos cercanos al Bosque de Chapultepec (BCH), determinando la geología y estratigrafía. Posteriormente, se analizaron mediante técnicas geofísicas; las características resistivas del subsuelo del bosque (BCH), mediante sondeos geofísicos transitorios electromagnéticos en el dominio del tiempo (TEM's). Finalmente, se integraron los resultados obtenidos de la información geológica y geofísica, con el objetivo para proponer un modelo geológico-geofísico conceptual del subsuelo y su caracterización hidrogeológica del Bosque de Chapultepec (BCH); de esta forma se desea contribuir al conocimiento del acuífero en estudios posteriores a la zona del gran Bosque de Chapultepec (BCH).



CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES Y GENERALIDADES

“El agua lo sostiene todo”

Tales de Mileto



CAPÍTULO 1, ANTECEDENTES Y GENERALIDADES

El 5 de junio de 2006, el vaciado del tanque de almacenamiento del Lago Mayor llamo la atención de la población y de las autoridades del Distrito Federal. Ya que se trató de una contingencia mayor y de riesgo en el parque recreativo más grande de Latinoamérica, esta contingencia fue mitigada gracias a la presencia del Interceptor Poniente; ya que la mayor parte del agua se encauzo en el túnel del interceptor. Las inspecciones de las autoridades indicaron que el vaciado del Lago Mayor se debió a un boquete que colapsó el revestimiento de la loza del Lago que socavó el subsuelo (Facultad de Ingeniería, UNAM, 2014).

Durante la construcción del Lago Mayor en 1964 se suscitó una condición similar en la construcción de la cimentación del lago artificial, por lo cual se realizaron una serie de estudios geofísicos para detectar el origen de dicho colapso, y los resultados de esas indagaciones arrojaron la presencia de minas en el subsuelo de la 2^{da} Sección del Bosque de Chapultepec (BCH), debido a la actividad minera de los años 1920's, para extraer materiales de construcción. Posteriormente estas minas fueron rehabilitadas y acondicionadas para construir un espacio de recreación y esparcimiento en la Ciudad, en 1964 indicaron que el subsuelo de la 2^{da} Sección del Bosque de Chapultepec existía minas, cavernas y galerías, que a través del paso del tiempo y debido a la infiltración de agua, socavan y erosionan la superficie, debilitando el techo de estas minas provocando subsidencias y colapsos que pueden ser un riesgo para los visitantes y del parque en general.

En efecto y a modo de reacción de las autoridades del Bosque de Chapultepec (BCH), se plantearon actividades principales de investigación, para el subsuelo de la 2^{da} Sección del Bosque de Chapultepec (BCH), planteándose proyectos que conlleven a explicar las condiciones actuales del subsuelo en el Bosque de Chapultepec (BCH) (Facultad de Ingeniería, UNAM, 2014).

1.1 Objetivo del trabajo de tesis

El objetivo general de este trabajo de tesis consiste en caracterizar las condiciones hidrogeológicas del subsuelo del Bosque de Chapultepec; con el que se pretende cumplir con base en la elaboración de información geológica de cortes litológicos existentes, y a la elaboración y análisis de perfiles de mapas de isorresistividad; generados a partir de datos geofísicos de resistividad por medio de métodos transitorios electromagnéticos (TEM's) adquiridos en la etapa de exploración de campo.



El presente estudio de tesis, pretende asociar las condiciones geológicas del subsuelo a partir de los contrastes de resistividad dentro del BCH, teniendo como objetivos específicos:

- ✚ Elaborar de 2 secciones geológicas mediante correlación de cortes litológicos de pozos existentes alrededor y cerca del Bosque de Chapultepec (BCH).
- ✚ Determinar la distribución de los valores de resistividad en el subsuelo del Bosque de Chapultepec (BCH) a una profundidad de 500 metros, mediante el uso de la metodología de transitorios electromagnéticos en el dominio del tiempo (TEM).
- ✚ Determinar las condiciones geológicas, mediante los resultados obtenidos a partir de la información geofísica, infiriendo discontinuidades que nos permitan delimitar fronteras, contactos y cuerpos de interés hidrogeológico.

Cabe mencionar que el presente trabajo ofrece resultados cuantitativos únicamente de información de cortes litológicos de pozos y de información geofísica mediante valores de resistividad, no fue posible obtener otros parámetros de las condiciones hidrogeológicas y de mecánica de rocas (*p.ej.*: valores piezométricos, caudal, coeficiente de almacenamiento, calidad de agua o porosidad de la roca por mencionar algunos); debido a la falta de información geológica e hidrogeológica.

1.2 Trabajos anteriores de la zona de estudio

Los estudios realizados en la zona son escasos, algunos lo han cubierto de manera parcial a la zona del Lago Mayor y otros son de carácter geotécnico y obras civiles. Entre los estudios técnicos realizados con anterioridad, se encuentran los solicitados por el Gobierno del Distrito Federal.

En el 2006 se realizaron estudios del subsuelo sobre la superficie del Lago Mayor, solicitados por los directivos del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), debido al vaciado súbito del Lago Mayor. Los cuales son una serie de estudios geofísicos del subsuelo de la parte nororiental del Lago Mayor, los estudios fueron realizados por las empresas: Seismocontrol, S. A de C. V. (SACMEX, 2006) y Proyecto Civil Integral S. A de C. V. (SACMEX_1, 2006) e instituciones académicas: ESIA, Ticomán del IPN por medio de la Dirección de Ciencias de la Tierra (SACMEX_2, 2006) y el Instituto de Ingeniería de la UNAM (SACMEX_3,2006). Los estudios consistieron en la integración de diferentes técnicas geofísicas para la revisión, evaluación y dictaminar



el origen del colapso que se presentó en el Lago Mayor. Dichos estudios refieren que el colapso se originó por la existencia de túneles y minas antiguas en la zona, además determinan la estratigrafía a 25 metros detallando litológicamente por relleno y horizontes de pómez, la cual fue determinada correlacionando con cortes litológicos de excavaciones exploratorias en el interior del lago.

Otros estudios locales del poniente son los de Lugo *et al.* (1995), que describe el relieve y la litología en zonas de riesgo en la Delegación Álvaro Obregón; El informe técnico de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH, 2002) realizado por el Ing. Luis Chavelas Peña, plantea la geología del poniente del D.F; destacando un mapa geológico y la realización de secciones geológicas; por otra parte Santoyo *et al.* (2005) define la zonificación, características físicas y estratigráficas del subsuelo de la Cuenca del Valle de México; Zúñiga A. (2006) enfatiza un marco geológico del poniente de la Ciudad de México y correlaciona estratigráficamente la capa dura en la zona SW de la Cuenca de México; García-Palomo *et al.* (2008) se centra en el análisis morfoestructural de la Sierra de las Cruces, finalmente otros estudios donde se interna la zona de interés, y son de carácter geológico de manera más regional, y son los estudios realizados por Vásquez-Sánchez y Jaimes Palomera en (1989), y Aguayo & Marín en (1989), que definen la evolución geológica de la Cuenca de México.

1.3. Localización

El Bosque de Chapultepec (BCH) se localiza al poniente de la Ciudad de México (CDMX), dentro de la demarcación política Miguel Hidalgo (*figura 1.1*), cubriendo un área superficial de 686.018 [ha]. Los principales accesos al área de estudio son a través de las avenidas principales como Molino del Rey (Chivatito), Paseo de la Reforma, Circuito interior y Constituyentes hacia la 1^{ra} sección; Boulevard Adolfo López Mateos (Periférico), Constituyentes y la Calzada Lomas hacia la 2^{da} Sección; y Constituyentes, Av. Toluca y calles secundarias hacia la 3^{ra} Sección.

1.4. Fisiografía, hidrología y clima

El Bosque de Chapultepec se encuentra en el sector Centro-Oriental de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, dentro de la subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac compuesta por topofomas de sierras volcánicas, mesetas, lomeríos y llanuras lacustres (INEGI, 2014). En términos generales, la fisiografía del Bosque de Chapultepec es topofomas de lomeríos con cañadas y la llanura aluvial (INEGI, 2014).

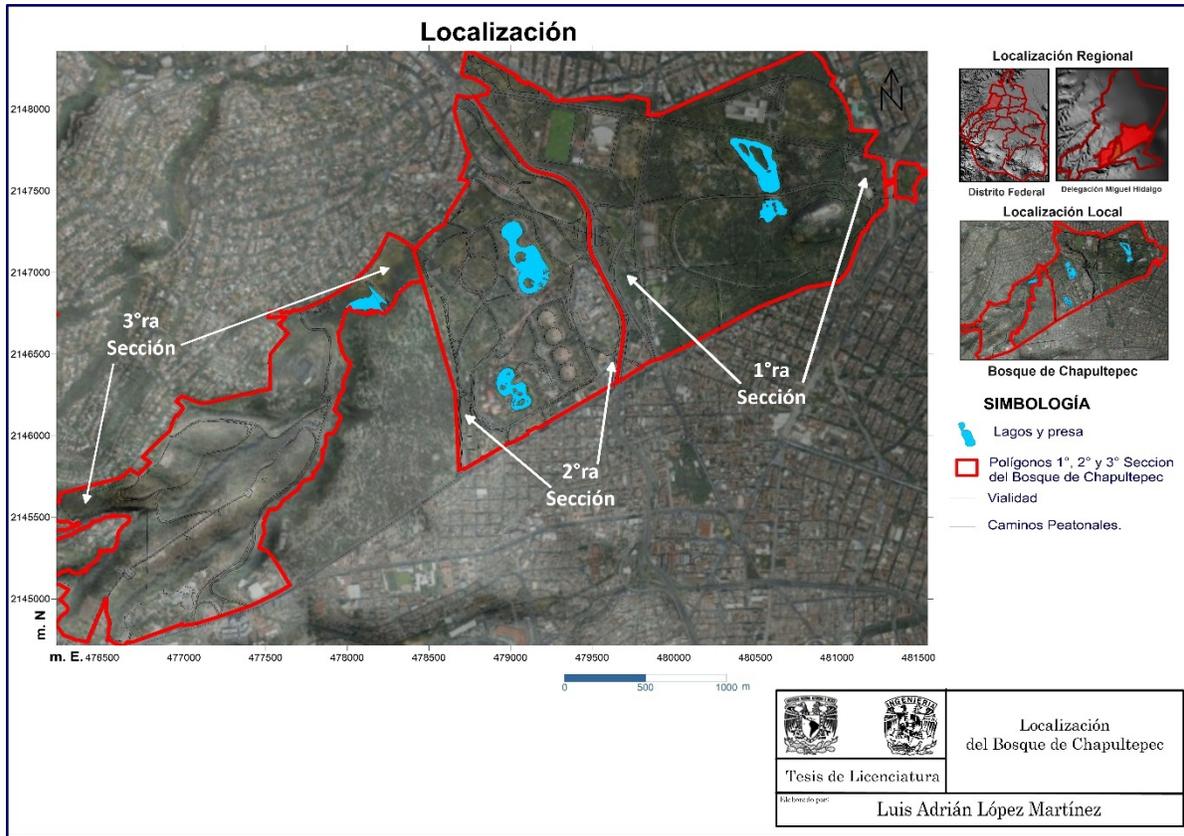


Figura 1. 1. Localización del Bosque de Chapultepec.

En términos hidrológicos se localiza dentro de la Región Hidrológica No 26 Panuco, Cuenca del Río Moctezuma (CONAGUA, 2009); en la porción sur-poniente de la Cuenca de México. La zona del bosque cuenta con escasas corrientes fluviales, como son: los pequeños arroyos localizados en la 3ª Sección del BCH en los cuales drenan agua de manera torrencial durante la temporada de lluvias y particularmente durante la presencia de tormentas y lluvias atípicas; los cauces de estos arroyos forman la subcuenca Dolores-Chapultepec.

Dentro del bosque existen importantes cuerpos de agua artificiales, los cuales se encuentran los antiguos lagos de Chapultepec, en la 1ª Sección; los tanques de almacenamiento, El Lago Mayor y El Lago Menor en la 2ª Sección; y la presa de contención Dolores-Chapultepec la cual se encuentra azolvada, representando un importante regulador hídrico (figura 1.2).

El Clima predominante en el bosque de Chapultepec es templado con lluvias en verano. En la 1ª Sección el porcentaje de humedad es menor que en las otras dos secciones; En la 2ª Sección del Bosque la humedad es media; mientras que en la 3ª Sección la temperatura va de un porcentaje de humedad media a mayor. La precipitación media anual en los meses lluviosos (junio a septiembre) es del orden de 700 a más de 900 mm aproximadamente. Durante los meses de noviembre a marzo la precipitación es menor a 125 mm aproximadamente (INEGI, 2014).

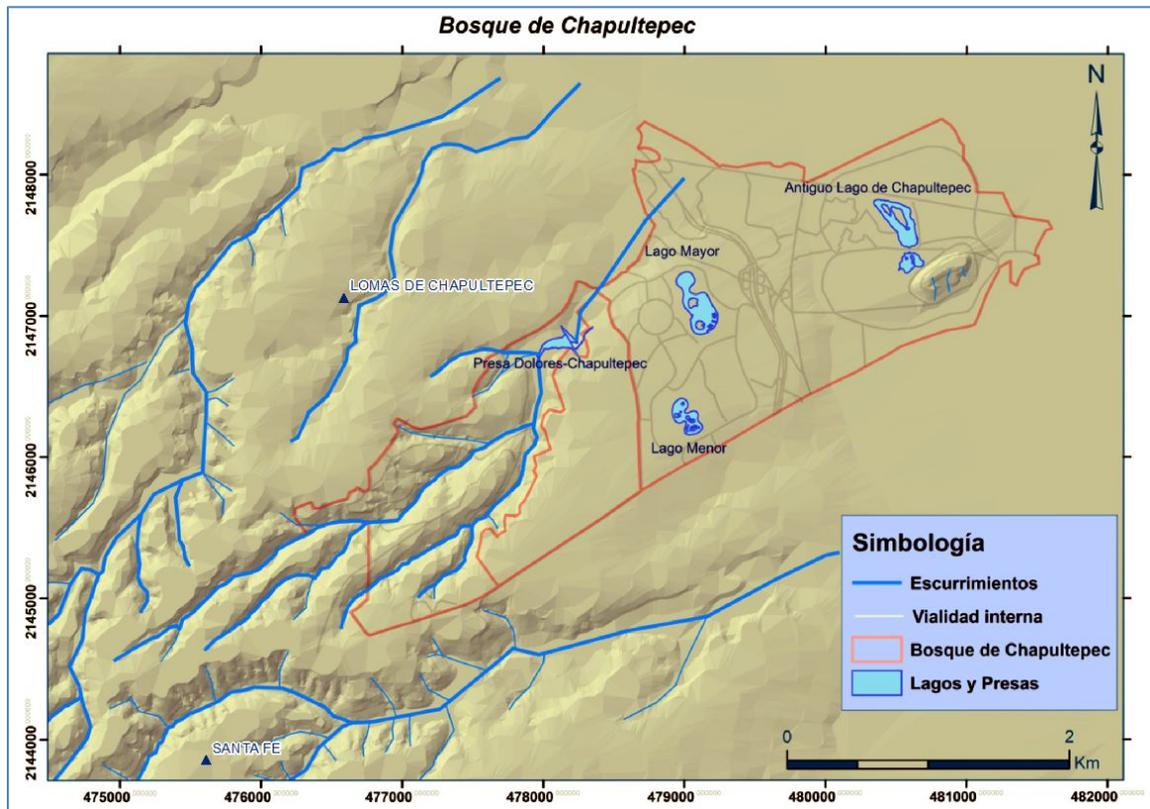


Figura 1. 2. Hidrografía de la subcuenca Dolores-Chapultepec.

1.5. Metodología de trabajo

El método de trabajo en la tesis fue desarrollado desde un enfoque geológico-geofísico, consiste en dos actividades fundamentales: trabajo geológico-geofísico de campo y trabajo de gabinete (figura 1.3).

La etapa de actividades en campo; constituye la base del estudio y tuvo la finalidad de generar la logística de adquisición de datos geológicos y geofísicos de resistividad; mediante recorridos geológicos y de mediciones geofísicas, en diferentes sitios, para este caso se realizaron sondeos transitorios electromagnéticos en el dominio del tiempo (TEM's), en zonas seleccionadas del Bosque de Chapultepec (BCH).

En la etapa de gabinete, se recopiló la información geológica y geofísica existente en el área de estudio, incluyendo la base topográfica a escala 1:50,000 (INEGI, 2021), fotografías aéreas escala 1:50,000, mapas geológicos y atributos geofísicos locales, además de la información litológica de pozos alrededor y dentro de la zona de estudio. La información fue utilizada para la generación de mapas y así planear las jornadas de reconocimiento y adquisición de datos, tanto geológicos como geofísicos para la elaboración de secciones geológicas y geofísicas de resistividad.

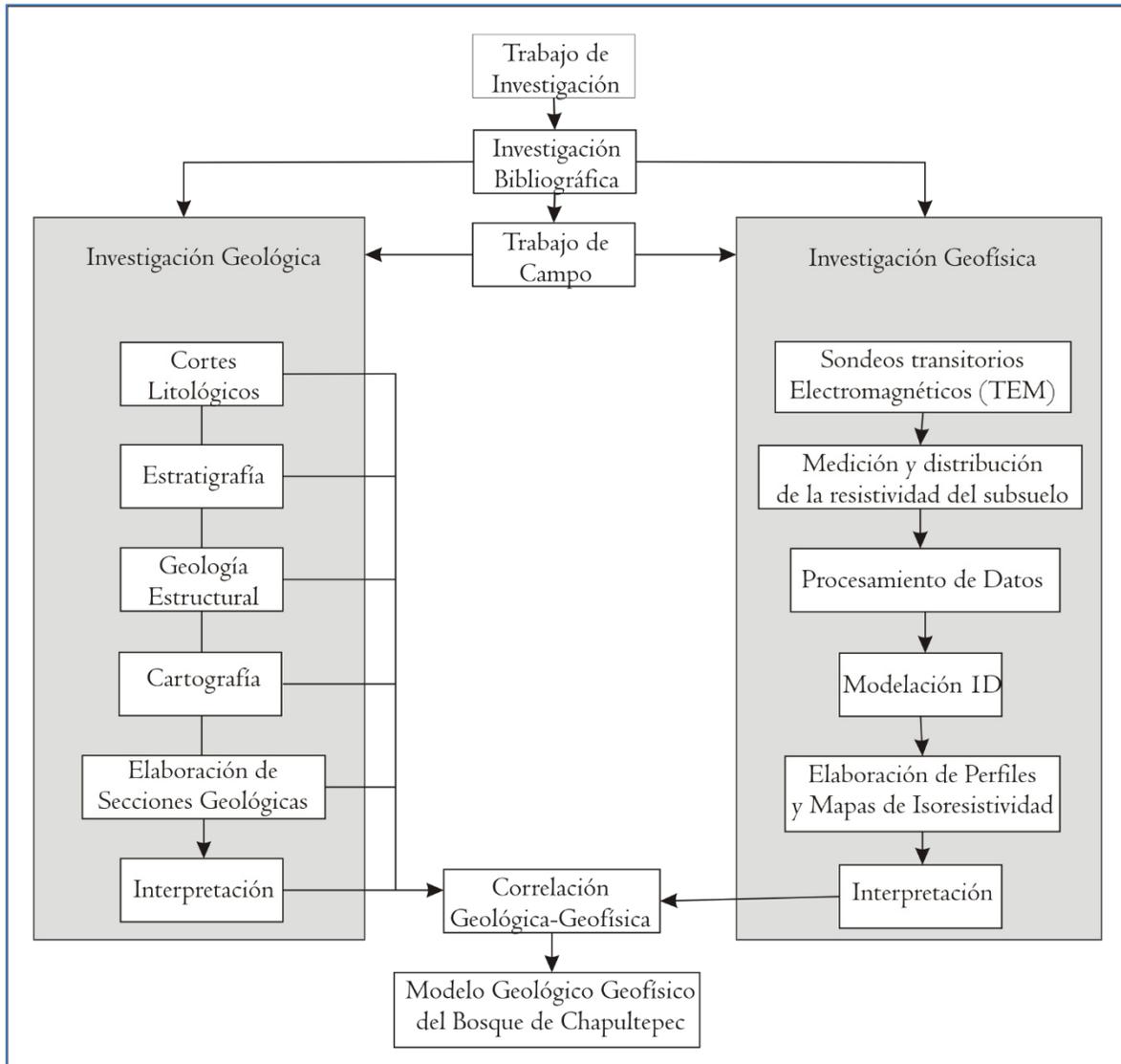


Figura 1. 3. Metodología de Investigación del trabajo de tesis.

Así mismo, se elaboró un mapa de la geología del poniente de la CDMX, así como de las estaciones de observación y ubicación de los sondeos electromagnéticos, en esta etapa también se realizó el análisis y procesamiento de datos geofísicos, así como la elaboración de los perfiles geoelectrónicos y la correlación geológica-geofísica obtenida.

Finalmente, una vez procesada y analizada la información se propone un modelo geofísico-geológico del Bosque de Chapultepec para hacer una caracterización hidrogeológica.



CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO

“Se nos olvida que el ciclo del agua y el ciclo de la vida son uno mismo”

Jacques Cousteau



CAPITULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL METODO ELECTROMAGNÉTICO

2.1. Conceptos Fundamentales de la Teoría Electromagnética

Los métodos geofísicos electromagnéticos miden la detección y propagación de los campos electromagnéticos de origen natural o artificial, teniendo sus fundamentos en la teoría electromagnética en medios homogéneos, basados en el concepto de interacción entre el campo eléctrico y el campo magnético, descritas por las leyes del electromagnetismo representadas mediante las ecuaciones de Maxwell.

2.1.1 El concepto de campo y el descubrimiento del electromagnetismo

El concepto de campo vectorial y escalar es describir la interacción de dos cuerpos por medio de fuerzas potenciales que interactúan entre ellos, descrito formalmente el concepto, por un campo vectorial, el cual se define como una función de cada punto en el espacio con magnitud y sentido, mientras que el campo escalar es una función de posición de un punto en el espacio con magnitud.

Michael Faraday propuso mediante experimentos la interacción del campo eléctrico con el campo electromagnético, donde una carga y un imán generan dichos campos respectivamente; y donde ambos pueden inducirse (Duran Neme, J., 2012), nos obstante este inventor carecía de elementos sólidos y descriptivos en leyes fisicomatemáticas.

El físico escoses James Clerk Maxwell observo esquemas e ilustraciones de los fenómenos que describió Faraday, y decidió indagar en algunas propiedades matemáticas para describir tales fenómenos, basándose en los conceptos de función armónica, y las funciones bien comportadas en el infinito, junto con el teorema de Louville, que demuestra el teorema de Helmholtz, este último teorema en su primer parte indica que todo campo vectorial está especificado unívocamente si se conoce su divergencia y rotacional, mientras que su segunda parte del teorema indica que un campo vectorial cuya divergencia y rotacional son conocidas debe cumplir con la condición de limite (Duran Neme, J., 2012).

El teorema de Helmholtz fue de gran importancia para que Maxwell, ya que con el describió y formulo el modelo matemático y el desarrollo teórico de las principales leyes del electromagnetismo, dándole así un formalismo vectorial, y demostrando con elementos fisicomatemáticos los experimentos de Faraday; enfatizando la idea principal de los dos científicos, sintetizar y enlazar bajo un solo marco teórico los fenómenos eléctricos y magnéticos que es el electromagnetismo.



2.1.2. Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell son un sistema de ecuaciones vectoriales diferenciales parciales, que describen el comportamiento del campo electromagnético, dichas ecuaciones están compuestas por las siguientes cuatro componentes:

$$\vec{B}: \text{Vector de Flujo Magnético o Campo de Inducción Magnética..... } \left[T = \frac{Wb}{m^2} \right]$$

$$\vec{E}: \text{Vector de Intensidad Eléctrica o Intensidad de Campo Eléctrico..... } \left[\frac{V}{m} \right]$$

$$\vec{H}: \text{Vector de Intensidad Magnética o Intensidad de Campo Magnético. } \left[\frac{A}{m} \right]$$

$$\vec{D}: \text{Vector de Flujo Eléctrico o Inducción Eléctrica..... } \left[\frac{C}{m^2} \right]$$

$$\vec{J}: \text{Vector de Densidad de corriente Eléctrica..... } \left[\frac{A}{m^2} \right]$$

$$q: \text{Densidad de Carga..... } \left[\frac{C}{m^3} \right]$$

Estas componentes vectoriales a su vez constituyen un campo vectorial entre sí por medio de modelos matemáticos en las ecuaciones de Maxwell que a continuación se muestran:

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

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

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (2.3) \text{ Ley de Gauss para Campos Eléctricos}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4) \text{ Ley de Gauss para Campos Magnéticos}$$

La Ley de Faraday (ecuación 2.1) es la expresión de la inducción electromagnética, y establece que un campo magnético puede producir una corriente en una trayectoria cerrada, si el flujo magnético está variando con el tiempo; el signo negativo está dada por la ley de Lenz, el cual nos traduce que, en dicha trayectoria cerrada, el flujo se opone al cambio de sentido al del flujo magnético (Díaz Molina, O, 2003) y (Escobar-Salguero y Cortes-Soto, 2000).

La Ley de Ampere (ecuación 2.2), establece que el campo magnético es generado tanto por corrientes de conducción (\vec{J}) y corrientes de desplazamientos en el dominio del tiempo ($\partial \vec{D} / \partial t$) (Díaz Molina, O, 2003), esta ecuación nos traduce el fenómeno de las corrientes en medios dieléctricos y los describe en medios conductores.

La Ley de Gauss para Campos Eléctricos (ecuación 2.3), representa la expresión matemática de la Ley de Coulomb, e indica que la fuente del campo de inducción eléctrica (\vec{D}) son las cargas (q)



(Díaz Molina, O, 2003).

La Ley de Gauss para Campos Magnéticos (*ecuación 2.4*), indica que en el campo magnético (\vec{B}) no existen cargas magnéticas que lo generen, por lo cual las líneas del campo (\vec{B}) son continuas y en forma de curva cerrada (Díaz Molina, O, 2003).

El sistema de ecuaciones de Maxwell está descrito como ecuaciones diferenciales lineales, por la tanto la solución para entender el fenómeno, electromagnético no es sencillo para cada campo, para sus casos más generales estas ecuaciones pueden ser reducidas a dos si se utilizan las relaciones constitutivas.

2.1.3. Relaciones constitutivas

Para entender mejor los fenómenos electromagnéticos es necesario conocer las relaciones constitutivas entre los campos; ya que las ecuaciones 2.1, 2.2, 2.3, y 2.4 no son independientes, es necesario incluir las relaciones constitutivas para completar el sistema de ecuaciones (Nathan Ida, 1995); para estas relaciones es importante tener en cuenta los Propiedades eléctricas y magnéticas de la materia que son los siguientes parámetros ϵ , μ y σ , donde:

- ϵ : *Permitividad Eléctrica*..... [$\frac{F}{m}$]
- μ : *Permiabilidad Magnética*..... [$\frac{H}{m}$]
- σ : *Conductividad eléctrica del Medio* ..[Siemens]

Estas propiedades físicas, relacionan el campo de desplazamiento de la inducción eléctrica (\vec{D}) con la intensidad del campo eléctrico (\vec{E}), por medio de la constante dieléctrica o permitividad eléctrica (ϵ) la cual constituye un tensor y es un escalar cuando el medio en el que se encuentran es homogéneo e isotrópico (*ecuación 2.5*) (Duran Neme, J., 2012).

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.5)$$

A su vez el campo magnético (\vec{H}) se relaciona con el campo de inducción magnética (\vec{B}) por medio de la permitividad magnética (μ) la cual es un tensor en el mismo caso en general (*ecuación 2.6*) (Duran Neme, J., 2012)).

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



Otra relación es la que cumple en la mayoría de los medios, es la Ley de Ohm en forma diferencial, que establece la relación de la densidad de corriente (\vec{j}) proporcionalmente con la intensidad del campo eléctrico (\vec{E}), por medio de la conductividad eléctrica del medio (σ) (ecuación 2.7).

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (2.7)$$

2.1.4. Ecuaciones de Maxwell en el dominio del tiempo

Para reducir a dos ecuaciones el sistema de cuatro ecuaciones de Maxwell se sustituye la ecuación 2.6 en la Ley de Faraday (ecuación 2.1) para obtener la primera ecuación. De igual manera se hace lo mismo para obtener la segunda ecuación solamente que esta vez se sustituyan las ecuaciones 2.5 y 2.7 en la Ley de Ampere (ecuación 2.2) dando como resultado:

$$(\nabla \times \vec{E}) = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.8)$$

$$(\nabla \times \vec{H}) = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.9)$$

Las ecuaciones 2.8 y 2.9 representan un sistema de ecuaciones en la cual existe una dependencia de variación temporal del campo magnético, que influye en el campo eléctrico y viceversa, pero es difícil y laborioso la solución de estas expresiones en el dominio del tiempo; por lo cual, para entender la propagación de ondas electromagnéticas, es más útil transformar las ecuaciones de Maxwell al dominio de las frecuencias.

2.1.5. Ecuaciones de Maxwell en dominio de las frecuencias

Los campos eléctrico y magnético son armónicos y variables en el tiempo, por consiguiente, se les obtendrá una parte real e imaginaria, al tomar la parte real y sustituirlas en las ecuaciones de Maxwell, pasaran al dominio de las frecuencias (Duran Neme, J., 2012).

Una forma elegante y fácil de solucionar las ecuaciones de Maxwell del dominio del tiempo al de las frecuencias, es utilizar la Transformada de Fourier (Ward y Hohmann, 1989), que a continuación se desarrolla.



Para obtener la Transformada de Fourier de cualquier componente del campo electromagnético en el dominio del tiempo, supóngase una función $\mathbf{F}(\vec{r}, t)$ que es cualquier componente del campo electromagnético, dependiente de tres coordenadas espaciales y del tiempo, obtenemos:

$$f(\vec{r}, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{F}(\vec{r}, t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.10)$$

Donde $f(\vec{r}, \omega)$ es la nueva función de la componente en el dominio de las frecuencias. Por lo tanto, también es posible expresar la función original $\mathbf{F}(\vec{r}, t)$ como la transformada inversa de Fourier de $f(\vec{r}, \omega)$.

$$\mathbf{F}(\vec{r}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\vec{r}, \omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (2.11)$$

Aplicando la derivada parcial respecto al tiempo se obtiene:

$$\frac{\partial \mathbf{F}(\vec{r}, t)}{\partial t} = i\omega \int_{-\infty}^{\infty} f(\vec{r}, \omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}(\vec{r}, t)}{\partial t} = i\omega \mathbf{F}(\vec{r}, t) \quad (2.13)$$

Posteriormente se realiza la Transformada de Fourier (ecuación 2.10 y a la ecuación 2.13):

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial \mathbf{F}(\vec{r}, t)}{\partial t} e^{-i\omega t} = i\omega \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{F}(\vec{r}, t) e^{-i\omega t} d\omega \quad (2.14)$$

Por lo tanto:

$$TF \left[\frac{\partial \mathbf{F}(\vec{r}, t)}{\partial t} \right] = i\omega f(\vec{r}, \omega) \quad (2.15)$$

Este procedimiento se les aplica a todas las componentes del campo electromagnético, por lo tanto, las ecuaciones de maxwell en el dominio de las frecuencias se expresan de la siguiente manera:



$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, \omega) = -i\omega \vec{B}(\vec{r}, \omega) \quad (2.16) \text{ Ley de Faraday}$$

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}, \omega) = \vec{J}(\vec{r}, \omega) + \vec{D}(\vec{r}, \omega) \quad (2.17) \text{ Ley de Ampere}$$

$$\nabla \cdot \vec{D}(\vec{r}, \omega) = q \quad (2.18) \text{ Ley de Gauss para Campos Eléctricos}$$

$$\nabla \cdot \vec{B}(\vec{r}, \omega) = 0 \quad (2.19) \text{ Ley de Gauss para Campos Magnéticos}$$

Teniendo en cuenta las relaciones constitutivas en el dominio de las frecuencias y sus propiedades eléctricas y magnéticas de la materia:

$$\vec{D}(\vec{r}, \omega) = \mu \vec{E}(\vec{r}, \omega) \quad (2.20)$$

$$\vec{B}(\vec{r}, \omega) = \mu \vec{H}(\vec{r}, \omega) \quad (2.21)$$

$$\vec{J}(\vec{r}, \omega) = \sigma \vec{E}(\vec{r}, \omega) \quad (2.22)$$

Reduciendo las ecuaciones de Maxwell a un sistema de dos ecuaciones en el dominio de las frecuencias, se sustituyen las relaciones constitutivas (ecuaciones 2.20, 2.21 y 2.22) en la Ley de Faraday y en la Ley de Ampere (ecuaciones 2.16 y 2.17), se obtiene:

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, \omega) = -i\mu\omega \vec{H}(\vec{r}, \omega) \quad (2.23)$$

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}, \omega) = (\sigma + i\epsilon\omega) \vec{E}(\vec{r}, \omega) \quad (2.24)$$

Dónde:

$$\hat{z} = i\mu\omega \quad (2.25) \text{ es la Impedividad o la Impedancia}$$

$$\hat{y} = \sigma + i\mu\omega \quad (2.26) \text{ es la Admitividad o la Admitancia}$$

Sustituyendo las ecuaciones 2.25 y 2.25 en las dos ecuaciones de Maxwell (ecuaciones 2.23 y 2.24) y despejando ambas ecuaciones se obtiene:

$$(\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, \omega)) + \hat{z} \vec{H}(\vec{r}, \omega) = 0 \quad (2.27)$$

$$(\nabla \times \vec{H}(\vec{r}, \omega)) - \hat{y} \vec{E}(\vec{r}, \omega) = 0 \quad (2.28)$$



2.1.6. Ecuación de onda

Una de las soluciones simples y al mismo tiempo fundamental en los problemas de la prospección electromagnética, es la propagación de ondas electromagnéticas en el subsuelo, teniendo en cuenta que se trata de un medio homogéneo e isotrópico, como ya vimos en los subcapítulos anteriores, las ecuaciones de Maxwell pueden ser simplificadas, sabiendo que ϵ , μ y σ son constantes y considerando las relaciones constitutivas; estos procedimientos anteriores nos conllevan a la ecuación de onda.

En el dominio del tiempo la ecuación de onda se obtiene aplicando el rotacional a las *ecuaciones 2.8 y 2.9* en el dominio del tiempo, las cuales se expresan como:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{H}) \quad (2.29)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} = \sigma (\nabla \times \vec{E}) + \epsilon \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{E}) \quad (2.30)$$

Sustituyendo la *ecuación 2.9* en 2.27 y la *ecuación 2.8* en 2.29, desarrollando y asumiendo que los campos eléctricos y magnéticos poseen primera y segunda derivada se obtienen:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.31)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} = -\mu \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (2.32)$$

Teniendo en cuenta la identidad vectorial $\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = -\nabla^2 \mathbf{A} - \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A})$, y asumiendo los campos eléctricos y magnéticos tienen continuidad en medios homogéneos por lo tanto $\nabla \cdot \vec{E} = 0$ y $\nabla \cdot \vec{H} = 0$, y aplicando dichas identidades a las *ecuaciones 2.31 y 2.32*, se tiene:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.33)$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.34)$$



Las *ecuaciones 2.33* y *2.34* son las ecuaciones de onda para el campo eléctrico y magnético respectivamente, las cuales representan la propagación de ondas de cada campo en función del tiempo y de las propiedades del medio en el subsuelo.

A fin de aprovechar el manejo de las ecuaciones anteriores, es mejor trabajarlas en el dominio de las frecuencias. Para pasar a dicho dominio se aplicó la Transformada de Fourier a cada componente del campo, por lo cual se harán las mismas transformaciones que se obtuvieron para las *ecuaciones 2.33* y *2.34*, en este caso para el dominio de las frecuencias.

La ecuación de onda para cada campo en el dominio de las frecuencias se obtiene de igual manera. Aplicando el rotacional a las *ecuaciones 2.23* y *2.24* en el dominio de las frecuencias, las cuales se expresan como:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E}(\vec{r}, \omega) = -i\mu\omega \nabla \times \vec{H}(\vec{r}, \omega) \quad (2.35)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H}(\vec{r}, \omega) = (\sigma + i\epsilon\omega)\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, \omega) \quad (2.36)$$

Sustituyendo esta vez las *ecuaciones 2.24* en la *ecuación 2.35* y *2.23* en la *ecuación 2.36*, desarrollándolas y teniendo en cuenta también la identidad vectorial $\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = -\nabla^2 \mathbf{A} - \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A})$, y asumiendo los campos eléctricos y magnéticos tienen continuidad en medios homogéneos por lo tanto $\nabla \cdot \vec{E} = 0$ y $\nabla \cdot \vec{H} = 0$, y aplicando lo mencionado anteriormente se tiene:

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}, \omega) + (\mu\epsilon\omega^2 + i\mu\sigma\omega)\vec{E}(\vec{r}, \omega) = 0 \quad (2.37)$$

$$\nabla^2 \vec{H}(\vec{r}, \omega) + (\mu\epsilon\omega^2 + i\mu\sigma\omega)\vec{H}(\vec{r}, \omega) = 0 \quad (2.38)$$

Las *ecuaciones 2.37* y *2.38* son las ecuaciones de onda para campo eléctrico y magnético en el dominio de las frecuencias respectivamente; estas dos últimas ecuaciones se pueden también escribir como:

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}, \omega) + \gamma^2 \vec{E}(\vec{r}, \omega) = 0 \quad (2.39)$$



$$\nabla^2 \vec{H}(\vec{r}, \omega) + \gamma^2 \vec{H}(\vec{r}, \omega) = \mathbf{0} \quad (2.40)$$

Donde γ es la constante de propagación o número de onda que se define como:

$$\gamma^2 = (\mu\epsilon\omega^2 + i\mu\sigma\omega) \quad (2.41)$$

Considerando que en muchos casos de la prospección electromagnética se utilizan campos que varíen relativamente lentos en el tiempo, el cual nos aproxima a un modelo cuasiestático o cuasiestacionario, lo cual significa que las corrientes de desplazamiento se desprecian ya que son mucho menores que las corrientes de conducción y estas últimas son las que predominan dentro del subsuelo.

Por lo cual se puede despreciar la segunda derivada en las *ecuaciones 2.33 y 2.34*; y tomando en cuenta que: $\mu\epsilon\omega^2 \ll -i\mu\sigma\omega$ por lo tanto la constante de propagación se aproxima a $\gamma^2 = -i\mu\sigma\omega$, considerando esto en las *ecuaciones 2.37 y 2.38*, se escriben las ecuaciones de onda, que se describe como una ecuación de difusión (*ecuaciones 2.42, 2.43, 2.44 y 2.45*) para el campo eléctrico y magnético:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \mathbf{0} \quad (2.42)$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \mathbf{0} \quad (2.43)$$

En el dominio del tiempo y:

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}, \omega) - i\mu\sigma\omega \vec{E}(\vec{r}, \omega) = \mathbf{0} \quad (2.44)$$

$$\nabla^2 \vec{H}(\vec{r}, \omega) - i\mu\sigma\omega \vec{H}(\vec{r}, \omega) = \mathbf{0} \quad (2.45)$$

En el dominio de las frecuencias.

Lo que resta es caracterizar los campos e imponer condiciones de frontera para así resolver las ecuaciones de difusión del campo eléctrico y del campo electromagnético.



2.1.7. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera se derivan de las ecuaciones de Maxwell, en su forma integral (Ward y Hohmman, 1989), se usan ya que en las diferentes capas del subsuelo las propiedades de la materia (ϵ, μ y $\sigma((1/\rho))$) varían bruscamente entre la interfaz litológica del subsuelo, lo que a su vez hacen que los campos \vec{B} , \vec{E} , \vec{H} y \vec{D} varíen de la misma forma y dichos flujos pueden ser infinitesimal cercana a la superficie (Díaz Molina, O., 2003).

El caso más general, en una superficie S separada por dos medios $M1$ y $M2$, los parámetros de cada medio son constantes o cambian gradualmente, y son válidos para las siguientes condiciones.

Para las componentes normales del campo las condiciones de frontera son:

$$\mathbf{B}_{n2} - \mathbf{B}_{n1} = 0 \quad (2.46)$$

Dónde: $\mathbf{n1}$ y $\mathbf{n2}$ representan las componentes normales de la superficie S .

Por lo tanto, la componente normal del campo magnético \vec{B} es continua al pasar del medio 2 (M2) al medio 1(M1) atreves de la interfaz de la superficie S (ecuación 2.46).

$$\mathbf{D}_{n2} - \mathbf{D}_{n1} = \mathbf{q}_n \quad (2.47)$$

Donde \mathbf{q}_n es la densidad de carga eléctrica superficial en la frontera, por lo tanto, la componente normal del campo de inducción eléctrica o desplazamiento, dieléctrico varía discontinuamente y es igual a la acumulación de carga superficial \mathbf{q}_n en la interfaz (ecuación 2.47).

Para las componentes tangenciales las condiciones de frontera son:

$$\mathbf{H}_{t2} - \mathbf{H}_{t1} = \mathbf{J} \quad (2.48)$$

Donde \mathbf{J} es la densidad de corriente eléctrica superficial, y donde t_1 y t_2 representan las componentes tangenciales de la superficie S . Para una superficie de medios conductores ideales, la densidad de corriente se diferencia de cero; por lo tanto, en un medio homogéneo e isotrópico no existe la corriente superficial por lo que las ecuaciones 2.47 y 2.48 se expresan de la siguiente manera:

$$\mathbf{D}_{n2} - \mathbf{D}_{n1} = 0 \quad (2.49)$$

$$\mathbf{H}_{t2} - \mathbf{H}_{t1} = 0 \quad (2.50)$$



Y la componente tangencial del campo eléctrico \vec{E} es continuo en la interfaz (*ecuación 2.51*).

$$E_{t2} - E_{t1} = 0 \quad (2.51)$$

Con la ayuda de las *ecuaciones 2.46 y 2.51* y las relaciones constitutivas (*ecuaciones 2.20, 2.21 y 2.22*) se obtiene las relaciones de continuidad de estas componentes normales y tangenciales de los campos \vec{B} , \vec{E} , \vec{H} y \vec{D} (Díaz Molina, O., 2003) (Chen-To Tai, 1971).

2.1.8. Solución de la ecuación de onda

La forma en que una onda electromagnética se propaga en un medio homogéneo e isótropo, la rige la ecuación de onda (*ecuaciones 2.33, 2.34, 2.39 y 2.40*), para este trabajo se simplificara la ecuación de onda con el concepto de onda plana con independencia sinoidal en el tiempo.

Dicho concepto nos describe que en un medio se introduce un sistema rectangular de coordenadas (x, y, z) , y dicho sistema se mueve en dirección preferencial en el eje de las z (*figura 2.1*), entonces los campos \vec{E} y \vec{H} deben cumplir las siguientes condiciones (Díaz Molina, O., 2003).

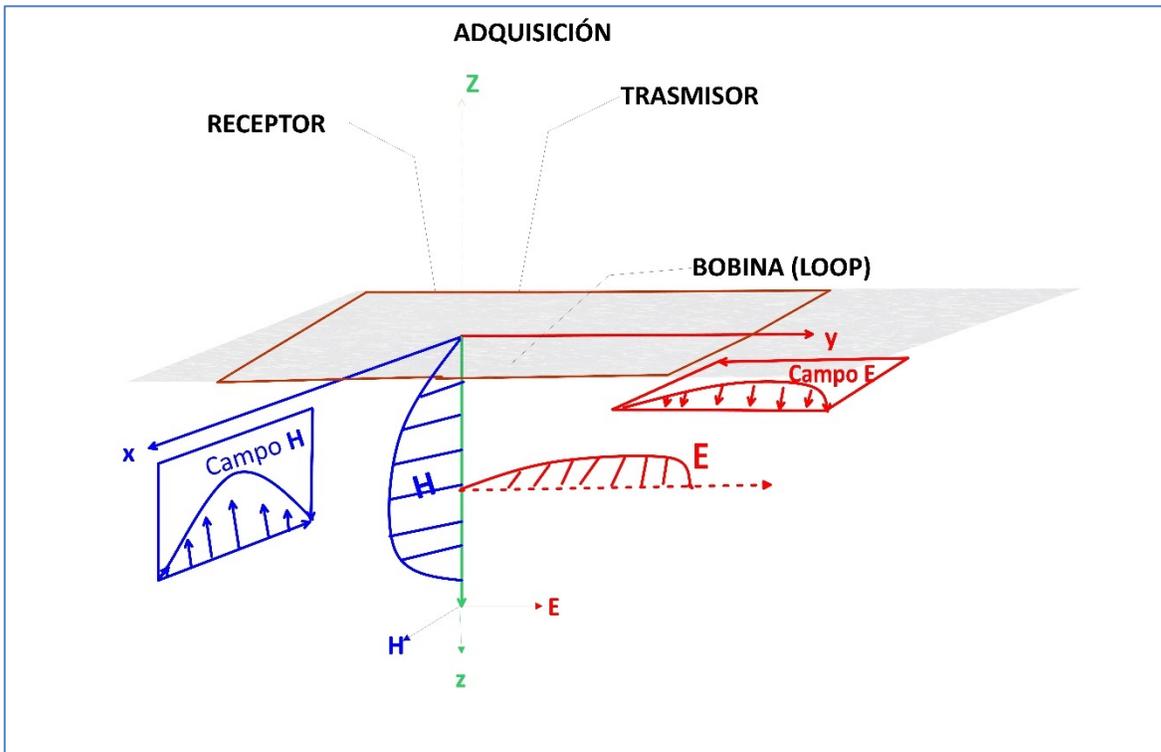


Figura 2 1. Sistema coordenado de onda plana para un campo electromagnético, modificado de Facultad de Ingeniería, curso de prospección electromagnética, semestre 2010-2, apuntes de clase.



- \vec{E} y \vec{H} son constantes en cualquier plano horizontal, por lo tanto:

$$\vec{E} \cong \vec{H} \cong \mathbf{0}, \text{ si } Z = \text{cte} \quad (2.52)$$

- El campo \vec{E} y \vec{H} tiende a cero si z tiende al infinito.

$$\vec{E} = \vec{H} = \mathbf{0}, \text{ si } Z \rightarrow \infty \quad (2.53)$$

Aplicando las condiciones a la Ecuación de Onda (ecuaciones 2.39 y 2.40), se obtienen los vectores \vec{E} y \vec{H} .

$$\nabla^2 \vec{E} + \gamma^2 \vec{E} = \mathbf{0} \quad (2.54)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + \gamma^2 \vec{H} = \mathbf{0} \quad (2.55)$$

Dando como resultado las siguientes ecuaciones diferenciales (ecuaciones 2.56, 2.57, 2.58 y 2.59).

- Para la condición 1.

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial x} = \frac{\partial \vec{E}}{\partial y} = \mathbf{0} \quad (2.56)$$

y

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial x} = \frac{\partial \vec{H}}{\partial y} = \mathbf{0} \quad (2.57)$$

- Para la condición 2

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} + \gamma^2 \vec{E} = \mathbf{0} \quad (2.58)$$

y

$$\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial z^2} + \gamma^2 \vec{H} = \mathbf{0} \quad (2.59)$$



La solución de las *ecuaciones 2.58 y 2.59* se escriben de la siguiente forma.

$$\vec{E} = A e^{i\gamma z} + B e^{-i\gamma z} \quad (2.60)$$

$$\vec{H} = C e^{i\gamma z} + D e^{-i\gamma z} \quad (2.61)$$

Donde A, B, C y D son vectores constantes complejos, para definirlos es necesario analizar los exponentes. Donde la propagación de onda se define como:

$$\gamma = \alpha + i\beta \quad (2.62)$$

Analizando los exponentes

$$e^{i\gamma z} = e^{i(\alpha+i\beta)z} = e^{i\alpha z} e^{-\beta z} \quad (2.63)$$

$$e^{-i\gamma z} = e^{-i(\alpha+i\beta)z} = e^{-i\alpha z} e^{\beta z} \quad (2.64)$$

Aplicando la condición 2, dado que $e^{i\beta}$ es acotada y $e^{-i\alpha}$ tiende a cero por que z tiende al infinito, entonces $e^{-i\gamma z}$ es diferente de cero, por lo que los vectores B y D van en dirección de la propagación del eje z; y como z tiende al infinito, por lo tanto:

$$z \rightarrow \infty$$

Entonces:

$$B = 0 \quad y \quad D = 0$$

Por lo que obtendremos:

$$\vec{E} = A e^{i\gamma z} \quad (2.65)$$

y

$$\vec{H} = C e^{i\gamma z} \quad (2.66)$$

Poniendo en la superficie inicial, la condición $Z=0$, se determinan las constante A y C (*ecuación 2.67 y 2.68*).

$$A = \vec{E}_0 \quad (2.67)$$

$$C = \vec{H}_0 \quad (2.68)$$



Analizando la descomposición vectorial de los campos eléctricos (\vec{E}) y magnético (\vec{H}); las derivadas parciales $\partial\vec{E}_z/\partial z$ y $\partial\vec{H}_z/\partial z$ son iguales a cero, mientras que γ es diferente de cero, por lo que:

$$\vec{E}_z = 0, \vec{H}_z = 0$$

Por lo tanto, el campo electromagnético cae sobre una superficie plana en dirección vertical, siempre sobrepuesta en un plano horizontal; entonces la propagación de ondas de los campos eléctricos (\vec{E}) y magnético (\vec{H}); se escriben de la siguiente forma:

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \vec{E}_0(\mathbf{x}, \mathbf{y})e^{i\gamma z} \quad (2.69)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \vec{H}_0(\mathbf{x}, \mathbf{y})e^{i\gamma z} \quad (2.70)$$

Las ecuaciones 2.69 y 2.70 representan la solución de la ecuación de onda para un campo eléctrico (\vec{E}) y un campo magnético (\vec{H}); en un semiespacio homogéneo e isótropo.

2.1.9. Propagación de ondas electromagnéticas

Existen tres conceptos importantes para comprender la forma en que se propagan las ondas electromagnéticas en un medio cuasiestático, y estos son las constantes de fase, la constante de atenuación y la penetración nominal, estas se obtienen a partir de la propagación de onda (γ) que es un vector complejo que se puede descomponer en su parte real y su parte imaginaria (ecuación 2.59).

La parte real α que es la constante de fase y la parte imaginaria β que es la constante de atenuación, son las propiedades que determinan la amplitud de las ondas electromagnéticas, expresándolas en función de las propiedades del medio natural (ϵ, μ, σ) y de la frecuencia angular (ω) (ecuación 2.39) (Díaz Molina, O., 2003).

