

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**COMPARACIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS EN LA
PORCIÓN NORESTE DE ESTACIÓN TERRAZAS, CHIHUAHUA.**

POR:

ING. IVÁN OSWALDO HERNÁNDEZ LEDEZMA

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA**

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

JUNIO 2021



"Comparación de métodos geofísicos aplicados en la porción Noreste de Estación Terrazas, Chihuahua". Tesis presentada por Ivan Oswaldo Hernandez Ledezma como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Hidrología Subterránea ha sido aprobada y aceptada por:

M.I. Javier González Cantú
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Secretario de Investigación y Posgrado

M.I. Miguel Angel González Nuñez
Coordinador Académico

M.A. Blas Eduardo Magallanes Ramírez
Director de Tesis

JUNIO 2021

Comité:

M.I. Blas Eduardo Magallanes Ramírez

Dr. Alejandro Villalobos Aragón

M.I. Rodrigo De la Garza Aguilar

M.I. Aracely López Terrazas

© Derechos Reservados

Iván Oswaldo Hernández Ledezma
FACULTAD DE INGENIERIA

Circuito No. 1, Campus Universitario
Chihuahua, Chih., Mexico. C.P. 31125

Tel. (614) 442-95-00

www.fing.uach.mx

JUNIO DE 2021



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Chihuahua, Chih., a 19 de mayo de 2021

**ING. IVÁN OSWALDO HERNÁNDEZ LEDEZMA
PRESENTE. -**

En atención a su solicitud relativa al traba de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Hidrología Subterránea, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta dirección, propuesto y dirigido por el M. I. Blas Eduardo Magallanes Ramírez para que lo desarrolle como tesis con el título "**Comparación de métodos geofísicos aplicados en la porción noreste de Estación Terrazas, Chihuahua**".

ÍNDICE DE CONTENIDO

- Dedicatoria
- Agradecimientos
- Índice de Contenido
- 1. Generalidades
- 2. Marco Físico
- 3. Geofísica
- 4. Metodología
- 5. Discusión de Resultados
- 6. Comparación de métodos
- 7. Conclusiones y Recomendaciones
- 8. Referencias
- 9. Anexos

Solicitud a Usted tomar nota de que el titulo del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

ATENTAMENTE

"naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

EL SECRETARIO DE INVESTIGACION

Y POSGRADO

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.



DIRECCIÓN

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
Circuito No.1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125
Tel. (614) 442-95-00
www.fing.uach.mx

Dedicatoria

*A mis hijos Ximena y Elías, a mi esposa Estephanie
y por último a mis Padres y Hermana.*

Agradecimientos

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua, por el apoyo que se brindó para poder realizar esta investigación y por la formación académica a lo largo de este tiempo.

Al director de esta tesis, el M.I. Blas Magallanes por el gran apoyo para el desarrollo de esta tesis, por ser un gran mentor y amigo.

A mis sinodales, el Dr. Alejandro Villalobos Aragón y el M.I. Rodrigo De la Garza Aguilar por ser gran motivación y promover la educación de calidad. A la M.I. Aracely López quien fue un gran apoyo en este trabajo de investigación.

También agradecer a cada uno de los alumnos de ingeniería Geológica e ingeniería en Minas, que me apoyaron en los trabajos de campo, principalmente a los alumnos de la brigada de Riesgos Geológicos.

Finalmente, a mi familia por el apoyo incondicional que me brindaron, en especial a mi esposa la Ing. Estephania Gamboa Pantoja, quien fue motivación junto con mis hijos e hicieron posible esto, el resultado es totalmente gracias a ustedes.