Desarrollando el binomio de las ecuaciones 2.41 y 2.62.

$$\gamma^2 = (\alpha + i\beta)^2 = \alpha^2 + 2i\alpha\beta - \beta^2 = \mu\epsilon\omega^2 + i\mu\sigma\omega$$

$$\alpha^2 - \beta^2 = \mu\epsilon\omega^2 \quad (2.71)$$

$$2i\alpha\beta = i\mu\sigma\omega \quad (2.72)$$



Desarrollando simultáneamente las *ecuaciones 2.71 y 2.72* obtenemos la constante de atenuación β .

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu\omega}{2} \left[(\sigma^2 + \varepsilon^2\omega^2)^{1/2} - \varepsilon\omega \right]} \quad (2.73)$$

O también se puede observar en función de su tangente de pérdida:

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\left[\left(\left(\frac{\sigma}{\varepsilon\omega} \right)^2 + 1 \right)^{1/2} \right] - 1 \right]} \quad (2.74)$$

De igual forma se desarrollan las *ecuaciones 2.71 y 2.72* obtenemos la constante de fase α .

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu\omega}{2} \left[(\sigma^2 + \varepsilon^2\omega^2)^{1/2} + \varepsilon\omega \right]} \quad (2.75)$$

O también se puede observar en función de su tangente de pérdida:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\left[\left(\left(\frac{\sigma}{\varepsilon\omega} \right)^2 + 1 \right)^{1/2} \right] + 1 \right]} \quad (2.76)$$

Es importante recordar que estas constantes se presentan en un dominio de modo cuasiestacionario, por lo que las corrientes de desplazamiento $|\mathbf{J}_D|$ son mucho menores que la corriente de conducción $|\mathbf{J}_C|$ ($|\mathbf{J}_C| \gg |\mathbf{J}_D|$); por lo tanto $|\mathbf{J}_D|$ se aproxima a cero $|\mathbf{J}_D| = \mathbf{0}$. Por lo que la constante de propagación (γ) (*ecuación 2.41*) es igual a la parte imaginaria:

$$\gamma^2 = i\mu\sigma\omega \quad (2.77)$$



Resolviendo la *ecuación 2.77* tenemos:

$$\gamma = \sqrt{i\mu\sigma\omega} \quad (2.78)$$

Pero

$$\sqrt{i} = \frac{1+i}{\sqrt{2}} \quad (2.79)$$

Sustituyendo la *ecuación 2.78* en *2.79*.

$$\gamma = (1+i) \sqrt{\frac{\mu\omega\sigma}{2}} \quad (2.80)$$

$$\gamma = \alpha + i\beta = (1+i) \sqrt{\frac{\mu\omega\sigma}{2}} \quad (2.81)$$

Por lo que la constante de fase (α) y atenuación (β) se escriben de la siguiente manera:

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\mu\omega\sigma}{2}} \quad (2.82)$$

La *ecuación 2.82*, describe que las constantes de fase (α) y atenuación (β) son iguales en un medio casiestacionario.

Ahora analizando los exponentes de la *ecuación 2.64* el término $e^{-\beta z}$ representa la atenuación de la onda electromagnética, y este exponencial tiende a cero cuando z aumenta por lo que la atenuación se da a una distancia (δ) conocido como la penetración nominal, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\delta = \frac{1}{\beta} \quad (2.83)$$

A esta expresión (*ecuación 2.83*) también se le conoce como (Skin Depth); y para un medio casiestacionario la penetración nominal está dada por (Ward y Hohmman, 1988):



$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}} = 503 \sqrt{\frac{1}{f\sigma}} \text{ [m]} \quad (2.84)$$

o

$$\delta = \sqrt{\frac{2t}{\mu\sigma}} \text{ [m]} \quad (2.85)$$

La *ecuación 2.84* nos describe el análisis de la resistencia en el medio en función de la frecuencia y la *ecuación 2.85* nos describe la resistencia en un medio en función del tiempo (Christensen, 1995).

2.2. Fundamentos Básicos del Método de Transitorios Electromagnéticos en el dominio del tiempo (TEM)

El método geofísico (*TEM*), provee un estudio inductivo de resistividad en el subsuelo, basándose en el principio físico de la inducción y detección de decaimiento de un campo magnético, este campo a su vez penetra y se propaga en el subsuelo interactuando con las capas conductoras y las propiedades físicas del medio (ϵ, μ, σ).

Los sondeos transitorios electromagnéticos (*TEM*) son de utilidad para identificar características en un medio rocoso, utilizando un contraste de resistividad, el cual tiene la capacidad de esclarecer y detectar estructuras geológicas, además de posible acumulación de recursos naturales existentes en el subsuelo, en general.

2.2.1. Principios físicos del método transitorio electromagnético (TEM)

El método transitorio electromagnético (*TEM*) se efectúa utilizando una fuente artificial controlada, se requiere además de un transmisor (*Tx*) para generar una señal y un receptor (*Rx*) para detectar la respuesta (*Figura 2.2*).

La técnica *TEM* consiste en hacer mediciones del campo electromagnético, el cual se registrarán la amplitud y el voltaje de la señal transmitida con respecto al tiempo. Esto se hace en un arreglo cuadrangular de circuito cerrado (*Bobina o Loop*) sobre la superficie terrestre, esta bobina a su vez funcionara como transmisor (*Tx*) y receptor (*Rx*) (*Figura 2.2*); su principio físico consiste en aplicar una corriente en la bobina Transmisora (*Tx*), el cual dicha corriente inducirá un campo magnético variable donde el mismo circuito cerrado detectara la señal de respuesta de un campo magnético secundario.

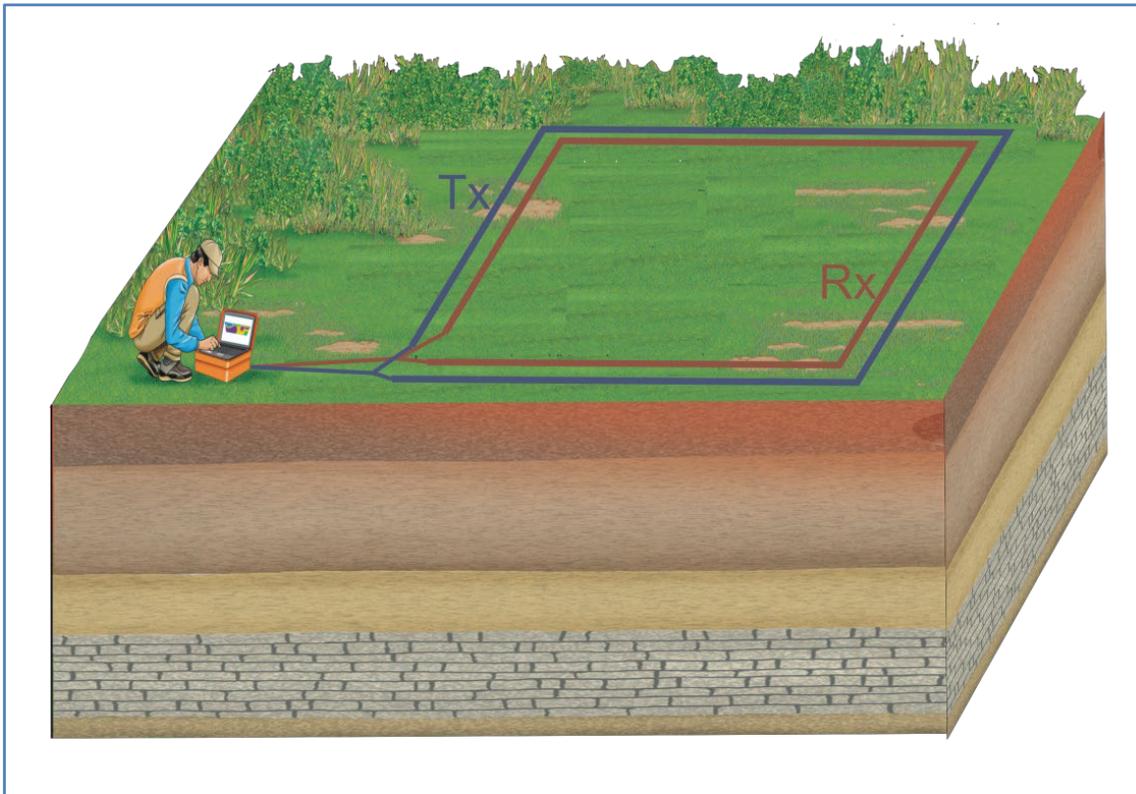


Figura 2.2. Arreglo del método inductivo TEM (Modificado de ANH, 2009).

La labor de medición del método *TEM* consiste en hacer circular una corriente constante y continua sobre el circuito cerrado (*Bobina o Loop*), transcurriendo un tiempo suficiente se genera un campo magnético primario en el subsuelo, ya creado el campo se interrumpe la corriente abruptamente (*Turn off*), y de acuerdo a la Ley de Faraday (ecuación 2.1) se induce una fuerza electromotriz generando un flujo de corrientes eléctricas (*Corrientes de Eddy*) que van migrando más distantes y más profundas en forma de escalones o pirámide en el subsuelo (Figura 2.3), y conforme va pasando el tiempo estas corrientes van disminuyendo su intensidad.

La fuerza electromotriz y las corrientes de Eddy, producen un campo magnético secundario que decae con el tiempo, y este campo induce un voltaje que, a su vez, va decayendo al pasar también el tiempo, este voltaje se detecta en el circuito Receptor (*Rx*) (Figura 2.3), obteniendo así la información para obtener la resistividad del subsuelo.

El proceso anterior se repite en la polaridad opuesta en el transcurso de tiempos cortos, en el cual se registran en un apilamiento de varias señales de respuesta para mejorar la señal y el ruido.

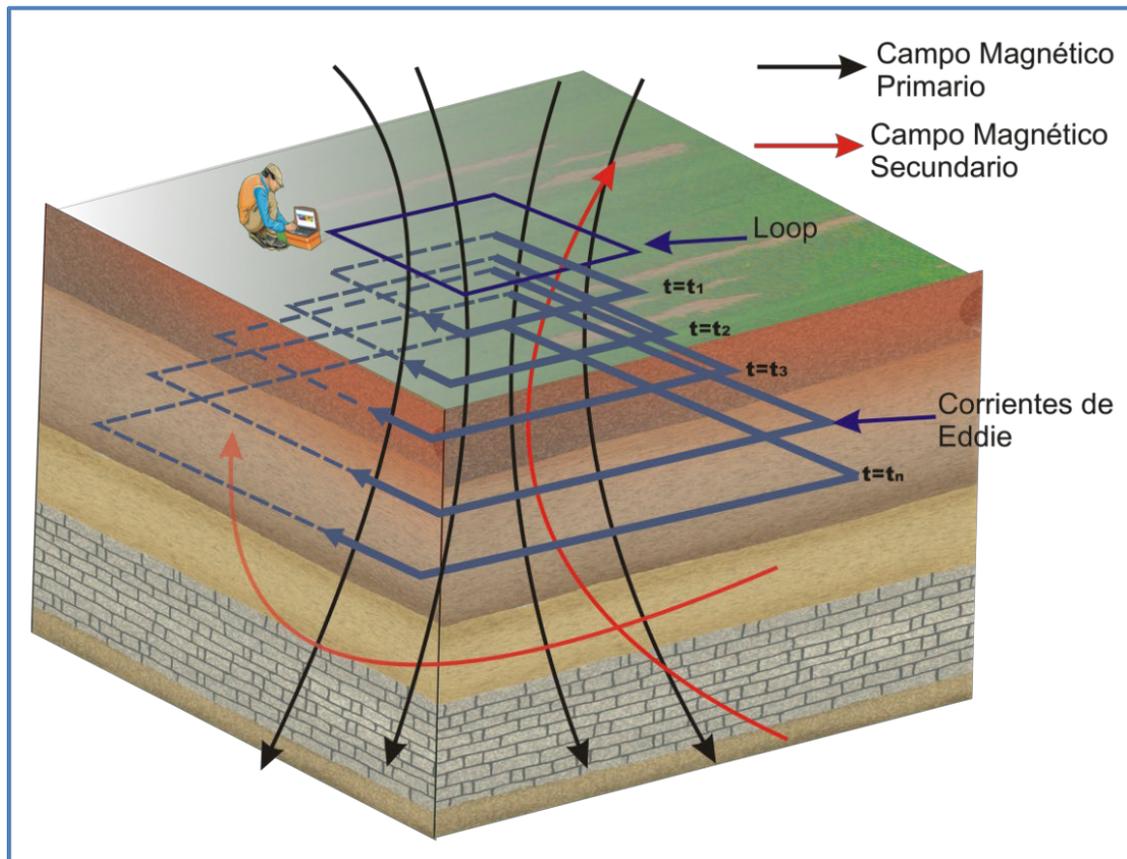


Figura 2.3. Generación del campo magnético (Modificado de ANH, 2009).

2.2.2 Señal del método (TEM)

Analizando la señal registrada del método *TEM*, esta se trata de una señal de tipo escalón (Figura 2.4), la cual se mide haciendo circular una corriente (I) (Figura 2.4a). En dicha señal existirán cuatro variaciones de voltaje (V) en el transmisor (Tx) (Figura 2.4b), pero solo en el receptor (Rx) medirá el decaimiento de dicho voltaje con respecto al corte de ventanas de tiempo (t) (Figura 2.4c), cuando se interrumpe la corriente en el Transmisor (Tx).

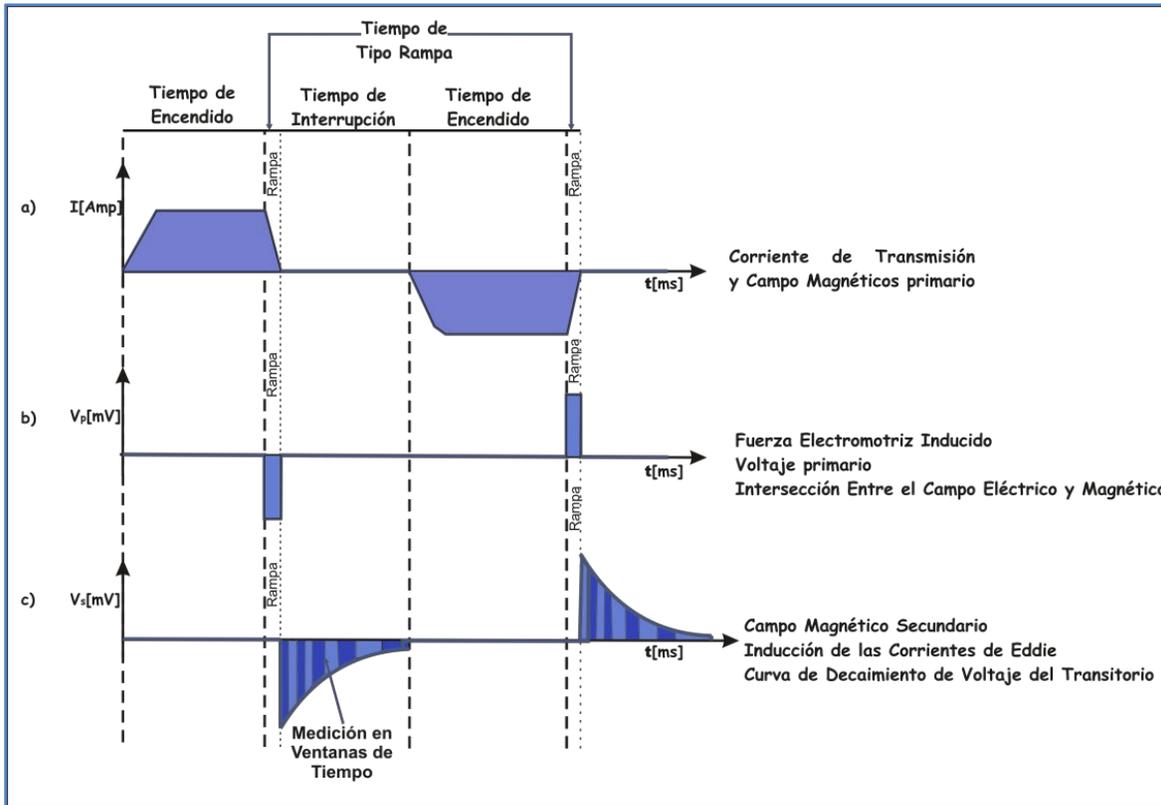


Figura 2.4. Señal del método transitorio electromagnético (TEM), a) Pulso de Corriente (I) a través de el transmisor, b) Pulso de voltaje primario y campo magnético primario, c) Voltaje secundario y campo magnético secundario a través del receptor (Rx) (Modificada de Schlumberger, 2009).

2.2.3 Respuesta transitoria del campo electromagnético vertical

La respuesta transitoria electromagnética, se origina a través del decaimiento del campo magnético secundario sobre un circuito cerrado (Bobina o Loop) sobre la superficie. En dicha bobina se obtendrá la componente vertical del campo secundario, en el cual se reduce a la heterogeneidad, según Ward y Hohmann, 1988, definen dicha respuesta como:

$$H_z = \frac{1}{\gamma^2 a^2} [3 - (3 - 3i\gamma a - \gamma a^2)e^{-i\gamma a}] \quad (2.86)$$

Dónde:

γ : Constante de Propagación

a : Radio de la Bobina

Para obtener la respuesta transitoria, se dividirá por $i\omega$ y se aplicará la Transformada Inversa



de Laplace a la *ecuación 2.86* la cual se obtiene:

$$H_z = \frac{1}{2a} \left[\frac{3}{\sqrt{\pi\theta a}} e^{\theta^2 a^2} + \left(1 - \frac{3}{2\theta^2 a^2}\right) \text{erf}(\theta a) \right] \quad (2.87)$$

La *ecuación 2.87* expresa el campo magnético del centro de la bobina después de interrumpida la corriente, donde: $\text{erf}(x)$ es la función de error y se define como:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (2.88)$$

Y

$$\theta = \sqrt{\frac{\mu_0 \sigma}{4t}} \quad (2.89)$$

Sustituyendo las *ecuaciones 2.88* y *2.89*, en la *ecuación 2.87*, se determinará el decaimiento de corriente del transmisor (T_x); además de que el término $1/2a$ de la *ecuación 2.87* representa la corriente media antes de que se interrumpa. Dicho la anterior se derivará la *ecuación 2.79*, con respecto al tiempo, por lo tanto:

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0 \sigma a^3} \left[3 \text{erf}(\theta a) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \theta a (3 + 2\theta^2 - a^2) e^{-\theta^2 a^2} \right] \quad (2.90)$$

Por lo que las *ecuaciones 2.87* y *2.90* representan el decaimiento del campo magnético inducido, y su derivada con respecto al tiempo. Mencionado lo anterior la señal de respuesta se divide en tres etapas:

Etapla temprana: la respuesta es continua y constante con el medio, y es donde se crea el campo magnético primario en un tiempo igual a cero, y aun no se inducen corrientes (*Figura 2.5*).

Etapla intermedia: La respuesta varia con respecto al tiempo, aquí el campo magnético se disipa, que a su vez empieza a decrecer debido a la pérdida óhmica, este cambio abrupto empieza a inducir las corrientes de Eddy, que fluyen en el interior del medio (*Figura 2.5*).

Etapla tardía: La respuesta es lineal y se mide la resistividad, aquí las corrientes inducidas (la inductancia) y la resistencia serán valores muy asintóticos, por lo que la amplitud de señal empieza a decaer y en este momento se registran la mayor información del medio (*Figura 2.5*).

Por lo tanto, para las *ecuaciones 2.87* y *2.90*, para tiempos largos, el campo magnético se deriva



con respecto al tiempo y la función error se expresa como:

$$\mathit{erf}(x) = \frac{\gamma\mu\sigma^{3/2}}{t^{5/2}} \quad (2.91)$$

Simplificada entonces el decaimiento del campo magnético sustituyendo las *ecuaciones* 2.89 y 2.91 en 2.87 y 2.90, por lo que dicho decaimiento del campo tendrá una pendiente aproximada a $t^{-3/2}$ y $t^{-5/2}$ y se expresan en las *ecuaciones* 2.92 y 2.93:

$$H_z \approx \frac{I\sigma^{3/2}\mu a^2}{30\pi^{1/2}} t^{-3/2} \quad (2.92)$$

Y su derivada como:

$$\frac{\partial H_z}{\partial z} \approx \frac{-I\sigma^{3/2}\mu^{3/2}a^2}{20\pi^{1/2}} t^{-5/2} \quad (2.93)$$

La grafica de las *ecuaciones* 2.92 y 2.93 se ilustran en la *figura* 2.5.

2.2.4 Resistividad aparente (ρ_a [$\Omega \cdot m$])

El método Transitorio Electromagnético (*TEM*) tiene como propósito registrar la resistividad del subsuelo terrestre, este parámetro experimental del subsuelo es de interés real en este método geofísico, por lo que es de importancia conocer el concepto de resistividad aparente.

La resistividad aparente es el valor que otorga el subsuelo o el medio terrestre, cuando responde al paso de una corriente eléctrica (I), y es el valor medido en los Sondeos Transitorios Electromagnéticos, junto con el voltaje que la propicia, este dato numérico es muy semejante a la resistividad real ya que el medio terrestre lo imaginamos perfectamente como un medio homogéneo e isotrópico (Duran Neme, J, 2012).

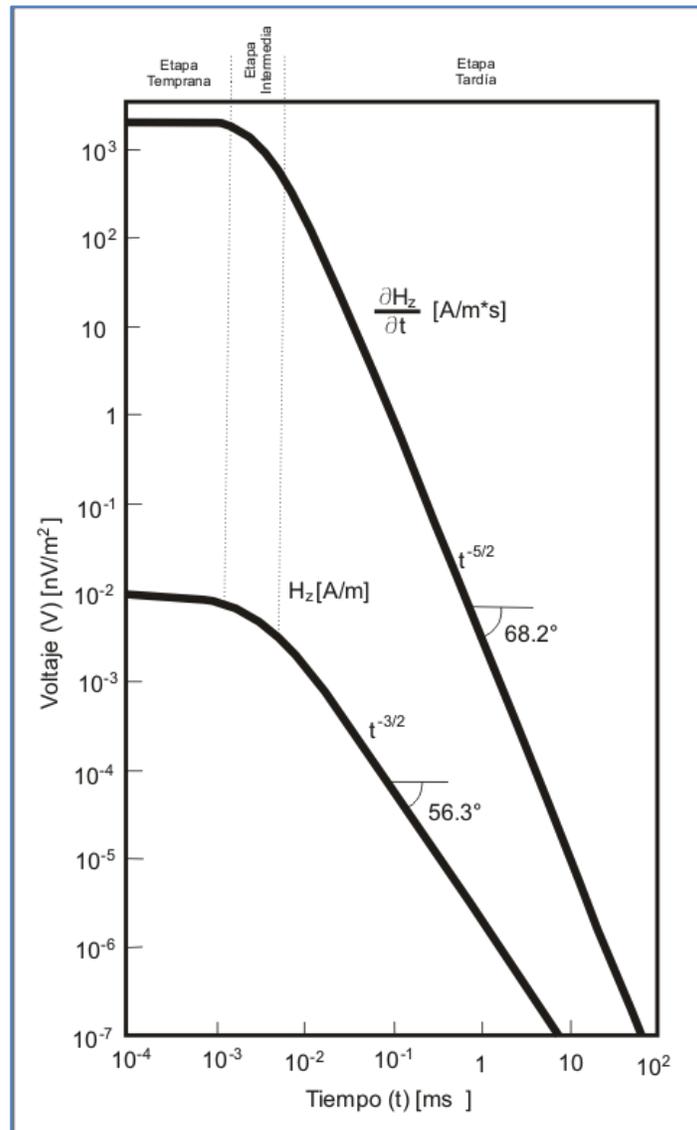


Figura 2.5. Campo magnético y su derivada con respecto al tiempo (Modificado de Nabighian, 1991).

Para obtener la resistividad, esta tiene su origen a partir de la expresión del voltaje registrado en la bobina receptora (R_x), el cual dicho valor variara de acuerdo al decaimiento del campo magnético secundario para tiempos cortos y largos (Spies et al, 1986)

Para tiempos cortos:

$$V = \frac{3nI}{\sigma a^3} \quad (2.96)$$

Para tiempos largos:

$$V = \frac{I\sigma^{3/2}\mu^{5/2}na^2}{20\sqrt{\pi}t^{3/2}} \quad (2.95)$$



Dónde: ***I***: *Corriente* [Amp]
n: *Número de vueltas de la Bobina*
a: *Radio de la Bobina* [m]
μ: *Permiabilidad Magnética* [$\frac{H}{m}$]
σ: *Conductividad eléctrica del Medio* [Siemens]
t: *Tiempo* [ms]
V: *Voltaje* [nV/m²]

Aplicando la técnica de series de expansión e iteración, la resistividad aparente para tiempos cortos y largos se expresa como:

Para tiempos cortos:

$$\rho_a = \frac{a^3 V}{3nI} \quad (2.96)$$

Para tiempos largos:

$$\rho_a = \frac{I^{2/3} a^{4/3} n^{2/3} \mu^{5/3}}{20^{2/3} \pi^{1/3} t^{5/3} V^{2/3}} \quad (2.97)$$

Agrupando las ecuaciones 2.95 y 2.97 se puede caracterizar la salida de voltaje en el receptor (Rx) con la expresión:

$$e(t) = \frac{k_1 M \sigma^{3/2}}{t^{3/2}} \quad (2.98)$$

Dónde: ***k₁***: *Constante del equipo*
M: *Momento Magnético en el Transmisor (Tx) por el Área* [m²]
σ: *Conductividad eléctrica del Medio* [Siemens]
t: *Tiempo* [μs]
e(t): *Salida del voltaje en el Receptor (Rx)* [nV/m²]

La ecuación 2.98 nos representa la salida de voltaje registrado por el sondeo transitorio electromagnético, a partir de esta expresión se puede despejar la resistividad aparente (ρ_a) la cual se define como:



$$\rho_a = \frac{k_1 M^{2/3}}{e(t)^{2/3} t^{5/3}} \quad (2.99)$$

La ecuación 2.99 establece la resistividad aparente (ρ_a) de un medio heterogéneo e isotrópico, la cual puede variar de acuerdo con sus condiciones mineralógicas, espacios porosos y/o fracturados, contenido de fluidos alojados en el subsuelo y temperatura del medio, también la variación puede darse debido a la profundidad que está determinada la tasa de decaimiento de la señal.

2.2.5 Configuración del sondeo transitorio electromagnético (TEM)

Como en la mayoría de las técnicas geofísicas se utilizan diferentes tipos de arreglos, dependiendo el objetivo y la profundidad de investigación, en el método de los transitorios electromagnéticos estos arreglos se clasifican de acuerdo con la posición relativa como se acomodan entre sí el Transmisor (T_x) y el Receptor (R_x). A continuación, se mencionan las diferentes configuraciones del método TEM's.

BOBINA SIMPLE (Simple Loop): La configuración de este arreglo se basa en una sola bobina que actúa como Transmisor (T_x) y receptor (R_x) (figura 2.6a), su principal característica es que cuando fluye la corriente esta actúa como Transmisor (T_x) y cuando esta corriente se apaga la misma bobina se conecta como Receptor (R_x), y mide mientras el Transmisor (T_x) está apagado; sus ventajas es que es fácil de mover y se acopla estrechamente con el objetivo, son muy poco vulnerables al ruido ambiental y geológico, su desventaja es que tiene baja resolución a mayor profundidad de investigación.

BOBINA COINCIDENTE (Coincident Loop): La configuración de este arreglo es la misma geometría que la bobina simple, la diferencia es que el Transmisor (T_x) y el Receptor (R_x) son bobinas independientes, y coinciden casi espacialmente (figura 2.6b), aunque tienen que tener una separación de 3 a 5 metros para suprimir el efecto paramagnético; sus ventajas son: que tiene momentos relativamente largos, no existen puntos ciegos entre punto a punto y les afecta poco el ruido ambiental y geológico; su desventaja es que tiene resolución relativamente baja a mayores profundidades y el movimiento de las bobinas es complicado.

BOBINA CENTRAL (In Loop): este arreglo es una variante de la bobina coincidente, la diferencia radica en que la dimensión radial del Transmisor (T_x) es mucho más grande que la bobina Receptora (R_x), pero estas conservan el mismo centro (figura 2.6c), su ventaja es que es muy eficiente para la máxima profundidad de investigación (mayor a 500m), su resolución es alta; su desventaja es que es muy vulnerable al ruido cultural y al ruido geológico (alteraciones geológicas).



BOBINA SEPARADA O BOBINA DIPOLAR (*Dipole Loop*): La configuración de este arreglo consiste en que el Transmisor (Tx) y el Receptor (Rx) se encuentran separados a una distancia (d) fija y las bobinas tienen la misma longitud, la característica principal es que el arreglo dipolar Receptor (Rx) es fijo (*figura 2.6d*); la ventaja es: la detección de las corrientes más profundas, su desventaja es que muy complicado el tendido para bobinas de grandes áreas, y es vulnerable al ruido ambiental.

BOBINA DOBLE (*Double Loop*): este arreglo utiliza dos bobinas conectadas en paralelo, de forma más fácil se le dan dos vueltas a la bobina (*figura 2.6e*), sus ventajas son: un mejor acoplamiento con conductores verticales, tiene mayor penetración de investigación que el la bobina simple y coincidente, se reduce significativo el ruido por fuentes remotas y externas, (*ruido ambiental, geométrico y geológico*), sus desventaja principal es que en zonas conductivas el ruido variara lateralmente y este no se logra reducir.

BOBINA RECEPTORA MOVIL DENTRO DEL TRANSMISOR (*Large Loop Inner*): La configuración es una variante de la bobina central, la diferencia de este arreglo consiste en un transmisor (Tx) de dimensiones grandes y este a su vez permanecerá fijo durante el levantamiento, mientras que el Receptor (Rx), será más pequeño y este se moverá a una distancia equidistante en forma de rejilla o malla dentro de la bobina Transmisora (Tx), (*figura 2.6f*). Sus Ventaja es: la detección de anomalías y contraste de resistividad con alto grado de exactitud, da una gran resolución lateral sin perder profundidad de investigación (mayores de 500m); sus desventajas son: es fuertemente afectado por el ruido cultural, y geométrico (*Topografía*) existen zonas ciegas polarizadas que no puedan captar zonas mineralizadas, su levantamiento necesita de muchas horas hombre así como demasiado cable, requiere de una logística en función del conocimiento geológico con el fin de elegir una buena posición de las bobinas, además de separarlas de 5 a 10 m en los extremos laterales ya que si se encuentran cercas se creara el efecto paramagnético.

BOBINA RECEPTORA MOVIL FUERA DEL TRANSMISOR (*Large Loop External*): la configuración de este arreglo es un Transmisor (Tx) largo fijo con un Receptor (Rx) movable y corto en dimensiones, este se moverá a lo largo de líneas perpendiculares del Transmisor (*figura 2.6g*). Su Ventaja es: que detecta anomalías y contraste de resistividad con alto grado de exactitud, da una gran resolución lateral sin perder profundidad de investigación; sus desventaja es: que son fuertemente afectado por el ruido cultural, y geométrico (*Topografía*) existen zonas ciegas polarizadas que no puedan captar zonas mineralizadas, su levantamiento necesita de muchas horas hombre así como demasiado cable, requiere de una logística en función del conocimiento geológico con el fin de elegir una buena posición de las bobinas.

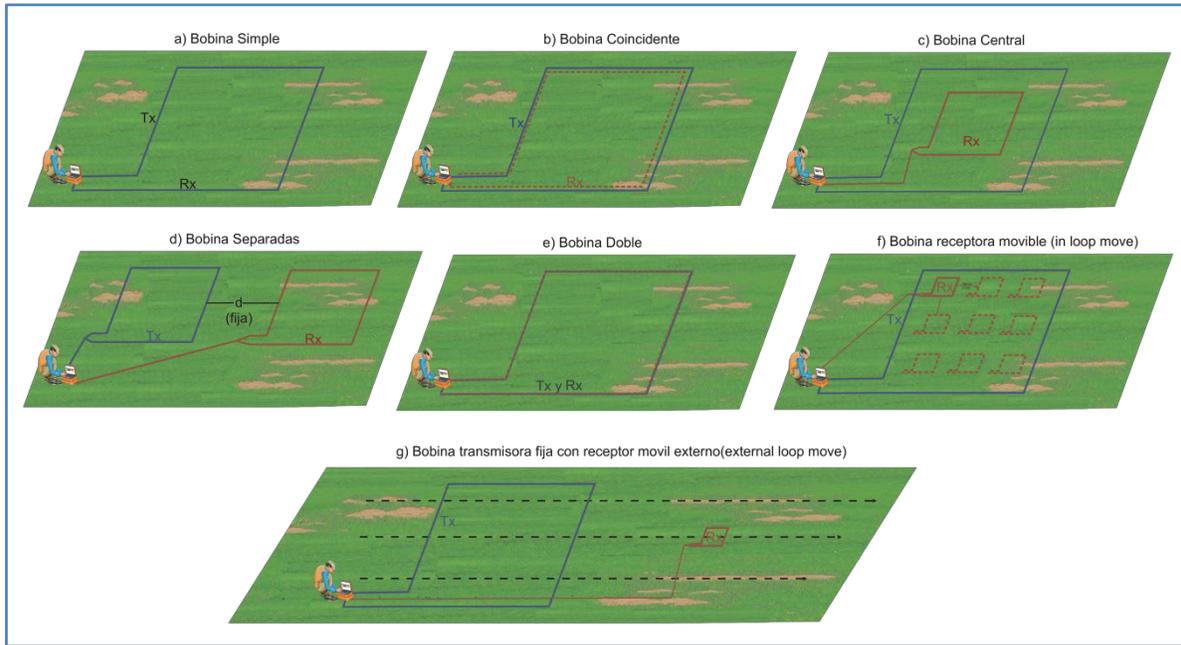


Figura 2.6. Configuración del método TEM's, a) Bobina Simple, b) Bobina Coincidente, c) Bobina Central, d) Bobinas separadas, e) Bobina Doble, f) Bobina Receptora Móvil Dentro del Transmisor, g) Bobina de Transmisor Largo, Fijo y Receptor Externo Móvil (Modificado de Geophysical Surveys, 2013 y Modificado de ANH, 2009).

2.2.6 Implicaciones en el tamaño de la bobina en los sondeos transitorios electromagnéticos (TEM)

Por lo general en las técnicas Geofísicas entre más grande sea el tendido, se alcanzara una mayor profundidad de investigación, y en los sondeos transitorios electromagnéticos se cumple la misma regla, mientras más grande sea la bobina transmisora la profundidad de penetración del campo electromagnético será mayor, y esto a su vez puede incrementar el área, el campo y el momento magnético aumentan su fuerza; dependiendo también del comportamiento del medio rocoso al inducir la señal, esta puede ser favorable para que la señal pueda penetrar a mayor profundidad dependiendo de la configuración del tendido. Nabighian en 1991, nos muestra que la tasa de decaimiento del campo magnético de una bobina grande es de $1/a$, mientras que en bobinas pequeñas la tasa es de $1/a^3$ donde a : es la distancia entre la bobina y el objetivo de penetración. Dependiendo de la profundidad de investigación, en bobinas a partir de 50x50 m no dan resolución en los primeros metros de profundidad, mientras que en profundidades menores de investigación en bobinas menores a 25x25 m, la resolución buena verticalmente a los primeros metros de profundidad. Como se muestra en la Tabla 2.1.



Tabla 2. 1.Relación entre profundidad de investigación y tamaño de la bobina.

Profundidad de Investigación	Tamaño de la bobina	Calibre de la Bobina	Observaciones
$\delta \leq 50$ m	10x10 m	16	Alta resolución vertical
	Hasta 25x25 m	o 18	
$\delta \leq 300$ m	50x50 m	12	Sin resolver los primeros 10 a 15 m
	hasta 100x100 m	o 14	
$\delta \leq 500$ m	100x100 m	10	Sin resolver los primeros 20 a 50 m
	Hasta 150x150 m	o 12	
$\delta \leq 1000$ m	300 x 300 m	10	Sin resolver los primeros 60 a 80 m
$\delta \leq 2000$ m	500x500 m	10	Sin resolver los primeros 100 m
		o 8	

2.2.7 Fuentes de ruido y error en los sondeos transitorios electromagnéticos (TEM)

Existen factores de ruido en la adquisición de datos Transitorios Electromagnéticos (TEM), es importante tener en cuenta estas fuentes de ruido ya que si no las consideramos pueden causarnos errores en el procesado e interpretación de datos, y estas se clasifican en: Ruido Instrumental, Ruido Geométrico, Ruido Cultural o Antropogénico, Ruido Electromagnético y Ruido Geológico (*figura 2.7*), que a continuación se describen:

RUIDO INSTRUMENTAL: Su fuente de error proviene de la calibración del equipo y al insertar los parámetros iniciales del arreglo, este tipo de error también pueden ser causados por sobrepasar las especificaciones técnicas del equipo y accesorios, como son la Temperatura (sobrecalentamiento), tipo de calibre conectado (Bobina), y una mala conexión del equipo.

RUIDO GEOMÉTRICO: Este tipo de ruido se origina comúnmente por la relación geométrica del tendido entre Transmisor (T_x) y Receptor (R_x) (un mal tendido de las bobinas), otro factor que ocasiona ruido es el relieve o topografía del terreno, así como las altas pendientes y acantilados de la superficie.



RUIDO CULTURAL O ANTROPOGÉNICO: Este tipo de ruido es ocasionado por la infraestructura urbana y materiales conductores en edificaciones, como son: viviendas, bodegas, líneas de alta tensión, líneas telefónicas, cableado subterráneo, tuberías, mallas ciclónicas y antenas eléctricas y radiofrecuencia, Estas estructuras civiles inducen y canalizan una corriente y campo magnético externo retenido, incapaces de retener en las bobinas, para minimizar este tipo de ruido se pueden poner el tendido simétricamente a la estructura o bien desplazar el tendido unos 50 m por lo menos.

RUIDO ELECTROMAGNÉTICO: Este tipo es consecuencia de señales geomagnéticas naturales y/o artificiales, con frecuencias naturales a $1 [Hz]$ provenientes de la ionosfera, como son las tormentas solares y tormentas eléctricas, otras fuentes de ruido son las ondas de radio (*Woky Toky, Teléfonos Mviles*).

RUIDO GEOLOGICO: Este tipo de ruido es ocasionado por cambios abruptos en la conductividad sobre estructuras altamente alteradas, este tipo de ruido no es común en los sondeos electromagnéticos solo debes en cuando el medio geológico genera ruido en la señal.

En la *figura 2.8* se ilustra un ejemplo de la curva de decaimiento de voltaje afectada por ruido, en este caso el efecto paramagnético (*figura 2.8a*), que se caracteriza por una magnetización inducida por un campo magnético externo, que es incapaz de retener las corrientes después de retirado el campo magnético, este fenómeno se atribuye al desarrollo de vibraciones térmicas y eléctricas (Torres de alta tensión), en el otro caso es el efecto de una tubería o cavernas en el subsuelo (*figura 2.8b*).

2.3. Teoría de la Inversión de Datos Geofísicos Transitorios Electromagnéticos (TEM)

Los datos electromagnéticos medidos en superficie son sometidos a un proceso de inversión, en este subcapítulo se enfatizará en la teoría de inversión que se utiliza el software especializado para generar un modelo que converja numéricamente los datos obtenidos con las condiciones geológicas observadas del medio en estudio. Más adelante se abordará el tema de procesado de datos Geofísicos en la que aplica la teoría de inversión para generar los modelos cuya respuesta sea cercana a la observada.

En las respuestas generada por el equipo empleado, se analizara en un paquete de cómputo al calcular la estadística de varias curvas de decaimiento del campo y posteriormente del voltaje registrado, en las diferentes lecturas e iteraciones del sondeo transitorio electromagnético (TEM); posteriormente se evaluara del modelo de unicidad inherente (modelo Inverso), basado en el algoritmo de Occam en el cual el paquete de cómputo empleado en este trabajo de tesis y basa su código fuente de inversión.

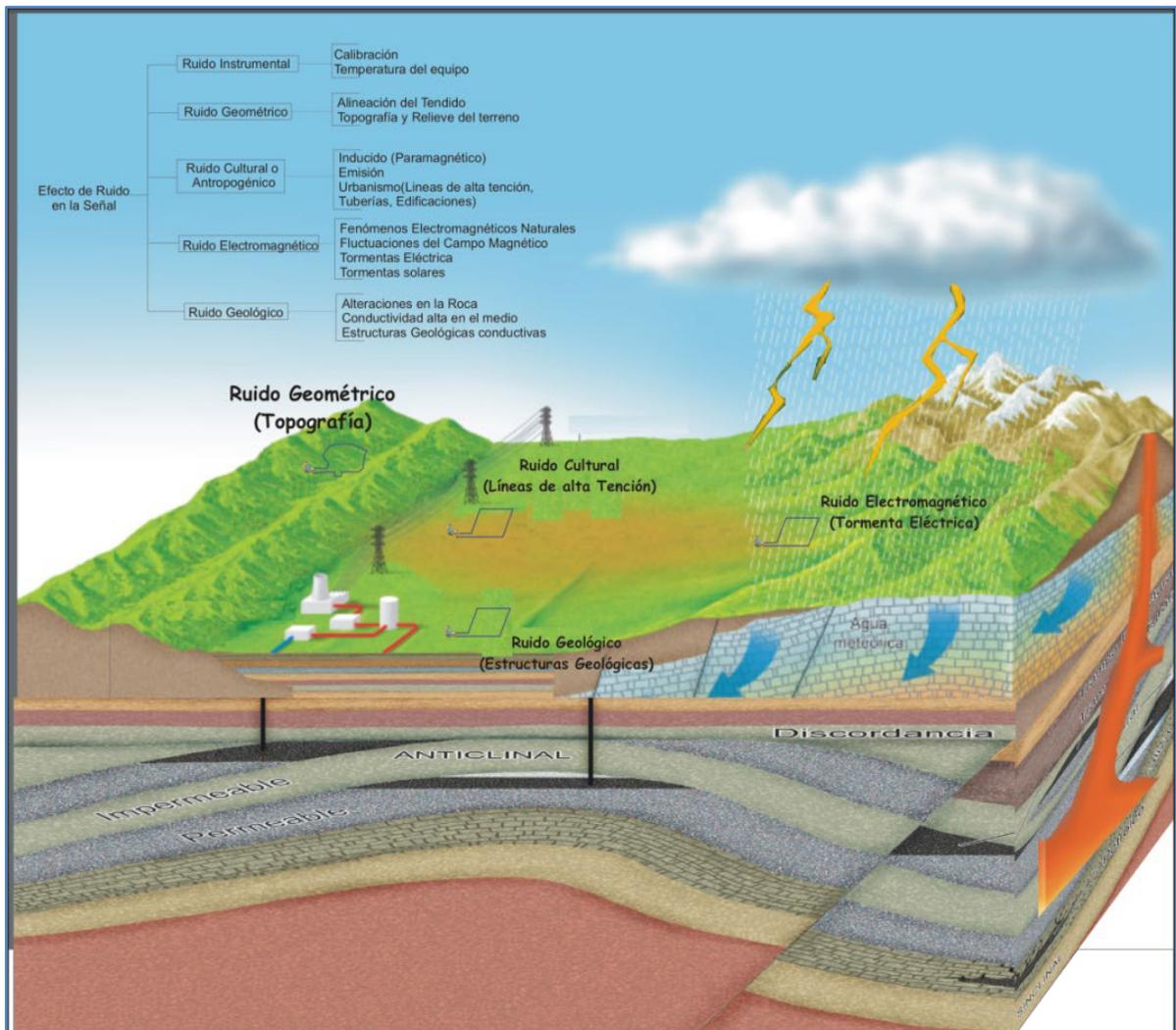


Figura 2.7. Fuentes de Ruido en los Sondeos Transitorios Electromagnéticos (TEM's) (Modificado de ANH, 2009).

2.3.1 Modelo inverso

El modelo inverso trata de simplificar la no unicidad del modelo otorgado por los datos electromagnéticos adquiridos en la etapa de exploración geofísica; el paquete de cómputo empleado para esta inversión se basa en el algoritmo de modelo inverso de Occam, el cual calcula de forma automatizada e iterativa, datos de resistividad, facilitando la búsqueda de un modelo óptimo, obteniendo modelos suavizados y la eliminación arbitraria de las discontinuidades.

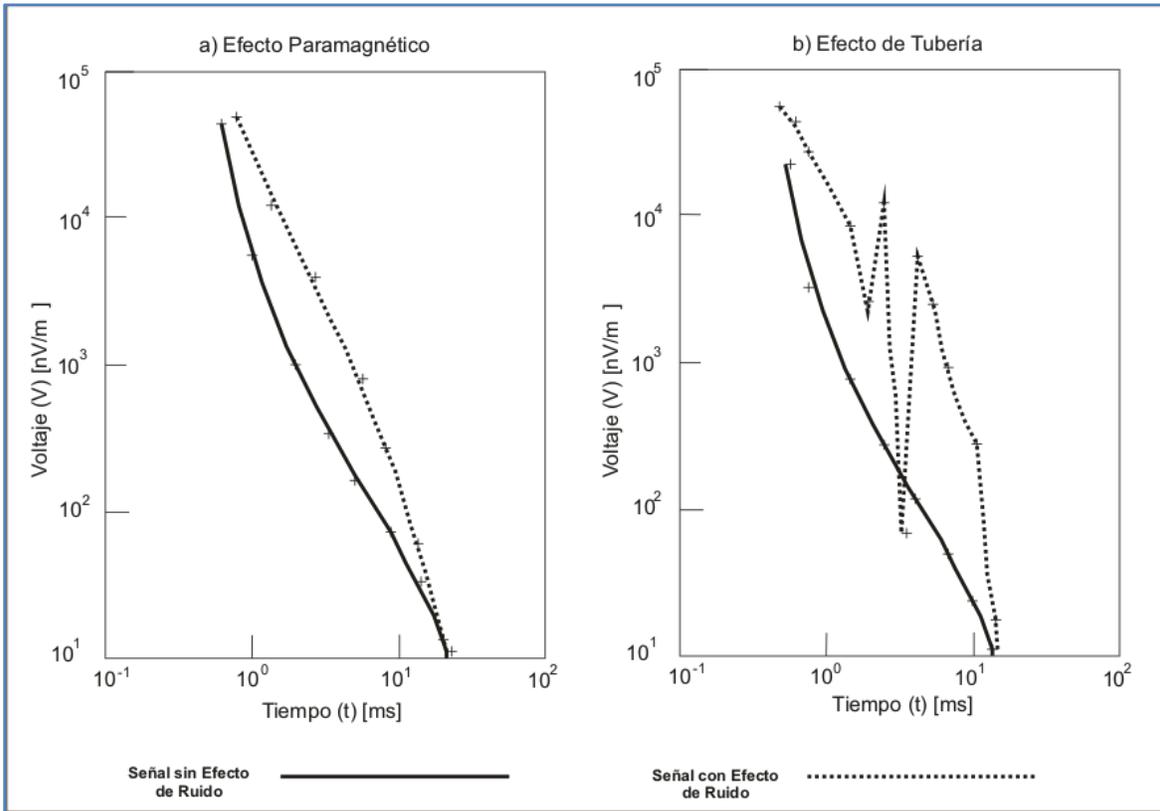


Figura 2.8. Influencia de ruido en la curva de decaimiento de voltaje en un sondeo TEM, a) Efecto de ruido paramagnético, b) Efecto de ruido por una tubería.

Este algoritmo fue propuesto por Constable *et al.* (1987), para entender este algoritmo es importante saber el concepto de Rugosidad, que se define como la integral del cuadrado de la primera y/o segunda derivada con respecto a la profundidad, las cual se expresan de la siguiente manera:

$$R_1 = \int \left(\frac{dm}{dz} \right)^2 \quad (2.100)$$

o

$$R_2 = \int \left(\frac{d^2m}{dz^2} \right)^2 \quad (2.101)$$

Dónde: $m(z)$ es el conjunto de datos de campo

Y se expresa como:

$$m(z) = m_i, z_{i-1} < z \leq z_i, i = 1, 2, \dots, N$$

Representando como diferencias las ecuaciones 2.100 y 2.101, entonces ecuaciones se expresan



de manera discreta como:

$$R_1 = \sum_{i=2}^N (m_i - m_{i-1})^2 \quad (2.102)$$

y

$$R_2 = \sum_{i=2}^{N-1} (m_{i+1} - 2m_i + 2m_{i-1})^2 \quad (2.103)$$

Dónde: $m_i = d_1, d_2, \dots, d_m$ y pueden ser diferentes resistividades aparentes para cada tiempo, estos datos se ajustarán con el criterio de mínimos cuadrados ponderados, siguiendo el método clásico de prueba y error, la cual se expresa como:

$$X^2 = \sum_{j=1}^m \frac{(d_j - F_j[m])^2}{\xi_j} \quad (2.104)$$

Dónde: $F_j[m]$: es la función de predicción de valores del j -ésimo dato

ξ_j : es el error en el j -ésimo dato estadístico

La solución para encontrar el modelo m_i a partir del conjunto de datos d_j asociados a un error de incertidumbre ξ_j , de manera que la rugosidad se reduzca (ecuaciones 2.102 y 2.103) y al mismo tiempo que también los de valores de X^2 deben ser mínimos y aceptables, el problema ahora es lineal, por lo que pueden existir varias soluciones, para explicar el método por el cual se encuentra el modelo más suavizado posible, (Constable *et al.*, 1987) es conveniente considerar la solución más sencilla posible en un problema directo lineal (Valencia Romero, U. A., 2012), la cual está dada por la expresión:

$$d_j = F_j[m] \quad \text{Dónde: } j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2.105)$$

Escribiendo la ecuación 2.105 en notación vectorial:

$$d = \vec{F}[m] \quad (2.106)$$

Ahora para solucionar la ecuación 2.106, se define el error de ajuste de X^2 utilizando una



$$\mathbf{u}^{-1}(\mathbf{WJ})^T \mathbf{WJm} - \mathbf{u}^{-1}(\mathbf{WJ})^T \mathbf{Wd} + \partial^T \partial \mathbf{m} = \mathbf{0} \quad (2.112)$$

Dónde: \mathbf{J} : es el Jacobiano de la matriz $M \times N$

Resolviendo el sistema no lineal para \mathbf{m} ; donde el Jacobiano (\mathbf{J}) es función de \mathbf{m} , esta define el siguiente vector (Constable *et al.*, 1987):

$$\mathbf{m}_{k+1}(\mathbf{u}) = [\mathbf{u}\partial^T \partial + (\mathbf{WJ}_k)^T \mathbf{WJ}_k]^{-1} (\mathbf{WJ}_k)^T \mathbf{Wd}_k \quad (2.113)$$

Dónde: \mathbf{m}_{k+1} : es el número de iteraciones

\mathbf{u} : es el operador para encajar en la tolerancia

y

$$\mathbf{d}_k = \mathbf{d} - \mathbf{F}[\mathbf{m}_k] + \mathbf{J}_k \mathbf{m}_k \quad (2.114)$$

Es importante mencionar que se necesita un modelo inicial (condiciones iniciales), para establecer las iteraciones \mathbf{m}_{k+1} escogiendo un operador \mathbf{u} que aproxime linealmente al ajuste del modelo inicial, y este sea arreglado de tal modo sea dentro de la tolerancia de menor al 1%, por lo que el error en términos de $\mathbf{k} + 1$ es:

$$\mathbf{X}_{k+1}(\mathbf{u}) = \|\mathbf{Wd} - \mathbf{WF}[\mathbf{m}_{k+1}(\mathbf{u})]\| \quad (2.115)$$



CAPÍTULO 3

GEOLOGÍA

*“Para hacer que el agua se vuelva realmente en todo el mundo y para todos ‘vida’ y ‘paz’,
debemos apoyar, con acciones de voluntariado de jóvenes, para llevar conocimientos tecnológicos e
innovaciones donde se necesitan, para encontrar nuevos acuíferos, pero también para defender los pozos
de la contaminación que es un verdadero problema en los países”*

Rita Levi Montalcini, Premio nobel de Medicina



CAPÍTULO 3. GEOLOGÍA

Para comprender la geología del subsuelo del Bosque de Chapultepec es necesario revisar el estado actual y evolución geológica de la Cuenca de México, haciendo énfasis en la Ciudad de México, especialmente en su porción Poniente.