Índice de Contenido

Agradecimientos	v
Índice de Contenido	vi
Índice de Figuras.....	x
1. GENERALIDADES	13
1.1 Introducción	13
1.2 Justificación	14
1.3 Objetivos	14
1.4 Antecedentes	15
2. MARCO FÍSICO	19
2.1 Localización y vías de acceso	19
2.2 Fisiografía	20
2.3 Hidrografía.....	20
2.4 Clima.....	21
2.5 Edafología	22
2.6 Geomorfología	24
2.7 Geología.....	24
2.7.2. Secciones geológicas	28
2.8 Hidrogeología	28
3. GEOFÍSICA.....	31
3.1 Clasificación de métodos	31
3.2 Métodos Eléctricos.....	32
3.3 Método Magnético	38



3.4 Métodos Sísmicos	54
4. METODOLOGIA	59
4.1. Selección del área de estudio	59
4.2 Análisis Geológico de la zona de estudio.	60
4.3 Estudios geofísicos previos.....	60
4.3.1. Método eléctrico	60
4.3.2. Método magnético	61
4.4.1. Obtención de datos por método eléctrico.....	63
4.4.1.1. Procesado de datos eléctricos.....	64
4.4.2. Obtención de datos por método sísmico	65
4.4.2.1. Procesado de datos sísmicos	66
4.4.3. Obtención de datos por método magnético.....	67
4.4.3.1. Procesado de datos magnéticos.....	67
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	68
5.1 Método Eléctrico.....	68
5.1.1 Arreglo Schlumberger.....	68
5.1.2 Secciones Geoeléctricas del arreglo Schlumberger.	91
5.1.3. Unidades Geoeléctricas.....	95
5.2.1 Arreglo Wenner	95
5.2.2. Secciones Geoeléctricas en arreglo Wenner	107
5.3. Método Sísmico de Refracción.	110
5.3.1. Secciones sísmicas	119



5.3.2. Unidades sísmicas	120
5.4. Método magnético	120
5.4.1. Primera y Segunda Derivada	124
5.4.2. Señal analítica	125
5.3.3. Derivada de Tilt	126
5.4.4. Continuaciones Ascendentes	127
5.4.4. Deconvulación Euler.....	128
6. COMPARACION DE METODOS.	130
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	136
8. REFERENCIAS.....	139
9. ANEXOS	142

Índice de Tablas

Tabla 1. Métodos geofísicos con las propiedades que estudian (Del Valle T., 1986).....	31
Tabla 2. Resistividades para diversos materiales (Villalobos A., 2004).	35
Tabla 3. Susceptibilidades magnéticas de rocas y minerales según Reynolds J., 1997. Los valores que encierras en paréntesis la letra “d” corresponden a un material diamagnético, la letra “o” para mineral.	43
Tabla 4. Índices estructurales y modelos geológico recomendados por “Northwest Geophysical Associates” (Reséndiz, P., 2015).	52
Tabla 5. Velocidades de ondas primarias (Reynolds J.M., 1997).....	58
Tabla 6. Coordenadas de los sondeos reinterpretados proporcionados por la CONAGUA.	68
Tabla 7. Coordenadas de los SEV’s realizados en la zona de estudio.	68
Tabla 8. Interpretación del SEV 1:	70
Tabla 9. Interpretación del SEV 2:	71