En este capítulo se presenta el marco geológico de la Cuenca de México y del poniente de La Ciudad de México (CDMX), y particularmente del Bosque de Chapultepec (BCH) en su marco local; este compendio geológico se basó en estudios realizados por diferentes autores, cortes litológicos provenientes de pozos de agua del SACMEX y de los afloramientos existentes en el área de estudio.

3.1. La Cuenca de México

La Cuenca de México se localiza en la parte centro-oriental de la provincia geológica conocida como Franja Volcánica Transmexicana (FVTM), se encuentra rodeado por las sierras de Pachuca, Tezontlalpan al norte, La Sierra Nevada y Río Frio al este, la Sierras del Ajusco y Chichinautzin al sur, así como los Montes alto y Bajo, como también la Sierra de las Cruces al poniente (*figura 3.1 y 3.2*), estos volcanes favorecieron las condiciones para formar la cuenca y a su vez dieron origen a los lagos de Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Tláhuac; en el interior de la cuenca se encuentran aparatos volcánicos como la Cerro de Guadalupe, El Peñón de los Baños, el Cerro de la Estrella, el Cerro del Peñón Viejo, la Sierra de Santa Catarina y El Cerro de Chapultepec.

La Cuenca de México es una depresión tectónica, originada desde el Oligoceno al Cuaternario, su basamento está sujeto al cretácico superior (Aguayo y Marín, 1989). Su origen es resultado de la interacción natural de procesos tectónicos, volcánicos, sedimentarios y climáticos (Aguayo y Marín, 1989).

La rocas que componen la cuenca son de origen calcáreo en su basamento, sobreyaciendo a éstas se depositaron conglomerados, los cuales sufrieron esfuerzos corticales dando origen al intenso vulcanismo; que depositaron las diferentes rocas volcánicas que predominan en el subsuelo de la Cuenca de México, estos a su vez sufrieron eventos efusivos y colapsos que dieron origen a rocas vulcanoclásticas en forma de abanicos, estos aparatos volcánicos fueron erosionados debido a glaciaciones y precipitaciones fluviales que transportaron y llenaron la superficie de la cuenca de material aluvial, dando origen a los grandes lagos que deposito la secuencia lacustre.



3.1.1. Evolución geológica de la Cuenca de México

La Cuenca de México manifestó una gran actividad tectónica en diferentes periodos geológicos, el cual se refleja geodinámicamente dentro del Arco Volcánico Transmexicano (AVTM), consecuencia del desplazamiento tectónico de tres placas continentales (Placa de Cocos, Placa Norteamericana y Placa del Caribe), estas placas tectónicas se obstaculizan entre ellas creando una gran fisura cortical, dando origen al arco magmático continental que es la Franja Volcánica Transmexicana (FVTM), (Aguayo y Marín, 1989).

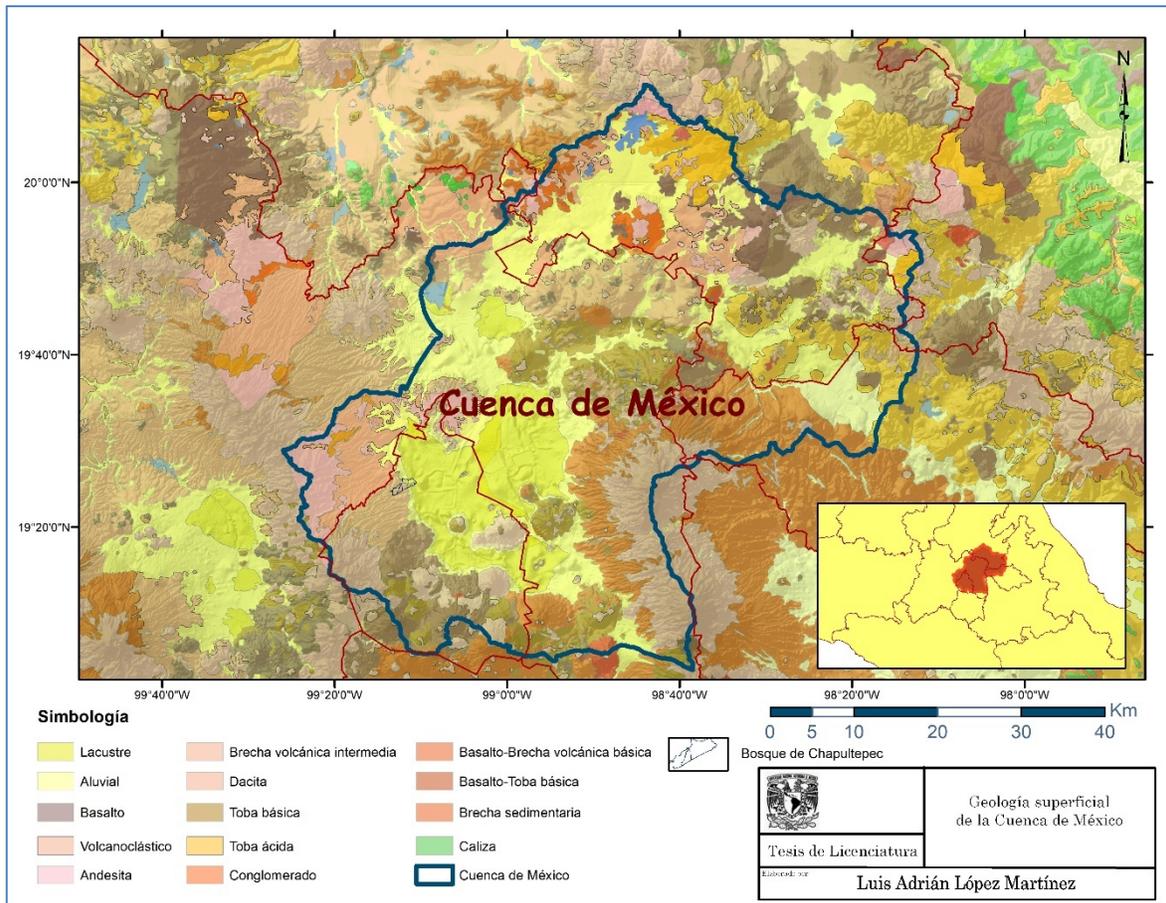


Figura 3. 1. Mapa geológico de la Cuenca de México. Modificada de INEGI, 2014.

La secuencia estratigráfica de la unidad más antigua a la más reciente, de la Cuenca de México data del Cretácico, conformado por estratos marinos compuestos de roca caliza de origen calcáreo, posteriormente se levantaron en la porción central del México debido a un primer evento tectónico (Orogenia Laramide), este esfuerzo distensivo plegó y falló los estratos calcáreos (Aguayo y Marín,



1989). Posteriormente en el Eoceno las rocas calizas fueron expuestas a la erosión depositando sobre de ellas una secuencia conglomerática, la cual sufrieron un segundo evento tectónico (Orogenia Laramide) plegando y fallando ambas formaciones.

Durante el Oligoceno la intensa actividad tectónica continuo, provocando que los esfuerzos distensivos, donde fracturaron y originaron fallas en el centro de México, originando así una zona de debilidad, creándose la fisura cortical que dio origen al Arco Volcánico Transmexicano (AVTM), manifestándose en la actividad volcánica de derrames andesíticos y efusiones piroclásticas (Rocas ígneas del Oligoceno) (Mooser et al, 1996) (Aguayo y Marín, 1989). Esta actividad magmática continuo durante el Mioceno, depositando material ígneo de composición ácida a intermedia (Rocas ígneas del Mioceno (andesitas y piroclastos) emergiendo sobre un sistema de fracturamiento en dirección W-E y N-S (Mooser et al, 1996).

En el Mioceno tardío y Pleistoceno temprano la actividad tectónica y volcánica dieron origen a la formación de fosas y pilares (Fosa Mixhuca) (Aguayo y Marín, 1989), donde emergió material lávico dacítico-andesítico, formando la Sierra de Guadalupe, Xochitepec y Tepozteco (figura 3.2), cerrando así la porción norte y empezando a desarrollarse la cuenca de México con flujo hídrico al SE, en la cual se empezó rellenar de aglomerado y depósitos lacustres originados por la erosión fluvial y de los lagos en formación en el Pleistoceno.

En el Pleistoceno se originó un segundo evento magmático en el AVTM, en el cual tuvo un carácter lávico y efusivo dando origen a los volcanes de San Miguel, Otomí y La Palma compuesto por depósitos de rocas ígneas extrusivas (Vulcanitas del Pleistoceno Superior e Inferior). Este evento volcánico tuvo una gran actividad en las porciones poniente y oriente de la cuenca, emergiendo material andesítico seguido de efusiones piroclásticas, formando Las Sierras de Las Cruces y Río Frío (figura 3.2), empezando a cerrar los flancos poniente y oriente de la cuenca, dándole así un carácter de cuenca endorreica, con escurrimientos hacia el S-SE.

Al pie de La Sierra de las Cruces se depositó material vulcano sedimentario en forma de abanicos aluviales y lahares intercalado con flujos piroclásticos (material de efusión y acarreo) asentándose suelos de toba lítica (gravas y arenas), pómez y aglomerados de la secuencia vulcanoclástica de la formación Tarango. A su vez otro depósito vulcano sedimentario se formaba también en los pies de la Sierra de Río Frío al oriente de la cuenca.

La actividad volcánica continuo durante en cuaternario en centro del AVTM, dando origen a domos volcánicos como el Peñón de los Baños y el Cerro de la Estrella, posteriormente durante el Pleistoceno tardío se depositaron rocas basálticas y piroclastos producto de una nueva reactivación tectónica (Aguayo y Marín, 1989), estas rocas formaron el cono volcánico del Cerro de Chapultepec



y La Sierra de Santa Catarina así como el sistema de Sierras Ajusco- Chichinautzin al sur de la cuenca, mientras que en el oriente se levantaban los estratovolcanes del Iztaccíhuatl y el Popocatepetl formando la Sierra Nevada, estas estructuras volcánicas cerraron el umbral hacia el sur y sureste de la Cuenca de México (hace 700,000 m.a.) (Aguayo y Marín, 1989).

Formada y desarrollada la Cuenca de México, se inició un cambio climático en la región, formándose glaciares en las sierras y en el valle (hace 100,000 m.a.) (Aguayo y Marín, 1989), además de la precipitación fluvial, estos agentes climáticos erosionaron y diseminaron en forma de ríos los diferentes aparatos volcánicos, rellenando el interior de la cuenca con depósitos aluviales y formando las grandes lagos (Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Tláhuac), que asentaron el material lacustre que predomina la superficie de la Cuenca.

La situación actual de la superficie de La Cuenca de México es consecuencia de la actividad antropogénica y desordenado crecimiento urbano, así mismo de la sobreexplotación de las aguas subterráneas que dan origen al problema de subsidencia y agrietamiento diferencial del terreno añadiendo su alta sismicidad (Aguayo y Marín, 1989), hacen de la Ciudad de México (CDMX) y Zona Metropolitana (ZM) un interesante complejo geológico a estudiar.

La figura 3.2 ejemplifica la visualización del modelo de elevación, la geomorfología y geología conceptual de La Cuenca de México, muestra también los aparatos volcánicos mencionados y el polígono del lago que existió en la gran Tenochtitlan, así como su sección geológica conceptual y geología superficial.

3.2. Geología de la Ciudad de México (CDMX)

La geología conceptual de La Ciudad de México (CDMX), fue elaborada y basada en los estudios que realizaron CFE y PEMEX en los años de 1986 a 1989, con la perforación de los pozos profundos y las líneas sísmicas de Reflexión, interpretadas por Ing. Guillermo Pérez Cruz en 1988, estos estudios se siguen actualizando por medio de SACMEX y la UNAM, con la perforación del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y reinterpretación de los datos de sísmica de Reflexión.

La CDMX se localiza en la porción sur-poniente de la Cuenca de México, dominada superficialmente por depósitos lacustres, aluviales y vulcanosedimentarios provenientes de la Sierra volcánica de Las Cruces de composición andesítica (*figura 3.3*).

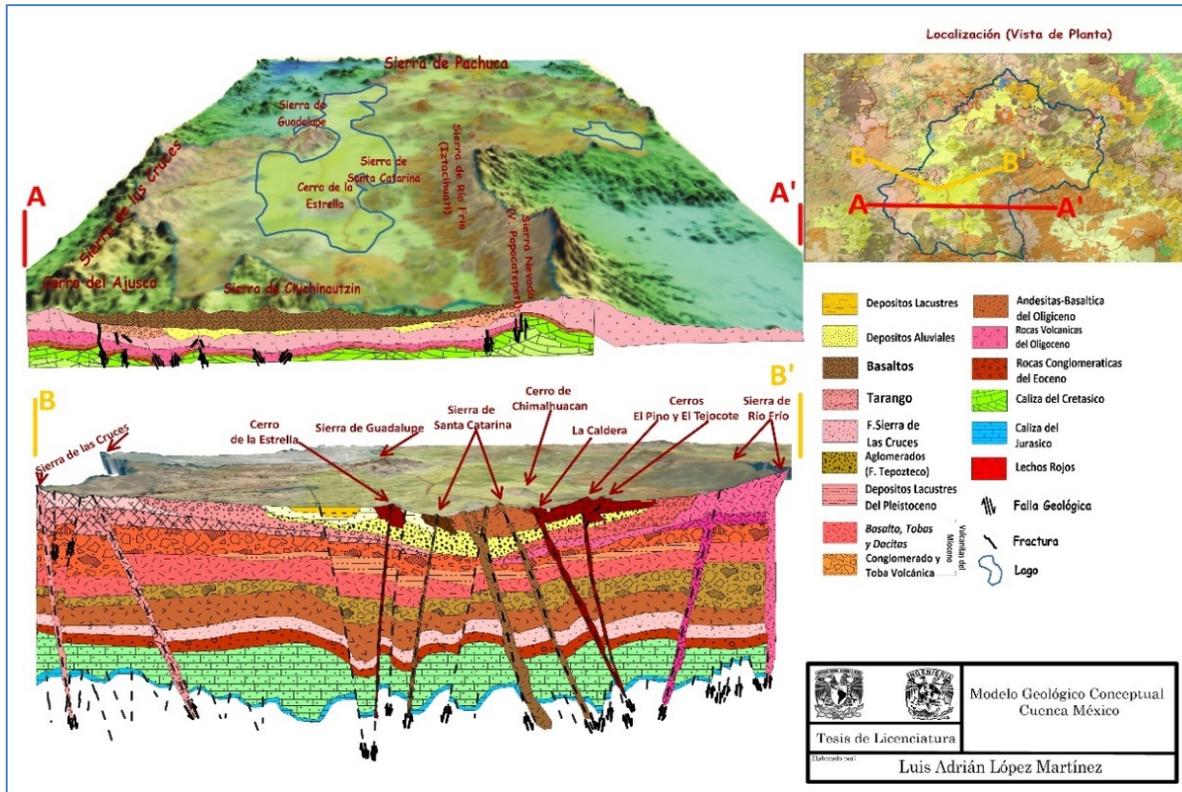


Figura 3. 2. Modelo geológico conceptual de la Cuenca de México. Modificado de Mosser et al en Santoyo y colaboradores, 2005.

La sección geológica conceptual de la *figura 3.4* es una reinterpretación de las secciones sísmicas de reflexión, y Magnetotelúrico, en correlación con los pozos profundos proporcionados por SACMEX, 2011 revisadas y modificadas para fines académicos, con el propósito de interpretar la geología conceptual en esta presente tesis. En ellas se describe la reinterpretación grafica de las diferentes unidades de roca que componen el subsuelo de CDMX, la cual según las secciones sísmicas se conforma de un basamento cretácico subyaciendo a conglomerados de la formación Balsas, estas formaciones se encuentran plegadas y falladas.

Sobreponiéndose a las formaciones sedimentarias se localizan las rocas volcánicas del Oligoceno conformadas por dacitas y andesitas–basálticas, estas se encuentran semi plegadas y falladas por la Falla inversa Mixhuca y la Falla normal Roma, formando la Fosa Roma-Mixhuca (*Sección WE, figura 3.4*), debido al intenso fracturamiento y fallamiento de las rocas volcánicas del oligoceno, emergieron y se sobreyacieron las rocas volcánicas de Mioceno compuestos por conglomerados y tobas volcánicas en su base, basaltos, tobas y dacitas hacia la cima (aflorando en La Sierra de Guadalupe) (*Sección NS, figura 3.4*), estos se correlacionaron con los pozos Roma, Mixhuca y Texcoco. Posteriormente se acento una costra de depósitos lacustres del Pleistoceno, subyaciendo por debajo de aglomerados volcánicos.

En la porción poniente de la sección W-E (Figura 3.4) las roca volcánicas del Mioceno se



encuentran parcialmente falladas, estas dieron origen a depósitos de aglomerados de toba lítica y a la formación Sierras de las Cruces compuesta principalmente de andesita y dacita, producto de esta sierra se depositaron a sus faldas depósitos vulcanoclásticos de la formación Tarango, posteriormente se depositaron derrames lávicos de composición basáltica (Cerro de Chapultepec y Sierra de Chichinautzin (*Sección WE y NS, figura 3.4*), continuo a este evento volcánico se depositó el material aluvial y lacustre en la parte superficial de la CDMX.

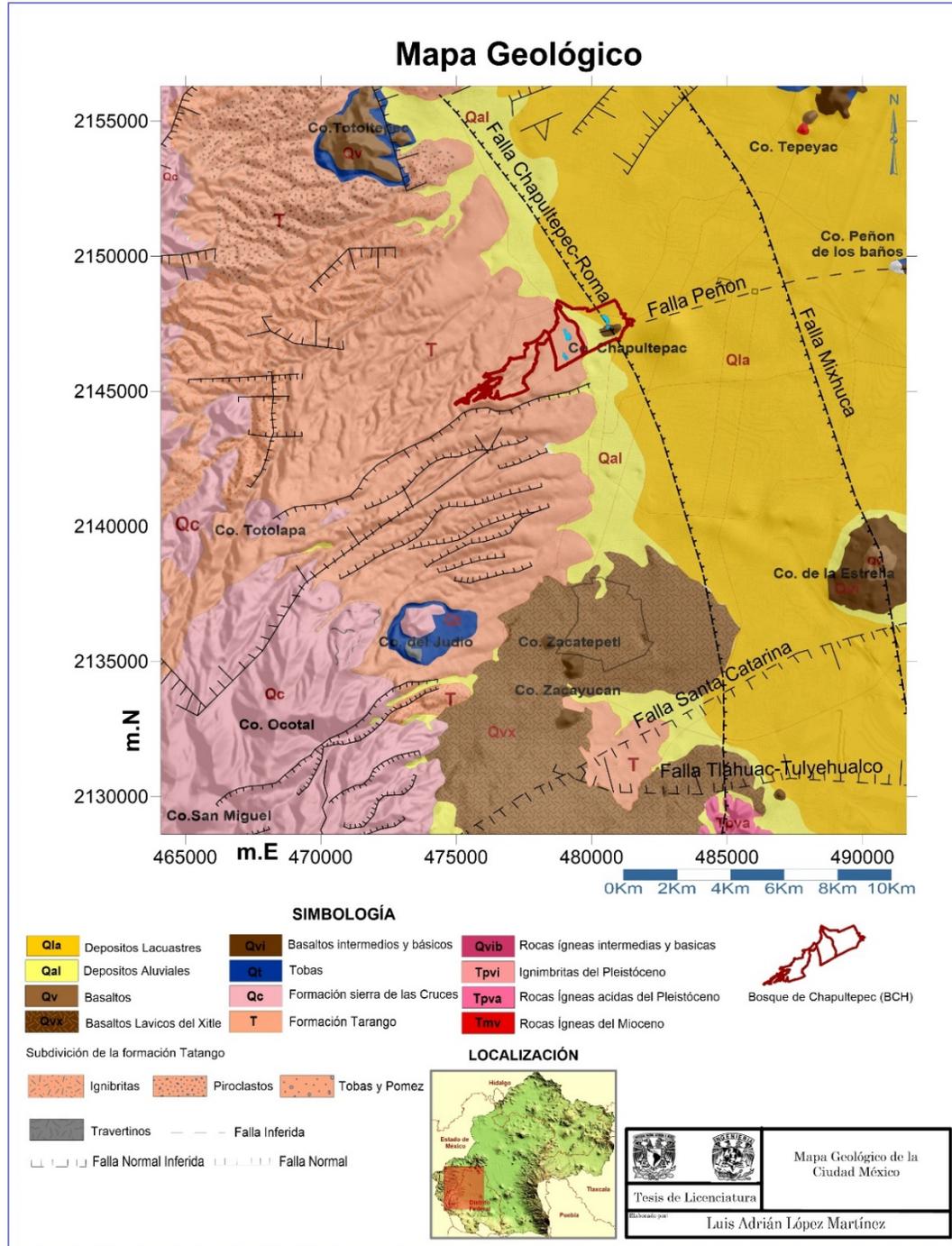


Figura 3. 3. Mapa geológico de la Ciudad de México (CDMX). Modificado de Mooser, 1994 y García-Palomo, 2008.

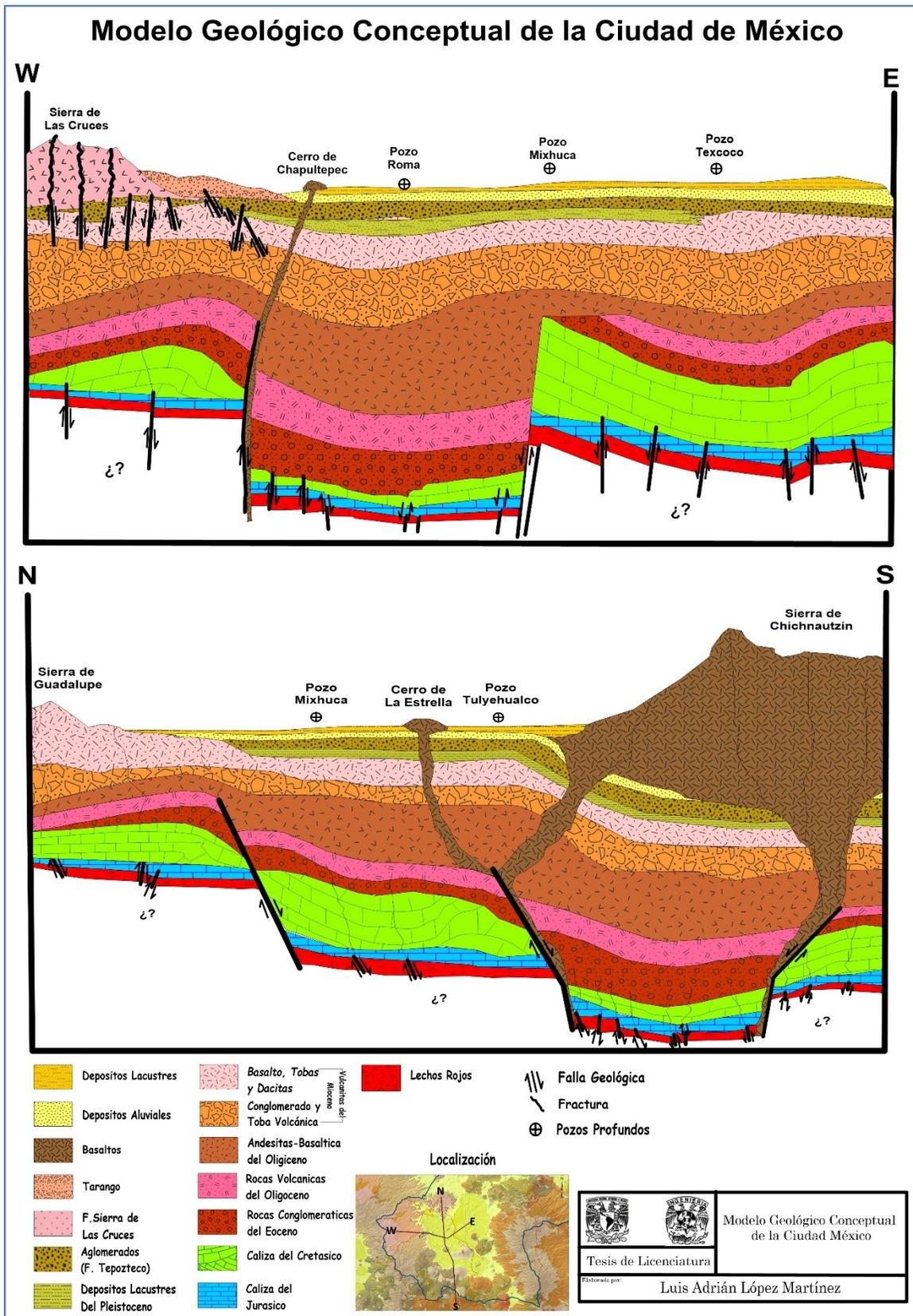


Figura 3. 4. Secciones geológicas regionales de la Ciudad de México. Reinterpretado y modificado de SACMEX 1; 2013; Pérez Cruz, 1988 y Mosser et al en Santoyo y colaboradores, 2005.



3.2.1. Geología del poniente de Ciudad de México (CDMX)

La descripción Geológica del Poniente de la CDMX, está formado por el conjunto montañoso de La Sierra de Las Cruces, que a su vez está constituido por domos y estratovolcanes de origen lávico, al pie de monte se depositaron abanicos volcánicos, producto de deslizamientos rápidos y violentos, de material volcanoclástico, además de lomas y barrancas que la conforman el relieve del poniente de la CDMX.

Las rocas que comprenden el subsuelo de la porción poniente de la CDMX, son una serie de rocas volcánicas y volcanoclásticas, de composición andesita, dacita y basaltos de la formación Sierra de las Cruces, estas rocas se observan en forma de derrames lávicos producto de la intensa actividad magmática en la zona poniente.

La secuencia vulcanoclástica la comprenden materiales piroclásticos y lahares de la formación Tarango, producto de una intensa explosión volcánica, el material de acarreo está compuesto de tobas líticas (arenas y gravas), intercalados con material piroclástico (arcillas y pómez), que se intercalan con arenas, limos y gravas de origen fluvial al interior de la cuenca, esta última cubierta por la capa arcillosa lacustre de la zona de lago, dominado por las topo formas del Cerro del Judío, Cerro de Totolapa, Cerro de San miguel, Cerro Ocotál, Cerro Totltepec y el Cerro de Chapultepec (*figura 3.3*) de composición basálticas, andesíticas y domos dacíticos y riolíticos.

3.2.2. Evolución geológica del poniente de la Ciudad de México (CDMX)

La formación morfogénica y de los depósitos lávicos y vulcanosedimentarios que existen y afloran en el poniente de CDMX, son producto de la actividad magmática ocurrida en el Mioceno tardío y Plioceno, estos depósitos ígneos son producto de tres episodios volcánicos, donde el último episodio se dio en el Holoceno (García-Palomo et al, 2008) (Delgado-Granados y Martín-del Pozo, 1993), con la formación de La Sierra de Chichinautzin.

La actividad tectónica del Mioceno tardío provocó un episodio geológico-estructural de fracturas y falla en la región (Mooser et al, 1994), la cual originó la actividad magmática que se emplazó sobre la falla N-S de la caldera de Cuauhtepéc, formando los estratovolcanes que componen la Sierra de las Cruces, esta actividad magmática, formó grandes derrames lávicos y domos volcánicos producto de emisiones de andesita y dacita, alternándose con actividad efusiva de intensidad media, originando bloques de ceniza y material piroclástico asentada en la misma sierra.

En el Plioceno y Pleistoceno, inicia una actividad volcánica de inmensas proporciones,



constituida por fragmentos incandescentes y erupciones volcánicas muy violentas originando el colapso de algunos aparatos volcánicos provocando flujos piroclásticos intensos y acarreo de escombros de material volcánico (cenizas y lahares), los cuales se deslizaron con una inmensa fuerza y velocidad, dando origen a grandes acumulaciones caóticas de fragmentos de roca labrada y saturada (Tobas), depositándose en forma de abanicos volcánicos al pie de la Sierra de las Cruces, (Aguayo y Marín, 1989).

Estos abanicos se encuentran entrelazados ya que están compuestas de diferentes emisiones volcánicas en diferentes periodos del Plioceno al Pleistoceno. Posteriormente para el Holoceno se inició la tercera actividad magmática con emisiones lávicas que formaron el sistema Volcánico Ajusco-Chicinautzin, continuamente la erosión fluvial y la creación de los lagos dentro de la cuenca depositando una secuencia aluvial seguida de depósitos arcillosos de origen lacustre.

3.2.3. Características litológicas

Para entender y describir los depósitos de rocas ígneas y vulcanoclásticas que predomina el poniente de la CDMX, tomaremos las dos formaciones que caracterizan esta región, estas unidades son: la Formación Sierra de las Cruces (FSC) y Formación Tarango (FT); las cuales se extienden desde San Ángel en el sur hasta Río Hondo al Norte. La *figura 3.5* muestra la superposición de ambas formaciones y sobreyacen a la formación Tepozteco (rocas volcánicas del Mioceno medio) o Xochitepec (rocas volcánicas del Oligoceno).

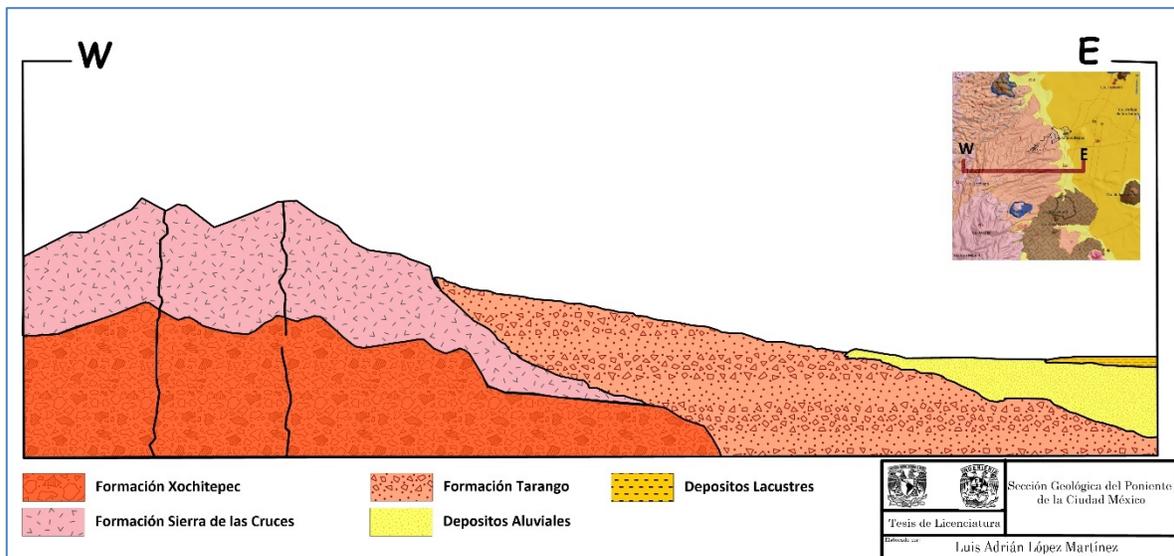


Figura 3. 5. Sección geológica esquemática del poniente de CDMX. Modificada de Mooser, 1986, en Remigio Morales E, 2013).



Formación Sierra de las Cruces.

La Formación Sierra de las Cruces es un conjunto de escudo-volcanes, flanqueados por abanicos vulcano sedimentarios, conformado por ocho aparatos volcánicos (Volcanes de Zempoala, La Corona, San Miguel, Salazar, Chimalpa, Iturbide, La bufa y La Catedral) (García-Palomo et al, 2008). Las rocas que componen esta unidad datan el Pleistoceno y se caracterizan por emisiones de derrames lávicos, extrusión de domos y emplazamiento de flujos piroclásticos de detritos y lodo.

Los derrames de lava es una composición de andesita y dacita alternadas con flujos piroclásticos y cenizas en forma de bloques, además de pequeñas capas de pómez, y lentes de lodo piroclástico y depósitos de deslizamiento (Lahares), estas a su vez se encuentran alternadas con arenas de grano medio a fino con fragmentos líticos y cristalinos de composición tóbacea (García-Palomo et al, 2008) (figura 3.6).

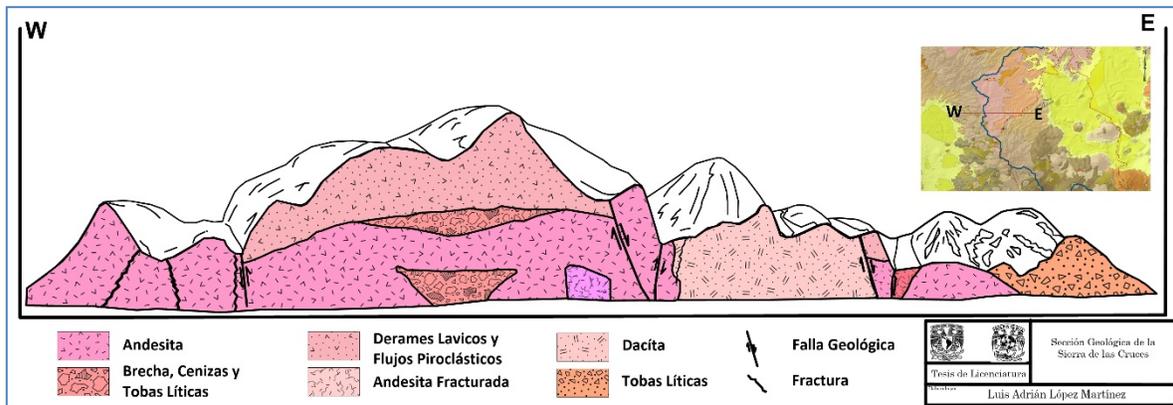


Figura 3. 6. Sección geológica esquemática de La Sierra de Las Cruces. Modificada de CONAGUA, 2009.

Formación Tarango.

La Formación Tarango es una secuencia vulcanoclástica de origen efusivo de explosiones violentas de los volcanes que integran la Sierra de Las Cruces, esta unidad es una secuencia de lodo y clastos puestos en movimiento por medio del transporte caótico del flujo piroclástico de erupciones violentas del Plioceno tardío al Pleistoceno medio, depositadas en forma de abanicos interlazados.

La formación Tarango representa un conjunto estratificado a veces de forma continua y homogénea (núcleos litológicos de la delegación Álvaro Obregón), también se presentan de forma irregular y lenticular, esta unidad se conforma de seis elementos litológicos (figura 3.7) dependiendo



de su altura y deslizamiento de depósito (Remigio Morales E., 2013) que a continuación se mencionan:

-  **Arenas Superficiales:** ceniza y pómez de diferente granulometría, depositada por transporte aéreo por medio de una nube ardiente.
-  **Capas de Arena Pumítica:** arcilla y limos producto de efusiones cortas y de poca intensidad
-  **Lahares y Aglomerados:** producto de acarreo caóticos de material
-  **Aglomerados:** Aglomerados mal consolidados y diseminados con fragmentos líticos y cristalinos
-  **Ignimbritas-Basaltos:** piroclastos bien consolidados intercalados con derrames de basaltos y andesitas.
-  **Depósitos Fluviales:** Tobas areno-arcillosas compuesta de fragmentos líticos de andesita, pómez y dacitas.

3.2.3. Geología estructural de la Ciudad de México

Los aspectos estructurales de la CDMX (figura 3.8) los podemos entender por los lineamientos diferenciales de los diferentes aparatos volcánicos existentes y los estudios de sismica de reflexión.

En el subsuelo de la CDMX se localiza la fosa Mixhuca-Roma producto del fallamiento producido en la Orogenia Laramide, la cual se representa por la falla Mixhuca con dirección S-SE, que fue detectada por las líneas de sismica de reflexión (Pérez Cruz, 1988). Esta fosa tiene forma escalonada integrada por una serie de fallas inferidas como la falla Chapultepec-Roma (Aguayo Camargo et. al, 1989) y la falla Mixhuca al poniente de la CDMX, en dirección NE-SES, estas se interceptan a la falla del Peñón de los Baños con dirección SE-E.

En la porción norte del mapa se localiza la fosa Cuauhtepc y Barrientos, con un alineamiento E-SE. La Sierra de las Cruces y al pie del monte de esta, se observan un sistema de fallas normales e inversas con dirección SW-NE buzantes al SE y NW (porción central del mapa, *figura 3.8*), la cual destaca la Falla Contreras al sur del Cerro del Totolapa y la fosa Lomas al sur de Chapultepec (García-Palomo et al, 2008), en la porción SE del mapa se localiza la fosa Tlahuac-Tulyehualco formada por las fallas Santa Catarina y Xicomulco (*figura 3.8*).



Espesor [m]	Litología	Descripción
Variable		(S-To), Suelo Totolsingo; Paleosuelo con contenido orgánico
Variable		(S-Ta), Suelo Tcubaya; Paleosuelo con bandas de caliche
0.50		(ApG-Arc), Arena Pumítica de Grano Grueso muy Arcillosa
Variable		(Tb-Arc), Tobas Areno-arcillosa
2.50-10.0		(LH-Ag), Lahar Aglomerático, bien compactado con clastos subredondeados a subangulosos de andesita, con matriz muy escasa de Areno-Limoso
10.0		(Ag), Aglomerado con clastos subangulosos de Dacita, emplazado en una matriz Areno-Arcilloso
0.70		(Tb), Toba Areno-Arcillosa con poco contenido lítico
1.50		(Ap), Aena Pumítica de Grano Grueso, muy deleznable
1.50		(Tb), Toba Lítica con clastos de Pumicita
2.50		(Ap), Arena Pumítica de Grano Medio, bien clasificada y Deleznable
1.50		(Tb), Toba Lítica, con clastos de Pómez de textura Areno-Arcillosa
1.30		(Ap), Arena Pumítica Granocreciente (Medio a Grueso)
15.0		(Tb), Toba lítica Areno-Arcillosa con clastos de Andesita, Pumicita y Dacita, Cementadas con matriz ácida (Arenas Rosas)
1.0		(Ap), Arena Pumítica mal calasificada, intercalada con Tobas Rosas
20.0		(Ag), Aglomerados Volcánicos con clastos subánguloso a subredondeados, muy compactado

Figura 3. 7. Estratigrafía de la Formación Tarango. Modificada de Ruiz González G. 1998.

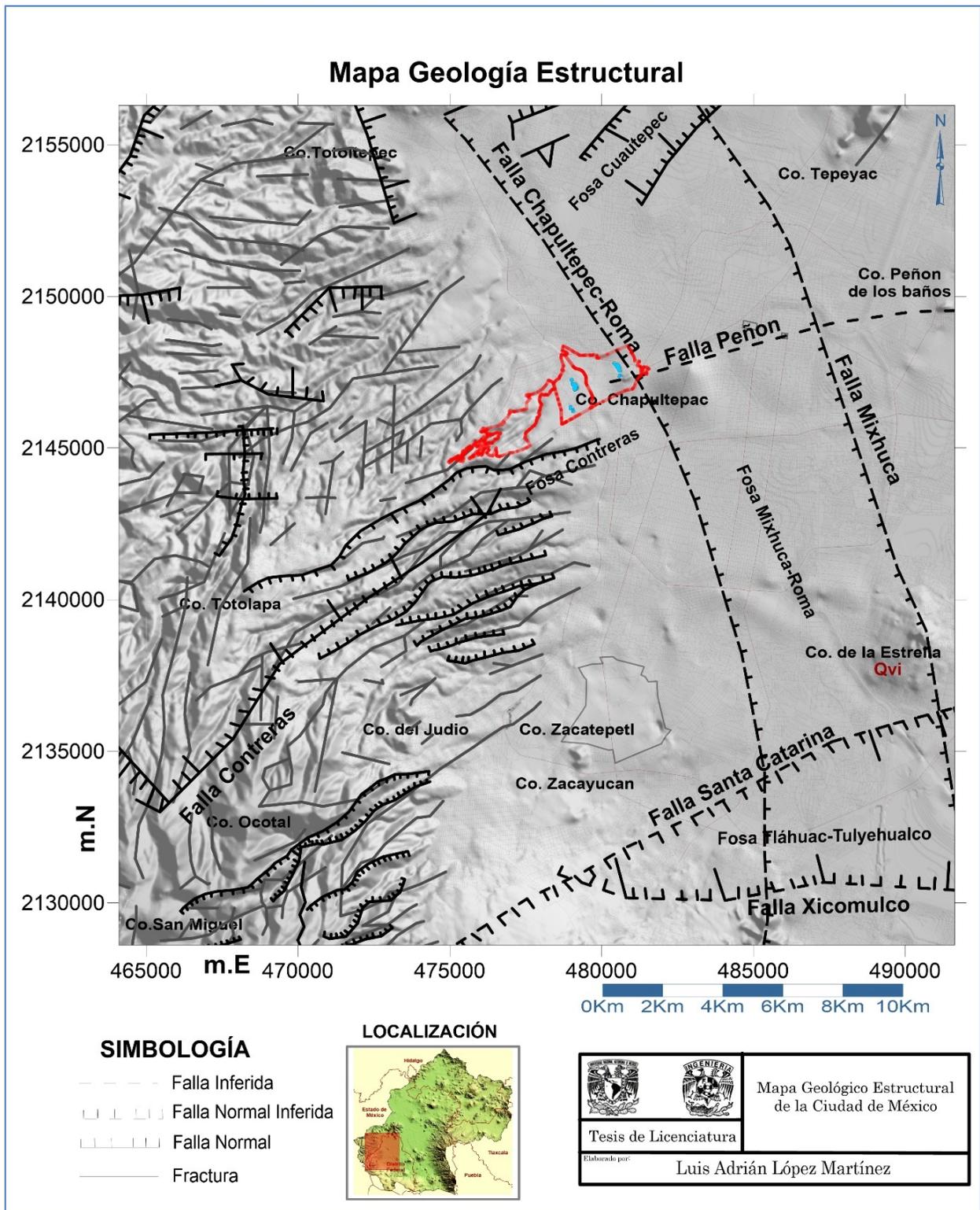


Figura 3. 8. Mapa estructural de la Ciudad de México. Modificada de García-Palomo et al, 2008 y Mooser et al, 1994.



3.3. Geología del Bosque de Chapultepec (BCH)

El BCH se localiza al poniente de la CDMX ubicada en la zona de lomas, superficialmente se compone de rocas vulcanoclásticas, depósitos aluviales y lacustres, tobas, piroclastos, aglomerados y arenas pumíticas de la formación Tarango, que se encuentran en contacto con arenas y arcillas de los depósitos aluviales y lacustres respectivamente. Morfológicamente el área se encuentra dominada por el Cerro de Chapultepec, de composición basáltica-dacítica, las barrancas y taludes de la tercera sección del bosque, compuestas por arenas piroclásticas (*figura 3.9*).

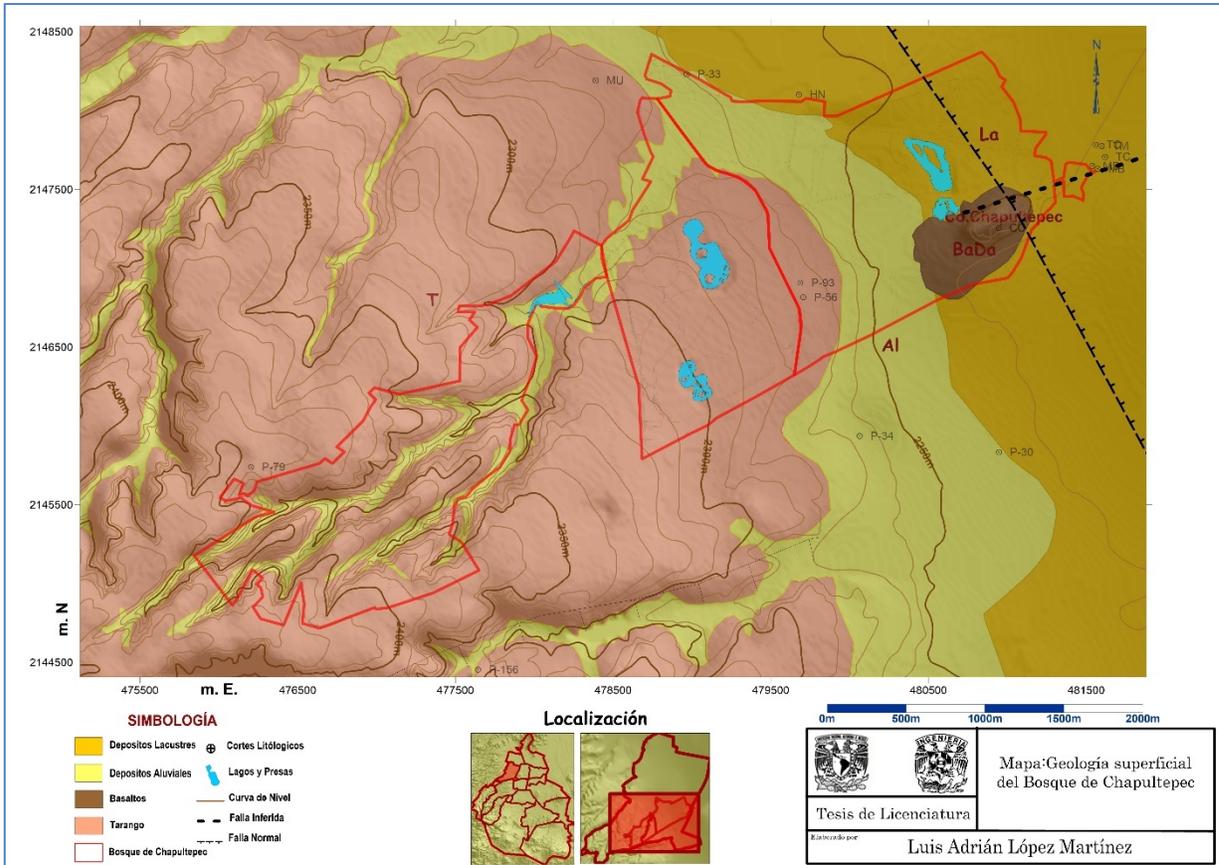


Figura 3. 9. Mapa geológico del Bosque de Chapultepec.

3.3.1. Geomorfología del Bosque de Chapultepec (BCH)

El análisis geomorfológico del BCH se basa en su origen, edad, evolución y sus procesos modeladores (endógeno y exógeno) (Enríquez Santillán C. A, 2013), observando el tipo de relieve del BCH se determinó la geomorfología compuesta por:

Cumbre de colina baja: de origen volcánico formado procesos endógenos de emisión de lava, que formo el cono volcánico del cerro de Chapultepec (*figura 3.10*).



Ladera de colina baja: de origen volcánico formado por procesos endógenos por flujos lávicos, es parte de la pendiente del Cerro de Chapultepec (*figura 3.10*).

Pie de colina baja: de origen vulcano sedimentario, formado por procesos exógenos debido a la acumulación de material coluvial y aluvial provenientes del desprendimiento de las zonas alta y pendiente del Cerro de Chapultepec (*figura 3.10*).

Planicie aluvial: de origen sedimentario, formado por procesos exógenos, producto del acarreo y transporte de material aluvial y depósitos de laguna (*figura 3.10*).

Planicie de lecho de barranca: de origen sedimentario formado por procesos exógeno producto de la erosión debido al flujo hídrico de los arroyos que corren torrencialmente en temporada de estiaje fluvial y de desprendimiento de material producto de caídas gravitacionales (*figura 3.10*).

Talud de transición: de origen vulcano sedimentario, formado por procesos exógenos de carácter complejo producto de depósitos de material efusivo compuesto por flujos piroclásticos y actualmente por construcciones antropogénicas, esta se representa una pequeña pendiente donde se encuentra el contacto entre el material aluvial con los depósitos vulcano sedimentarios (*figura 3.10*).

Pared de barranca: de origen sedimentario y gravitacionales, formado por procesos exógenos, producto de la erosión y fracturamiento de las barrancas localizadas en la tercera sección del BCH, compuesta de material epiclástico y lahares en forma de taludes, los cuales se erosionan por torrentes fluviales y crecidas de los arroyos (*figura 3.10*).

Pie de monte: de origen volcánico, predominante en el área de estudio, formado por procesos exógenos, depositado por material vulcanoclástico, en forma de abanicos, paleosuelos y lahares, observables en la tercera y segunda sección del BCH (*figura 2.10*).

3.3.2. Estratigrafía del Bosque de Chapultepec (BCH)

Considerando el análisis e integrando la información de los subcapítulos anteriores se presenta la estratigrafía que compone el subsuelo del BCH, cuyas rocas tienen su origen desde el Paleógeno superior (Oligoceno) al Cuaternario (*figura 3.11*).

De manera general en el BCH se depositaron diferentes unidades volcánicas que emergieron debido a tres eventos magmáticos, producto del segundo evento tectónico (Post- Orogenia Laramide). Este evento fracturo la zona de debilidad en la porción de la cuenca dando origen a arco cortical y calderas volcánicas que depositaron las rocas volcánicas del Oligoceno, Mioceno y Pleistoceno, que conforman las unidades volcánicas del primer evento.

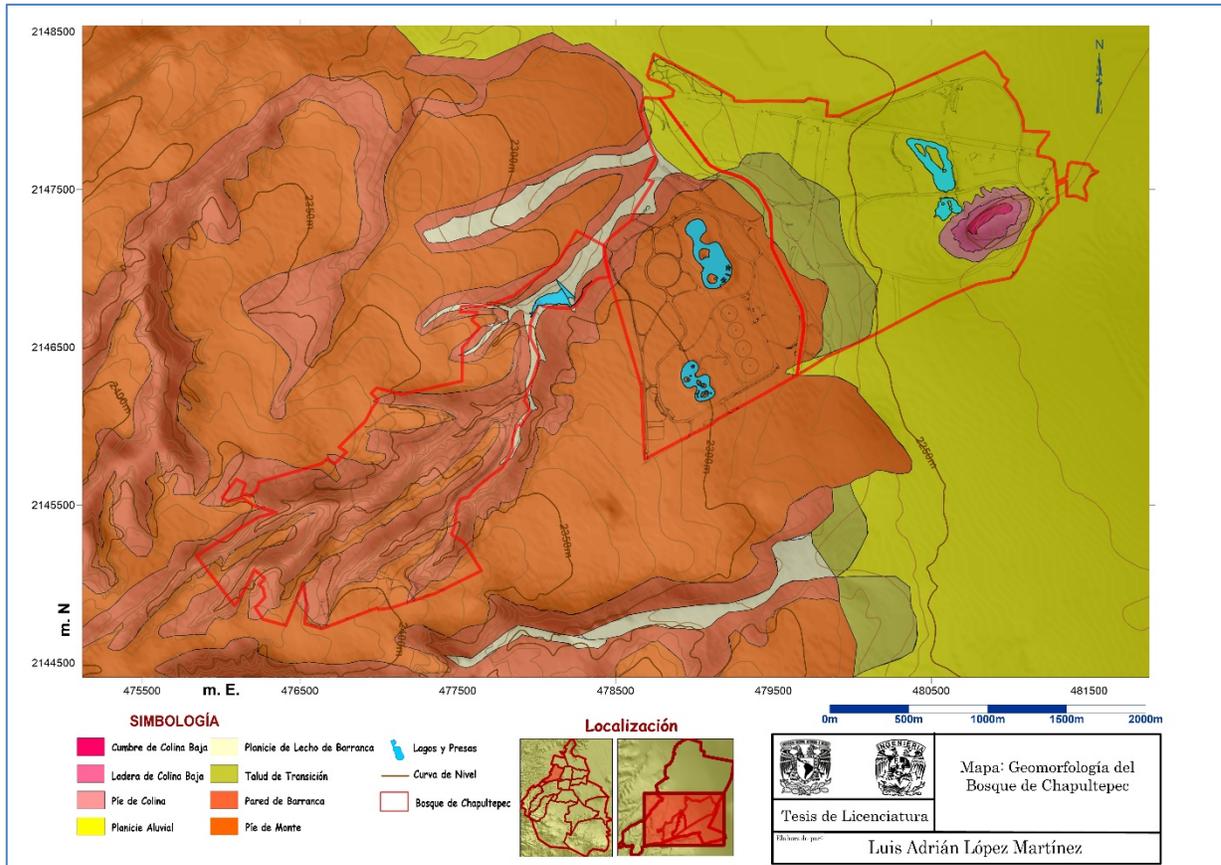


Figura 3. 10. Mapa geomorfológico del Bosque de Chapultepec. Modificado de Enrique Santillán, E. A., 2013.

Posteriormente con una nueva reactivación tectónica y un segundo evento magmático se depositaron las rocas volcánicas del Cuaternario, que representan el evento magmático y efusivo que origina la parte superior de las rocas que conforman la Sierra de las Cruces y los depósitos vulcanoclásticos que dominan el área de estudio.

Posterior al segundo evento volcánico, a este se depositó material aluvial y lacustre proveniente del cauce fluvial de arroyos y ríos existentes en el cuaternario, continuamente a los depósitos aluvio-lacustres, se formó el aparato volcánico que dio origen al Cerro de Chapultepec, producto del tercer periodo magmático que sufrió la Cuenca de México.

En el siguiente apartado se describen las unidades que conforman la estratigrafía del subsuelo del BCH:



PALEOGÉNO

Rocas Volcánicas del Oligoceno (Vu Ol).

La unidad está conformada por rocas volcánicas extrusivas de composición intermedia, aunque se incide también material efusivo de composición básico y ácido; depositadas por un vulcanismo de varios periodos magmáticos y efusivos, que dieron origen a rocas andesíticas, riolíticas y dacitas, en contacto con los derrames lávicos e intercalados con tobas líticas, cristalinas y vítreas, piroclastos, y brechas de flujo, esta secuencia se depositó discordantemente durante el primer evento magmático sobre las fosas Mixhuca y Roma. Esta unidad la cortan los pozos de exploración de PEMEX a una profundidad de 503 a 1140 m, y según las secciones sísmicas (SACMEX 1, 2013 y Pérez Cruz G., 1989) se encuentra suavemente plegada.

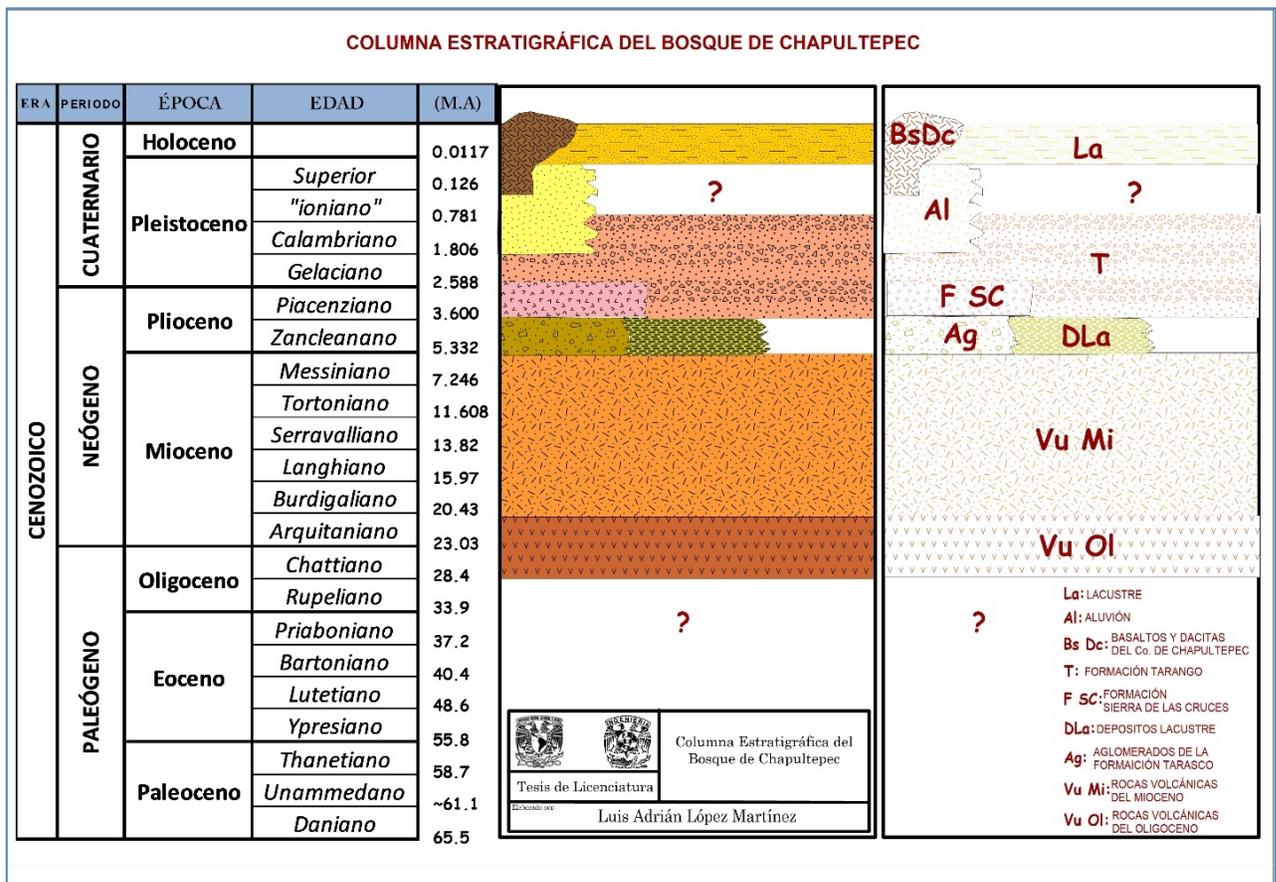


Figura 3. 11. Estratigrafía tipo del Bosque de Chapultepec. Modificada de Aguayo C., Marín, 1989.



NEÓGENO

Rocas Volcánicas del Mioceno (Vu Mi)

La unidad es secuencia de rocas volcánicas extrusivas compuestas por tobas, brechas y lavas de composición básica a intermedia, como andesita, riocacita y dacita de textura afanítica y porfídica; reportada en los pozos profundos a una profundidad de 675 m y aflorando en la Sierra de Guadalupe, reportando espesores de 180 metros aproximadamente, sobrepuesta encima de las rocas volcánicas del Oligoceno. Esta unidad tuvo su origen entre el primer evento magmático y principio del segundo cuyo material emergió sobre las fracturas y fallas durante el Mioceno.

Depósitos Lacustres del Plioceno (DLa)

La unidad está representada por capas de arcilla y tobas arcillosas formadas en un ambiente lagunar producto del desarrollo de cuencas endorreicas someras durante el Plioceno, esta unidad descansa sobre las secuencias volcánicas del Mioceno con espesores de 200 a 300 m.

Aglomerados del Plioceno (Ag)

Sobreyaciendo a las rocas volcánicas del Mioceno y a los depósitos lacustres del Plioceno se depositaron una secuencia de aglomerados compuestos por tobas intercaladas con lavas con presencia de horizontes arcillosos, formada por espesores subhorizontales detectada en las líneas sísmicas levantadas en la CDMX, en 1987 y 2011; su depósito es producto de la erosión y transporte de origen fluvial, el espesor es de aproximadamente 600 m.

Formación Sierra de las Cruces (SC).

Descrita por Schlaepferer en 1968, la caracteriza como una secuencia de rocas volcánicas y vulcano sedimentarias de origen magmático y efusivo; la secuencia lávica está compuesta por un conjunto de rocas andesíticas y dacíticas intercalada con material de composición piroclástico, pumicita y cenizas vítreas, también se intercalan con brechas líticas, con fragmentos de roca de pómez y andesitas. Se encuentra en contacto discordante con el material aluvial y paleocanales fluviales; esta unidad se sobrepone a los aglomerados del Plioceno, durante el segundo evento volcánico.



NEOGENO-CUARTERNARIO

Formación Tarango (T).

Descrita por Bryant en 1948 (SGM, 2014), la formación Tarango está constituida por una secuencia de rocas volcanoclásticas compuestas por piroclastos, tobas líticas intercaladas con cenizas, arcillas y aglomerados, con horizontes lenticulares de pumicita, limos; así como lahares y depósito de lodos volcánicos, esta formación se depositó transicionalmente sobre la formación Sierra de las Cruces en forma de abanicos producto de vulcanismo efusivo y acarreo caótico de material volcánico depositados en el Neógeno tardío (Plioceno) y Cuaternario temprano (Pleistoceno), con espesores de 20 a 200 m.

CUARTERNARIO

Depósitos Aluviales (Al).

Propuesto por Bryan y Terra en 1948 (SGM, 2014), caracterizan esta unidad como una secuencia de material fluvial, acumulado por sedimentos de diferentes miembros; esta unidad sedimentaria está compuesta por fragmentos de gravas, arenas, limos y arcillas poco consolidadas, cortada por los pozos profundos de PEMEX a profundidades de 74 a 330, 117 a 320 y 300 a 500 m respectivamente, esta unidad descansa discordantemente sobre la Formación Tarango y los aglomerados del Plioceno, y se encuentra concordantemente en contacto superior con depósitos lacustres, su depósito rocoso se debe al bloqueo de desagüe que sufrió la Cuenca de México que favoreció al cambio de flujo y velocidades de los cauces fluviales y la erosión de unidades descritas anteriormente debido al periodo glacial y pos-glaciación que sufrió la CDMX y el Pleistoceno superior. Su espesor en el área de estudio varía de 30 a 150 m.

Depósitos Lacustres (La).

Descrita por Bryant en 1948 (SGM, 2014), esta unidad areno-arcilloso se sobrepone concordantemente a los depósitos aluviales, producto de un ambiente lagunar depositando y sedimentado en el lago de Texcoco, y el transporte aéreo de material piroclástico y cenizas de las erupciones de los diferentes volcanes que rodean la Cuenca de México. Esta unidad la componen material piroclástico y acumulación arcilla lacustre, que se depositó en forma de una gran altiplanicie compuesta también por material arcilloso intercalado con arenas y limos con horizontes de tobas y derrames lávicos, esta secuencia areno-arcillosa contiene poco carbonato de calcio interestratificado



con pómez y cenizas, además de contener material orgánico; con espesores que van de los 30 a los 100 m respectivamente.

Cerro de Chapultepec (CC_Bs-Dc)

Esta unidad se le asigna al aparato volcánico relativamente joven y es el Cerro de Chapultepec, que está compuesto por rocas ígneas extrusivas de composición de basaltos y dacita emergidas durante el tercer periodo magmático en el Pleistoceno superior y el Holoceno, su espesor es relativamente heterogéneo en contacto concordante con los depósitos aluviales y lacustres.

3.3.3. Secciones geológicas del Bosque de Chapultepec

En base a la información geológica descrita anteriormente y a cortes litológicos de pozos del poniente de la CDMX, así como en el apoyo de cortes geotécnicos, se construyeron dos secciones geológicas esquemáticas del BCH; en las cuales se observa una distribución de depósitos sedimentarios (lacustres y aluviales) y vulcano sedimentarios (depósitos de acarreo y piroclásticos de la formación Tarango) (*figura 3.12*).

Estas secciones se basan en cuatro cortes litológicos de pozos de extracción de agua proporcionados por SACMEX (2011) y tres cortes geotécnicos realizados por la empresa TGC (2009) los cuales se mencionan a continuación:

-  Pozo No. 79 Lomas de Chapultepec #3, (Profundidad: 300 m) (SACMEX 2, 2011).
-  Pozo No. 93 Molino del Rey, (Profundidad: 265 m) (SACMEX 3, 2011).
-  Pozo No. 33 Campos Elíseos, (Profundidad: 300 m) (SACMEX 4, 2011).
-  Pozo No. 34 Casa Amarilla, (Profundidad: 200 m) (SACMEX 5, 2011)
-  (CC) Sondeo Geotécnico Cerro de Chapultepec, (Profundidad: 50 m) (TGC 1, 2009).
-  (MB) Sondeo Geotécnico Monumento Bicentenario, (Profundidad: 65 m) (TGC 2, 2009).
-  (TM) Sondeo Geotécnico Torre Mayor (Profundidad: 60 m) (TGC 3, 2009).

En base a estos siete cortes litológicos se elaboraron las secciones geológicas A-A' (*figura 3.12 superior*) y B-B' (*figura 3.12 inferior*) que continuación se describen.

La sección geológica esquemática A-A' (*figura 3.12 superior*), se basa en los cortes litológicos compuesta por los pozos No. 79, No. 93 y los sondeos geotécnicos Cerro de Chapultepec (CC),



Monumento Bicentenario (MB) y Torre Mayor (TM), en donde se correlacionaron las unidades geológicas en base a sus características litológicas (ver Anexo 1) tiene una longitud de 6 kilómetros y una profundidad de 390 m y 240 m, con un desnivel de 150 m aproximadamente.

La sección geológica esquemática B-B' (*figura 3.12 inferior*), se basa en los cortes litológicos compuesta por los pozos No. 33, No. 34 y No. 93 en donde se correlacionaron las unidades geológicas en base a sus características litológicas (ver Anexo 1), tiene una longitud de 2.6 kilómetros y una profundidad de 260 m, con un desnivel de 100 m aproximadamente.

A continuación, se describen las unidades de roca definidas para estas secciones:

Relleno: Constituido por material de tipo antropogénico como cascajo, tepetate y asfalto, tienen un espesor de 1 a 2.5 metros aproximadamente por debajo se encuentra material limo-arenoso de color marrón, como lo reportan los cortes geotécnicos CC, MB y TM (ver Anexo 1).

Depósitos lacustres: Constituido por una serie de arcillas y limos intercalado con ceniza volcánica y lentes arenosos, el material es de color gris olivo en su mayoría, de acuerdo con los cortes geotécnicos CC, MB y TM, su espesor varía de 18 m a 20 m siendo estrato-creciente hacia el oriente (ver Anexo 1) (*figura 3.12*).

Secuencia aluvial: caracterizado por constituirse por una secuencia de arenas aluviales intercalado con material limo-arenoso y arcillas arenosas de color gris en su parte superior y marrón oscuras en la parte inferior, en algunos horizontes contiene gravas aisladas de tipo andesítico y pumítico de color azul, su espesor puede variar desde 4 m hasta los 30 m aproximadamente como lo reportan los cortes geotécnicos CC, MB y TM, en algunas porciones se presentan como lentes de 70 m cercanos a la planicie del pie de monte (ver Anexo 1) (*figura 3.12*).

Secuencia vulcanoclástica de la Formación Tarango: esta secuencia se subdivide en seis diferentes texturas las cuales se mencionan a continuación sus características:

FT Piroclastos: Material Piroclástico de textura tobácea-areno arcillosa con contenido pumítico y semifracturado, el material se encuentra gradado hacia la base, se observan dos estratos; uno superior el cual es de composición areno-arcilloso de color marrón claro el cual aflora en la 3^{ra} Sección, del BCH, este tiene una longitud en la sección de 700 m aproximadamente y un espesor de 26 m como lo reportan el pozo No. 79 (ver Anexo 1) y es estrato-decreciente hacia el este.

El estrato inferior el cual tiene una geometría irregular, está compuesto de toba areno-arcillosa y areno-limosa de color gris azulado, internando horizontes irregulares de arena pumítica alrededor



de 6 m de espesor, el pozo No. 79 lo reporta a 111 m de profundidad con un espesor de 21 m, mientras que los pozos No. 33, No. 93 y No. 34 lo reportan a una profundidad de entre 25 y 27 m con un espesor entre 37 y 46 m, decreciendo a 25 m hacia el SE, (ver Anexo 1) los espesores no presentan espesores homogéneos (*figura 3.12*).

FT Toba Pumítica: Toba de textura pumítica de color pardo discontinuo de 60 m de espesor según lo reporta el pozo No. 79 a una profundidad de 30 a 80 m, se observa un estrato-decreciente a 15 m aproximadamente hacia el NE y SE según los lo reportan los pozos No. 93 y No. 94, como se aprecia en las secciones geológicas esquemáticas A-A' y B-B' (*ver Anexo 1*) (*figura 3.12*).

FT Pómez Areno-Arcillosos: material areno-arcilloso de color gris azulado y rosado con espesor aproximado de 31 m proporcionado por el pozo No. 79 a una profundidad de 80 a 111 m (ver Anexo 1), también se puede encontrar como lentes de espesor de 20 metros aproximadamente (ver Anexo 1) (*figura 3.12*).

FT Toba Lítica: Material tobáceo compuesto por arenas y gravas mal clasificada de textura aglomerática de matriz arenosa, producto de acarreo de material volcánico y lahares, se encuentra intercalado con horizontes de arena volcánica (cenizas), pómez y material arcilloso, su granulometría es gruesa en su mayoría presentando boleos y bloques, esta capa interna lentes de arenas, pómez y enclaves de andesita y basalto, su espesor es de 200 a 300 m aproximadamente, esta unidad la reportan los pozos No. 79, No.93, No.33 y No.34, respectivamente (ver Anexo 1) y (*figura 3.12*).

FT Pómez: material ligeramente compacto de color gris azulado, regularmente clasificada de grano medio y grueso de matriz arcillosa en forma lenticular y en paquetes de dimensiones considerables reportada por el pozo No. 93 a profundidades de 25 y 218 m con espesores variables (ver Anexo 1) y (*figura 3.12*).

FT Lentes Arcillosos: material pumítico de matriz arcillosa en forma lenticular y en paquetes de color rosas y gris azulado, de espesores variables reportada a una profundidad de 136 m en el pozo No. 93 (ver Anexo 1) y (*figura 3.12*).

Basalto- Dacita: Material lávico de composición basáltico-dacítico de color gris oscuro a claro, aflorando en el Cerro de Chapultepec, se presenta de forma cónica en superficie, cortando a todas las unidades mencionadas anteriormente,

La figura 3.12 muestra la distribución geométrica y espacial de las unidades de roca hasta una profundidad de 390 y 240 m respectivamente, en la sección geológica esquemática A-A' en una dirección preferencial de SW- NE, mientras que la sección geológica esquemática B-B' tiene una profundidad de 270 m aproximadamente y una dirección preferencial de NW-SE, ambas dentro del BCH.

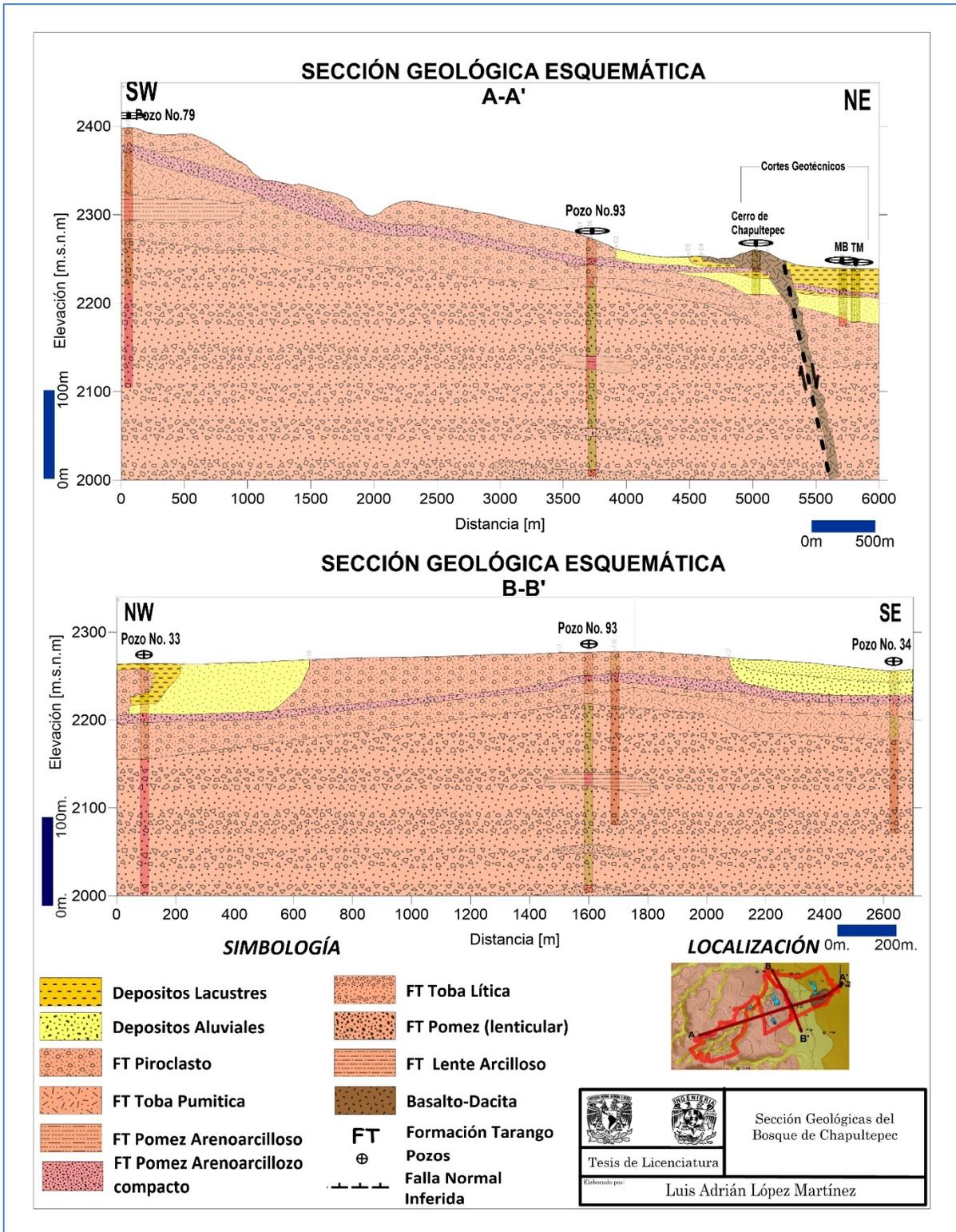


Figura 3. 12. Secciones geológicas esquemática del Bosque de Chapultepec.



CAPÍTULO 4

GEOFÍSICA.

“Tenemos agua para satisfacer a todos, pero no la avaricia de todos”.

Mahatma Gandhi



CAPITULO 4. GEOFÍSICA

La caracterización hidrogeológica del subsuelo del Bosque de Chapultepec (BCH) se realizó mediante Sondeos Transitorios Electromagnéticos (TEM's). En este capítulo se presenta su procesamiento, modelación e interpretación de los datos geofísicos en la zona de estudio, para ello se elaboran secciones y mapas de isorresistividad, asignándole su respectiva unidad geoelectrostratigráfica de acuerdo con los contrastes de resistividad. Finalmente, los resultados de este estudio conforman un modelo geoelectrico 3D del subsuelo.

4.1. Metodología de Adquisición de Datos de Resistividad, Mediante Sondeos Transitorios Electromagnéticos (TEM)

Para tener una mejor adquisición de datos de campo, previamente necesitamos hacer una logística de la campaña de adquisición, las cuales constan de conocer las vías de acceso, las condiciones topográficas y antropogénicas, así como la distribución urbana y espacial del BCH, también es muy importante conocer las condiciones geológicas del área en estudio, todas estas etapas se abordaron en los capítulos anteriores.

Posteriormente se ubicaron los sondeos (TEM's), se eligió un tipo de bobina y se adquirieron datos numéricos para después ser procesados respectivamente.

4.1.1. Ubicación de sondeos TEM

Los sondeos transitorios electromagnéticos (TEM's) se ubicaron estratégicamente cubriendo la mayor área posible dentro del BCH (*figura 4.1*). Estos conformaron una base de 23 sondeos divididos en tres campañas de exploración geofísica. La distribución de los sondeos se muestra en la *figura 4.1*. En esa figura utilizamos la nomenclatura HG y CHP, la cual indica el nombre del sondeo TEM respectivamente.

4.1.2. Tipo de arreglo (bobina coincidente)

La técnica electromagnética TEM consiste en utilizar el arreglo denominado Bobina Coincidente. Como se muestra en la *figura 4.2*, este arreglo está formado por una espira cuadrangular de 100x100 m, abarcando un área de 10,000 m² por tendido. En estos arreglos se realizaron pruebas de penetración, aplicando una intensidad de corriente en el intervalo de 1 y 4 amperes, intensidad que permite cubrir una profundidad de investigación aproximada de 300 a 500 m.

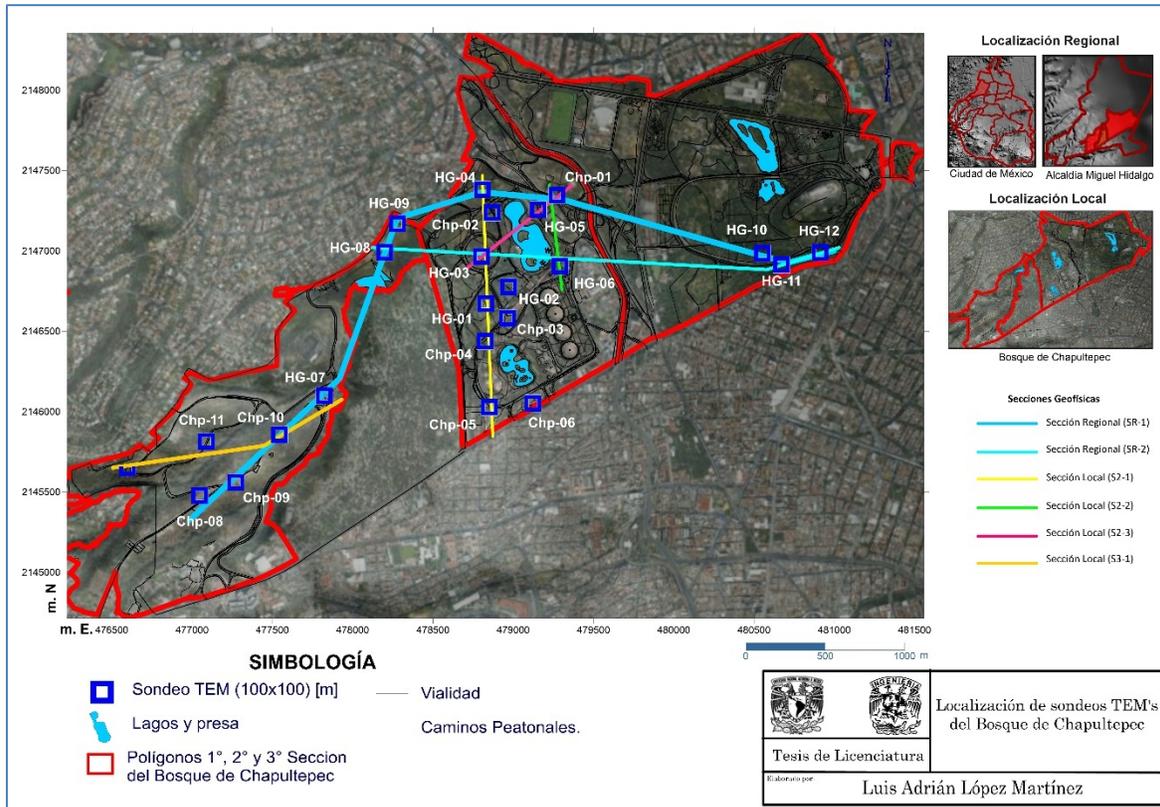


Figura 4. 1. Localización de los sondeos TEM y secciones geofísicas en el Bosque de Chapultepec.

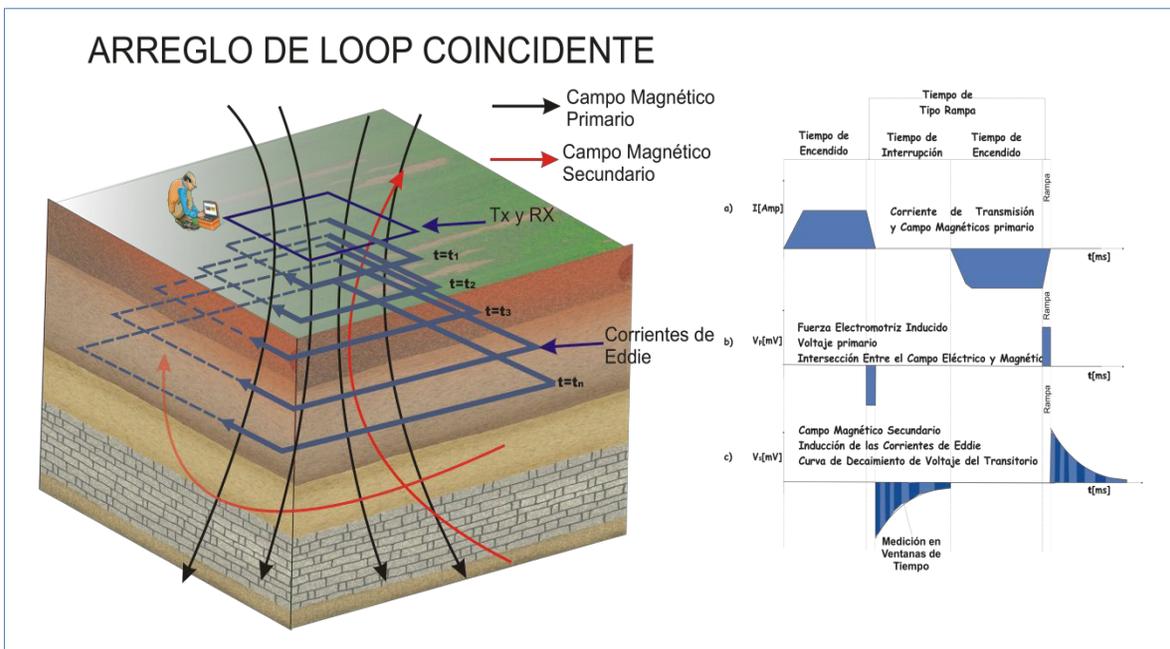


Figura 4. 2. Arreglo de la bobina coincidente (Modificado de ANH, 2009 y Schlumberger, 2009).



El control de calidad de los datos requirió la realización de diferentes pruebas, las cuales consistieron en variar los parámetros siguientes:

- 🚧 Pruebas de resistencia del circuito Tx y Rx.
- 🚧 Análisis de intensidad de corriente
- 🚧 Análisis de ruido y atenuación de este con la respuesta de diferentes ganancias
- 🚧 Análisis de penetración de la señal en el subsuelo, (profundidad de investigación).
- 🚧 Análisis de la repetitividad de la respuesta medida.
- 🚧 Apilamiento de la señal.

4.1.3. Características técnicas del equipo

En los levantamientos de campo se utilizó el equipo AERM TEM FAST 48 HPC (figura 4.3) fabricado por la empresa AEMR Ltd. Se trata de un equipo portátil, el cual está diseñado para mediciones electromagnéticas en el dominio del tiempo (TEM). El equipo actúa como transmisor y receptor a la vez configurándolo para ello; de acuerdo con las características del fabricante, proporciona una alta resolución en profundidad y facilidad en la adquisición de datos de resistividad.



Figura 4. 3. Equipo AERM TEM-FAST 48.



Las especificaciones técnicas del equipo se muestran en la *Tabla 4.1*:

Tabla 4. 1. Especificaciones técnicas del equipo (AEMR, 2006)

Equipo	AEMR TEM-FAST 48HPC
Ventanas de tiempo	48 geoméricamente separados
Rango de tiempo	4 - 16000 mS
Transmisor de corriente	1 Amp o 4 Amp
Tamaño de Bobina (Loop)	5 cm x 5 cm - 500 x 500m
Rango de profundidad	1 m – 1000 m aproximadamente
Número de sondeos tomados	10 - 15 sondeos cada 2 hrs
Caja a prueba de agua	IP65
Dimensiones (cm)	33 x 10 x 3.5
Peso (kg)	1.5 Kg
Batería interna	12 V, 2 A · h
Sensibilidad	~ 0,1 mV
Pantalla	Notebook o PC de mano
Temperatura de funcionamiento	-20 ° C a + 65 ° C

4.1.4. Adquisición de datos geofísicos de resistividad

En el levantamiento y adquisición de campo se utilizó el equipo Tem Fast 48HPC con accesorios, también se utilizó un carrete de cable de cobre calibre 12 con una longitud de 400 m, así como una batería externa de 24[V] y un GPS de mano marca Garmin para la ubicación y geoposicionamiento global en coordenadas absolutas UTM.

El armado del sondeo inicia posicionando el punto del levantamiento en un sistema coordenado, posteriormente se tira y extiende el cable formando un cuadrado de dimensiones de 100x100m, finalmente se conecta al equipo, como se muestra en la *figura 4.4*.

Una vez armado la bobina y conectado el equipo se procede a insertar las diferentes características y parámetros físicos para la adquisición de los datos numéricos, los cuales son:



Figura 4. 4. Equipo TEM armado, para adquisición de datos.

- 🐾 Un Bobina Coincidente de 100x100m de dimensión.
- 🐾 Intensidad de corriente que varía de 1 [Amp] a 4 [Amp].
- 🐾 Tiempo de medición de 36 a 48 ventanas.
- 🐾 Con una ganancia de 1 y 10
- 🐾 Rango de Tiempo de 7 y 9 [μ s]
- 🐾 Apilamiento (Staking) de 15 y 20
- 🐾 Frecuencia de 60 [Hz]

Posteriormente se da lectura a los datos numéricos de los campos electromagnéticos a adquirir en el subsuelo. Es importante mencionar que en cada sondeo se adquirieron de 3 a 4 lecturas con diferentes ganancias y apilamiento. Para cada lectura analizamos la curva de campo, poniendo especial atención a su decaimiento, resistividad y profundidad de investigación de la señal como se muestra en la *figura 5.5*. Este procedimiento hace posible verificar y corroborar la calidad de los datos en campo, para posteriormente hacer su análisis estadístico en el procesamiento de datos geofísicos obtenidos.

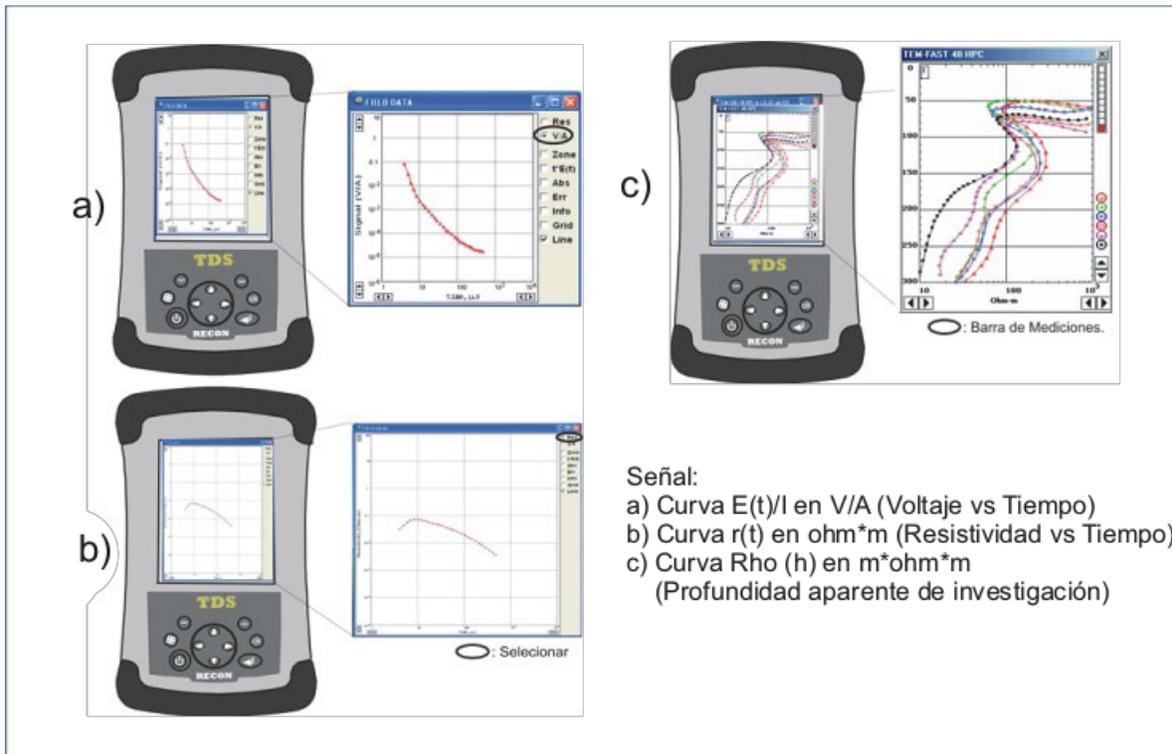


Figura 4. 5. Adquisición y análisis de datos de campo, a) Curva de decaimiento de voltaje, b) Curva de resistividad aparente, c) Curva de profundidad de investigación.

4.2. Procesamiento de Datos Geofísicos

El procesado de los datos geofísicos para cada, sondeo tiene como objetivo particular obtener un modelo unidimensional partiendo de la curva de resistividad aparente. Esta curva es procesada en dos etapas de análisis, la primera consiste en elaborar un modelo de capas planas siguiendo el método clásico de prueba y error, mientras que en la segunda etapa se procesa y analiza la curva de resistividad aparente aplicando una regresión tipo Occam (Constable, C. C. *et al.*, 1987). Con esto se logra obtener un modelo multicapas con el cual se integrarán en secciones de resistividad para contar con una caracterización bidimensional de los contrastes en el subsuelo.

El procesado de los registros de datos debe seguir estándares de calidad, por lo cual se utilizaron dos paquetes de cómputo:

-  Programa Tem-Fast 48 Poket CONVERTER v 2.18 para el procesado primario.
-  Programa WinGlink (Geosystem SRL, 2003), para utilizarlo como base de datos, modelar las curvas, elaborar secciones y mapas de resistividad.



El procesado de la información de cada, registro se efectuó de la manera siguiente:

- 🖨️ Transferencia de datos del equipo AEMR TEM FAST 38 HPC a la PC.
- 🖨️ Convertir datos en formato *BIN a formato *TXT.
- 🖨️ Edición de los datos.
- 🖨️ Edición y análisis estadístico de las curvas de decaimiento (nV/AMP vs Tiempo [μs]) con cada ganancia.
- 🖨️ Formación de la base de datos en WinGlink (Geosystem SRL, 2003).
- 🖨️ Conversión de la curva de decaimiento (nV/AMP vs Tiempo [μs]) a resistividad aparente (Rho [$\Omega.m$] vs Tiempo [μs]).
- 🖨️ Cálculo del modelo suavizado (inversión de Occam) (modelo multicapas o de capas planas).
- 🖨️ Elaboración del modelo Unidimensional.
- 🖨️ Elaboración de secciones y mapas de isoresistividad.

El procesado de datos de resistividad incluyo trabajo de gabinete; descarga y edición, procesos que a continuación se describen.

4.2.1. Transferencia de datos

La descarga de datos consiste en transferir los registros numéricos de cada sondeo, del equipo AEMR Tem Fast 48 HPC mediante la conexión por cable USB a la PC, organizando cada sondeo con su respectivo nombre en formato *BIN. Una vez descargados los datos se convierten de formato *BIN a *TXT mediante el programa Tem-Fast 48 Poket CONVERTER v 2.18.

4.2.2. Edición de los datos numéricos de resistividad

En esta parte del procesado de datos se revisa y se edita las diferentes lecturas numéricas que sean requeridos para cada sondeo. Particularmente se revisan el nombre del sondeo, la localización de referencia, el tamaño de Loop, los valores de voltaje, resistividad y profundidad, todos estos parámetros deben ser congruentes con la bitácora de exploración de campo.

La parte de la edición se utilizó un editor de textos, en él se borraron los datos nulos o se reemplazaron tomando una estadística promedio de las diferentes corridas de los datos en el mismo renglón coincidente; también se convirtieron en valor absolutos los datos negativos, la *figura 4.6* ejemplifica el proceso de edición de datos.

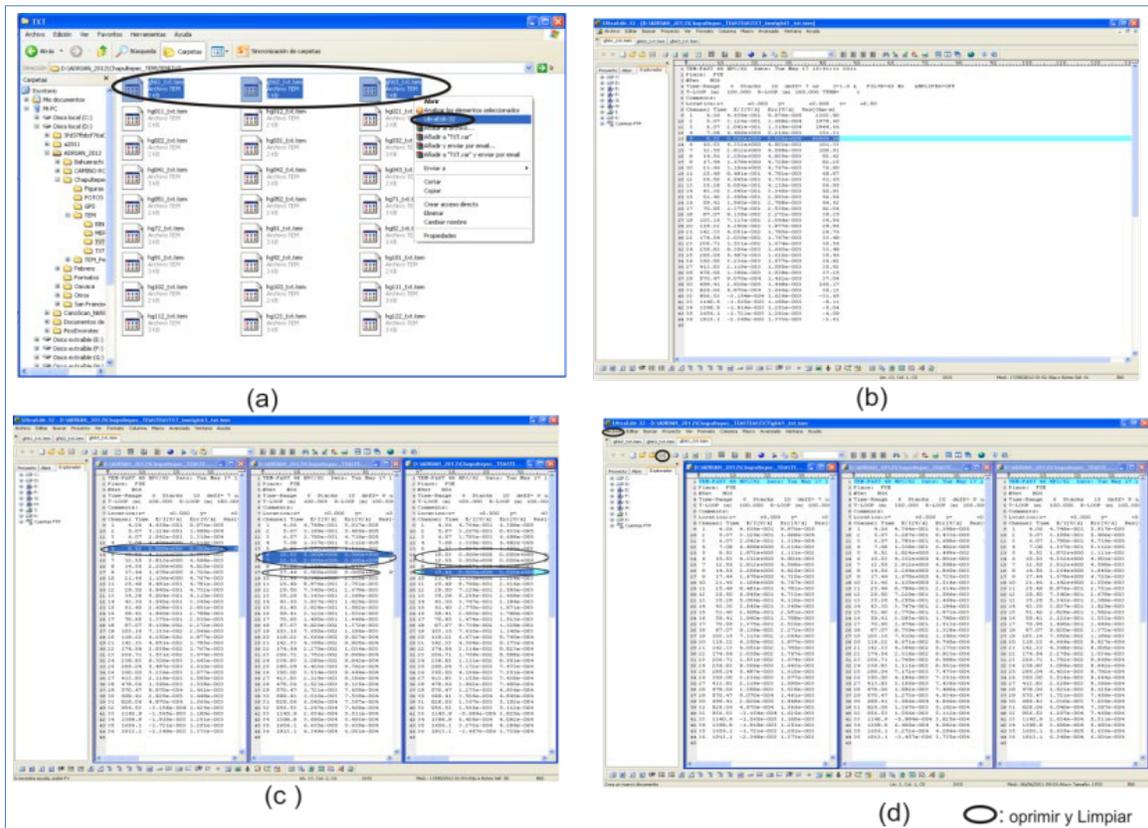


Figura 4. 6. Edición de datos numéricos de resistividad(a) Apertura de los archivos .TXT con el editor de textos; (b) Visualización de los datos y parámetros iniciales de los registros adquiridos; (c) Limpieza de datos nulos, se puede observar en las elipses los datos con valores nulos y negativos, estos deben ser borrados o remplazados además de aplicarle el valor absoluto a todos los datos de voltaje; (d) Visualización de los tres registros listos para su análisis estadístico.

4.2.3. Análisis estadístico y edición de curva de decaimiento de voltaje (nV/AMP vs Tiempo [μs])

En esta etapa del procesado se genera la curva de decaimiento de voltaje (nV/AMP vs Tiempo [μs]). En esta curva se analiza el porcentaje de ruido contenido en la señal, y si es necesario se le aplican filtros recursivos para eliminar el ruido. Posteriormente se realiza un análisis estadístico de los datos numéricos utilizando su desviación estándar y su promedio para hacer un re-muestreo y comparar las diferentes lecturas de cada valor numérico del sondeo. Una vez hecho lo anterior, se cargan todas las curvas de decaimiento editadas y filtradas, estas se comparan con la curva de decaimiento de re-muestreo, para obtener una curva final de decaimiento (nV/AMP vs Tiempo [μs]) guardándola en formato *MERGE. La figura 4.7 y 4.8 ejemplifica el análisis y resultado de esta etapa del procesado de datos.

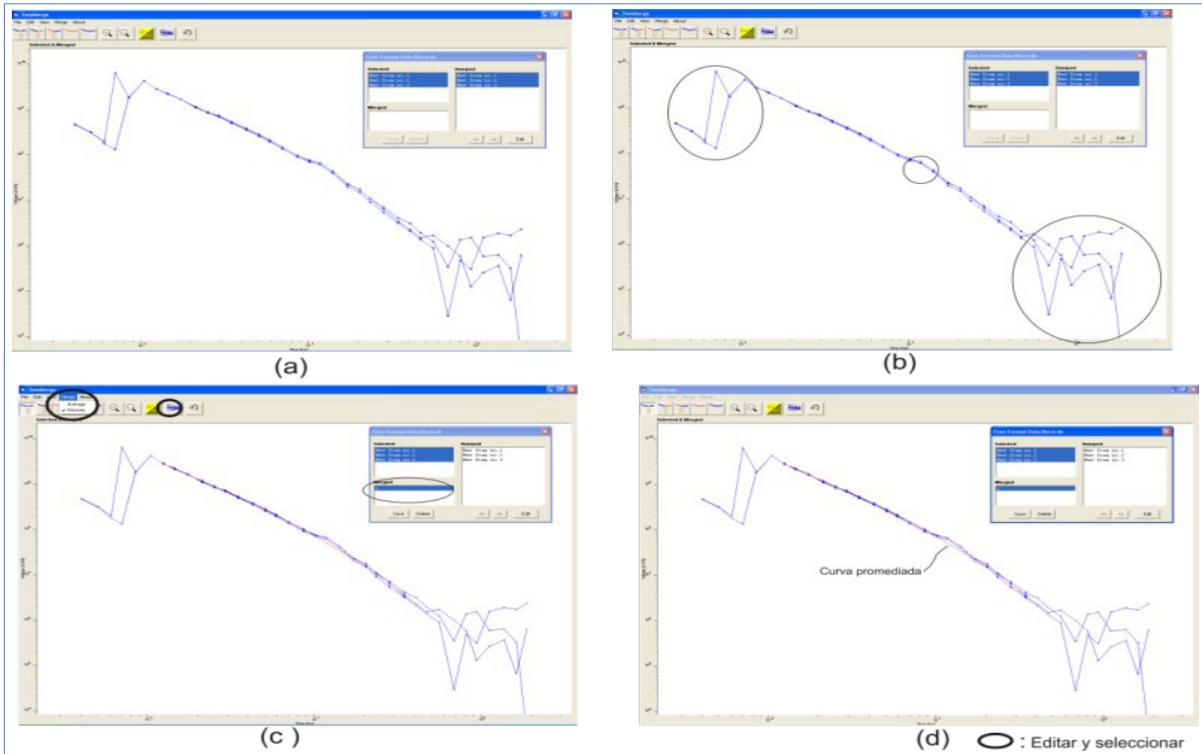


Figura 4. 7. Edición de puntos en la curva de decaimiento de voltaje. (a) Selección de las curvas a promediar; (b) Puntos a editar o a eliminar, estos se muestran dentro de un círculo; (c) Pasos y opciones para promediar las curvas; (d) Comparación con la curva promediada.