Tabla 10. Interpretación del SEV 3:	72
Tabla 11. Interpretación de SEV 4:.....	73
Tabla 12. Interpretación del SEV 5:	74
Tabla 13. Interpretación del SEV 6:	75
Tabla 14. Interpretación del SEV 7:	76
Tabla 15. Interpretación del SEV 8:	77
Tabla 16. Interpretación del SEV 9:	78
Tabla 17. Interpretación del SEV 10:	79
Tabla 18. Interpretación del SEV 11:	80
Tabla 19. Interpretación del SEV 12:	81
Tabla 20. Interpretación del SEV 13:	82
Tabla 21. Interpretación del SEV 14:	83
Tabla 22. Interpretación del SEV 15:	84
Tabla 23. Interpretación del SEV 16:	85
Tabla 24. Interpretación del SEV 1 CONAGUA:	86
Tabla 25. Interpretación del SEV 3 CONAGUA:	87
Tabla 26. Interpretación del SEV 1103 CONAGUA:	88
Tabla 27. Interpretación del SEV 1104 CONAGUA:	89
Tabla 28. Interpretación del SEV 1105 CONAGUA:	90
Tabla 29. Coordenadas de los SEV's en arreglo Wenner:.....	96
Tabla 30. Interpretación del SEV 1 en arreglo Wenner.....	97
Tabla 31. Interpretación del SEV 2 en arreglo Wenner.....	98
Tabla 32. Interpretación del SEV 3 en arreglo Wenner.....	99
Tabla 33. Interpretación del SEV 4 en arreglo Wenner.....	100
Tabla 34. Interpretación del SEV 5 en arreglo Wenner.....	101
Tabla 35. Interpretación del SEV 6 en arreglo Wenner.....	102
Tabla 36. Interpretación del SEV 7 en arreglo Wenner.....	103
Tabla 37. Interpretación del SEV 8 en arreglo Wenner.....	104
Tabla 38. Interpretación del SEV 9 en arreglo Wenner.....	105
Tabla 39. Interpretación del SEV 9 en arreglo Wenner.....	106



Tabla 40. Coordenadas de los sondeos sísmicos de refracción:	110
Tabla 41. Rango de velocidades para la interpretación de sondeos sísmicos.	116
Tabla 42. Unidades generadas a partir de los resultados de resistividad y velocidad P.	130

Índice de Figuras

Figura 1. Localización y vías de acceso a la zona de estudio.	20
Figura 2. Hidrografía en la zona de estudio.	21
Figura 3. Mapa de Climas presentes en la zona de estudio extraído del shape de INEGI.	22
Figura 4. Mapa de unidades edafológicas presentes en la zona de estudio según el shape de INEGI.	24
Figura 5. Geología de la zona de estudio.	27
Figura 6. Secciones geológica extraída de la carta geológica minera Sacramento H13-C56 del Servicio Geológico Mexicano con escala 1: 50,000.	28
Figura 7. Mapa de unidades hidrogeológicas (CONAGUA).	30
Figura 8.- Ley de ohm.	32
Figura 9. Medidas de resistencia aparente con espaciado e incremento de corriente del electrodo que conduce a las profundidades de penetración aumentadas de la corriente inyectada. Los resultados son compilados en la curva de resistividad (Kirsh, R., 2009).	34
Figura 10. Arreglo Eléctrico Tipo Wenner.	37
Figura 11. Arreglo Eléctrico Tipo Schlumberguer.	37
Figura 12. Comparación del método.	38
Figura 13. Definición y representación geométrica de las componentes del vector de campo geomagnético inferido a un punto P.	39
Figura 14. La variación de la inclinación del campo magnético total con latitud basada en una aproximación de un dipolo simple del campo geomagnético.	44
Figura 15. Inclinación (líneas continuas y valor en grados) e intensidad (línea punteada y valores en cientos de nT) del campo magnético de la Tierra. (Milsom, J., 2003).	45
Figura 16. Variación típica del campo magnético de un "día tranquilo" en latitudes medias.	47
Figura 17. Principio del magnetómetro de protones.	53