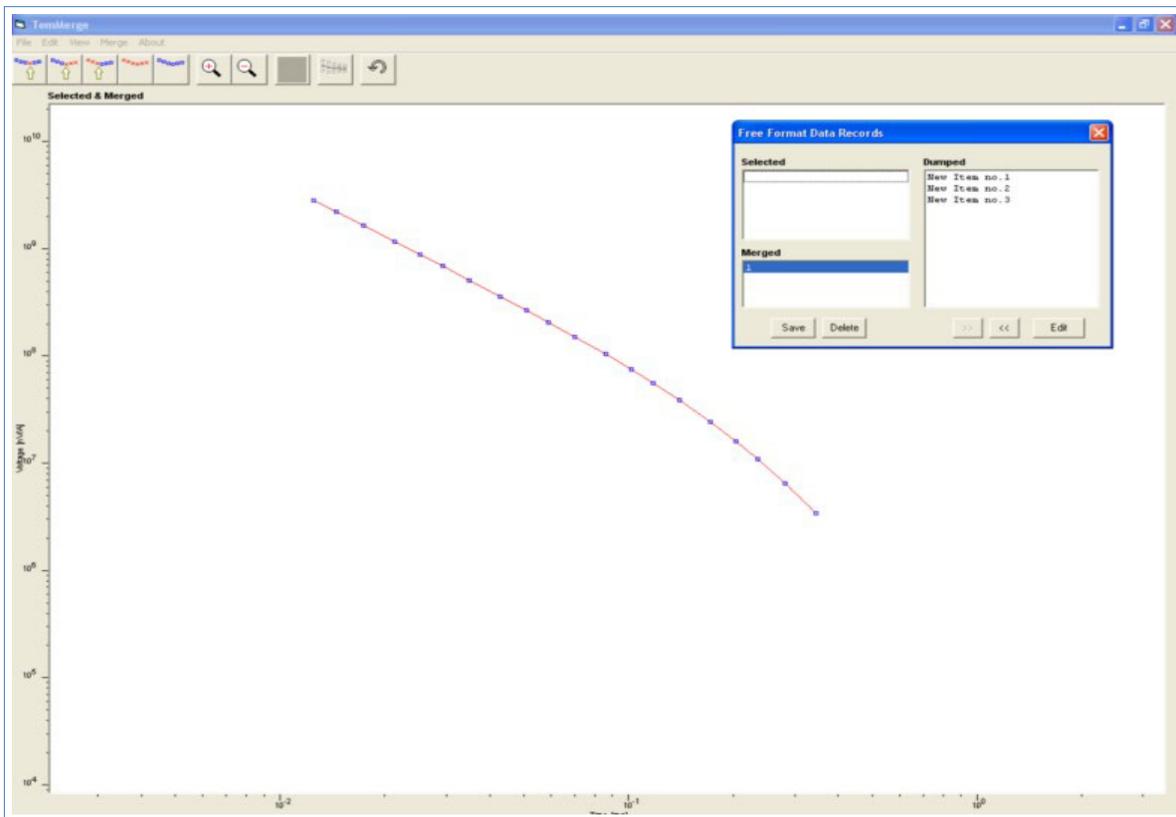


Figura 4. 8. Curva de Decaimiento estadística.



4.2.4. Conversión de la curva de decaimiento de voltaje (nV/AMP vs Tiempo [μs]) a Resistividad aparente (Rho [Ω.m] vs Tiempo [μs])

En la etapa del procesado la curva de decaimiento de voltaje se convierte a la curva de Resistividad aparente (Rho [Ω.m] vs Tiempo [μs]). Para ello se utiliza la herramienta de la ventana TemMerge del paquete de cómputo WinGlink (Geosystem SRL, 2003). En esta opción se puede ver la curva de resistividad (Rho [Ω.m] vs Tiempo [μs]) automáticamente, la cual se muestra en la *figura 4.9*.

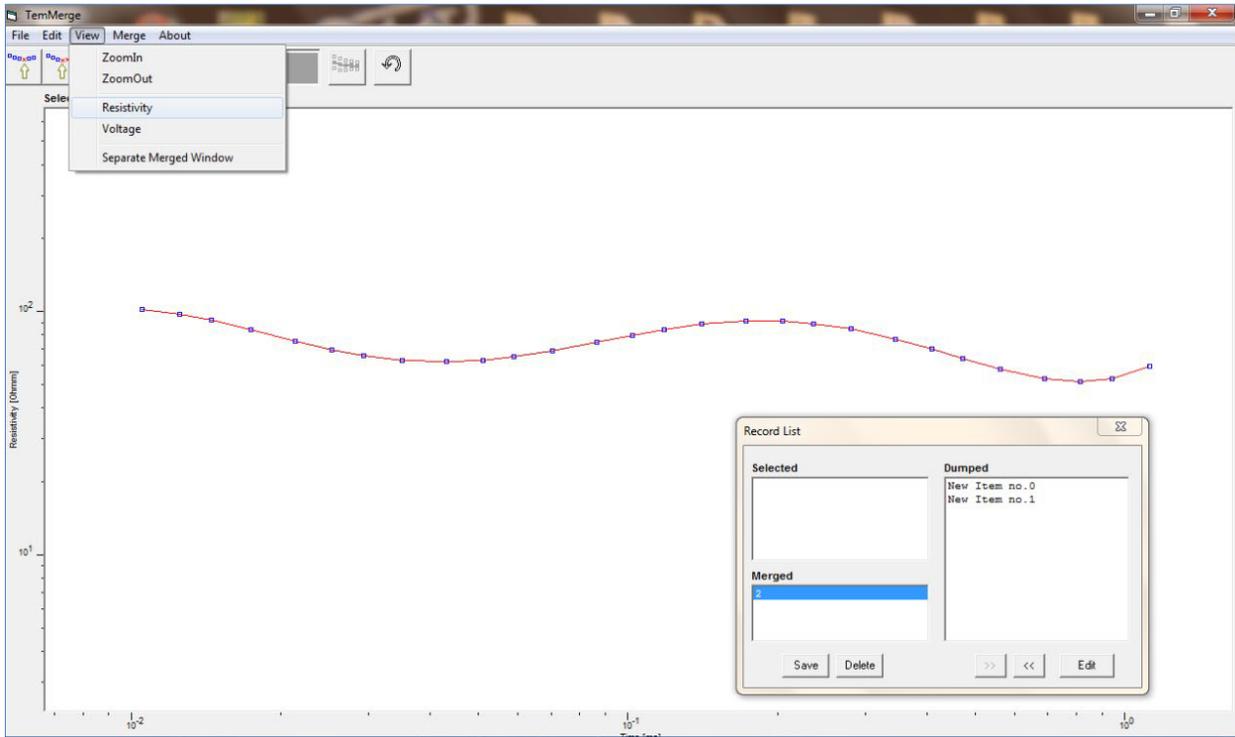


Figura 4. 9. Curva Resistividad Aparente (Rho [Ω.m] vs Tiempo t [μs]).

4.2.5. Modelo suavizado (inversión de Occam)

Una vez obtenida la curva de resistividad aparente, esta se somete a un modelado mediante el uso de un espacio estratificado en base a una iteración de prueba y error, el cual se le conoce como modelo suavizado mediante una regresión tipo Occam o también llamado de capas planas (modelo multicapa). En este proceso se propone una resistividad inicial y una resistividad final, basado en la estadística promedio de los datos de resistividad de campo, el algoritmo (ver Capítulo 2) requiere un número de capas, un valor de ajuste al que se quiere llegar dependiendo de la profundidad inicial y final y un valor máximo de iteraciones. Estos tres valores no intervienen en la obtención del modelo suavizado, por lo que solo dependen de los valores de resistividad.



En este trabajo de tesis se aplicó el modelo de inversión y cuyo error RMS estuviera en el intervalo del 10 a 20%, lo cual permitió obtener una mejor estimación del modelo. La *figura 4.10* muestra el procesado de datos para la obtención de un modelo suavizado y de capas planas.

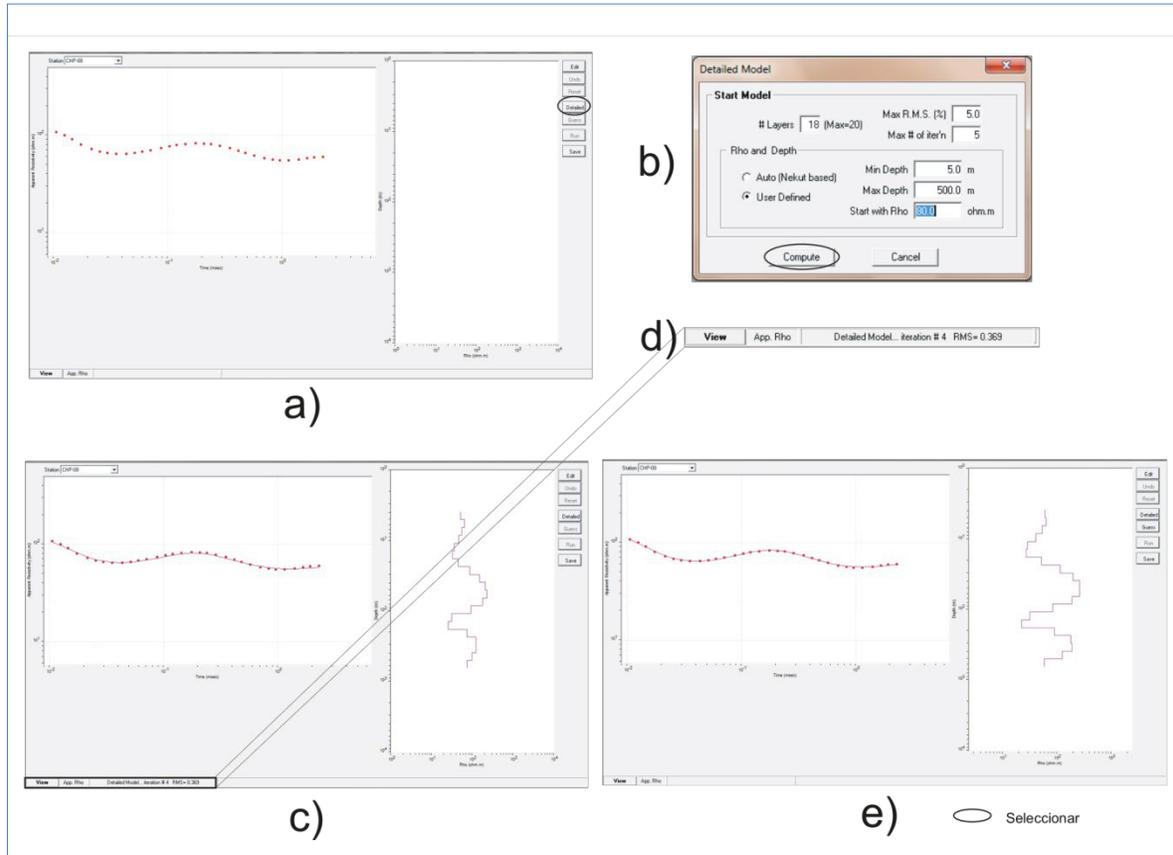


Figura 4. 10. Procesado Para el Modelo Suavizado, (a) Curva de Resistividad a modelar;(b) condiciones iniciales para nuestro modelo multicapa (# capas, Max. R.M.S [%], Max. # de Iteraciones, profundidad máxima y mínima, valor de resistividad inicial); (c) Evolución del modelo suavizado y multicapas; (d) observación de la evolución de las iteraciones con su respectivo error del modelo; (e) Modelo suavizado de la curva de resistividad y modelo multicapas.

4.2.6. Modelo unidimensional

A el modelo suavizado y de multicapas, se le aplica un ajuste automático en la curva de resistividad mediante una regresión automática de Ridge y Marquart (Ruiz, Aguilar, D., 2010). En esta regresión se sigue el método clásico de prueba y error en el que se propone un número de capas dependiendo de las inflexiones de curva de resistividad. La inversión se mejora aplicando la aproximación de tipo Anderson (Anderson, 1979), lo cual permite un mejor ajuste de la curva de resistividad del modelo suavizado mediante el error cuadrático mínimo (RMS) menor al 10 [%], a este proceso se le conoce como modelo unidimensional.



La *figura 4.11* muestra el proceso de la obtención del modelo unidimensional el cual se empieza observando la curva de resistividad del modelo suavizado, posteriormente se observan las inflexiones de dicha curva y se insertan el número de capas, el número de iteraciones y el error cuadrático mínimo (R.M.S [%]). Finalmente se obtiene el ajuste de la curva de resistividad (curva de color verde de la *figura 4.11f*).

En este modelo obtiene una serie de modelos equivalentes que cumplen con el mismo error de ajuste. Estos modelos equivalentes son conocidos como la interpretación interactiva de los datos y permiten realizar una interpretación al variar los diferentes parámetros para establecer el intervalo de espesor y resistividad de cada capa del modelo original con fines de correlación de valores de resistividad (correlación electroestratigráfica).

4.3. Perfiles de Resistividad

El objetivo de la exploración y procesamiento de datos geofísicos fue determinar de forma indirecta la distribución y profundidad de los materiales que componen el subsuelo del BCH. Para ello se utilizaron perfiles de isorresistividad.

Con base a la distribución de los 23 sondeos de TEM, y su interpretación, se elaboraron 2 perfiles regionales y 4 perfiles locales, los cuales se muestran en las *figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16* y *4.17*, y que a continuación se menciona:

-  Perfil Regional SR-01.
-  Perfil Regional SR-02.
-  Perfil Local S2-01 (2^{da} Secc. Del BCH).
-  Perfil Local S2-02 (2^{da} Secc. Del BCH).
-  Perfil Local S2-03 (2^{da} Secc. Del BCH).
-  Perfil Local S3-01 (3^{ra} Secc. Del BCH).

A continuación, se describirán los resultados de cada uno de los perfiles conformados en términos de la distribución de resistividad con la profundidad alcanzada. A su vez se correlacionarán tales resistividades con los cortes litológicos reportados en el subcapítulo 3.3.3 de este trabajo de tesis.

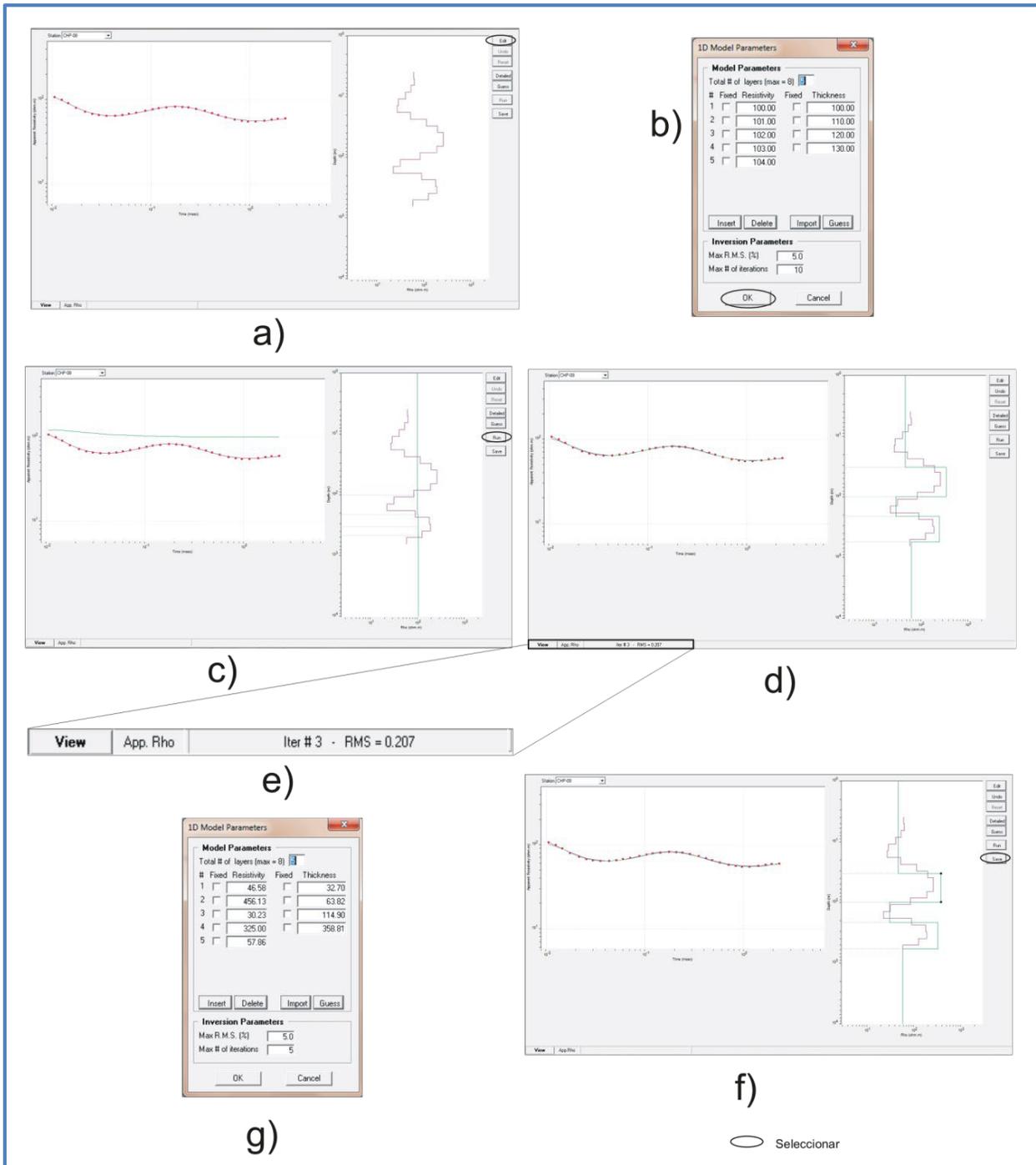


Figura 4. 11. Procesado del modelo unidimensional, (a) Modelo suavizado y multicapas; (b) Condiciones iniciales para nuestro modelo unidimensional (# de capas, Max. R.M.S [%], Max de # de iteraciones); (c) Curva a ajustar, aparece de color verde; (d) Aplicando la inversión para el mejor ajuste de la curva; (e) observando de la evolución de las iteraciones con su respectivo error; (f) modelo unidimensional; (g) valores de resistividad y espesores del modelo unidimensional.



4.3.1. Perfil Geofísico Regional SR-01

Lo conforman 11 sondeos (CHP-08, CHP-09, CHP-10, HG-07, HG-08, HG-09, HG-04, CHP-01, HG-10, HG-11 Y HG-12); tiene una longitud de 5.25 km, comienza en la 3^{ra} Sección del BCH y finaliza hasta la 1^{ra} Sección del BCH, tiene siete diferentes direcciones preferenciales: S50°W-N50°E, S20°W-N20°E, S68°W-N68°E, W-E, N68°W-S68°E y W-E. La interpretación de los diferentes contrastes que se observan en el perfil de isorresistividad (*figura 4.12*) muestra 6 diferentes unidades que se describen a continuación.

En la porción izquierda de la sección, se muestra superficialmente un horizonte de resistividades mayores a 80 [Ω .m] (**U4**) (color naranja), asociado a una secuencia piroclástica la cual aflora en la 3^{ra} Sección del BCH, presenta un espesor variable entre 75 a 120 m aproximadamente y se presenta hasta la distancia $X=2,264$ m en la sección. Este horizonte contrasta lateralmente con resistividades medias del orden de 20 a 80 [Ω .m] (**U2**) (color verde), la cual se muestra en la sección entre las distancias $X=2,264$ m a $X=4,743$ m, asociado a una secuencia de arenas y gravas de textura piroclástica, aglomerática y material aluvial, su espesor es variable de 30 m a 80 m y se muestra de forma acuñaada, se considera como una unidad eléctroestratigrafica con probabilidades acuíferas.

A su vez las resistividades medias (**U2**) (de 20 a 80 [Ω .m]) contrasta lateralmente con resistividades menores a 20 [Ω .m] (**U1**) (color azul), que se presenta a partir de la distancia $X=4,743$ m en la sección, y se asocia a una secuencia arcillo-lacustre. Presentando 25 m de espesor aproximadamente y se encuentra saturada.

La (**U3**) se subdivide en un contraste de resistividades bajas (**U3a**) y resistividades medias (**U3b**). La (**U3a**) (color azul) muestra un horizonte conductor del rango de resistividades de 1 a 20 [Ω .m], que se le asocia a tobas limo arenosas saturadas, con espesor variable entre 70 m a 105 m en forma acuñaada, esta unidad se puede observar en la sección a partir de la distancia $X=2,185$ m; y en la porción izquierda de perfil a una distancia entre $X=223$ y $X=1,303$ m, la misma subunidad (**U3a**) con un espesor aproximado de 90 m, se encuentra dentro de la subunidad (**U3b**) en forma lenticular.

La subunidad inferior (**U3b**) (colores en tonos verdes) contrasta por debajo de las resistividades bajas (**U3a**) y altas (**U4**), agrupando resistividades del orden de 20 a 80 [Ω .m], se le asocia a arenas volcánicas permeable y saturadas (Toba lítica), intercaladas con aglomerados volcánicos y piroclastos, se presenta en la sección de izquierda a derecha en forma estrato-creciente, con espesores que varían de 100 m a 330 m aproximadamente hasta la distancia $X=2,660$ m. La unidad (**U3b**) se considera con alto potencial acuífero. Infiriendo su nivel freático a una profundidad aproximada de 120 m de la superficie.

Finalmente se observa un alto resistivo con valores mayores a 80 [Ω .m] (**U5**) (color naranja),



que se asociado a una andesita fracturada, su espesor es desconocido.

En la *figura 4.12* se muestra la distribución geométrica y espacial de los diferentes contrastes de resistividades descritas en el perfil SR-01, también se observa una discontinuidad en la unidad (**U2**) y subunidades **U3a** y **U3b**, la cual indica la presencia de una posible estructura geológica a partir de la distancia $X=4,800$ m cerca del Cerro de Chapultepec asociado a un lineamiento estructural, propuesta por Aguayo Camargo en 1989, posiblemente es el salto de la fosa Roma.

4.3.2. Perfil Geofísico Regional SR-02

El perfil SR-02 (*figura 4.13*) está conforman 6 sondeos (HG-08, HG-03, HG-06, HG-10, HG-11 y HG-12). El perfil presenta una dirección N87°W-S87°E, con una longitud de 2.85 km. Inicia al norte de la Presa Dolores y termina en las oficinas de la Dirección General del BCH. La interpretación de los diferentes contrastes que se observan en este perfil de isorresistividad (*figura 4.13*) muestra 6 diferentes unidades que se describen a continuación.

En la parte superior derecha del perfil a una distancia de $X= 2,495$ m, se observan resistividades menores a 20 [Ω .m] (**U1**), la cual se asocia a una secuencia lacustre saturada, presenta un espesor de 25 m. Contrastando lateral y por debajo de las resistividades de (**U1**), se observa un horizonte de resistividades con valores entre 20 a 80 [Ω m] (**U2**), los cuales se asocian secuencia vulcanoclástica y material aluvial saturadas (piroclastos granulares y material aluvial), superficialmente se observa un espesor variable entre 18 m a 30 m, a la distancia de $X=2,620$ m, sin embargo el espesor puede llegar hasta 80 m. La unidad se considera como potencial zona acuífera.

La unidad (**U2**) contrasta lateralmente con resistividades mayores a 80 [Ω m] (**U4**), está asociada piroclastos semcompactos, presenta un espesor de 60 metros acuñándose a una distancia de $X=1,308$ metros.

La unidad (**U3**) se subdivide en un contraste de resistividades bajas (**U3a**) y resistividades medias (**U3b**). La subunidad (**U3a**) presenta resistividades de 1 a 20 [Ω m] y se le asocia a tobas limo arenosas saturadas, presentándose desde la distancia $X= 650$ m, con un espesor de 74 m a 90 m. Por otra parte, las resistividades (**U3b**) presentan valores entre 20 y 80 [Ω m], asociándose con arenas y gravas volcánicas; con potencial acuíferas a una profundidad entre 90 m y 130 m, de la superficie del BCH.

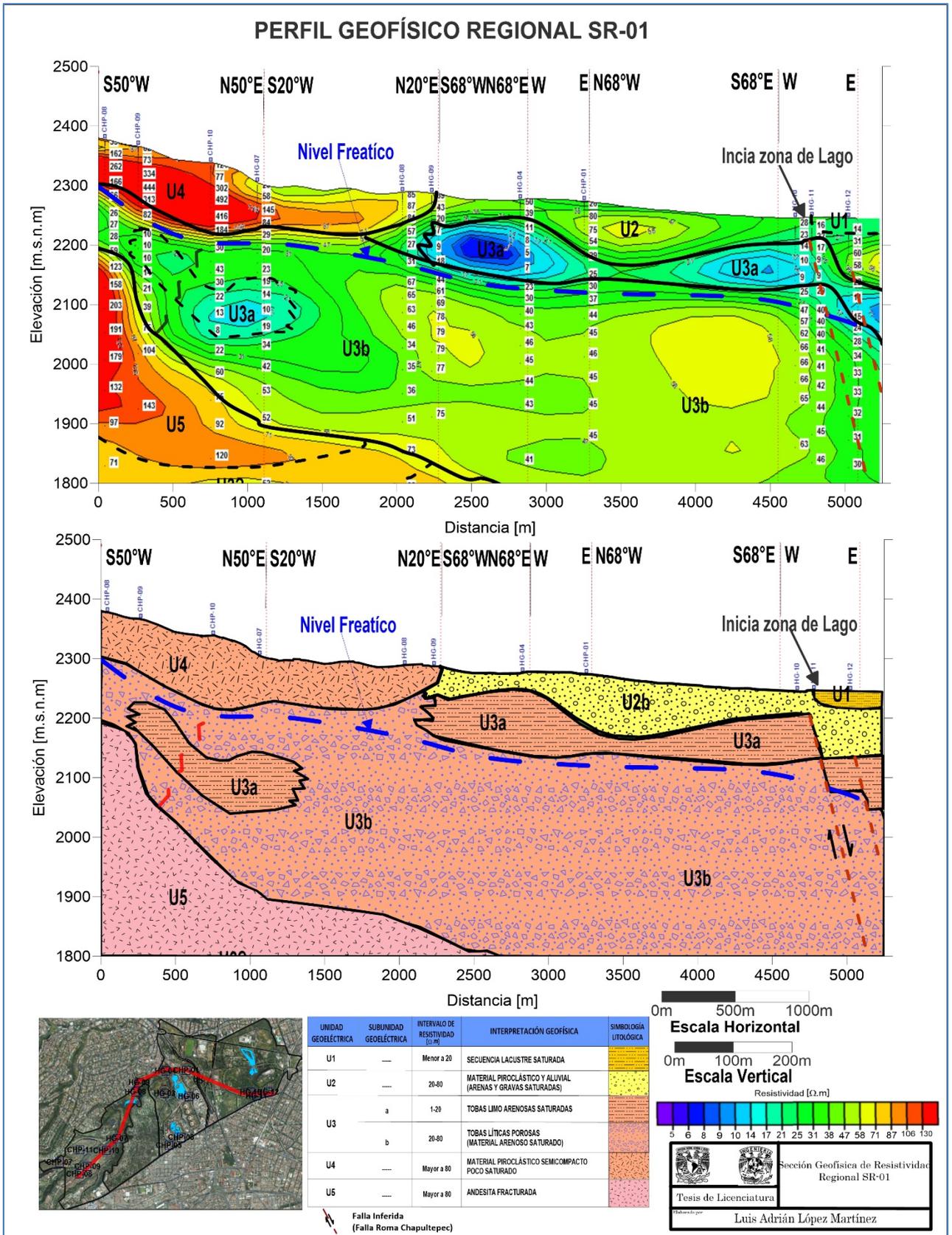


Figura 4. 12. Perfil Geofísico de Isorresistividad Regional SR-01.



Finalmente, en la porción inferior izquierda del perfil, se observan resistividades mayores a 80 [Ω .m] (**U5**), las cuales se asocian con material andesítico fracturado.

La *figura 4.13* muestra la distribución geométrica y espacial de los diferentes contrastes de resistividades descritas en este perfil SR-02, también se observa una discontinuidad en la unidad **U2** y subunidades **U3a** y **U3b**, la cual indica la presencia de una posible estructura geológica a partir de la distancia en $X=2,532$ m, cerca del Cerro de Chapultepec que la podemos asociar con en contacto entre la zona de transición con la zona lacustre y el lineamiento estructural propuesta por Aguayo Camargo en 1989 asociado a la posible falla Chapultepec Roma.

4.3.3. Perfil Geofísico Local S2-01

El perfil S2-01 (*figura 4.14*) se localiza en la 2^{da} Sección del BCH, la conforman 6 sondeos (HG-04, CHP-02, HG-03, HG-01, CHP-04 y CHP-05), presenta una dirección N03°W-S03°E, con una longitud de 1.6 Km, el perfil inicia en la calle de Alencastre y termina en la Av. Constituyentes. La interpretación de los diferentes contrastes que se observan en este perfil de isorresistividad (*figura 4.14*), se muestran 4 diferentes unidades que se describen a continuación:

La unidad (**U2**) presenta valores resistivos de 20 a 80 [Ω m], se asocia a arenas y gravas de origen volcánico (piroclastos) y aluvial saturadas, con un espesor variable de 25 m a 60 m, la unidad se le considera con alto potencial acuífero.

Dentro la unidad (**U2**) se detectó una anomalía local con valores de resistividad entre 80 y 130 [Ω .m] (**U2b**), que se asocian con material de relleno o posible zona de mina, en la *figura 4.14* se observa la anomalía entre las distancias $X=517$ m y $X=737$ m, a una profundidad de 23 m de la superficie y con un espesor aproximado de 30 m.

La (**U3a**) contrasta como un horizonte de resistividades de 1 a 20 [Ω m], el horizonte se le asocia a material tobáceo con matriz limo arenosa saturada, presenta espesores continuos; con forma de cuña con espesores de 30 m a 62 m (delgados) y de 110 m a 140 m (gruesos).

A una profundidad de 130 m se observa un contraste de resistividades con un rango de valores de 20 a 80 [Ω m]) (**U3b**), que se asocia a tobas líticas permeables y se le considera una unidad con alto potencial acuífero.

La *figura 4.14* muestra la distribución geométrica y espacial de los diferentes contrastes de resistividades descritas en este perfil S2-01.

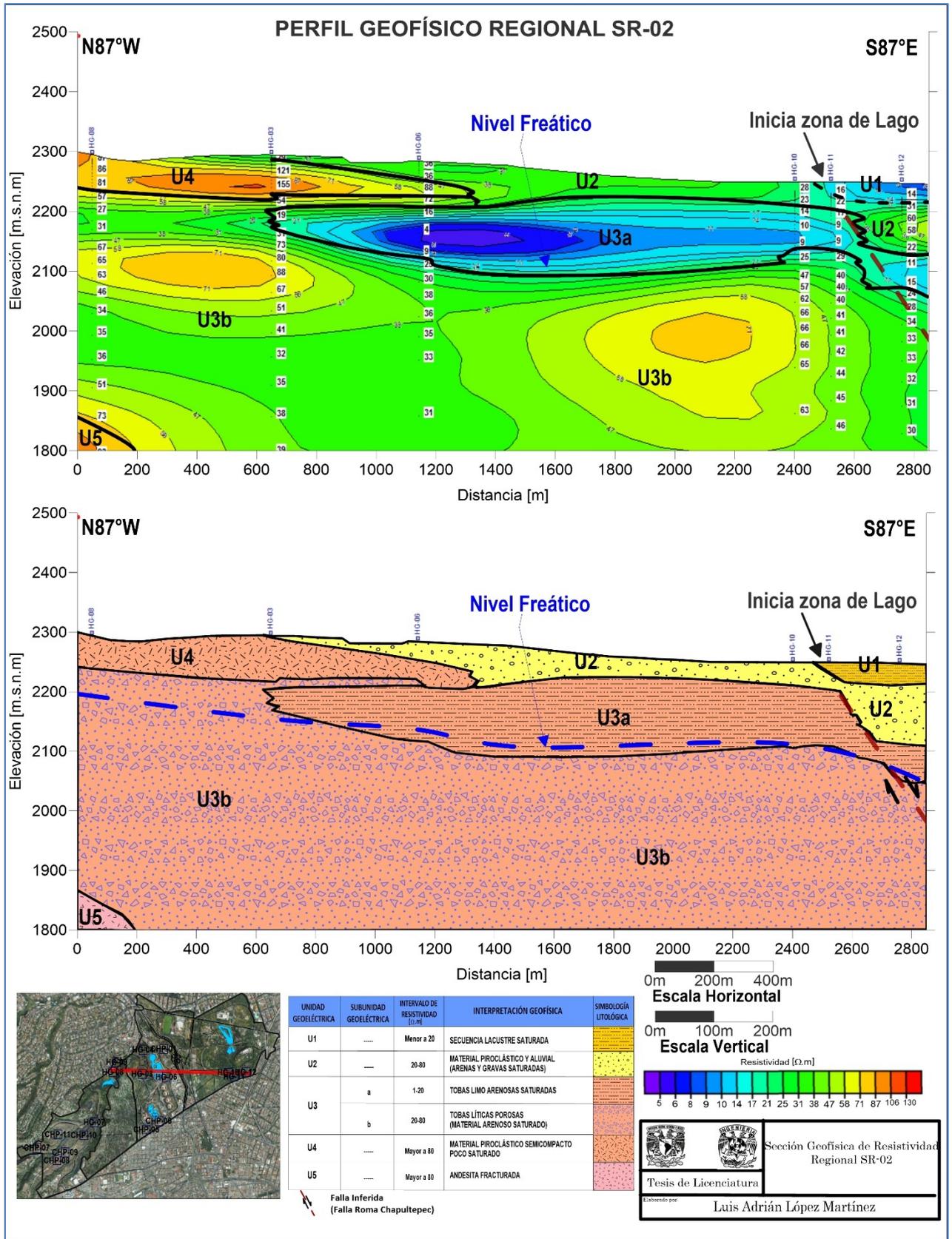


Figura 4. 13. Perfil Geofísico de Isorresistividad Regional SR-02.

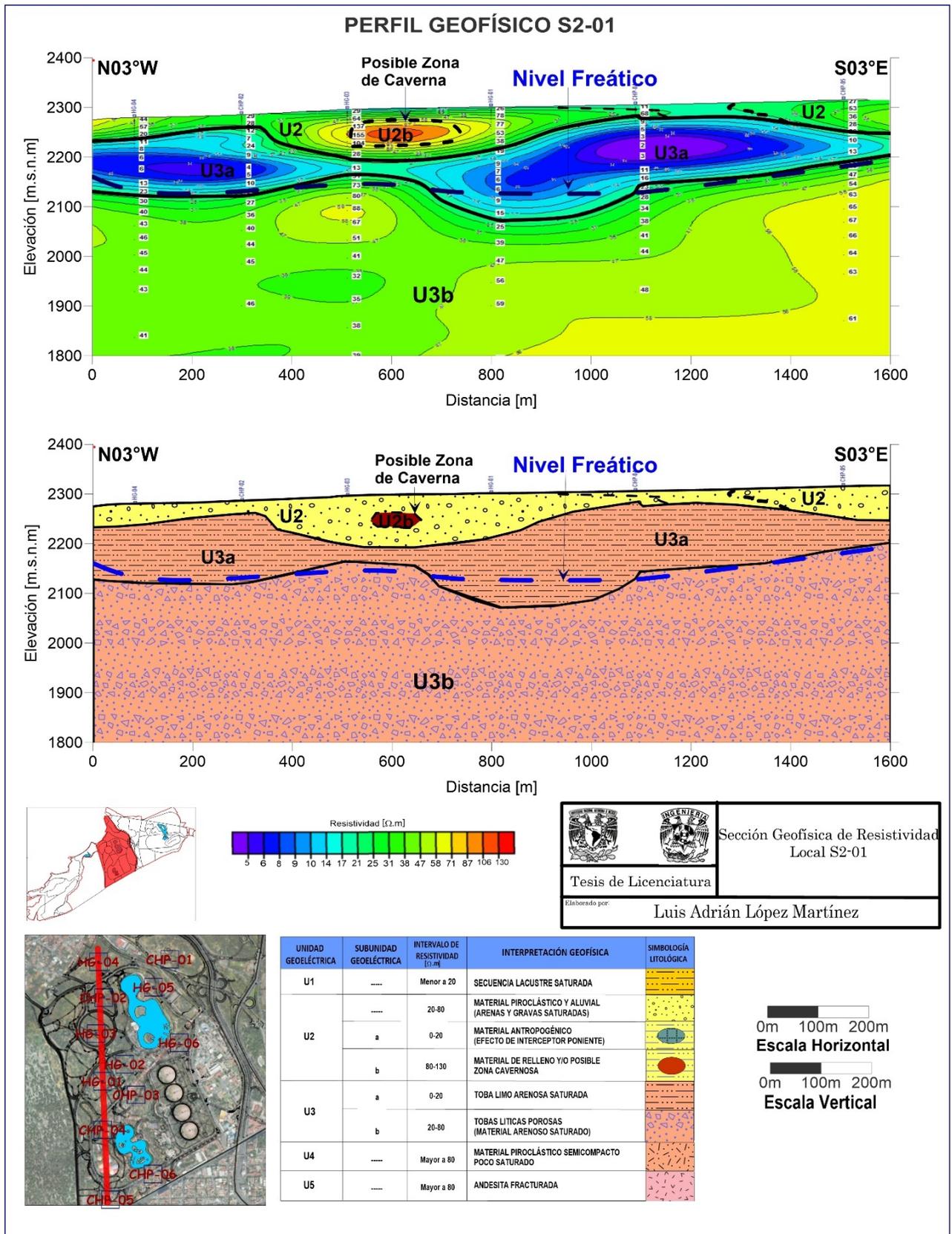


Figura 4. 14. Perfil Geofísico de Isorresistividad Local S2-01.



4.3.4. Perfil Geofísico Local S2-02

El perfil S2-02 (*figura 4.15*) se localiza en la 2^{da} Secc. del BCH, lo conforman 3 sondeos (CHP-01, HG-05 y HG-06), presenta una longitud de 600 m y una dirección N-S, inicia en la calle Alencastre y termina a un costado del Lago Mayor sobre el Paseo de los Compositores. La interpretación de los diferentes contrastes que se observan en este perfil de isorresistividad (*figura 4.15*), muestran 4 diferentes unidades que se describen a continuación:

La unidad (**U2**) presenta resistividades entre 20 y 80 [Ω m], asociados a piroclásticos granulares de arenas y gravas de origen aluvial saturados, con alto potencial acuífero, presentado espesores de 17 m a 80 m.

Dentro de la unidad (**U2**) se detectó una anomalía entre las distancias $X=0$ m y $X= 22$ m (porción izquierda de la *figura 4.14*), se observa resistividades entre 80 y 130 [Ω m] (**U2b**), el cual se asocia a material piroclástico en forma de lente, se ubica a una profundidad de la superficie de 40 m y tiene un espesor de 27 m aproximadamente.

La (**U2**), contrasta como un horizonte de resistividad de 1 a 20 [Ω m] (**U3a**), que se asocian a material volcánico compuesto por toba limo arenosa, con un espesor de 90 m a 100 m, a partir de la distancia $X= 135$ m (*figura 4.15*).

La unidad (**U3b**) presenta resistividades de 20 a 80 [Ω m], los valores de resistividad se asocian a tobas líticas con alto potencial acuífero, se observa a una profundidad entre 60 m y 130 m.

La *figura 4.15* muestra la distribución geométrica y espacial de los diferentes contrastes de resistividades descritas en este perfil S2-02.

4.3.5. Perfil Geofísico Local S2-03

El perfil S2-03 (*figura 4.16*) se localiza en la porción norte de la 2^{da} Secc. del BCH, lo forman 3 sondeos (HG-03, HG-05 y CHP-01), tiene una longitud de 680 m y una dirección S50°W-N50°E y S36°W-N36°E. La interpretación de los diferentes contrastes que se observan en este perfil geofísico de iso-resistividad (*figura 4.16*); muestra 4 diferentes unidades que se describen a continuación:

En la superficie contrastan valores de resistividad entre 20 y 80 [Ω m] (**U2**), asociado a piroclastos y aluviales granulares, con un espesor de 120 m, se le considera una unidad con potencial acuífero.

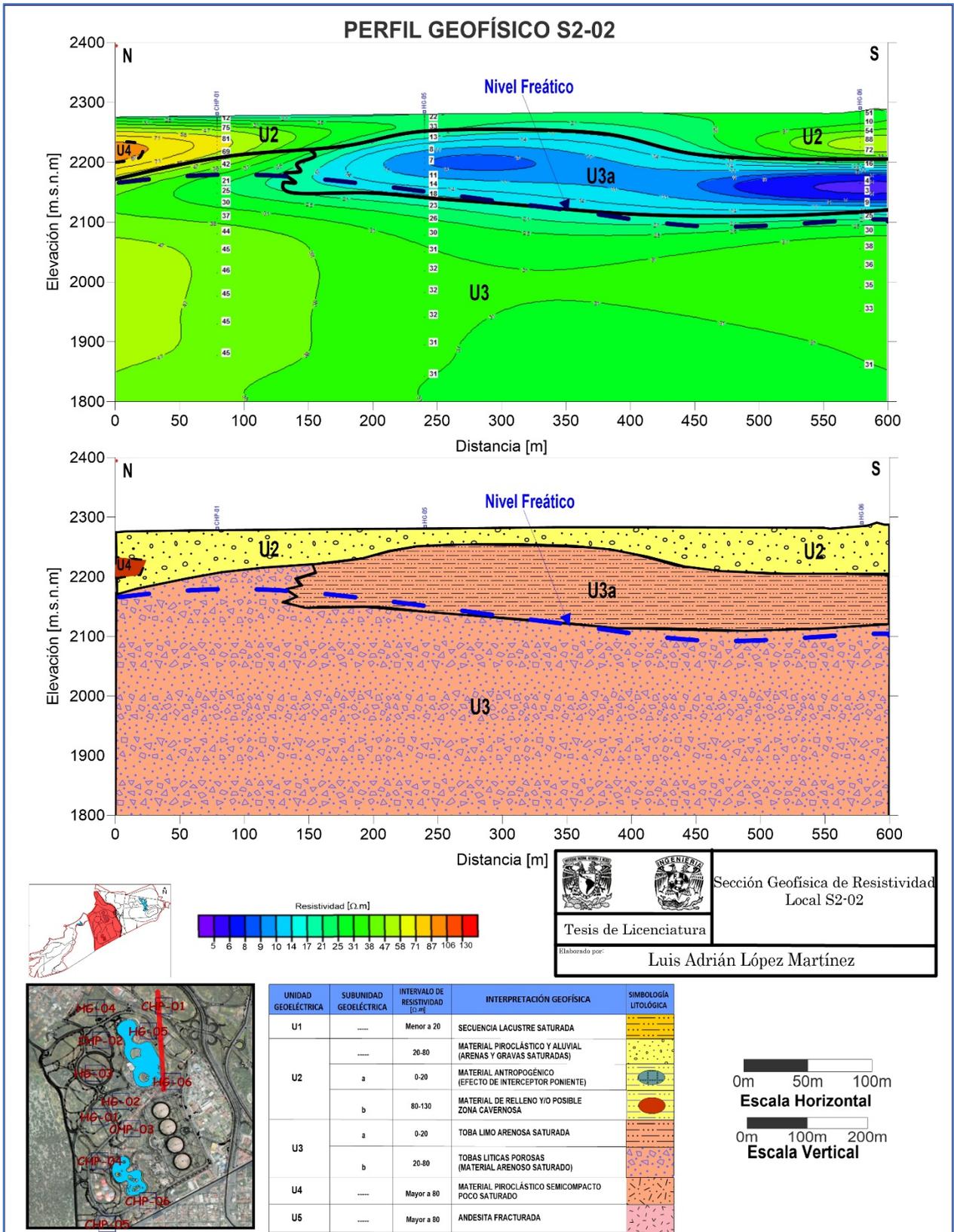


Figura 4. 15. Perfil Geofísico de Isorresistividad Local S2-02.



Dentro de la unidad (U2) se observan dos anomalías (U2b) con valores resistivos de 80 a 130 [Ω m], estas anomalías se presentan en forma de lentes entre las distancias $X=0$ m y $X=30$ m, y $X=658$ m y $X=680$ m (*figura 4.16*), se localizan a una profundidad de 30 m y tienen un espesor de 15 m, cada anomalía local que puede estar asociada a una caverna.

De igual manera dentro de la unidad (U2), se observa una anomalía de resistividades entre 1 a 20 [Ω m], que se observa en la *figura 4.16* entre las distancias $X=280$ m y $X=555$ m, este contraste se ubica exactamente debajo al Lago mayor y atraviesa el Interceptor Poniente, la anomalía tiene un espesor de 10 m y una profundidad de 30 m, se le asocia a los efectos resistivos de la infraestructura civil y a sus alrededores se observa saturada la formación.

A una profundidad de 120 m aproximadamente contrastan resistividades entre 20 y 80 [Ω m] (U3b), asociado a tobas líticas con alto potencial acuífero.

La *figura 4.16* muestra la distribución geométrica y espacial de los diferentes contrastes de resistividades descritas en el perfil S2-03.

4.3.6. Perfil Geofísico local S3-01

El perfil S3-01 (*figurage 4.17*) se localiza la 3^{ra} Secc. del BCH, lo conforman 3 sondeos (CHP-07, CHP-11 y HG-07), tiene una longitud de 1,350 m, y una dirección S70°W-N70°E. La interpretación de los diferentes contrastes que se observan en este perfil de resistividad (*figura 4.17*); muestra 5 diferentes unidades que se describen a continuación:

El contraste superficial presenta valores resistivos mayores a 80 [Ω .m] (U4), asociado a piroclásticos (del tamaño de arena y semicompacto), con espesores entre 90 m y 100 m. A una distancia $X=1,112$ m existen contrastes de resistividades de 20 a 80 [Ω m] (U2), con un espesor promedio de 25 m, la unidad se asocia a piroclastos y aluviales del tamaño de arenas y gravas.

A la distancia $X=1,010$ m se observa un espesor en promedio de 190 m, a partir de esa distancia la unidad se hace creciente (y se desconoce su espesor), sin embargo, se les subdivide un contraste de resistividades entre 1 a 20 [Ω .m] (U3a) y de 20 a 80 [Ω .m] (U3b), que a continuación se describen:

La subunidad (U3a) se encuentra dentro de la subunidad (U3b), presenta valores de resistividad entre 1 a 20 [Ω m], se presenta como un estrato de 20 m a 94 m de espesor, y se le asocia a tobas limo arenosas saturadas.



La subunidad (**U3b**) presenta resistividades entre 20 a 80 [Ω m]. Asociado a tobas líticas porosas, tiene un espesor superior mayor a 92 m, por debajo se encuentra el estrato inferior (**U3b**), con un espeso de 71 a 170 m, como se muestra en la *figura 4.17* a una distancia $X=1,005$ m.

La unidad (**U5**), contrastan con resistividades mayores a 80 [Ω .m], asociada a una andesítica fracturada, su espesor es desconocido y se corta discontinuamente a una distancia de $X= 1,105$ m.

La *figura 4.17* muestra la distribución geométrica y espacial de los diferentes contrastes de resistividades descritas en el perfil S3-01.

4.4. Mapas de isorresistividades

Para determinar el comportamiento integral en los diferentes contrastes de resistividad, se realizaron 5 mapas de isorresistividad, los cuales se representan en cortes horizontales a cada 100 m de profundidad. Es importante recalcar que el relieve superficial que se encuentra el BCH; presenta variaciones topográficas con un desnivel de 110 m, motivo por lo cual los mapas tienen su corte en los siguientes 5 niveles:

-  Cota 2,300 [m.s.n.m].
-  Cota 2,200 [m.s.n.m].
-  Cota 2,100 [m.s.n.m].
-  Cota 2,000 [m.s.n.m].
-  Cota 1,900 [m.s.n.m].

A continuación, se presenta la descripción de los 5 mapas de isorresistividad elaborados para este trabajo de tesis.

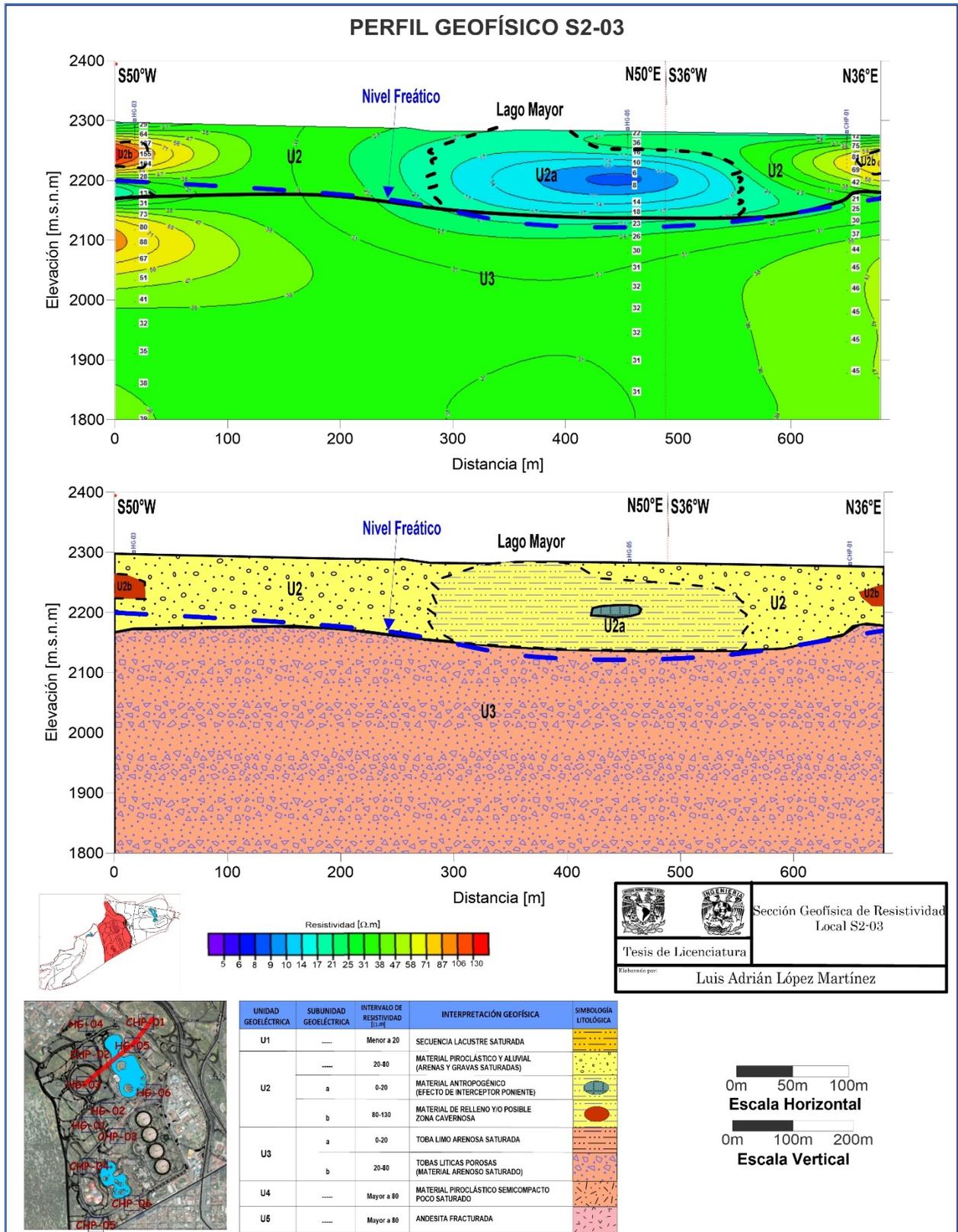


Figura 4. 16. Perfil Geofísico de iso-resistividad Local S2-03.

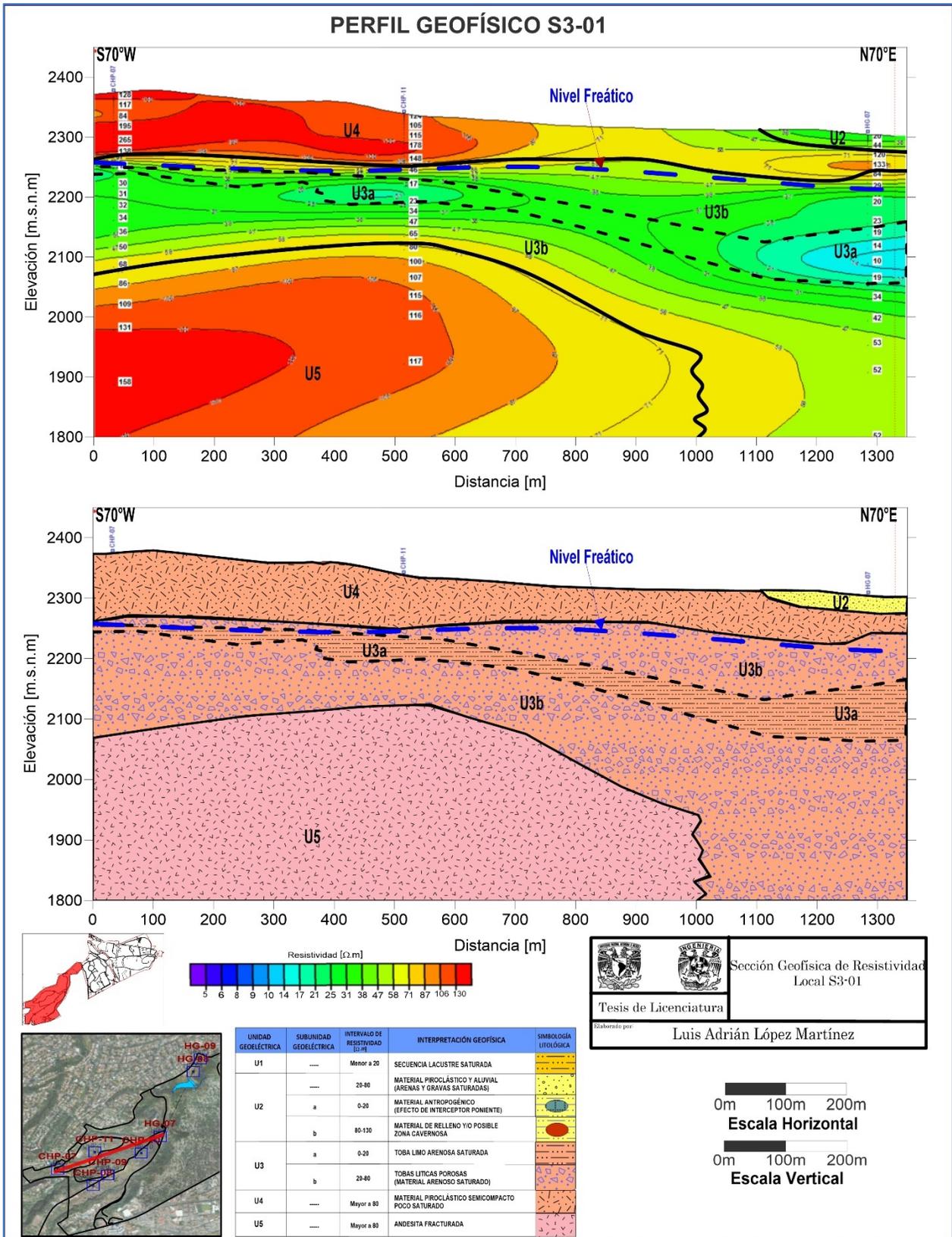


Figura 4. 17. Perfil Geofísico de Isoresistividad Local S3-01.



4.4.1. Mapa de isorresistividades a 2,300 [m.s.n.m].

El mapa se localiza en la elevación 2,300 [m.s.n.m], La *figura 4.18* muestra un contraste de resistividades mayores a 80 [Ωm] (**U4**), en la zona de la 3^{ra} Sección del BCH, asociados a material piroclástico; lateralmente contrasta con valores de resistividades entre 20 a 80 [Ωm] (**U2**), asociado a materiales piroclásticos del tamaño de arenas y gravas volcánicas (permeables). Esta a su vez contrasta con materiales conductores (color azul) del orden de 1 a 20 [Ωm] de la subunidad (**U2a**); que se localizan por debajo de la 3^{ra} y 2^{da} Sección del BCH, asociados a efectos antropogénicos producidos por las construcciones de la presa Dolores, la capa asfáltica, el Lago Mayor y Lago Menor.

En el mapa se muestra que la zona de la 3^{ra} Sección superficialmente hay un cambio entre material piroclástico semicompacto (**U4**) a material granular (**U2**). Así mismo la *figura 4.18* muestra la distribución geométrica y espacial de los diferentes contrastes de resistividades descritas en mapa de isorresistividad a nivel de la elevación de 2,300 [m.s.n.m].

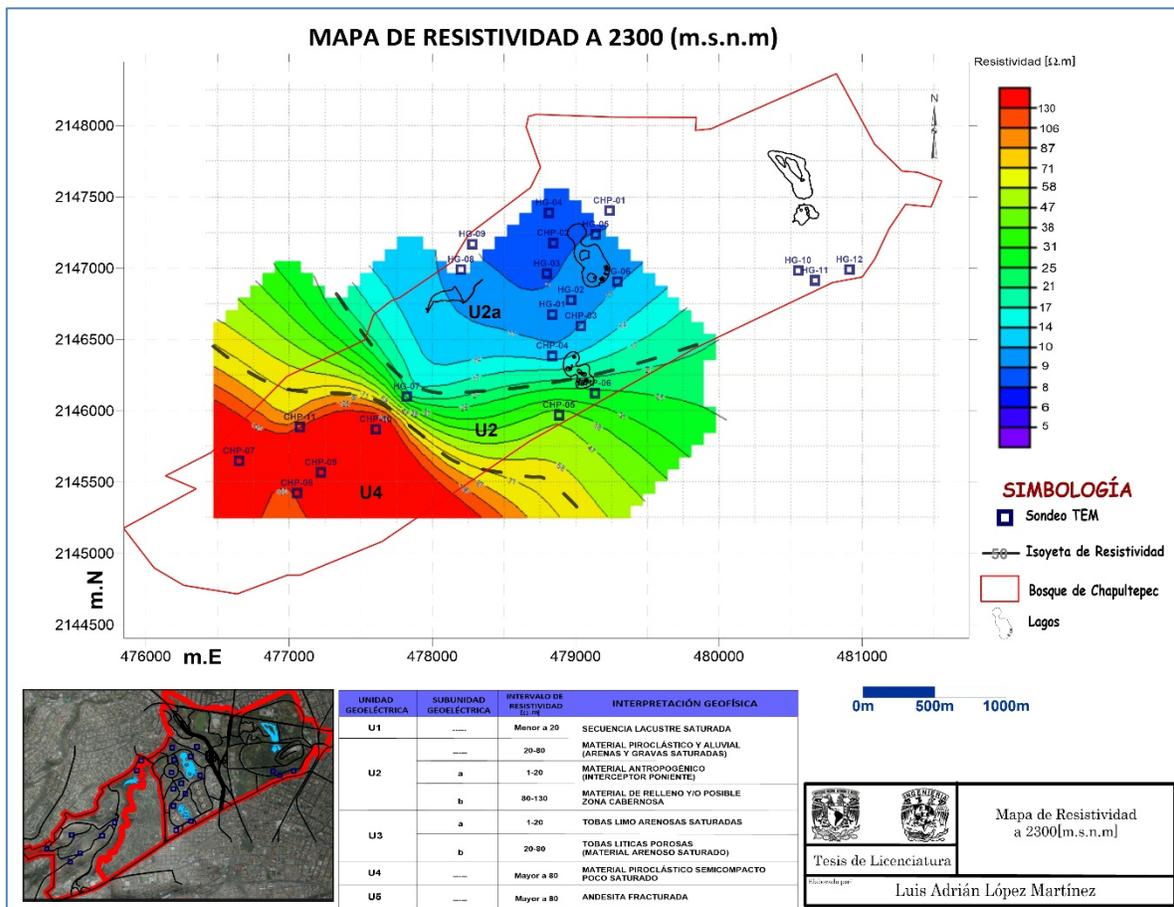


Figura 4. 18. Mapa de isorresistividad a 2,300 [m.s.n.m].



4.4.2. Mapa de isorresistividades a 2,200 [m.s.n.m]

El mapa se localiza en la elevación 2,200 [m.s.n.m]. En la *figura 4.19* se muestra la subunidad (U3b) (valores de 20 a 80 [Ω m]) (color verde); y la unidad (U2) (valores de 20 a 80 [Ω m]) se encuentran interrumpidos discontinuamente por un material conductor areno-limoso semisaturado (U3a) (colores azules), se infiere como un cambio de materiales porosos con potencial acuífero (U3b asociado a tobas líticas) y (U2 asociado a materiales piroclásticos del tamaño de arenas y gravas, y material aluvial), interrumpidos por material areno- limoso (U3a).

La *figura 4.19* muestra la distribución geométrica y espacial de los diferentes contrastes de resistividades descritas en mapa de isorresistividad a nivel de elevación de 2,200 [m.s.n.m].

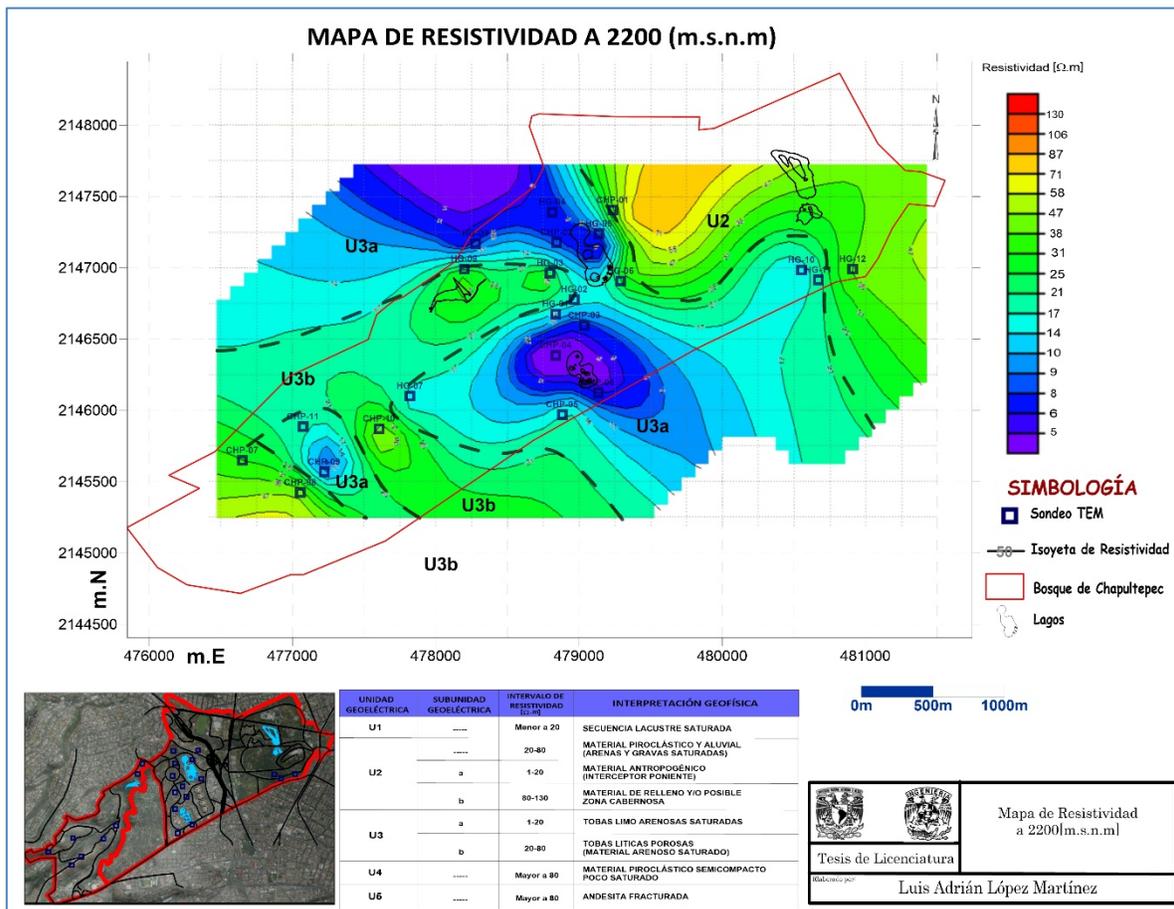


Figura 4. 19. Mapa de isorresistividad a 2,200 [m.s.n.m].



4.4.3. Mapa de isorresistividades a 2,100 [m.s.n.m]

El mapa se localiza en la elevación 2,100 [m.s.n.m]. La *figura 4.20* presenta un contraste en la 3^{ra} Sección del BCH entre la unidad resistiva (U5) (mayores a 80 [Ω .m]) (colores naranjas) asociadas a andesita fracturada, y la subunidad de resistiva (U3b) (20 a 80 [Ω .m]) (colores verdes), que se asocian a tobas líticas. Esta subunidad (U3b) predominan en la 2^{da} Sección del BCH, y es interrumpida por una franja conductora correspondiente a la subunidad (U3a) (1 a 20 [Ω .m]) (color azul), que se asocian a tobas limo arenosas, que presentan un alineamiento con dirección S47°E-N47°W.

En la 1^{ra} Secc. del BCH se observa un fuerte contraste entre las subunidades (U3b) (20 a 80 [Ω .m]) y la (U3a) (1 a 20 [Ω .m]), por lo que se puede inferir la presencia de una posible estructura geológica en el subsuelo.

La *figura 4.20* muestra la distribución geométrica y espacial de los diferentes contrastes de resistividades descritas en mapa de isorresistividad a nivel de elevación de 2,100 [m.s.n.m].

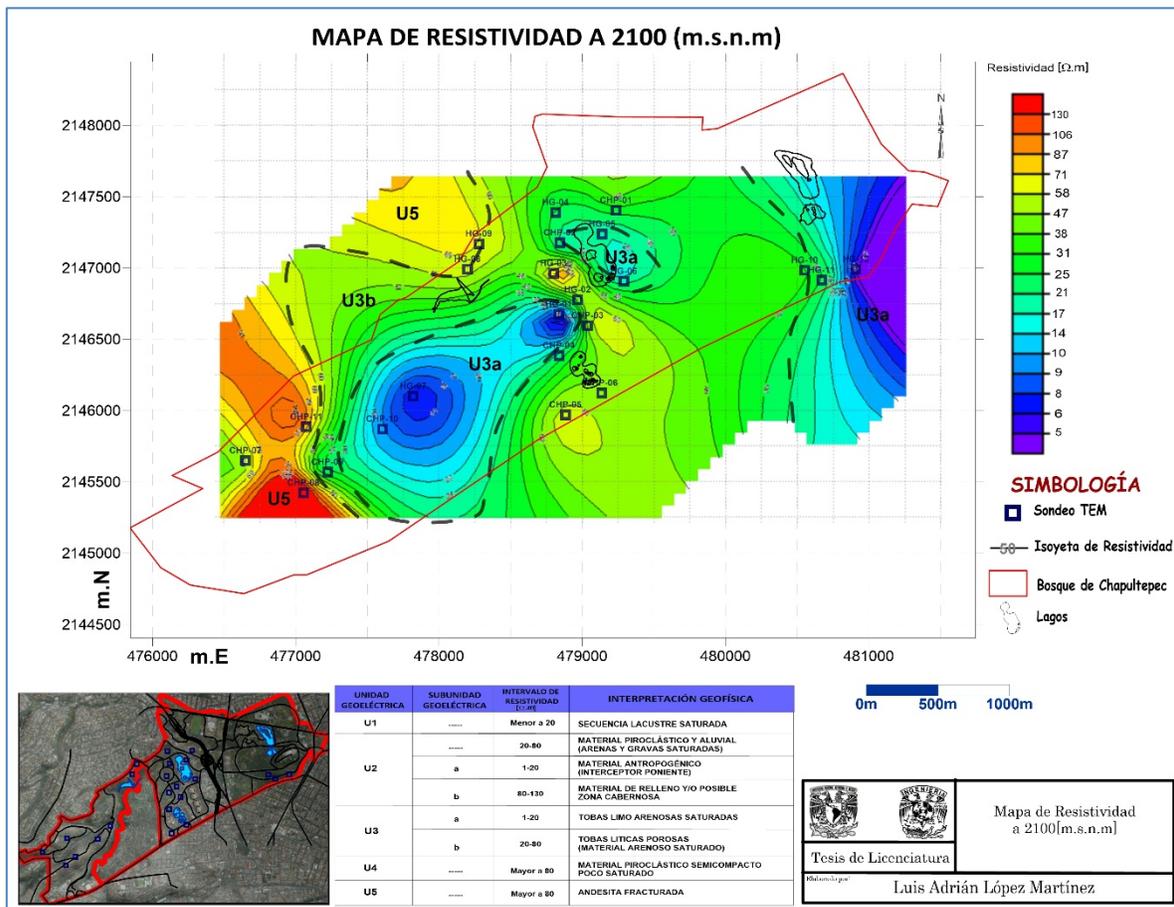


Figura 4. 20. Mapa de isorresistividad a 2,100 [m.s.n.m].



4.4.4. Mapa de isorresistividades a 2,000 [m.s.n.m]

El mapa se localiza en la elevación 2,000 [m.s.n.m]. La *figura 4.21* muestra la subunidad (U3b) (20 a 80[Ω.m]) (color verde y amarillo), asociado a tobas líticas con un gran potencial acuífero, predominando a este nivel de profundidad. Esta subunidad a su vez contrasta por debajo de la 3^{ra} sección del BCH, con la unidad resistiva (U5) (mayor a 80 [Ω.m]) (color naranja), se asocia a la andesita fracturada. La *figura 4.21* muestra la distribución geométrica y espacial de los diferentes contrastes de resistividades descritas en mapa de isorresistividad a nivel de elevación de 2,000 [m.s.n.m].

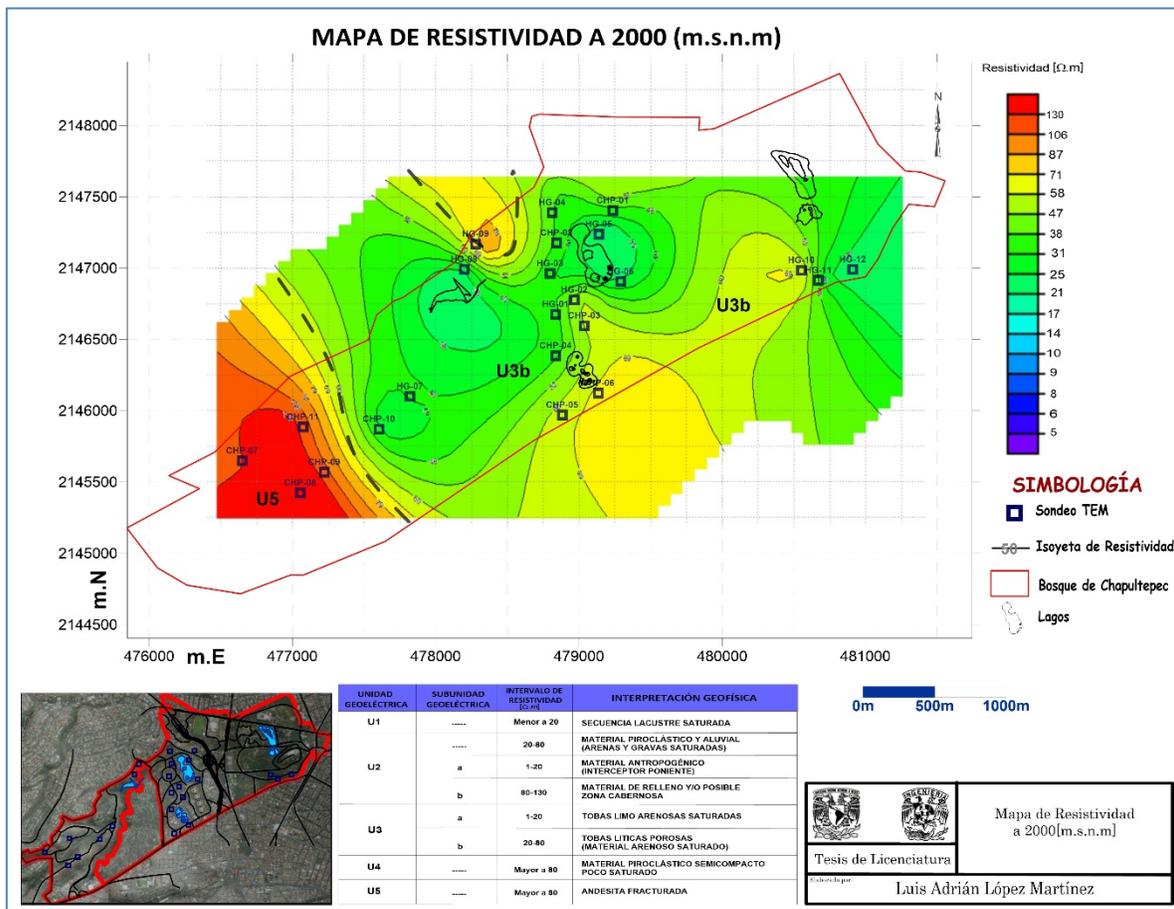


Figura 4. 21. Mapa de isorresistividad a 2,000 [m.s.n.m].



4.4.5. Mapa de isorresistividades a 1,900 [m.s.n.m]

El mapa se localiza la elevación 1,900 [m.s.n.m]. La *figura 4.22* muestra el mismo contraste que el mapa anterior, solo que en esta elevación la unidad (U5) (mayor a 80 [Ω .m]) (color naranja), asociada a andesita fracturada se ensancha un poco más por debajo de la 3^{ra} Sección del BCH, a su vez contrasta con la subunidad (U3b) (20 a 80[Ω .m]) (color verde y amarillo), que son asociadas a tobas líticas, esta subunidad (U3b) sigue predominado ampliamente a este nivel de profundidad en el subsuelo del BCH. La *figura 4.22* muestra la distribución geométrica y espacial en de los diferentes contrastes de resistividades descritas en mapa de isorresistividad a nivel de elevación de 1,900 [m.s.n.m].

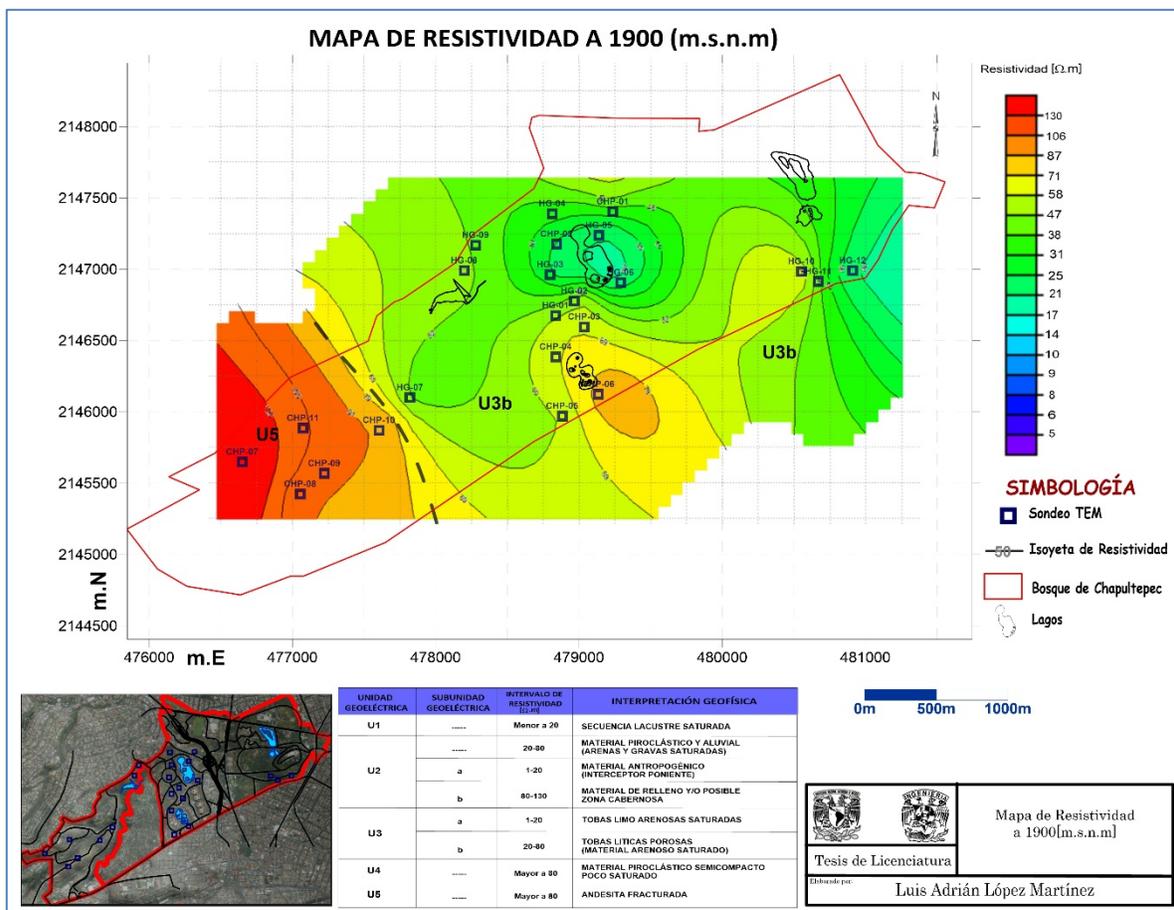


Figura 4. 22. Mapa de isorresistividad a 1,900 [m.s.n.m].

La *tabla 4.2*, resume las unidades geoelectricas interpretadas en los perfiles geofísicos para este trabajo de tesis:



4.5. Modelo Geofísico Tridimensional (3D)

Analizados los procesos de inversión y de interpretación, se formó un modelo tridimensional del BCH, el cual fue realizado con los mapas y secciones anteriormente mostrados, el modelo se construyó con el propósito de resaltar los iso-volumenes de resistividad para tener una perspectiva de los resultados obtenidos.

Se utilizó un interpolador de datos para obtener esta visualización en 3D, el cual se apoyamos en la herramienta computacional Voxler 3 (Golden Software, Inc., 2012), en él se insertaron las secciones geoelectricas, al igual que los mapas de isoresistividad a cada 100 m analizados en los subcapítulos 4.4 y 4.5. En la *figura 4.23* se muestran los mapas y los diferentes perfiles respectivamente.

Tabla 4. 2. Zonificación Georresistiva

UNIDAD GEOELÉCTRICA	SUBUNIDAD GEOELÉCTRICA	INTERVALO DE RESISTIVIDAD [$\Omega.m$]	INTERPRETACIÓN GEOFÍSICA	SIMBOLOGÍA LITOLÓGICA
U1	----	Menor a 20	SECUENCIA LACUSTRE SATURADA	
U2	----	20-80	MATERIAL PIROCLÁSTICO Y ALUVIAL (ARENAS Y GRAVAS SATURADAS)	
	a	1-20	MATERIAL ANTROPOGENICO (EFECTO DE INTERCEPTOR PONIENTE)	
	b	80-130	MATERIAL DE RELLENO Y/O POSIBLE ZONA CAVERNOSA	
U3	a	1-20	TOBAS LIMO ARENOSAS SATURADAS	
	b	20-80	TOBAS LITICAS POROSAS (MATERIAL ARENOSO SATURADO)	
U4	----	Mayor a 80	MATERIAL PIROCLÁSTICO SEMICOMPACTO POCO SATURADO	
U5	----	Mayor a 80	ANDESITA FRACTURADA	

EL protocolo para el modelo 3D, se elaboró por medio de un volumen de datos ya procesados de los 23 sondeos TEM'S, y se creó un archivo con todos la iso-valores de resistividad adquiridos en



la etapa de procesado de datos. A estos iso-valores se les complemento con coordenadas geográficas de los sondeos, sus respectivas profundidades y se invirtieron en el visualizador 3D, adquiriendo un modelo de distribución real de las resistividades en el Subsuelo del BCH.

La visualización 3D nos permite observar la distribución de resistividades en el subsuelo del BCH, y se elaboró para poder identificar estructuras geológicas de interés, además para cumplir más ampliamente con el objetivo de conocer hidrológicamente los estratos con contenido hídrico. A continuación, se muestra la distribución espacial 3D, de los iso-volumenes de resistividad en el subsuelo del BCH, cabe mencionar que solo se describirán la distribución espacial y geométrica de los eléctroestratos.

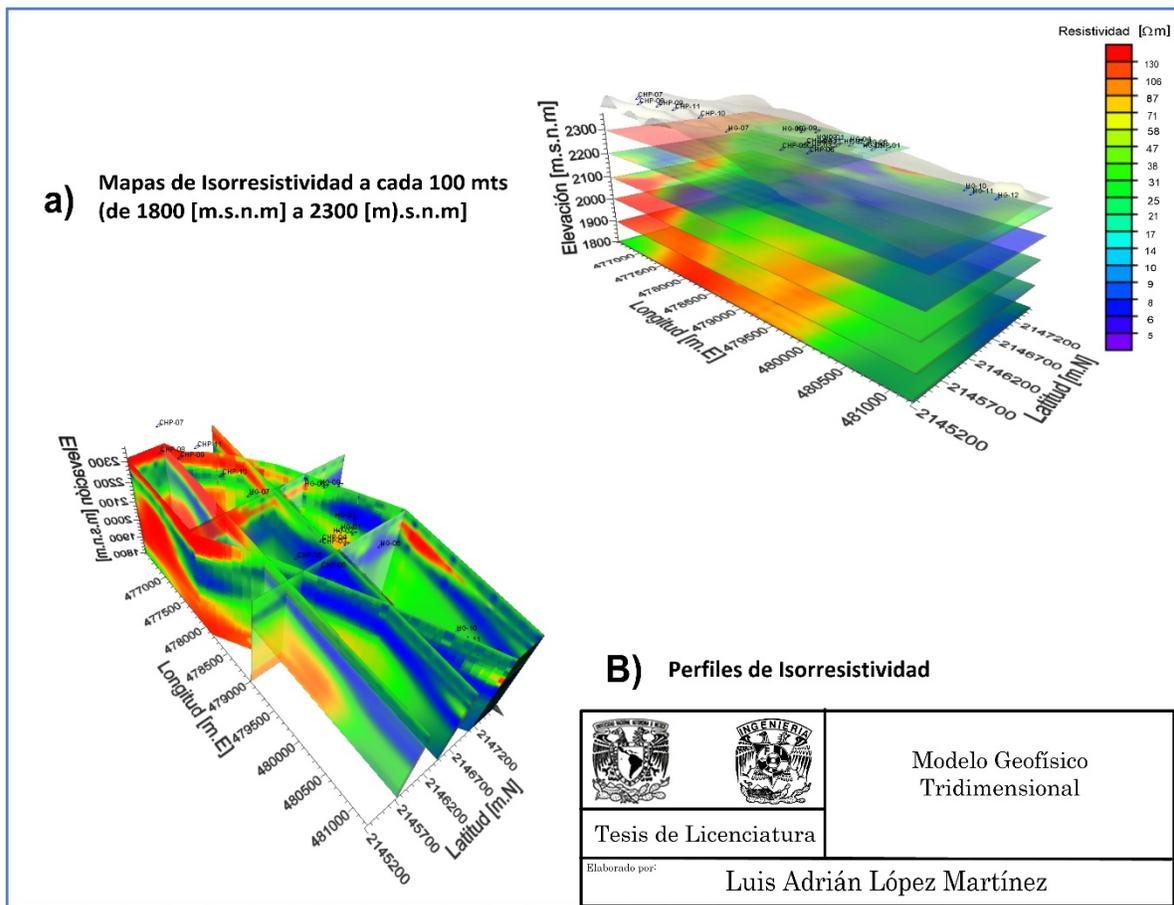


Figura 4. 23. Visualización 3D, a) Mapas de isorresistividad a cada 100 m de profundidad; b) Perfiles de isorresistividad.



4.5.1. Resultados.

A continuación, se muestran las diferentes resistividades en la visualización 3D; donde la *figura 4.24a*, muestra las diferentes secciones que se elaboraron para limitar el polígono del BCH, además de servir como apoyo de interpretación en el subsuelo para este modelo.

Bajos resistivos: La *figura 4.24b* muestra la distribución espacial de los materiales conductores (de 1-20 [Ω .m] en color azul); los cuales los constituyen la unidad **U1** y las subunidades **U2a** y **U3a**.

La Unidad **U1** se observa someramente por debajo de la 1^{ra} Sección del BCH, asociados a una secuencia lacustre.

La unidad **U2a** muestra iso-volúmenes pequeños someramente por debajo de la 2^{da} y 3^{ra} Sección del BCH, lo cual se asocia al efecto antropogénico y cimentación de los lagos Mayor y Menor, e Interceptor Poniente.

La unidad **U3b** se presenta en forma de lente por debajo de la 3^{ra} Sección del BCH y de horizonte continuo a lo largo del subsuelo de la 2^{da} y 1^{ra} Sección del BCH, esta unidad la constituyen tobas limo arenosas.

Resistividades medias: En la *figura 4.24c* se observan los iso-volúmenes de los electrostratos de resistividades medias (20-80 [Ω .m] en color verde), estos contrastes son los más sobresalientes en el subsuelo del BCH y se encuentran constituidas por la unidad **U2** y la subunidad **U3b**.

La unidad **U2** se presenta un Iso-volumen somero continuo, el cual se extiende desde el límite entre la 2^{da} y 3^{ra} Sección hasta la 1^{ra} Sección del BCH, se asocia con materiales piroclásticos granular y aluvial, debido a los valores de resistividad presentes. Este horizonte es una zona saturada y se encuentra afectada por debajo de la 1^{ra} Sección del BCH, infiriéndose la presencia de una estructura geológica.

La subunidad **U3b** se presenta en todo el subsuelo del BCH, de acuerdo con sus valores de resistividad, se le asocia a tobas líticas intercaladas con cenizas, aglomerados y pómez, lo consideramos como un iso-volumen de alto potencial acuífero.

Altos resistivos: En la *figura 4.24d* se muestran los iso-volúmenes de altos resistivos (mayores a 80 [Ω .m] en color naranja). La constituyen la unidad **U4** el cual se encuentra en la parte superior y la unidad **U5** el cual se encuentra en la parte inferior, a ambas unidades la separa la unidad **U3**.



La unidad **U4** es el iso-volumen superior localizado y predominando en la superficie de la 3^{ra} Sección del BCH, la unidad se asocia a material piroclástico semicompacto, se le considera la capa superficial predominante en la 3^{ra} Sección.

La unidad **U5** es el iso-volumen inferior y se extiende por debajo del subsuelo de la 3^{ra} y los limítrofes de la 2^{da} Sección del BCH, a esta unidad se asocia como una roca de textura andesita en condiciones físicas posiblemente fracturada.

Una vez analizado los distintos iso-volumenes de resistividades nos permite identificar la distribución de los diferentes contrastes de resistividad en un modelo 3D. Las *figuras 4.24e* muestra la vista lateral desde norponiente (NW) y la *figura 4.24f* muestra la vista lateral desde el sureste (SE). En ellas se muestran todas las diferentes resistividades descritas anteriormente, es importante resaltar que superficialmente en la 3^{ra} Sección del BCH predominan un alto resistivo de la unidad geoelectrica **U4**, y contrasta lateralmente con resistividades medias (**U2**) que predomina toda la extensión de la 2^{da} Sección y la mayor parte de la 1^{ra} Sección del BCH, esta a su vez contrasta lateralmente bajos resistivos (**U1**) que se ubica por debajo y rodea el Cerro de Chapultepec.

También es posible observar la anomalía local (**U2a**) (bajos resistivos) asociados al drenaje profundo como el Interceptor Poniente que pasa por debajo de la 2^{da} Sección del BCH, localizados dentro de la unidad **U2**.

La unidad **U3** también se distingue en ambos flancos laterales del BCH, con sus respectivas subunidades, donde los bajos resistivos (**U3a**) se muestra en forma de lentes por debajo de la 3^{ra} Sección, mientras que por debajo de la 2^{da} y 1^{ra} Sección se muestra como horizonte continuo.

Por debajo de la subunidad **U3a** contrasta las resistividades medias (**U3b**) resaltando su predominio en el subsuelo del BCH. Contrastando abajo de la unidad **U3** se encuentra el alto resistivo inferior (**U5**) que se muestra en ambos flancos y debajo del subsuelo de la 3^{ra} y 2^{da} Sección del BCH.

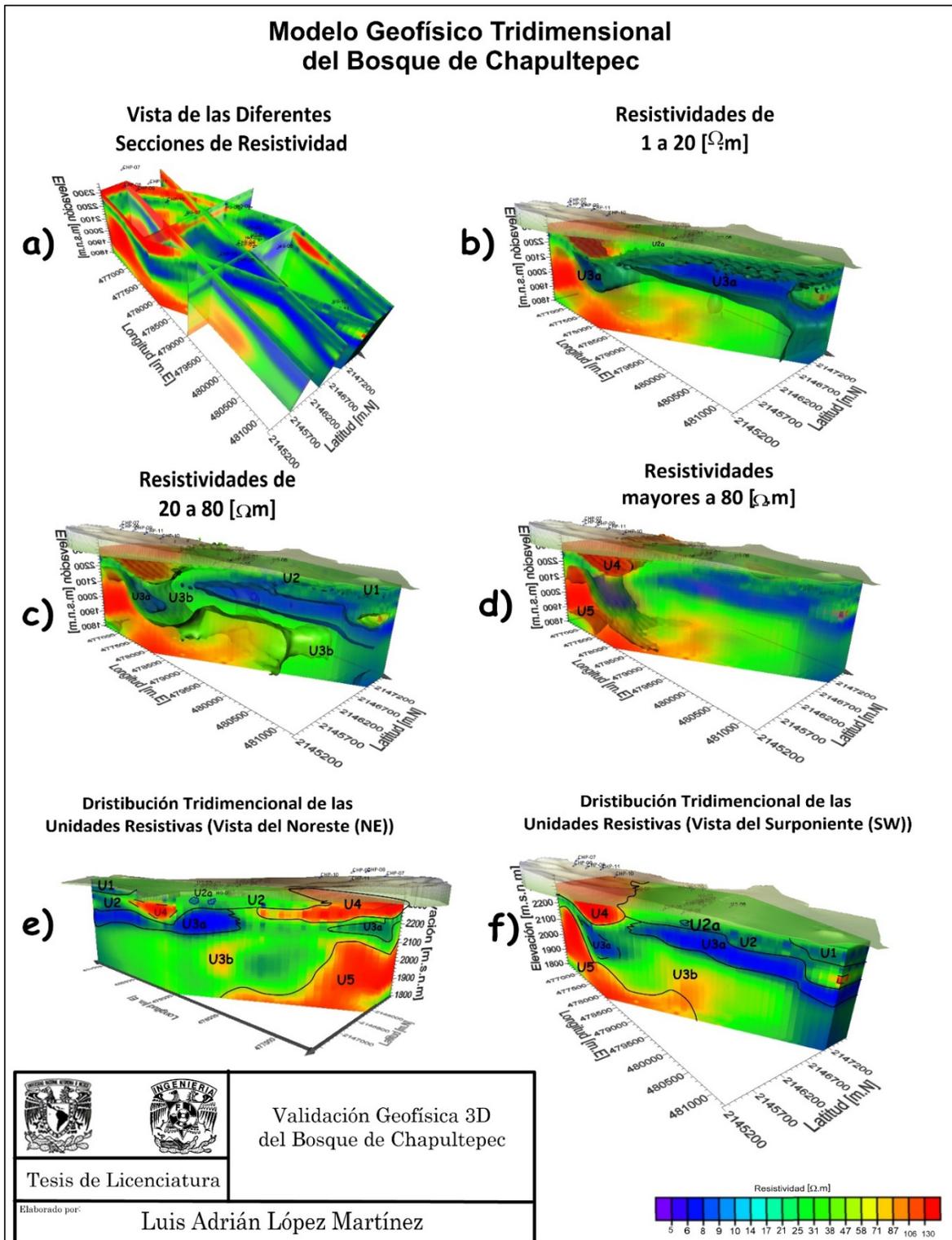


Figura 4. 24. Visualización 3D de los resultados de la inversión de los iso-valores de resistividad; a) correlación de perfiles de Isoresistividad; b) Vista lateral de bajos resistivos; c) Vista lateral de resistividades medias; d) Vista lateral de altos resistivos; e) Distribución de las unidades resistivas vista lateralmente desde el norponiente (NW); f) Distribución de las unidades resistivas vista lateralmente desde el sureste (SE).



CAPÍTULO 5

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL BOSQUE DE CHAPULTEPEC

“...el agua pertenece a la tierra, a todas las especies. Es un derecho humano fundamental no una mercancía intercambiable, debe ser preservada para las futuras generaciones”.

Maude Barlow



CAPITULO 5. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLOGICA DEL BOSQUE DE CHAPULTEPEC

En el presente capítulo se expone la caracterización hidrogeológica del BCH, en donde se describe el comportamiento relacionado con el medio geológico y su ocurrencia con el agua subterránea, en base a los resultados geológicos y geofísicos realizados en este trabajo.

5.1. Modelo Conceptual Geofísico-Geológico del BCH

Tomando en cuenta los resultados del análisis de este trabajo de tesis, se integró un modelo Geológico-Geofísico del BCH (*figura 5.1*); en el cual se caracteriza el medio geológico basándonos en los diferentes contrastes de resistividad y que a continuación se describen:

Basalto (Ba): Constituido por roca ígnea extrusiva de composición basáltica-dacítica que forma El Cerro de Chapultepec, no se detectó en ningún sondeo por lo que no se encontraron valores de resistividad de esta unidad, solo se correlaciona con datos del sitio.

Secuencia lacustre (La): Compuesta por arcillas y arenas (Arc-Ar), con valores de resistivos menores a 20 [Ω .m] correlacionado con la unidad geoelectrica *U1*.

Piroclásticos y pómez (Py-Pz): Secuencia granular compuesta por una intercalación de tobas, piroclastos del tamaño de arenas con pómez y aglomerados pertenecientes a la formación Tarango (T), con valores resistivos entre 20 a 80 [Ω .m], correlacionado con la unidad geoelectrica *U2*.

Tobas Arenas limosas (Tb-Ar-Lim): Horizonte compuesto por una secuencia de tobas arenosas y limosas intercalada con piroclastos, cenizas y pómez de la formación Tarango (T) (SACMEX 3, 2011), presentando valores bajos de resistividad entre 1 y 80 [Ω .m] correlacionado con la subunidad geoelectrica *U3a*.

Secuencia piroclástica (Py): Conformado por roca de textura piroclástica intercalada con pequeños horizontes de pómez de diferente granulometría (SACMEX 2, 2011), alterándose a arcilla la cual se encuentra semicompacta, este horizonte tiene valores de resistividad mayores a 80 [Ω .m] correlacionándola con la unidad geoelectrica *U4*.

Toba lítica y aglomerados (Tb-Ag): Secuencia granular de la formación Tarango (T) compuesto por tobas líticas y aglomerados, contiene clastos de dacita, riolita, basalto y andesita, se encuentra intercalado con horizontes de pómez, tobas vítreas y cristalinas (SACMEX 2, 2011; SACMEX 3, 2011), presenta valores resistivos entre 20 a 80 [Ω .m] correlacionándola con la subunidad geoelectrica *U3b*.

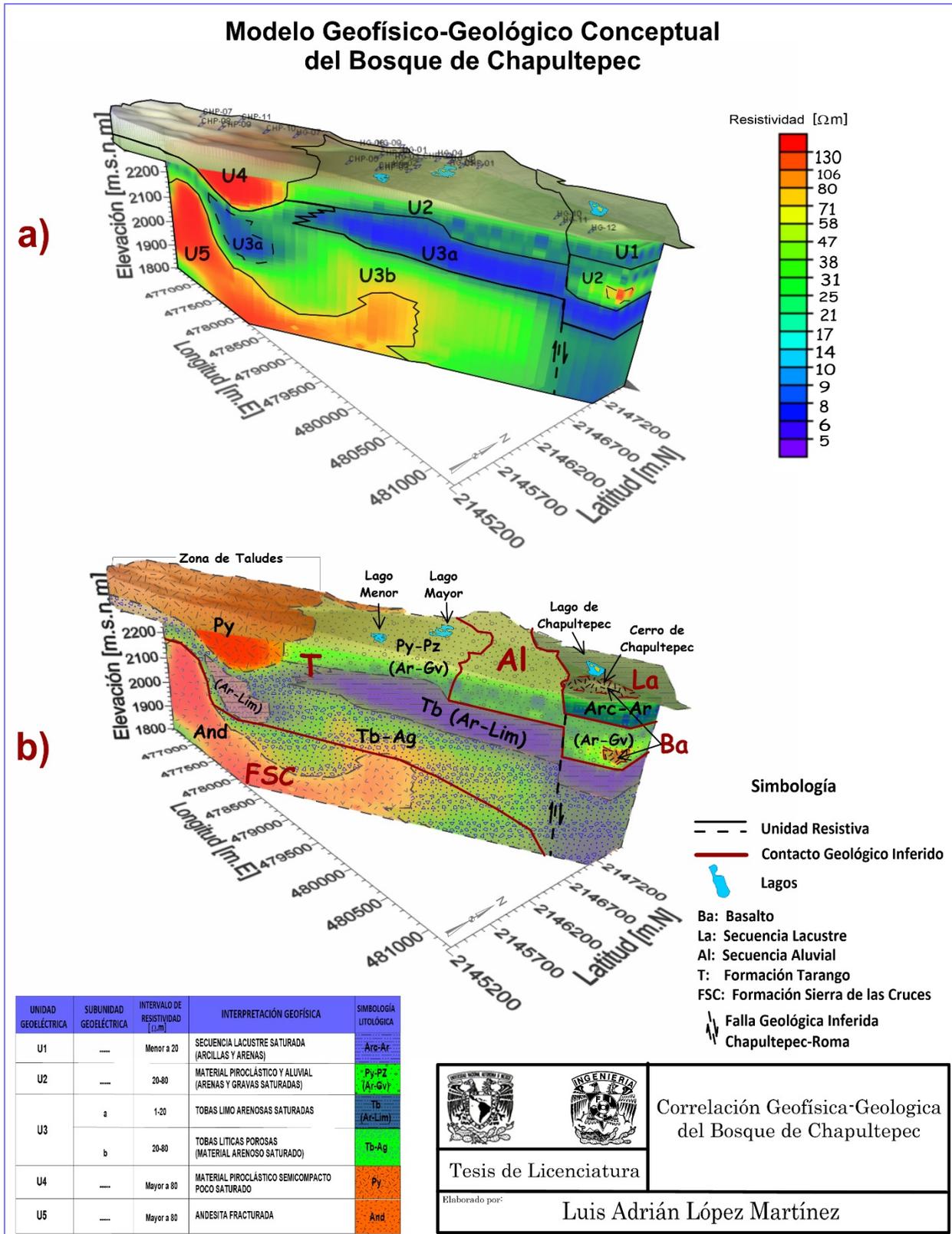


Figura 5. 1. Modelo conceptual integrado geofísico-geológico del Bosque de Chapultepec, a) Modelo geofísico; b) Modelo geológico



Andesita (And): Roca ígnea extrusiva de composición andesítica, perteneciente a la formación Sierra de Las Cruces (FSC), presenta valores de resistividad mayores a 80 [Ω .m], correlacionada con la unidad geoelectrica **U5**.

5.2. Integración de Información para la Caracterización Hidrogeológica del BCH.

Para entender el comportamiento del agua subterránea en el subsuelo del BCH, se realizó un modelo un carácter geológico-geofísico, mediante el cual se pudieron definir las unidades hidroestratigráficas a partir de su comportamiento resistivo, de tal manera que los perfiles, mapas y superficies 3D de isorresistividad que se abordaron en el capítulo 4, pudo caracterizar la presencia de zonas saturadas principales, como se observa en la *figura 5.2*.

La asignación de unidades hidrogeológicas del subsuelo del BCH en el perfil de isorresistividad regional SR-02 (*figura 5.2a*) y la superficie 3D (*figura 5.2d*), muestra 3 unidades hidroestratigráficas las cuales se caracterizan por la unidad hidroestratigráfica **UH-1** con espesor de 30 m, presentándose solo en la 1^{ra} Sección del BCH; la unidad hidroestratigráfica **UH-2** con un espesor de 200 a 600 m; y la unidad hidroestratigráfica **UH-3** con espesor desconocido.

Debajo del subsuelo del BCH, predomina la unidad hidroestratigráfica **UH-2**, en la cual existen dos horizontes saturados, una zona saturada somera (**UH-2a**) (*figuras 5.2a, 5.2b, 5.2c y 5.2d*), y una zona saturada principal (*UH-2d*), la cual predomina por debajo del BCH, como se muestra en las *figuras 5.2a, 5.2b, 5.2c y 5.2d*.

Estas dos zonas saturadas se encuentran interrumpidos por dos horizontes semipermeables (**UH-2b y UH-2c**), el cual pertenecen al paquete de rocas que componen el acuífero principal (**UH-2d**), pero con un comportamiento de acuitardos (*figuras 5.2a, 5.2b, 5.2c y 5.2d*), que es la unidad hidroestratigráfica (**UH-2**).

El acuífero principal se encuentra limitado en la cima por la unidad hidroestratigráfica **UH-1** y en la base por la unidad hidroestratigráfica **UH-3**, ambas de baja permeabilidad y medios saturados.

5.3. Unidades Hidroestratigráficas

De acuerdo con la integración de la información geológica-geofísica y a la interpretación litológica de los modelos anteriores, se definieron 3 unidades hidroestratigráficas en el BCH las cuales son: **UH-1, UH-2 y UH-3** (*tabla 5.1*), que a continuación se describen:

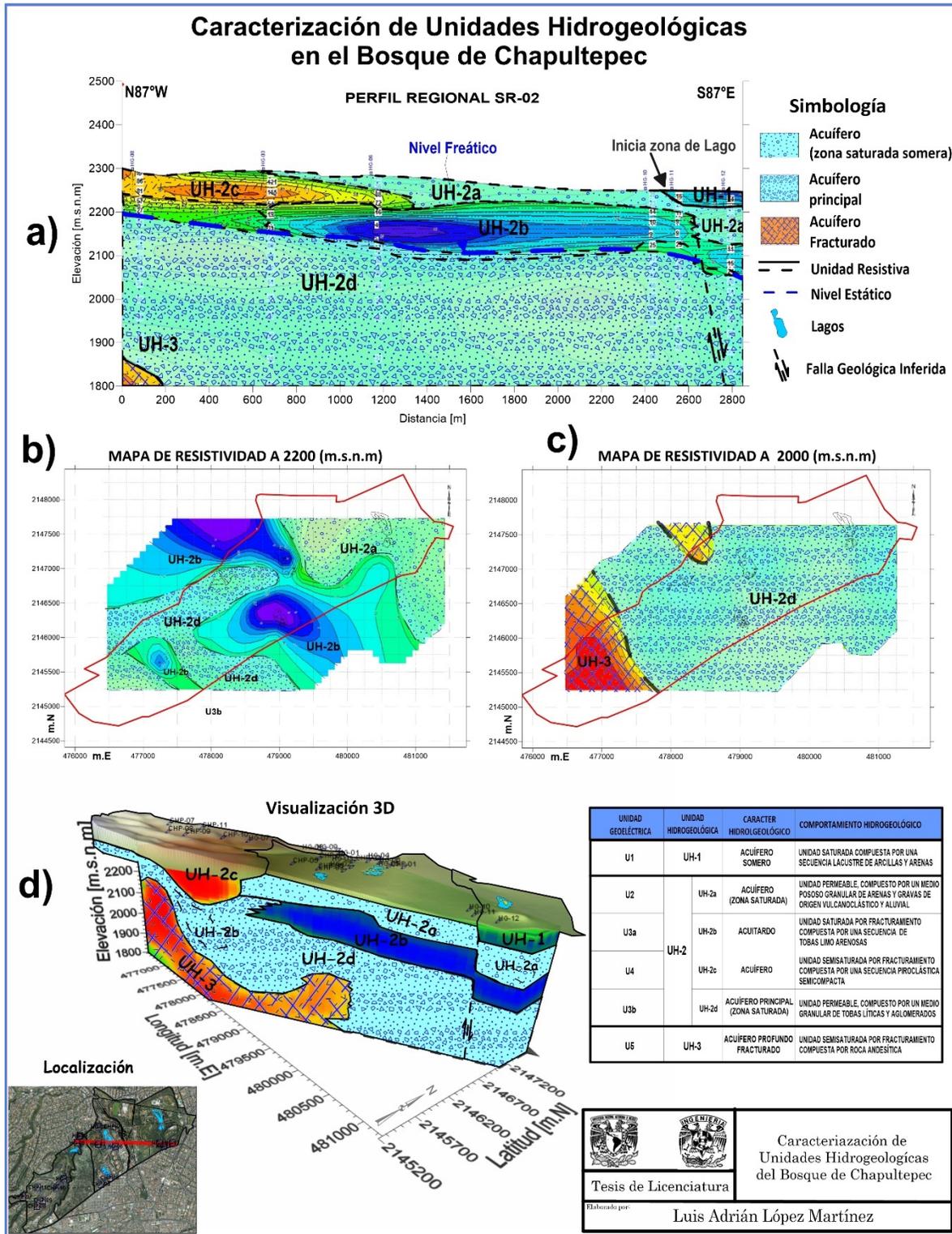


Figura 5. 2. Caracterización hidrogeológica del Bosque de Chapultepec; a) Interpretación hidrogeológica del perfil regional SR-02; b) Interpretación hidrogeológica del mapa a 2200 [m.s.n.m]; c) Interpretación hidrogeológica del mapa a 2000 [m.s.n.m]; interpretación y distribución espacial de las unidades hidroestratigráficas en el subsuelo del Bosque de Chapultepec (BCH).



5.3.1. Unidad hidroestratigráfica UH-1

Esta unidad hidrogeológica la constituye una secuencia lacustre (La) del Cuaternario, compuesta por arcillas y arenas (Arc-Ar) poco consolidadas, se caracteriza hidrogeológicamente por ser un acuitado con porosidad primaria y secundaria en zonas de fisuras, que permite que se sature el medio y tenga permeabilidad baja, presenta un espesor promedio de 25 metros, esta unidad hidroestratigráfica se correlaciona con la unidad geoelectrica **U1**.

5.3.2. Unidad hidroestratigráfica UH-2

Esta unidad hidrogeológica está representada por la formación Tarango (T) y se le considera el acuífero principal. Está compuesta por cuatro diferentes tipos de materiales rocosos, piroclásticos y pómez (Py- Pz), tobas arena limosas (Tb- Ar-Lim), piroclásticos (Py), tobas líticas y aglomerados (Tb-Ag), divididos respectivamente en cuatro subunidades hidroestratigráficas respectivamente.

Subunidad hidroestratigráfica UH-2a: Representada por un medio granular de arenas y gravas mal clasificadas depositadas en el Cuaternario, compuestas de dos diferentes tipos de roca, la primera son rocas ígneas de origen efusivo y de acarreo, caracterizada por material piroclástico intercalado con pómez (Py-Pz) y aglomerados de la formación Tarango (T); el segundo tipo de material es una secuencia aluvial de arenas y gravas (Ar-Gv). Su comportamiento es poroso y con condiciones favorables de permeabilidad, hidrogeológicamente se caracteriza como un acuífero libre (zona saturada somera) y presenta espesores variables entre 20 a 60 m y puede llegar a medir hasta 80 m en material aluvial. Su nivel saturado se puede encontrar a algunos metros de la superficie en temporada de estiaje y a 60 m en la zona aluvial, esta unidad hidroestratigráfica se correlaciona con la unidad geoelectrica **U2**.

Subunidad hidroestratigráfica UH-2b: Esta subunidad hidrogeológica está conformada por unas secuencias de tobas arena limosas (Tb- Ar-Lim) semiconsolidadas de origen efusivo pertenecientes a la formación Tarango (T) depositadas en el Cuaternario. Se caracteriza hidrogeológicamente por ser un acuitado en rocas vulcanoclásticas (Tb-Ar-Lim) con comportamiento fisurado que permite que se sature el medio, trasminando pequeñas cantidades de agua subterránea; presenta un espesor variado entre 90 y 100 m, esta unidad hidroestratigráfica se correlaciona con la subunidad geoelectrica **U3a**.



Subunidad hidroestratigráfica UH-2c: Esta unidad hidrogeológica está representada superficialmente por material piroclástico (Py) mal clasificada intercalada con tobas púmiticas, de granulometría en su mayoría es fina de edad Cuaternaria. Hidrogeológicamente se le caracteriza por ser un acuífero en rocas piroclásticas (Py), con un comportamiento poco poroso y fisurado de baja permeabilidad que permite transmitir pequeñas cantidades de agua al subsuelo y una zona de recarga natural de la zona de estudio presenta un espesor variado entre 90 a 120 m, y se correlaciona con la unidad geoelectrica *U4*.

Subunidad hidroestratigráfica UH-2d: Esta unidad hidrogeológica la constituyen una secuencia de rocas granulares de origen vulcanoclástico depositadas a fines del Neógeno y principios del Cuaternario, se caracteriza por estar compuesta por tobas líticas en su mayoría y aglomerados (Tb-Ag), estas se encuentran intercalados con pequeños horizontes arcillosos de composición púmitica, cenizas y tobas vítreas y cristalinas de grano fino a medio. Hidrogeológicamente su carácter es de un acuífero principal (zona saturada), comportándose como un medio de muy buena porosidad y proporciona un alto valor de permeabilidad, su espesor es variado dentro del BCH, y va desde 200 a 600 m, con un nivel freático a 120 m aproximadamente de la superficie del BCH, esta unidad hidroestratigráfica se correlaciona con la subunidad geoelectrica *U3b*.

5.3.3. Unidad hidroestratigráfica UH-3

Esta unidad hidrogeológica lo constituyen rocas de origen lávico de composición andesita de la formación Sierra de las Cruces (FSC), emergidas durante el Neógeno superior. Hidrogeológicamente se caracteriza como un acuífero fracturado profundo; presenta un comportamiento de permeabilidad secundaria que permite transportar cantidades moderadas de agua subterránea y permeabilidad moderada, su espesor es desconocido en este trabajo de tesis, esta unidad hidroestratigráfica se correlaciona con la unidad geoelectrica *U5*.

La *tabla 5.1* describe de las unidades hidroestratigráficas correlacionadas con las unidades geoelectricas para poder darle un carácter hidrogeológico al subsuelo del BCH.



Tabla 5. 1. Descripción de las unidades hidroestratigráficas, correlacionadas con las unidades geoeléctricas.

UNIDAD GEOELÉCTRICA	UNIDAD HIDROGEOLOGICA	CARACTER HIDROGEOLOGICO	COMPORTAMIENTO HIDROGEOLOGICO
U1	UH-1	ACUÍFERO SOMERO	UNIDAD SATURADA COMPUESTA POR UNA SECUENCIA LACUSTRE DE ARCILLAS Y ARENAS
U2	UH-2	UH-2a	ACUÍFERO (ZONA SATURADA)
U3a		UH-2b	ACUITARDO
U4		UH-2c	ACUÍFERO
U3b		UH-2d	ACUÍFERO PRINCIPAL (ZONA SATURADA)
U5	UH-3	ACUÍFERO PROFUNDO FRACTURADO	UNIDAD SEMISATURADA POR FRACTURAMIENTO COMPUESTA POR ROCA ANDESÍTICA

5.4. Modelo Conceptual Hidrogeológico del Bosque de Chapultepec

Para entender el comportamiento del agua subterránea en el subsuelo del BCH y en base al modelo geológico-geofísico, mediante en el cual se indicaron sus respectivas unidades hidroestratigráficas a partir de su comportamiento resistivo y litológico; de tal manera que toda la información generada en este trabajo de tesis se pudo interpretar hidrogeológicamente el subsuelo del BCH, cuya interpretación coadyuvó a realizar un modelo conceptual hidrogeológico del BCH como se muestra *figura 5.3*, la cual se clasifica a continuación.

-  **Acuitardo superior lacustres (UH-1):** formado por arenas y arcillas lacustres (L) de baja permeabilidad.
-  **Acuífero (UH-2):** formado por rocas vulcanoclásticas de la formación Tarango (T) y la secuencia aluvial (Al) de tamaño de arenas y gravas, ambas presentan materiales saturados y está dividido en 4 subunidades hidrológicas (UH-2a, UH-2b, UH-2c y UH-2d).
-  **Acuífero vulcanoclástico y aluvial (UH-2a) (zona saturada somera):** constituido por flujos piroclásticos y pómez de la Formación Tarango (T), en contacto lateral con arenas y gravas



- aluviales (A1), ambas unidades rocosas son de permeabilidad alta
- Acuífardo en tobas areno limosas (UH-2b):** formado por un horizonte continuo de arenas y limos de composición tobácea, intercalada con cenizas y tobas pumíticas de baja permeabilidad de la Formación Tarango (T).
- Acuífero en rocas piroclásticas (UH-2c):** formado por una secuencia piroclástica intercalada con tobas líticas y pómez de grano fino a medio de baja permeabilidad pertenecientes a la Formación Tarango (T)
- Acuífero principal (UH-2d) (zona saturada):** considerado el acuífero principal, está constituido por tobas líticas y aglomerados de gano grueso hasta gravas con pequeños horizontes arcillosos pertenecientes a la Formación Tarango (T), sus condiciones permeables son idóneas para el almacenamiento de agua subterránea y presenta un nivel freático aproximado 120 m de profundidad de la superficie del BCH.
- Acuífero fracturado profundo (UH-3):** constituido por derrames lávicos de composición andesítica-basáltica presentando permeabilidad secundaria y moderada (medio fracturado).

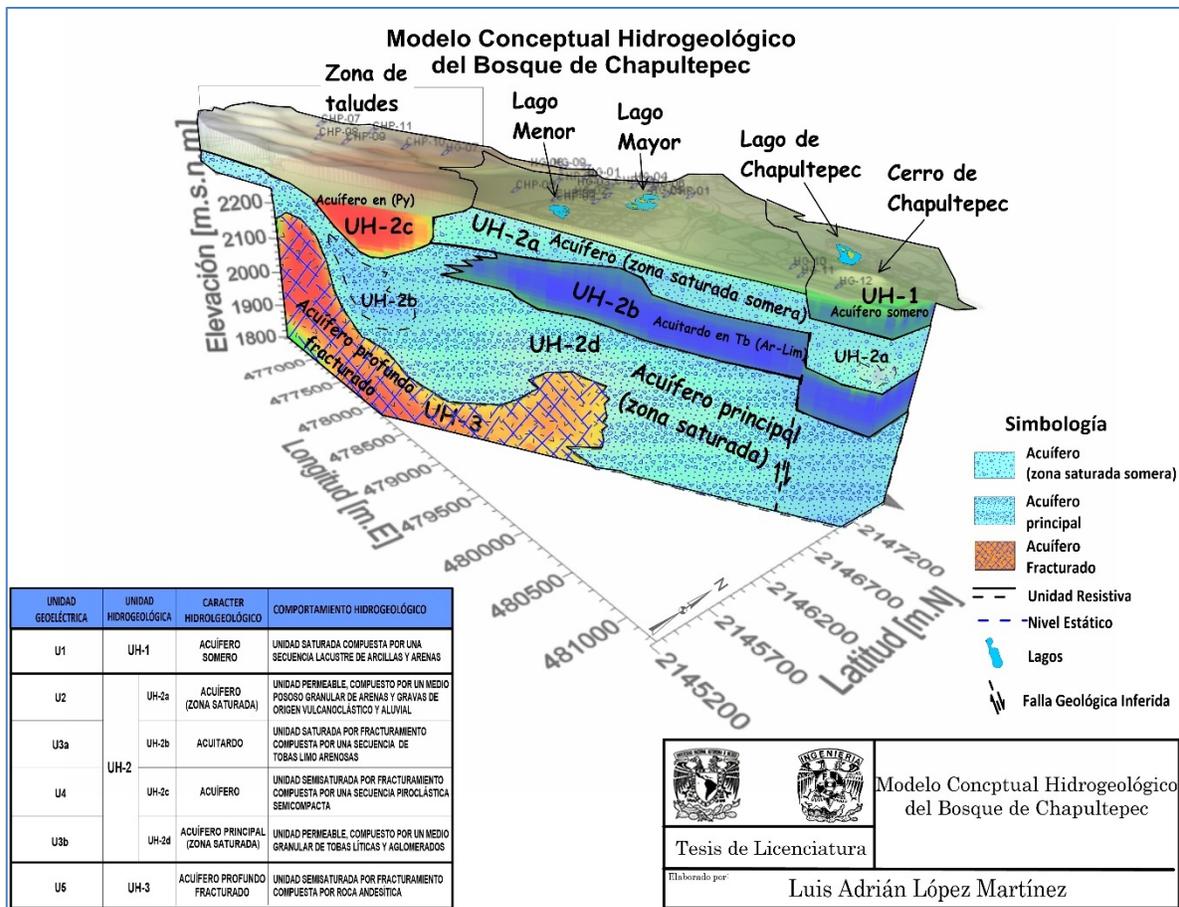


Figura 5. 3. Modelo conceptual hidrogeológico del bosque de Chapultepec.



CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

*“Tomar agua nos da vida.
Tomar conciencia nos dará agua, con el agua somos todo, sin ella no somos nada”.*
Acción Política



CAPITULO 6. CONCLUSIONES

La obtención de las condiciones hidrogeológicas del subsuelo del BCH, fue mediante la técnica geofísica conocida como el método transitorio electromagnético en el dominio del tiempo (TEM). El énfasis fue observar las variaciones de resistividad del subsuelo del BCH. El análisis geológico de los resultados fue con apoyo de la correlación de pozos, derivando los resultados siguientes:

El BCH se encuentra asentado sobre material volcánico de origen vulcanoclástico y extrusivo en su mayoría. Los materiales corresponden a piroclásto y tobas líticas intercaladas con pómez y aglomerados de la formación Tarango y andesitas de la formación Sierra de las Cruces Ambas formaciones se depositaron en el Plioceno superior hasta el Pleistoceno medio, durante el segundo evento magmático que sufrió la Cuenca de México. Sobre estas formaciones se encuentran los depósitos aluviales y lacustres, que cubren parte de la 1^{ra} y 2^{da} Sección del BCH donde resalta la presencia del cono volcánico del Cerro de Chapultepec de composición basáltica-dacítica.

Estructuralmente las fracturas y fallas cercanas al BCH, se presentan en dirección SW-NE, por lo que el drenaje fluvial tiene un patrón en dirección al NE, y el cual se pierde al llegar a la presa de dolores.

Los resultados del análisis de resistividad mediante el método de transitorios electromagnéticos (TEM), indican la presencia de cinco unidades resistivas, las cuales se asocian y se correlacionan con las diferentes formaciones y materiales litológicos que componen el BCH:

1. La unidad geoelectrica U1 asociada a depósitos lacustres y con valores menores a 20 [Ω .m].
2. La unidad geoelectrica U2 asociado a deposito piroclásticos y material aluvial saturadas con valores entre 20 a 80 [Ω .m]; y unidad resistiva a su vez interna y se subdivide en anomalías locales U2a y U2b.
3. La subunidad geoelectrica U2a se asocia a material antropogénico y efectos de los lagos mayor y menor, y del interceptor poniente, presentando valores entre 1y 20 [Ω .m], y solo se presentan por debajo de la 2^{da} Sección del BCH.
4. La subunidad geoelectrica U2b, asociado a materiales de relleno y zonas cavernosas, con valores entre 80 y 130 [Ω .m]; solo se presentan en el subsuelo de la 2^{da} Sección del BCH.
5. La unidad geoelectrica U3 subdividida en U3a y U3b, se le asocia a la intercalación de materiales arenosos de diferente granulometría pertenecientes a la formación Tarango.
6. La sub unidad geoelectrica U3a se le asocia a materiales areno limosos y de composición tobácea, y se encuentra saturado, con valores entre 1 y 20 [Ω .m].



7. La sub unidad geoelectrica U3b se le asocia a tobas liticas porosa y saturadas, con valores entre 20 y 80 [Ω .m].
8. La U4 se le asocia a piroclastos semicompactos poco saturado, con valores de mayores a 80 [Ω .m]; solo se presenta en la 3^{ra} Sección del BCH.
9. La unidad geoelectrica U5 se asocia a andesita fracturada, con valores mayores a 80 [Ω .m], perteneciente a la formación Sierra de las Cruces.

En la 1^{ra} Sección del BCH, los mapas y perfiles de isorresistividad, contrastan una discontinuidad resistiva cerca del Cerro de Chapultepec, el cual se asocia al contacto entre la zona de transición y la zona de lago, se observa que desplaza a las unidades U2, U3a y U3b y fue rellenada por la unidad U1 (depósitos lacustres).

La profundidad de los sondeos electromagnéticos alcanzó los 500 m en promedio y fue la adecuada para caracterizar hidrogeológicamente el subsuelo del BCH y así establecer las unidades hidrogeológicas de los acuíferos en la zona. De esta manera, se interpretaron tres tipos de acuífero (UH-1, UH-2 y UH-3):

10. La unidad hidroestratigráfica UH-1, representa el acuífero somero lacustre que actúa como un acuitardo, conformado por arcillas y arenas, presenta un espesor de 25 m en promedio, permitiendo la infiltración de agua subterránea.
11. La unidad hidroestratigráfica UH-2 representa el acuífero principal con un espesor entre 200m y 600 m, conformada por dos subunidades hidroestratigráfica granulares UH-2a y Uh-2d, y dos subunidades hidroestratigráfica por fracturamiento UH-2b y UH-2c:
12. La unidad hidroestratigráfica UH-2a representa el acuífero vulcanoclástico y aluvial en un medio granular y tiene su nivel freático localizado a algunos metros de la superficie en la 2^{da} Sección de BCH, y a 60 m en la 1^{ra} Sección del BCH y representa un gran potencial de agua subterránea en tiempo de estiaje.
13. La unidad hidroestratigráfica UH-2b, representan un acuitardo en tobas areno limosas de baja permeabilidad y comportamiento fisurado, con un espesor de 90 a 100 m.
14. La unidad hidroestratigráfica UH-2c, representa el acuífero en rocas piroclásticas, con un comportamiento fisurado y un espesor de 90 a 120 m, ubicado solo en la 3^{ra} Sección del BCH.
15. La unidad hidroestratigráfica UH-2d, representa el acuífero principal, con un nivel freático localizado a 120 m de profundidad, representa el mayor potencial de almacenamiento de agua subterránea en el Subsuelo del BCH, con un espesor de 200 a 600 m promedio.
16. La unidad hidroestratigráfica UH-3, representa el acuífero profundo fracturado, presentando una porosidad secundaria (fracturamiento), perteneciente a la formación Sierra de las Cruces.



El subsuelo del BCH se caracteriza por ser un medio rocoso saturado, donde el acuífero principal corresponde a la formación Tarango, cuyo nivel estático se encuentra a 120 m de profundidad. Los resultados no permiten determinar su base. Sin embargo, si se observa que las andesitas fracturadas, presentan permeabilidad moderada, resultado que permite inferir que la zona del BCH es parte de la recarga del acuífero profundo fracturado en rocas volcánicas del Mioceno y Plioceno al interior de la Cuenca de México.

Por lo anterior se recomiendan las acciones siguientes:

RECOMENDACIONES

1. Continuar estudiando este modelo hidrogeológico, sobre todo en la 1^{ra} Sección del BCH, ya que es la zona donde menos datos se obtuvieron.
2. Realizar estudios geofísicos y del subsuelo de detalle para caracterizar la estructura geológica localizada cerca del Cerro de Chapultepec en la 1^{ra} Sección del BCH.
3. Integrar estudios de resistividad a una profundidad de 70 m en la 2^{da} Sección del BCH, para contar con un modelo del acuífero somero superior (UH-2a), compuesto por material vulcanoclástico y el contacto con los materiales aluviales. Esto permitirá, determinar posibles cavidades y minas antiguas que han colapsado por socavamiento debido a la presencia del agua subterránea.
4. Hacer un pozo de exploración de 60 m de profundidad entre los sondeos HG-03 y HG-01, para caracterizar la anomalía resistiva que se asocia a una zona cavernosa.
5. Proponer una red de monitoreo mediante pozos para medir el nivel piezométrico en cada sección del BCH, a una profundidad de 100 m, para dar seguimiento a los cambios de saturación en los materiales de la unidad hidroestratigráfica UH-2a en tiempo de estiaje.
6. Establecer pozos de observación a 250 m para monitorear la recarga subterránea del acuífero y realizar zonificación de recarga inducida aprovechando la Presa Dolores.



Anexo 1. Correlación de Cortes Litológicos.

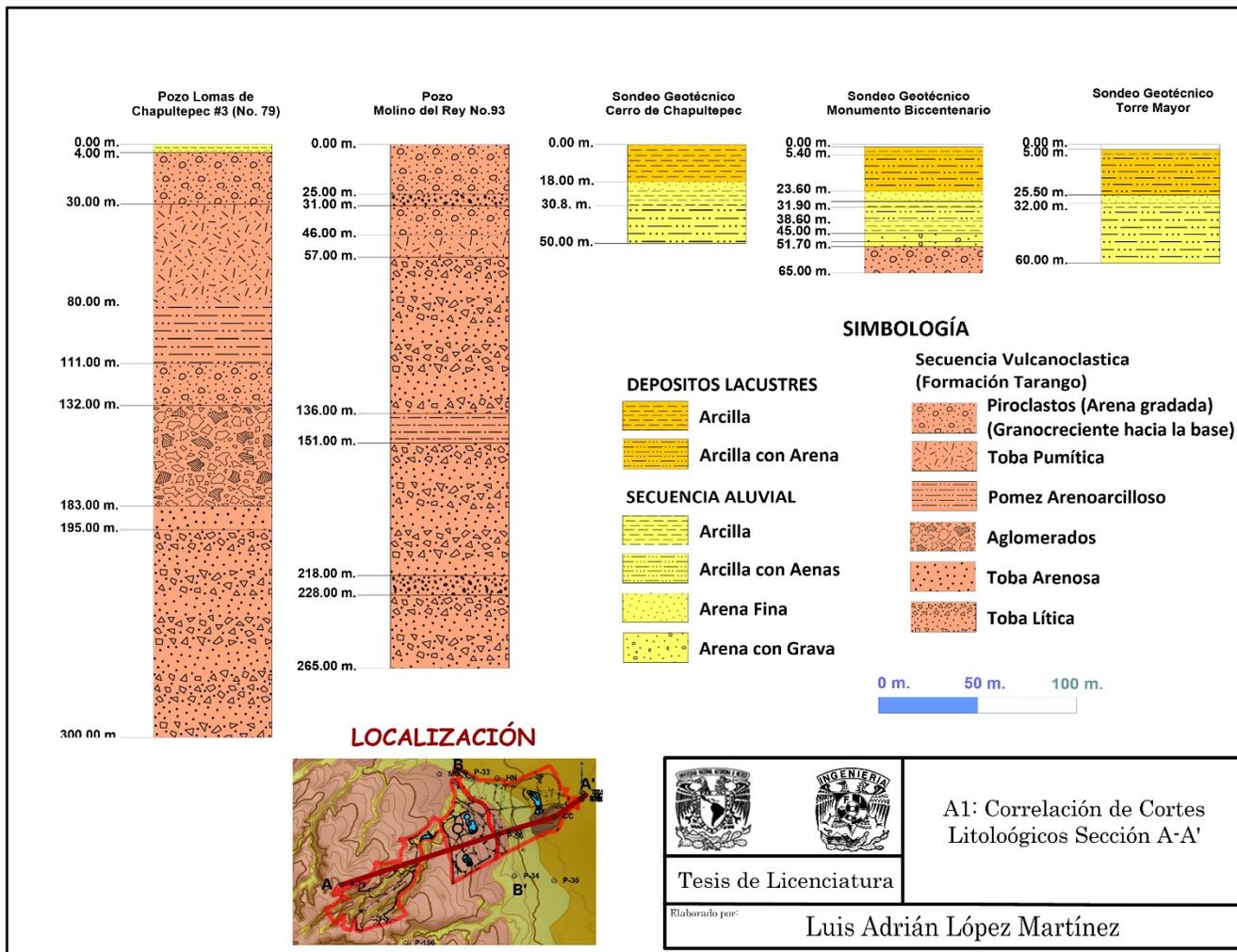


Figura A1. 1. Correlación de Cortes litológicos para la sección geológica esquemática A'-A.

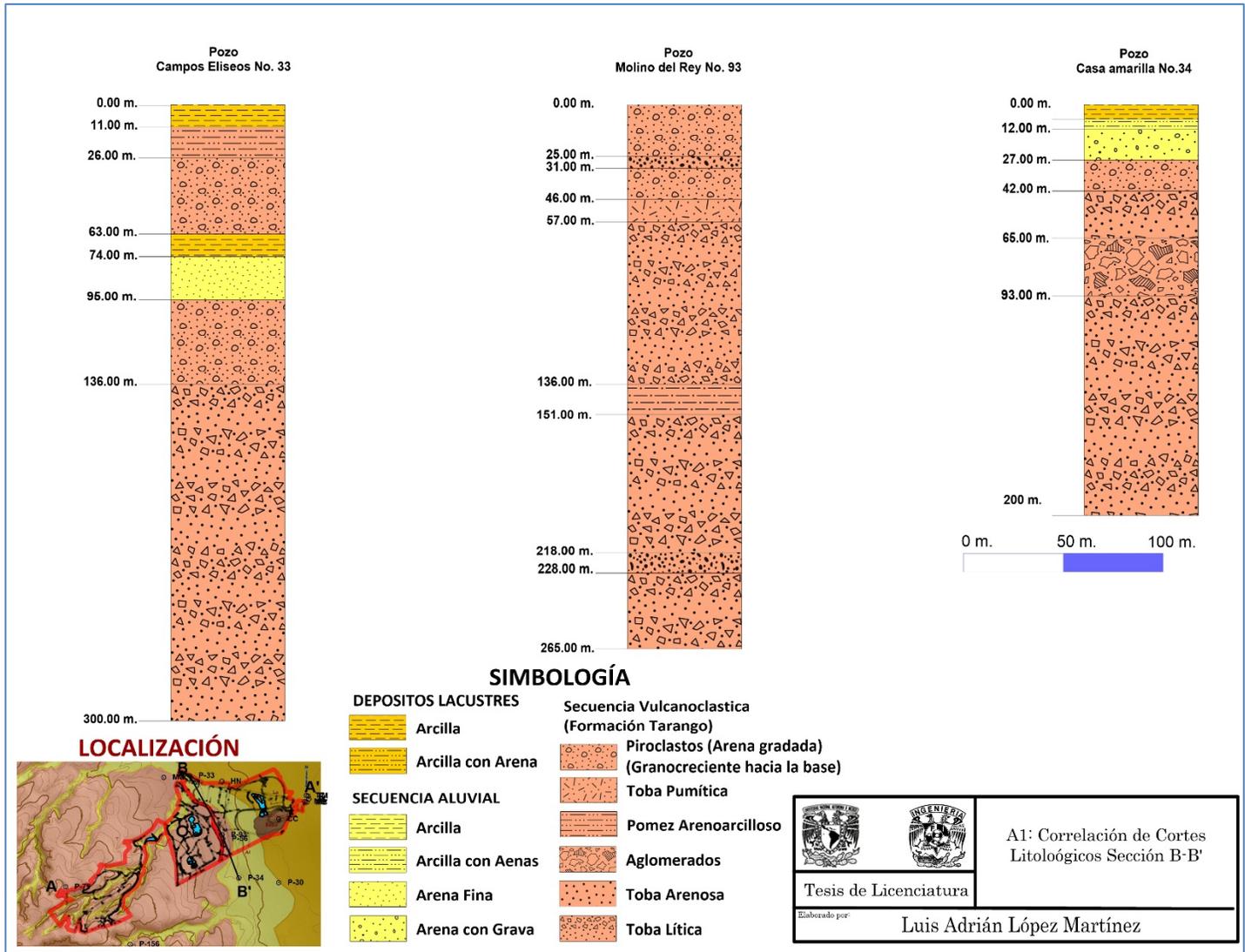


Figura A1. 2. Correlación de cortes litológicos para la sección geológica esquemática B'-B.



Anexo 2. Curvas de resistividad.

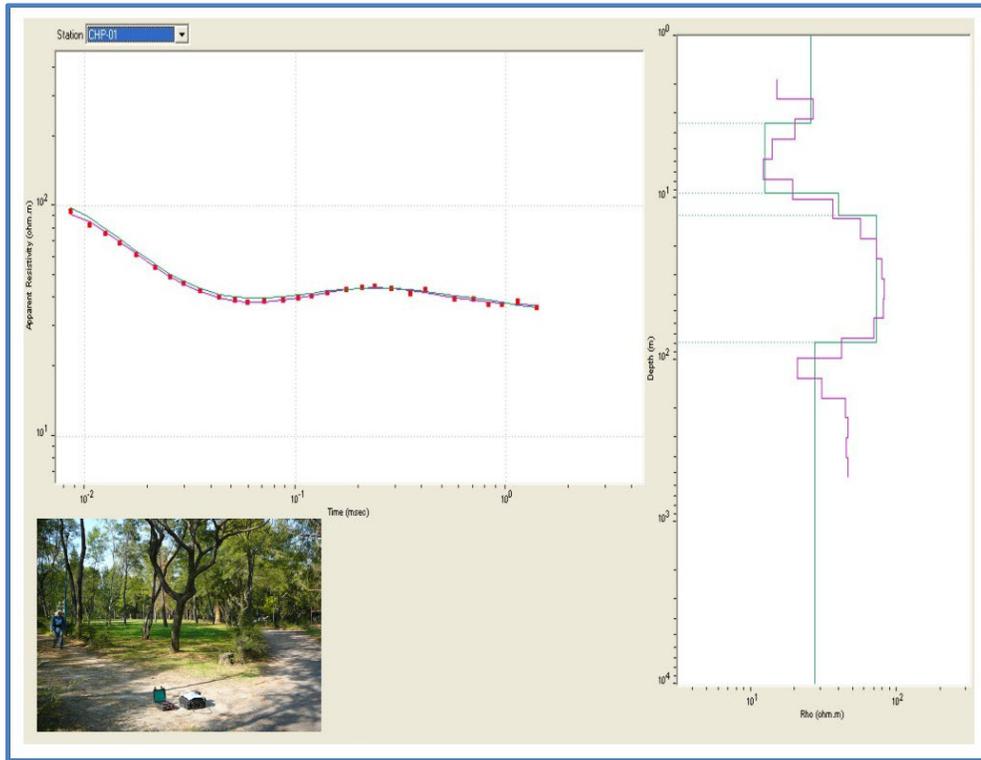


Figura A2. 1. Curva CHP-01. Inversión Unidimensional.

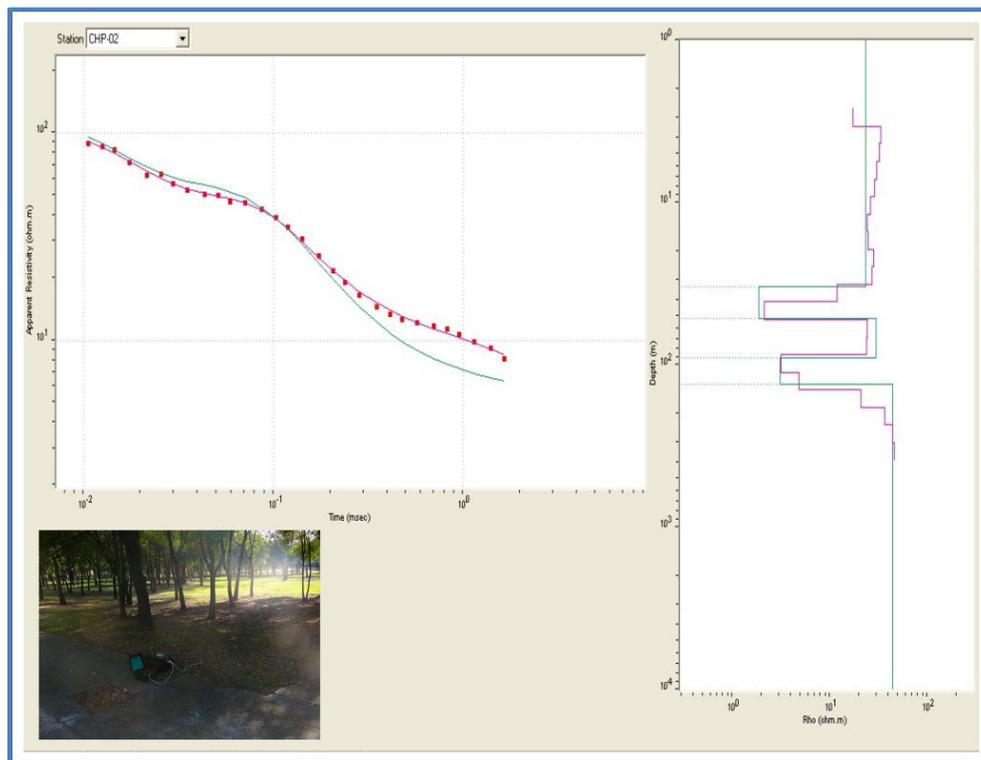


Figura A2. 2. Curva CHP-02. Inversión Unidimensional.

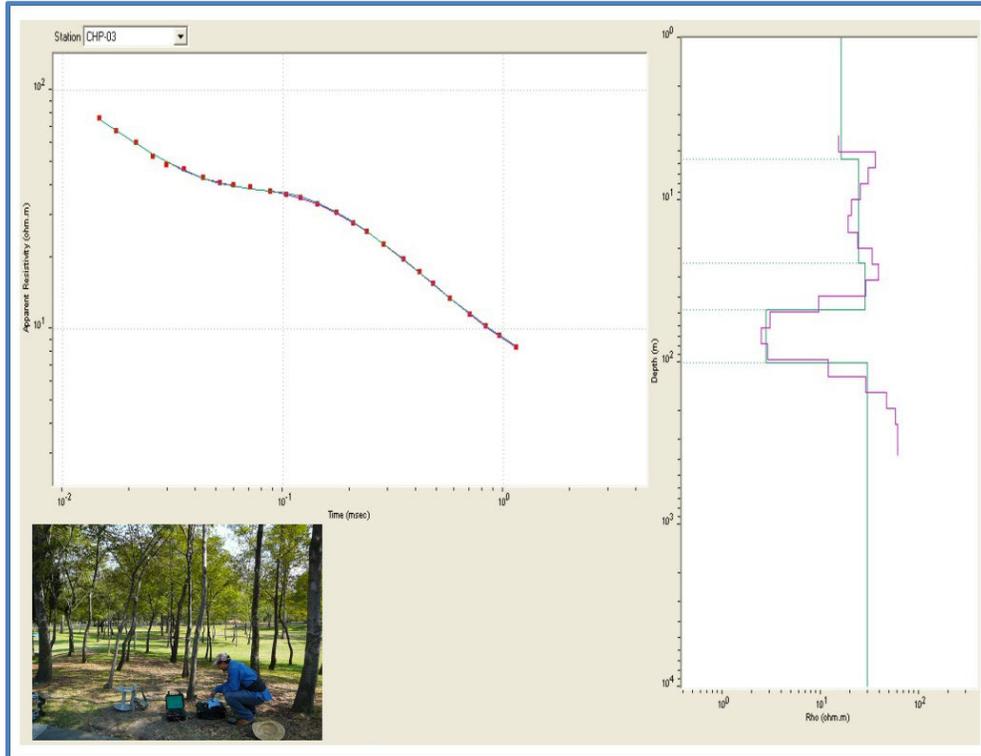


Figura A2. 3. Curva CHP-03. Inversión Unidimensional.

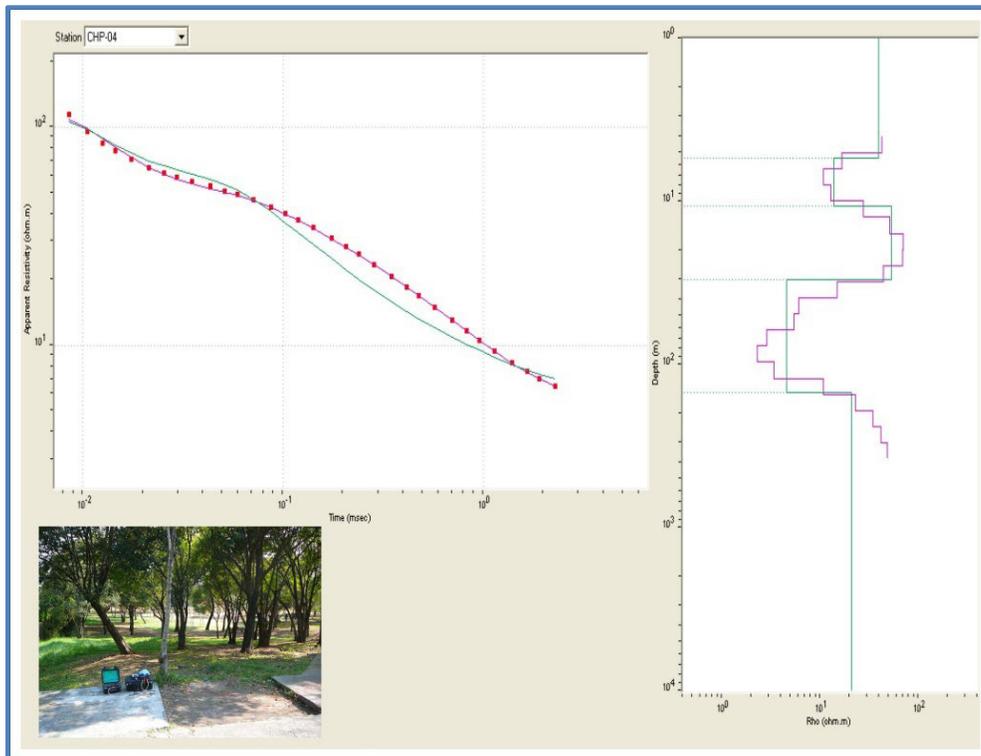


Figura A2. 4. Curva CHP-04. Inversión Unidimensional.

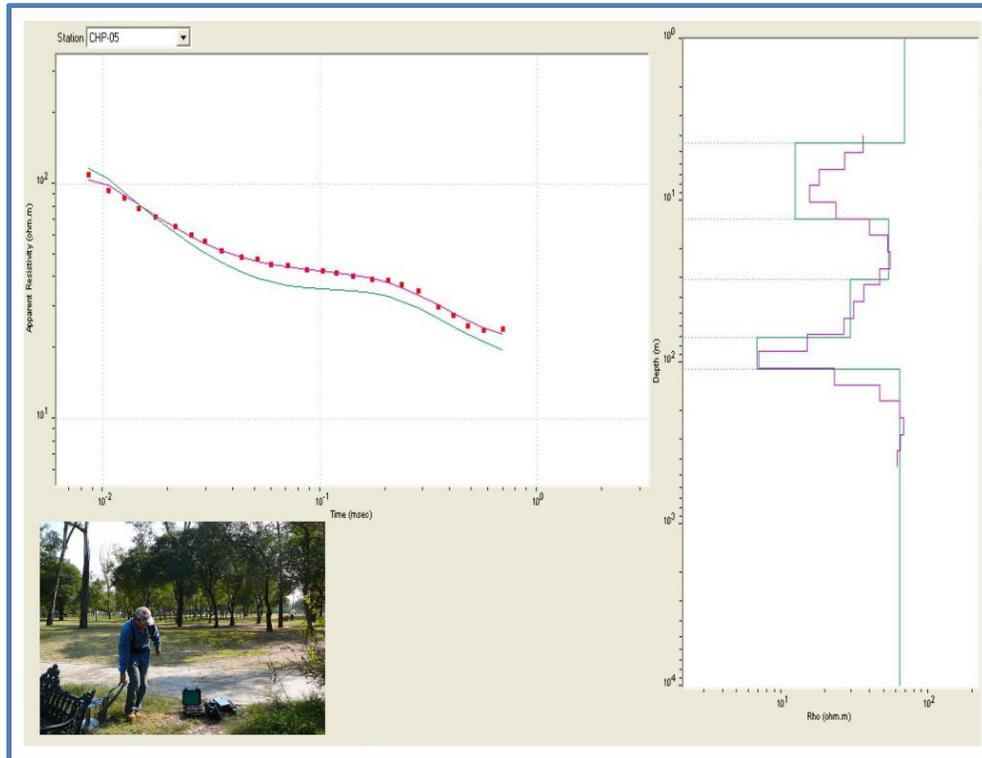


Figura A2. 5. Curva CHP-05. Inversión Unidimensional.

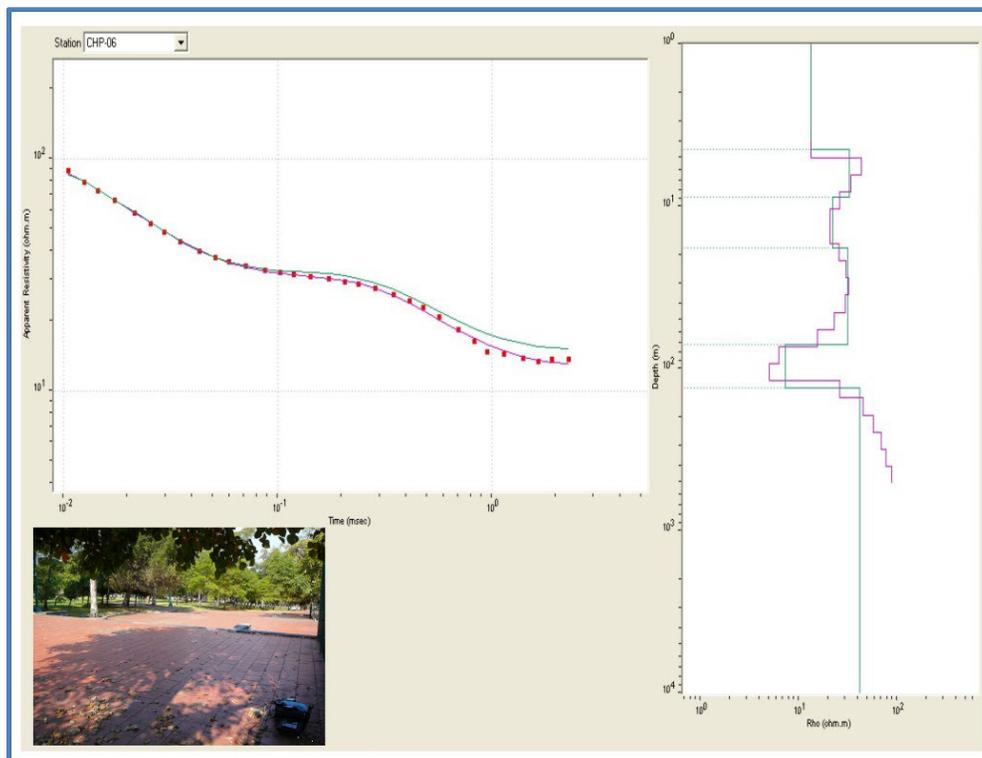


Figura A2. 6. Curva CHP-06. Inversión Unidimensional.

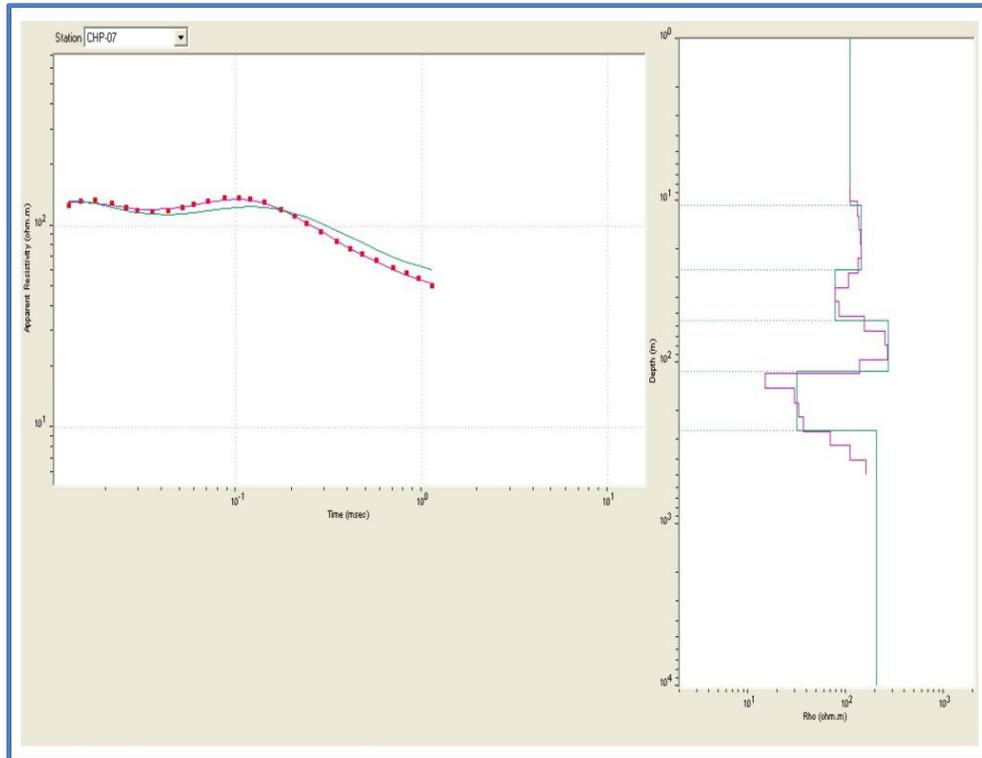


Figura A2. 7. Curva CHP-07. Inversión Unidimensional.

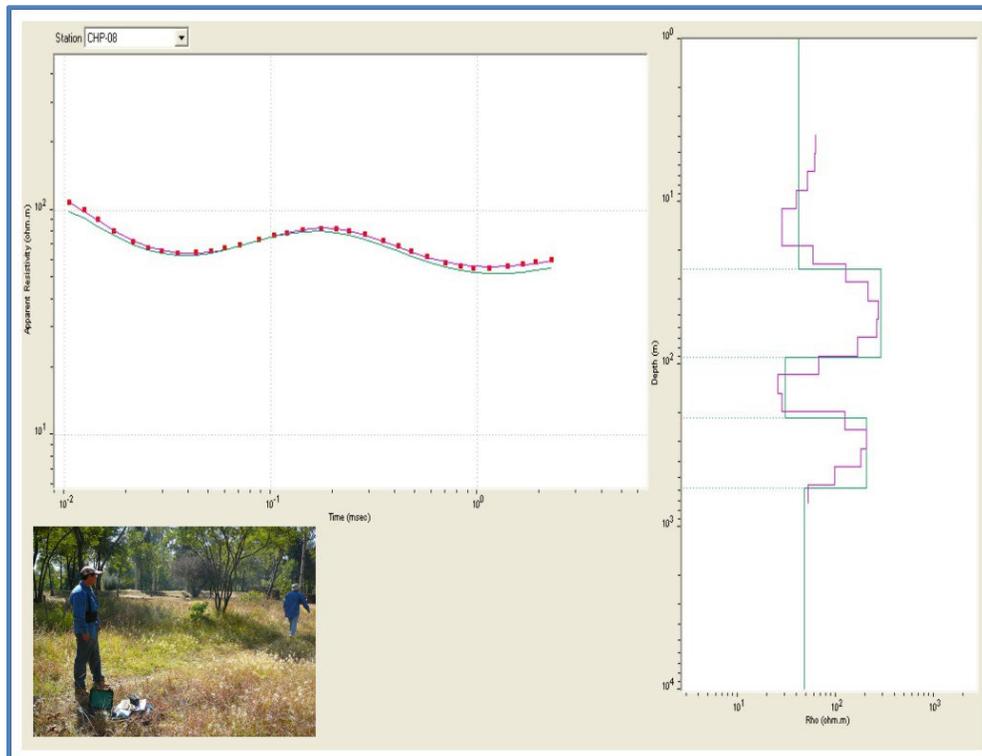


Figura A2. 8. Curva CHP-08. Inversión Unidimensional.

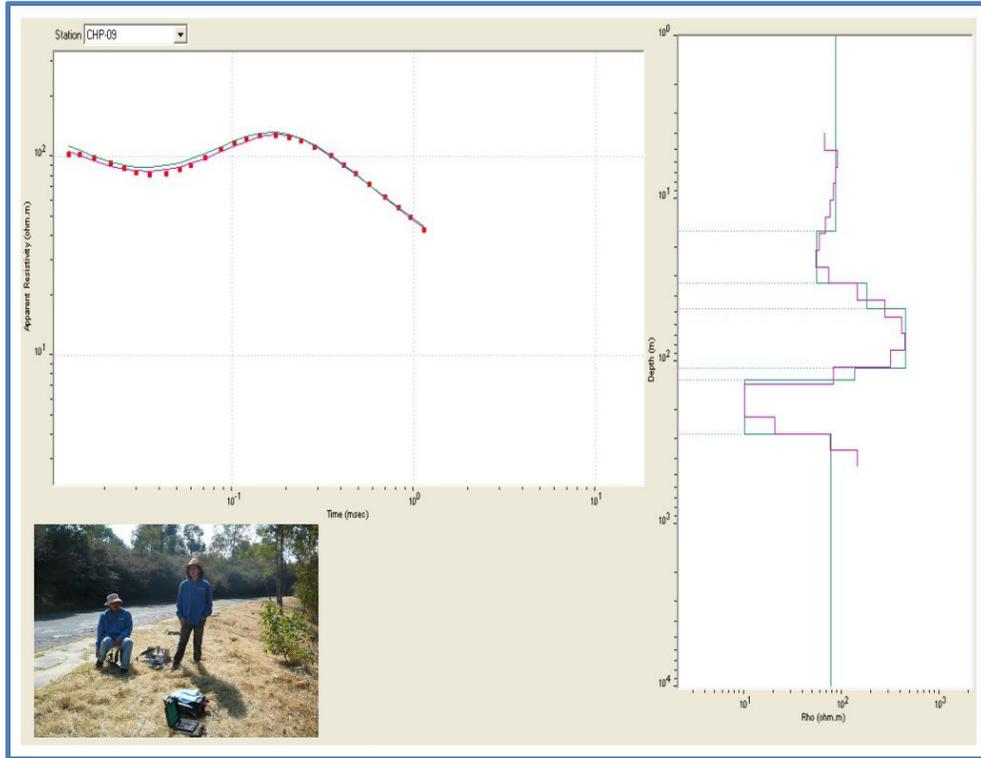


Figura A2. 9. Curva CHP-09. Inversión Unidimensional.

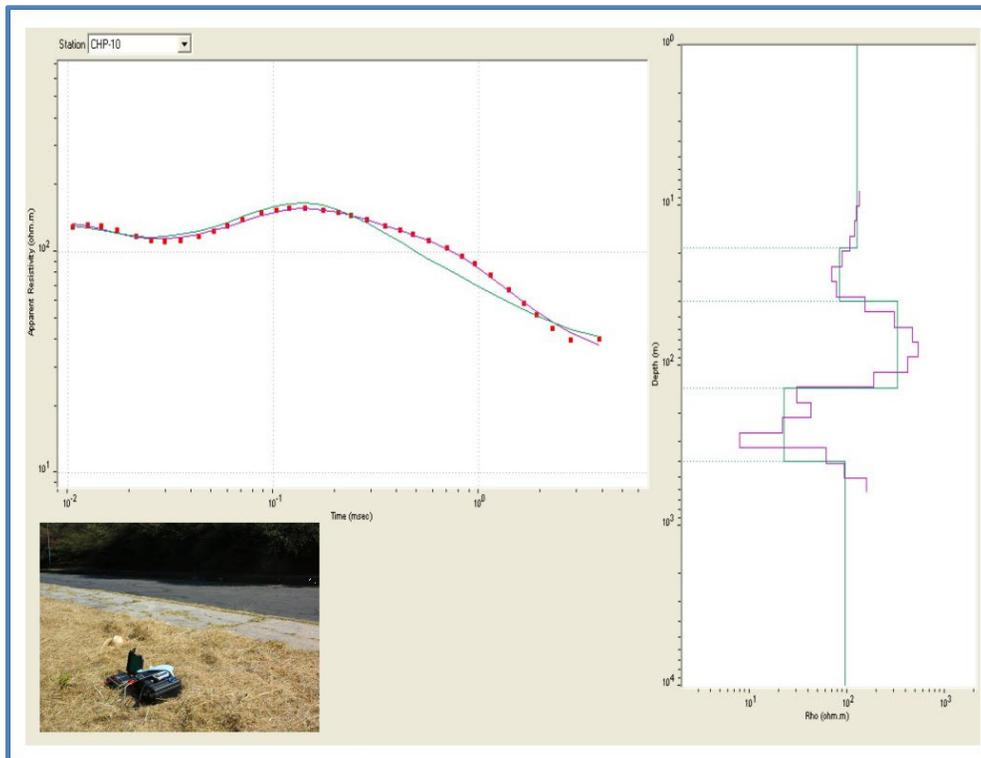


Figura A2. 10. Curva CHP-10. Inversión Unidimensional.

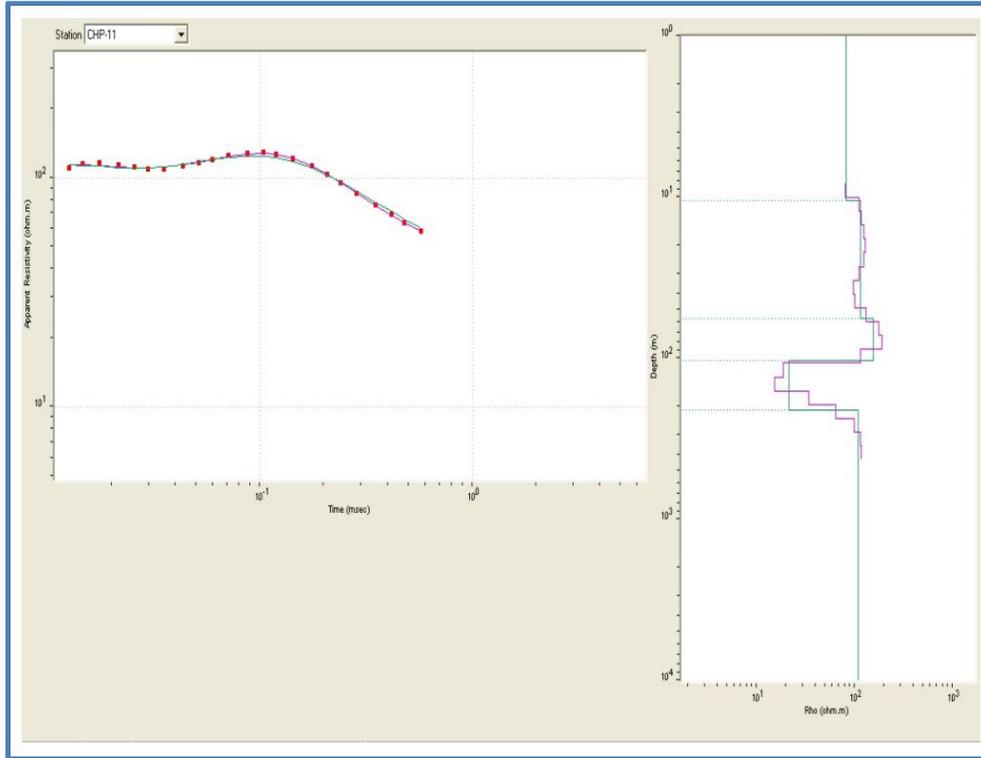


Figura A2. 11. Curva CHP-11. Inversión Unidimensional.

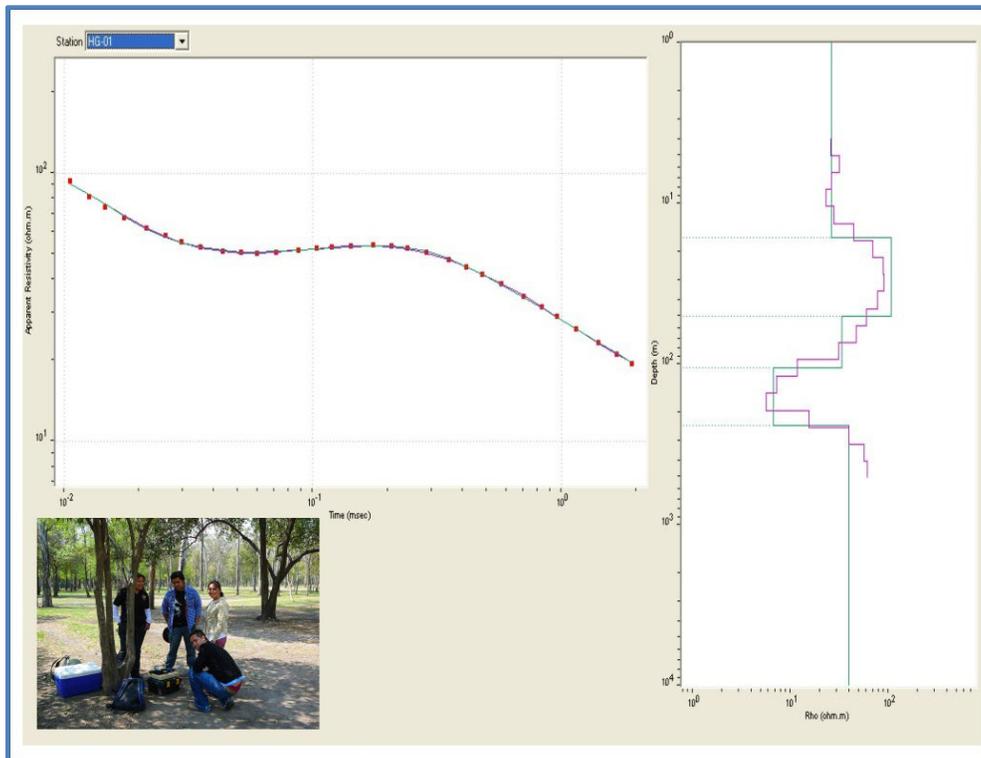


Figura A2. 12. Curva HG-01. Inversión Unidimensional.

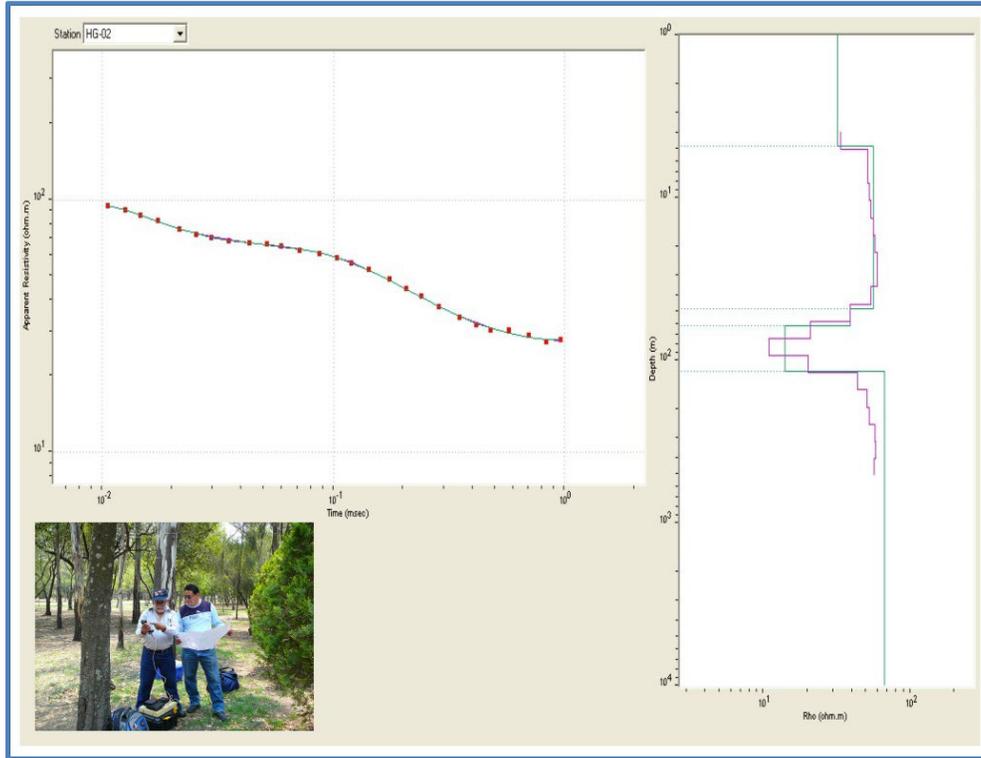


Figura A2. 13. Curva HG-02. Inversión Unidimensional.

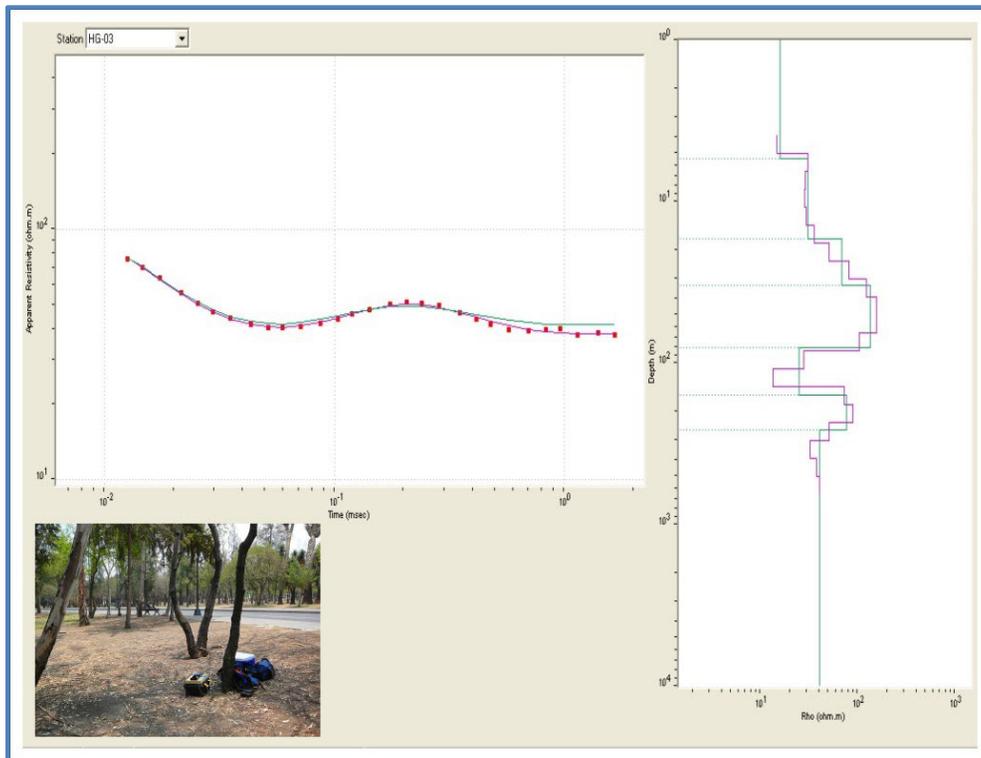


Figura A2. 14. Curva HG-03. Inversión Unidimensional.

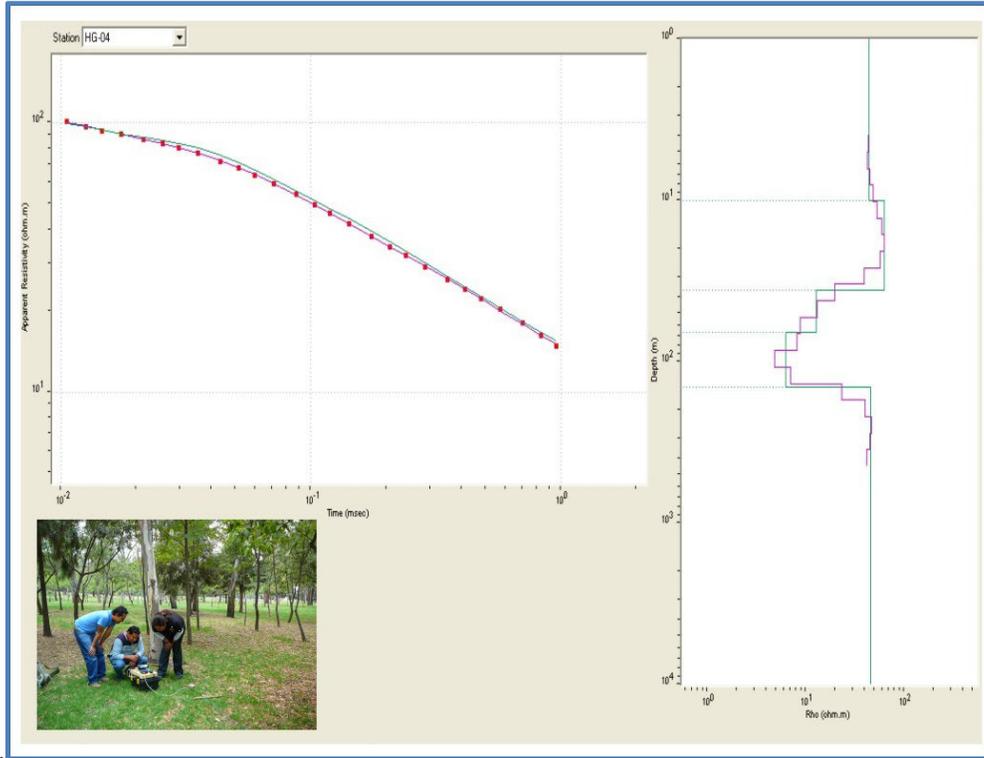


Figura A2. 15. Curva HG-04. Inversión Unidimensional.

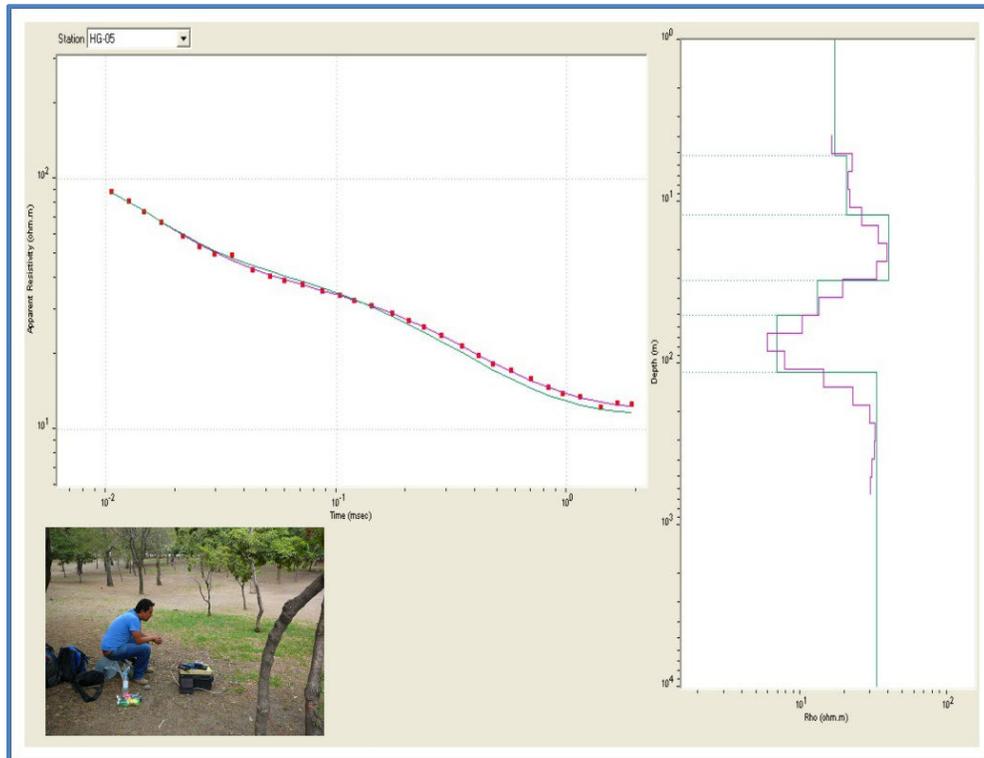


Figura A2. 16. Curva HG-05. Inversión Unidimensional.

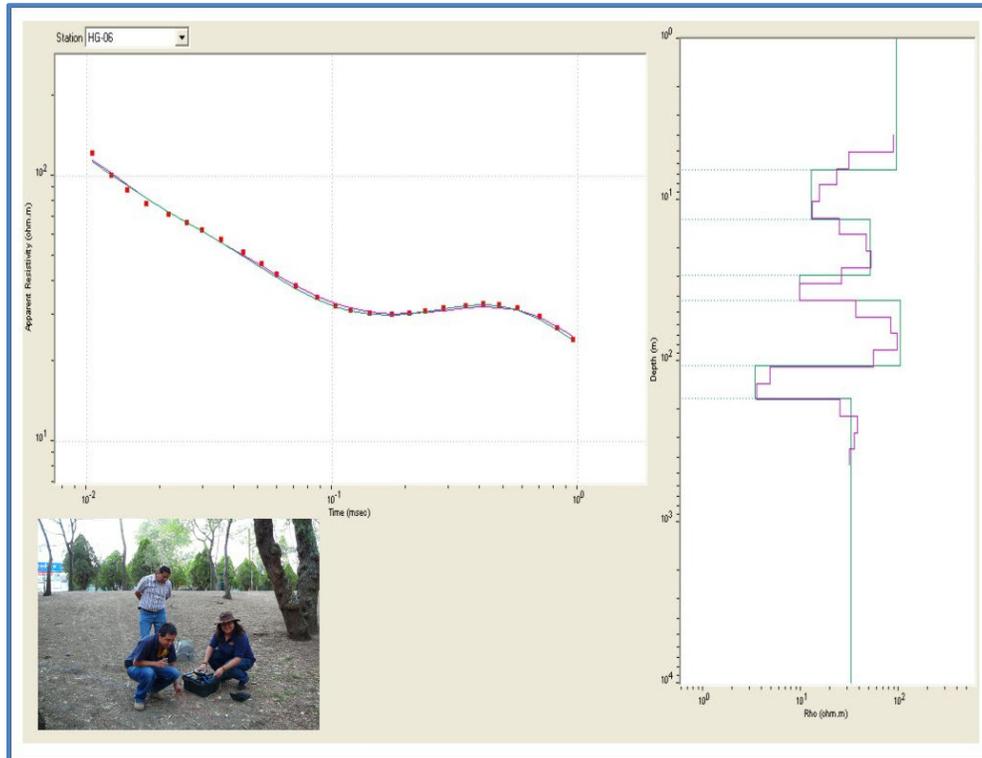


Figura A2. 17. Curva HG-06. Inversión Unidimensional.

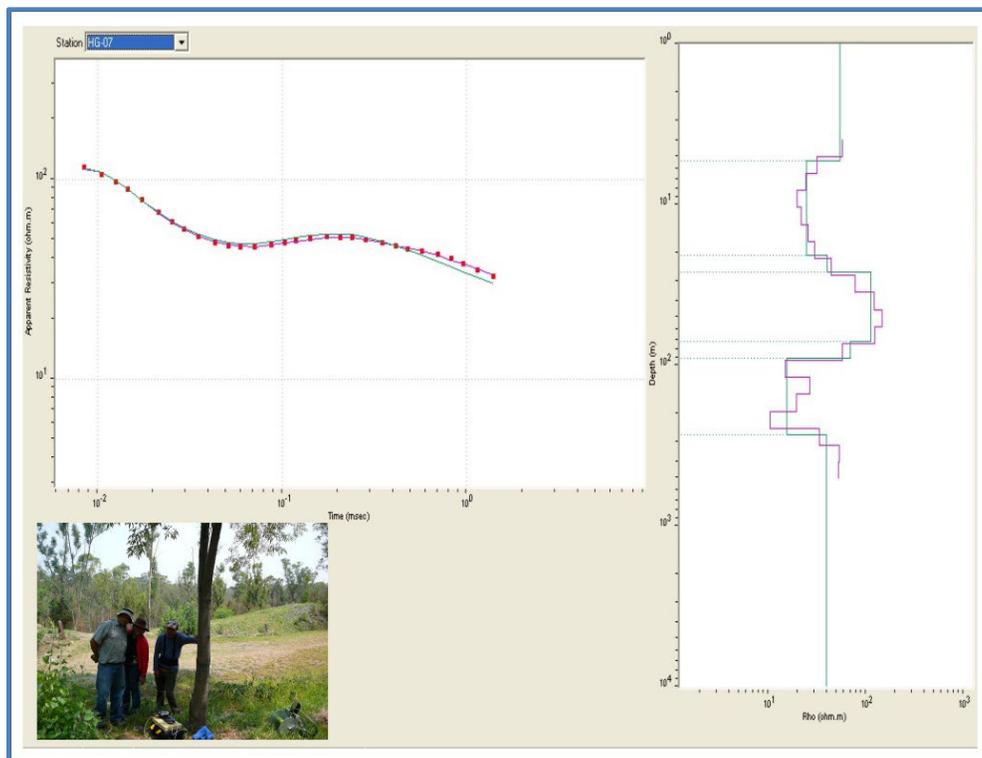


Figura A2. 18. Curva HG-07. Inversión Unidimensional.

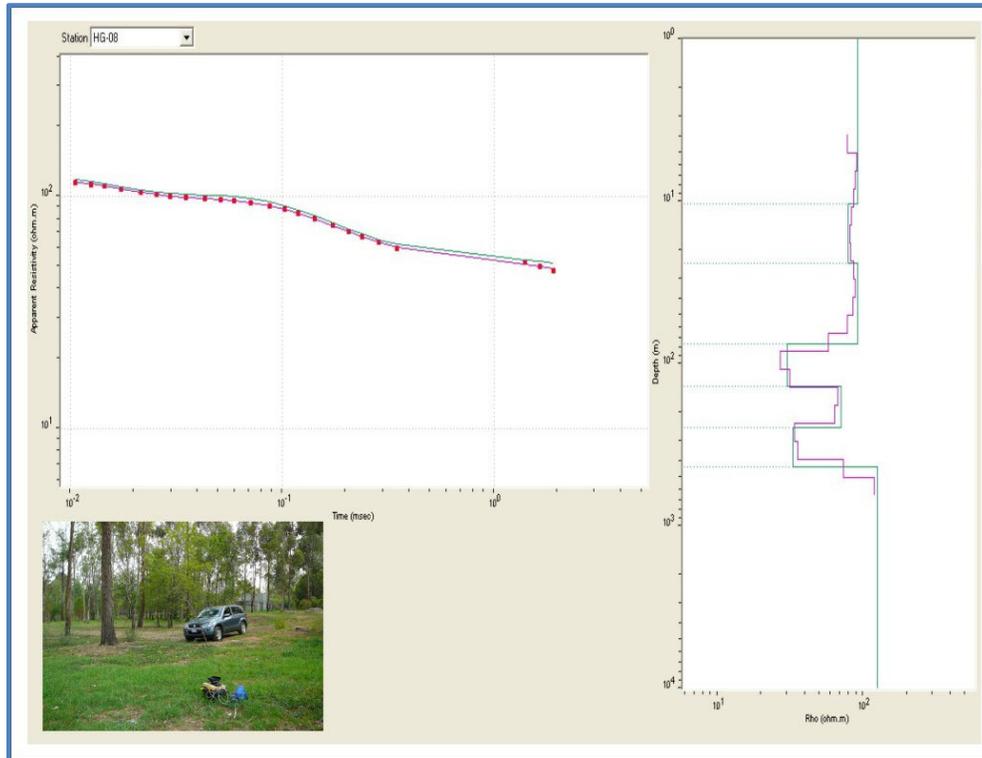


Figura A2. 19. Curva HG-08. Inversión Unidimensional.

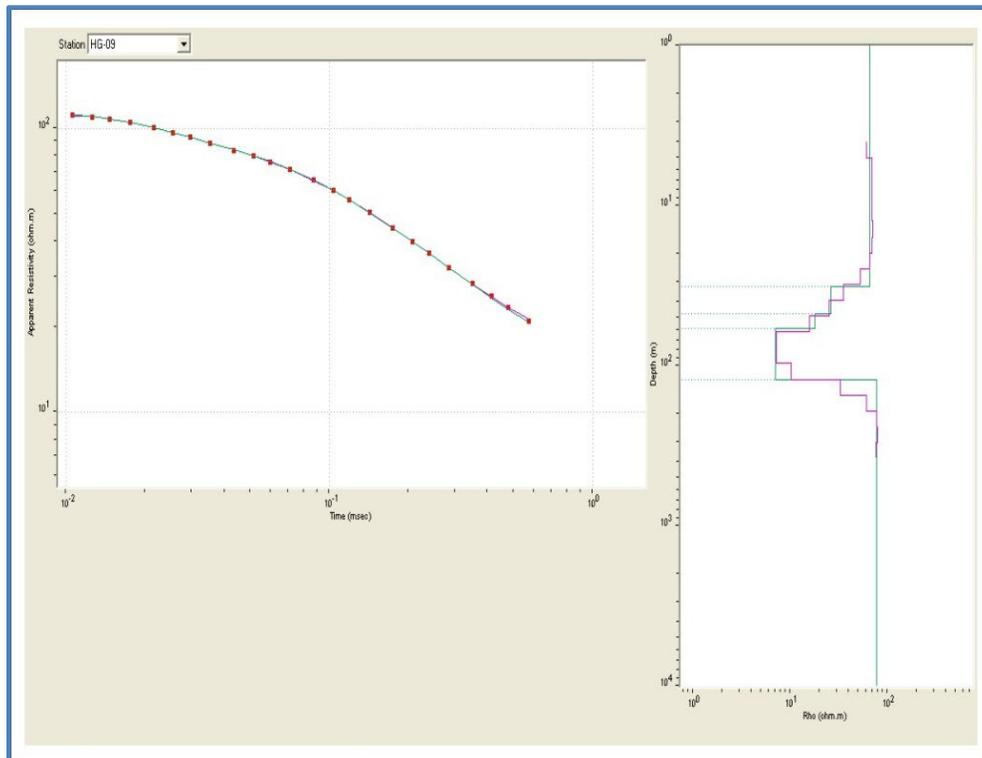


Figura A2. 20. Curva HG-09. Inversión Unidimensional.

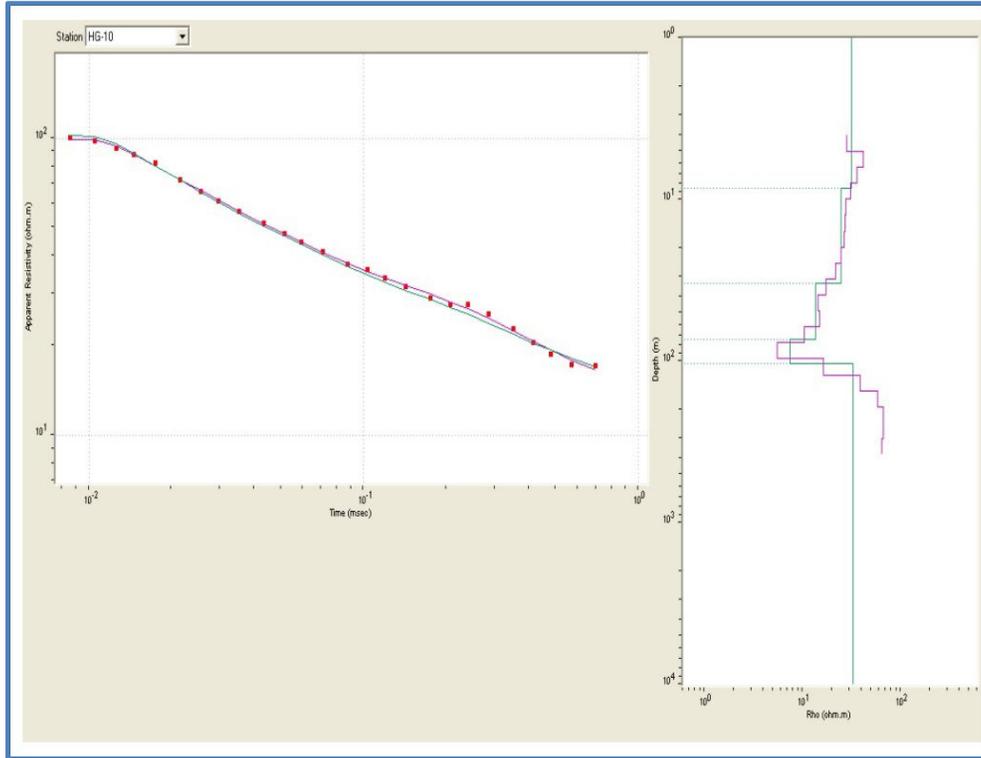


Figura A2. 21. Curva HG-10. Inversión Unidimensional.

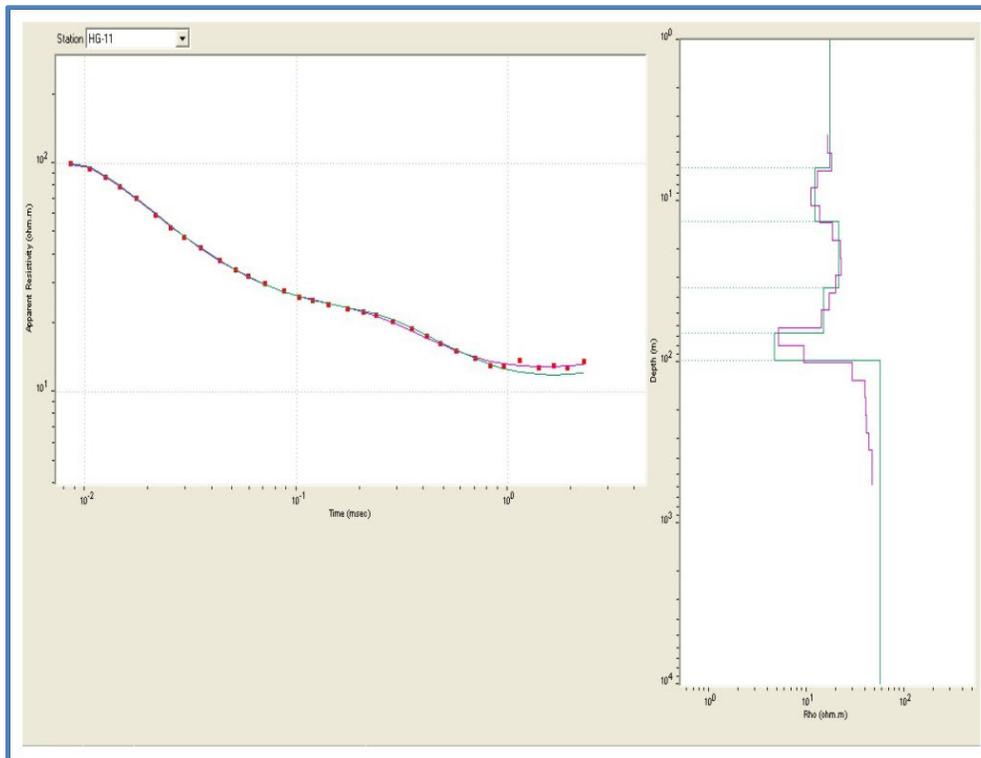


Figura A2. 22. Curva HG-11. Inversión Unidimensional.

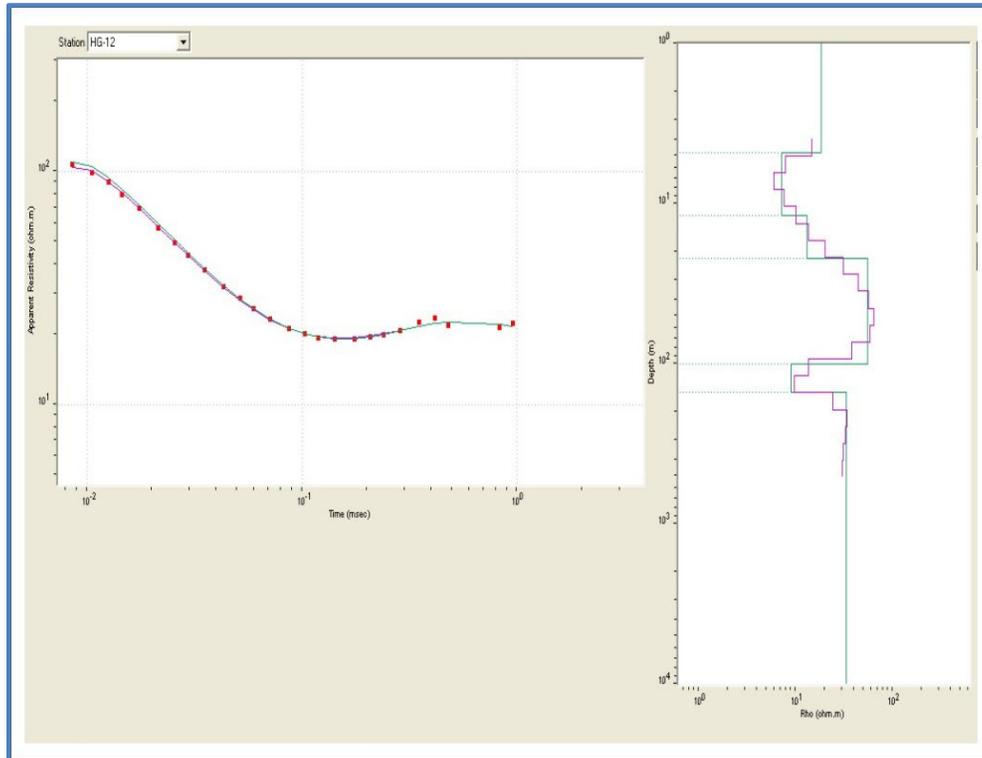


Figura A2. 23. Curva HG-12. Inversión Unidimensional.



Referencias.

- 🏠 AEMR Applied Electromagnetic Research the Netherlands. (2006) *“Tem-Fast 48, Guide versing 7.3”*. AEMR, Netherlands.

- 🏠 Aguayo, C. J., Marín, C. S. (1989). *“Evolución geológica de la Cuenca de México”*. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Memorias del Simposio sobre tópicos Geológicos de la Cuenca del Valle de México, México D.F., 25-41

- 🏠 Anderson, W. L. (1979). *“Numerical iteration of related Hankel transforms of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering”*. Geophysics. 44. 1287-1305.

- 🏠 ANH, Agencia Nacional de Hidrocarburos., (2009). *“Conceptos básicos de geología y geofísica”*. Bogotá, Colombia. 51 pag.

- 🏠 Arellano, A. R. V. (1953). *“Estratigrafía de la Cuenca de México”*. UNAM. Congreso Científico Mexicano, Memorias. 3. 172-186.

- 🏠 Denghai, BAI, Meju, Maxwell, A., Jian, LU, Lifeng WANG, Zhaohai HE., (2003). *“Numerical calculation of all-time apparent resistivity for central loop transient electromagnetic method”*. Chinese Journal of Geophysics. Vol. 46, No. 5: pp.998-1010.

- 🏠 Chen-To Tai. (1971). *“Dy dic Green’s functions in electromagnetic applications”*. En: Nabighian M. N (Ed.). *Electromagnetic Methods applied to geophysics*. Vol. 1. Ch. 4. 1998.

- 🏠 Christensen, Neils, B. (1995). *“1D imagin of central loop transient electromagnetic soundings”*. JEEG, 0: 1.

- 🏠 CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2009). *“Informe final del diagnóstico geohidrogeológico de la Sierra de las Cruces, entre Ocoyoacac, Mex., y estación Observatorio, D.F.”*. Elaborado por: Buro Hidrogeológico, Consultoría, para CONAGUA, México D. F.



-  Constable, C. C., Parker, K. L., Constable, C. G. (1987). “*Occam’s inversion a practical algorithmic for generating smooth models from electromagnetic sounding*”. *Geophysics*, 52 (3): 289-300.
-  De Cserna, Z., De La Fuente-Duch, M., Palacios-Nieto, M. Triay, L., Mitre-Salazar, L. M., Mata-Palomino, R. (1988). “*Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México*”. Instituto de Geología, UNAM, Boletín 104, México D.F.
-  Delgado-Granados, H., Martín del Pozo, A. L., (1993). “*Pliocene to Holigocene volcanic geology at the junction of Las Cruces, Chichinautzin and Ajusco ranges, southwest of Mexico City*”. *Geofísica Internacional*. Vol. 32: Num. 3: pp.511-522.
-  Díaz, Molina, O. (2003). “*Modelación 1D directa e inversa de datos de radar de penetración terrestre*”. Tesis de Maestría. Instituto de Geofísica, UNAM, Ciudad Universitaria, México D. F.
-  DGCOH. (2002). “*Estudio geológico de la zona poniente Del Valle de México e interpretación estratigráfica de los pozos de agua a cargo de la D.G.C.O.H. Localizados en las delegaciones de Azcapotzalco, Miguel Hidalgo, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras y Cuajimalpa. México D.F.*”. Estudio elaborado por el Ing. Luis Chavelas Peña. Para: DGCOH. México D.F.
-  Duran, Neme, J. A. (2012). “*Aplicación de las ecuaciones de Maxwell en el dominio de las frecuencias al análisis electromagnético de un medio rocoso*”. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional de Colombia (UNC). Bogotá, Colombia.
-  Enríquez, Santillán, C. A. (2013). “*El Bosque de Chapultepec y la transformación de su entorno*”. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad Universitaria, México D.F.
-  Escobar-Salguero, L. H., Cortes-Soto, F., (2000). “*Fundamentos de la teoría electromagnética*”. Facultad de Ingeniería, UNAM, 243pp. México D.F.



-  Facultad de Ingeniería, UNAM. (2010). "Apuntes de la asignatura: Prospección Electromagnética semestre 2010-2". Apuntes Escolares, C.U.

-  Facultad de Ingeniería, UNAM. (2014). "Estudio geológico-geofísico del Lago Mayor de la 2ª sección del Bosque de Chapultepec". Informe Técnico, México D.F.

-  Fries, C. Jr., (1960). "Geología del estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México". Instituto de Geología, UNAM, México D.F.

-  Fries, C. Jr., (1962). "Resumen de la geología de la hoja Pachuca, Estado de Hidalgo y México, hoja Pachuca 14Q-C (11). Esc. 1:100,000". Instituto de Geología, UNAM, México D.F.

-  García-Palomo A., Zamorano J., López-Miguel C., Galván-García A., Carlos-Valerio V., Ortega R., Macías J.L., (2008). "El Arreglo Morfoestructural de la Sierra de las Cruces, México Central". Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol.25, No 1, 158-178.

-  GSU, Geophysical Surveys., (2013), "arreglos de adquisición Tem's", www.gsu.com

-  Geosystem. SRL. (2003), "WinGlink. User's guide. Relace 2.03.01". Geosystem. SRL. Milán, Italy.

-  Golden Software, Inc., (2012), "Voxler 3. Full user's guide". Golden Software, Inc. Colorado, USA.

-  Gómez-Tuena, A., Orozco-Esequivel, Ma. T., Ferrari, L. (2005). "Petrogénesis ígnea de la faja volcánica transmexicana". Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. LVII. Núm. 3: pp. 227-283.

-  Gutiérrez de Mac Gregor, González, Sánchez, J., Zamorano, Orozco, J. J., (2005). "La Cuenca de México y sus cambios demográfico-espaciales". Instituto de Geografía, UNAM, México D. F.



-  INEGI, (2021). *“Carta Topográfica Ciudad de México E14A39. Esc: 1: 50,000”*. INEGI. Mexico. D.F.
-  INEGI, (s.f.). Provincias Fisiográficas del Distrito Federal. Recuperado el 14 de Marzo de 2014, de www.inegi.org.mx
-  Lugo-Hubp J., Cordero-Estrada M., Zamorano-Orozco J. J., (1995). *“Relieve, litología y riesgos en la zona urbana de la delegación Álvaro Obregón, Distrito Federal, México”*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 12 No1, 52-67.
-  Marsal, R. J., Manzari, M., (1969). *“El subsuelo de la Ciudad de México”*, Instituto de Ingeniería, UNAM, México D. F.
-  Mooser, F. y Colaboradores. (1983), *“Características geológicas y geotécnicas del Valle de México”*. Informe Técnico. COVITUR. Secretaria General de Obras, México D.F.
-  Moose, F., Montiel, A., Zuñiga, A., (1996). *“Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla. Estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos (1937-1996)”*. Comisión Federal de Electricidad (CFE). México, 27 pp.
-  Nabighian, M. N., Mcnae, J. C., (1991). *“Time domain electromagnetic prospecting methods”*. En Nabighian (Ed.). *“Electromagnetic methods applied to geophysics”*. Vol. 2, Past. A: pp. 427-479.
-  Nathan Ida., (1995). *“Numerical modeling for electromagnetic non-destructive evaluation”*. Chapman and Hall, Great Britain, 511 pp.
-  Pérez Cruz, G. A., (1988). *“Estudio sismológico de reflexión del suelo de la Ciudad de México”*. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra. Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, México D.F. (Texto Inédito).



-  Remigio, Morales, K., (2013). *“Caracterización mineral de muestra pétreas mediante la aplicación de microscopía óptica de polarización de los taludes en la Tercera Sección del Bosque de Chapultepec”*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, México D.F.

-  Ruiz, Aguilar, D., (2010). *“Estudio geofísico para la evaluación hidrogeológica de una zona del acuífero Alfajayucan-Chapantongo”*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, México D.F.

-  Ruiz, González, G., (1998). *“Análisis geotécnico para la excavación del proyecto corporativo, opción Montes Urales III, en Lomas de Chapultepec, D.F.”*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores (FES) Acatlan, UNAM. México D.F.

-  Ryu, J., Morrison, H. F., Ward, S.H., (1970). *“Electromagnetics effects about a loop source of current”*. Geophysics. Vol. 35: pp. 862-896.

-  SACMEX, Secretaria de Aguas de la ciudad de México. (2006). *“Estudio de georadar y calicatas geoelectricas para caracterizar el armado de lozas y estado del subsuelo del Lago Mayor de la Segunda Sección del Bosque de Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo, México D.F.”*. Informe Técnico. Estudio realizado por la Empresa Sismo Control S.A de C.V para SACM. México D. F.

-  SACMEX_1, secretaria de Aguas de la ciudad de México. (2006). *“Procedimiento constructivo para el sellado de la oquedad en el fondo del Lago de Chapultepec, 2ª Sección. México D.F.”*. Informe Técnico. Estudio realizado por la empresa Proyecto Civil Integral S.A de C.V para SACM. México D. F.

-  SACMEX_2, secretaria de Aguas de la ciudad de México. (2006). *“Estudio integral para la integración de las condiciones geológicas existentes en el fondo del tanque de almacenamiento del Lago Mayor y su zona periférica, Segunda Sección del Bosque de Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo. México D.F.”*. Informe Técnico. Estudio elaborado por ESIA Ticoman para SACM. México D. F.



-  SACMEX_3, secretaria de Aguas de la ciudad de México. (2006). *“Revisión y evaluación y dictamen de resultados obtenidos en estudios realizados para el planteamiento de la estrategia de acciones a desarrollar en las obras de rehabilitación requeridas dentro del tanque de almacenamiento Lago Mayor, Segunda Sección del Bosque de Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo. México D.F.”*. Informe Técnico. Estudio elaborado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM para SACM. México D. F.

-  SACMEX_1, Sistema de Aguas de la Ciudad de México. (2013). *“Estudio geofísico 2D de alta resolución en la Ciudad de México”*. Informe Técnico. Elaborado por la empresa COMESA, para el SACMEX, México D.F.

-  SACMEX_2, Sistema de Aguas de la Ciudad de México. (2011), *“Reinterpretación estratigráfica del sistema poniente. Pozo Lomas de Chapultepec #. 3 (No. 79)”*. SACMEX, México D.F.

-  SACMEX_3, Sistema de Aguas de la Ciudad de México. (2011), *“Reinterpretación estratigráfica del sistema poniente. Pozo Molino del Rey No. 93”*. SACMEX, México D.F.

-  SACMEX_4, Sistema de Aguas de la Ciudad de México. (2011), *“Reinterpretación estratigráfica del sistema poniente. Pozo Campos Elíseos No. 33”*. SACMEX, México D.F.

-  SACMEX_5 Sistema de Aguas de la Ciudad de México. (2011), *“Reinterpretación estratigráfica del sistema poniente. Pozo Casa Amarilla No. 34”*. SACMEX, México D.F.

-  Santoyo Villa E., Ovando Shelley E., Mooser F., León Plata E., (2005). *“Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México”*. TGC Geotecnia S.A de C.V. México

-  Schlaepfer, J. C., (1968), *“Resumen de la geología de la hoja de México, Distrito Federal, Estado de México y Morelos. Hoja 14Q-h (5). Esc. 1:100,00”*. Instituto de Geología, UNAM, México D. F.

-  Schlumberger. (2009). *“Levantamientos electromagnéticos someros”*. Oil Field Review. Vol. 21, No. 1: pp. 20-25.



-  SGM, Servicio Geológico Mexicano., (2004). “*Carta geológica, hoja E14-2, Ciudad de México. Esc. 1:250,000*”. SGM, México.
-  SGM, Servicio Geológico Mexicano., (2014). “*Léxico estratigráfico, unidad volcánica Sierra de las Cruces*”. SGM, México.
-  Spies, B. R., Egger, Dwight, E., (1986). “*The use misuse of apparent resistivity in electromagnetic methods*”. Geophysics. Vol. 51: 7.
-  TGC_1, TGC Geotecnia. (2009). “*Proyecto de desarrollo de infraestructura, sondeo con eléctrico Cerro de Chapultepec*”. Informe Técnico. TGC Geotecnia S. A de C.V. México D. F.
-  TGC-2, TGC Geotecnia. (2009). “*Proyecto de desarrollo de infraestructura, sondeo con eléctrico Monumento Bicentenario*”. Informe Técnico. TGC Geotecnia S. A de C.V. México D. F.
-  TGC-3, TGC Geotecnia. (2009). “*Proyecto de desarrollo de infraestructura, sondeo con eléctrico Torre Mayor*”. Informe Técnico. TGC Geotecnia S. A de C.V. México D. F.
-  Vásquez-Sánchez, E., Jaime-Palomera, R., (1989). “*Geología de la Cuenca de México*”. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Memorias del Simposio sobre tópicos Geológicos de la Cuenca del Valle de México, pp. 1-24.
-  Valencia Romero, U., (2012). “*Estudio de resistividad electromagnética en zonas geotérmicas del Cinturón Volcánico Mexicano, área Los Humeros* “. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, México D.F.
-  Ward, S.H. and Hohmann, G. W., (1988). “*Electromagnetic theory for geophysical application*”. En Nabighian (Ed.). “*Electromagnetic methods applied to geophysics*”. Vol.1, Ch. 4.
-  Ward, S.H. and Hohmann, G. W., (1989). “*Electromagnetic theory for geophysical application*”. En Electromagnetic “*Methods in Applied Geophysics, Investigations in Geophysics. Society of Explorations Geophysicists*”, Tulsa, OK, USA. Vol. 1: pp. 131-511.



-  Wilson, B. W., Hernandez, M. J. P., Meave, T. G., (1965). “*Un banco calizo del cretácico, oriente del Estado de Querétaro, México*”. Sociedad Geológica Mexicana, Boletín. 18; No.1:pp. 1-10.

-  Zúñiga Arista A. R. (2006). “*La capa dura y su extensión a Las Lomas en el marco geológico del SW se la Cuenca de México*”. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, México D.F.