Figura 18. Deformaciones elásticas y movimientos de partículas en el suelo asociados con el paso de las ondas corporales. (a) Onda P. (b) Onda S.	56
Figura 19. Sección Geoeléctrica 08 realizada por CONAGUA en 2011.....	61
Figura 20. Carta Magnética Chihuahua H13-10 del SGM, georeferenciada para la ubicación del área del estudio.	62
Figura 21. Carta Magnética Sacramento H13-C56 del SGM, georeferenciada para la ubicación del área del estudio.	63
Figura 22. Equipos de resistividad propiedad de la Facultad de Ingeniería, los cuales fueron utilizados para obtener lecturas in situ.....	64
Figura 23. Pantalla de bienvenida del software WinSEV 6.4.....	65
Figura 25. Sismógrafo WS-3000 de Geometrics.....	66
Figura 26. Magnetómetro de protón modelo G-856AX de GEOMETRICS.....	67
Figura 27. Mapa de localización de SEV´s.....	69
Figura 28. Representación gráfica de las unidades geoeléctricas del SEV 1.....	70
Figura 29. Representación gráfica de las unidades geoeléctricas del SEV 2.....	71
Figura 30. Representación gráfica de las unidades geoeléctricas del SEV 3.....	72
Figura 31. Representación gráfica de las unidades geoeléctricas del SEV 4.....	73
Figura 32. Representación gráfica de las unidades geoeléctricas del SEV 5.....	74
Figura 33. Representación gráfica de las unidades geoeléctricas del SEV 6.....	75
Figura 34. Representación gráfica de las unidades geoeléctricas del SEV 7.....	76
Figura 35. Representación gráfica de las unidades geoeléctricas del SEV 8.....	77
Figura 36. Representación gráfica de las unidades geoeléctricas del SEV 9.....	78
Figura 37. Representación gráfica de las unidades geoeléctricas del SEV 10.....	79
Figura 38. Representación gráfica de las unidades geoeléctricas del SEV 11.....	80
Figura 39. Representación gráfica de las unidades geoeléctricas del SEV 12.....	81
Figura 40. Representación gráfica de las unidades geoeléctricas del SEV 13.....	82
Figura 41. Representación gráfica de las unidades geoeléctricas del SEV 14.....	83
Figura 42. Representación gráfica de las unidades geoeléctricas del SEV 15.....	84
Figura 43. Representación gráfica de las unidades geoeléctricas del SEV 16.....	85
Figura 44. Representación gráfica de las unidades geoeléctricas del SEV 1 CONAGUA.....	86



Figura 45. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 3 CONAGUA.....	87
Figura 46. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 1103 CONAGUA.....	88
Figura 47. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 1104 CONAGUA.....	89
Figura 48. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 1105 CONAGUA.....	90
Figura 49. Localización de secciones geoelectricas sondeos eléctricos en arreglo Schlumberguer...	92
Figura 51. Sección geoelectrica 1 de los SEV´s en arreglo Schlumberguer.....	93
Figura 52. Sección geoelectrica 2 de los SEV´s en arreglo Schlumberguer.....	94
Figura 54. Localización de sondeos eléctricos en arreglo Wenner.....	96
Figura 55. Unidades geoelectricas inferidas mediante el uso del arreglo Wenner.	97
Figura 56. Unidades geoelectricas inferidas mediante el uso del arreglo Wenner.	98
Figura 57. Unidades geoelectricas inferidas mediante el uso del arreglo Wenner.	99
Figura 58. Unidades geoelectricas inferidas mediante el uso del arreglo Wenner.	100
Figura 59. Unidades geoelectricas inferidas mediante el uso del arreglo Wenner.	101
Figura 60. Unidades geoelectricas inferidas mediante el uso del arreglo Wenner.	102
Figura 61. Unidades geoelectricas inferidas mediante el uso del arreglo Wenner.	103
Figura 62. Unidades geoelectricas inferidas mediante el uso del arreglo Wenner.	104
Figura 63. Unidades geoelectricas inferidas mediante el uso del arreglo Wenner.	105
Figura 64. Unidades geoelectricas inferidas mediante el uso del arreglo Wenner.	106
Figura 65. Secciones geoelectricas de los SEV´s en arreglo Wenner.....	108
Figura 66. Sección geoelectrica 1W de los SEV´s en arreglo Wenner.....	109
Figura 67. Sección geoelectrica 2W de los SEV´s en arreglo Wenner.....	109
Figura 68. Localización de sondeos sísmicos.	111
Figura 69. Mapa de localización de sondeos sísmicos sobre el mapa geológico de la zona.	112
Figura 70. Localización de secciones sísmicas.....	113
Figura 71.-Secciones sísmicas con velocidades de ondas p.	114
Figura 72. Secciones sísmicas con velocidades de ondas p.....	115
Figura 73. Secciones sísmicas 1 y 2 con materiales.	117
Figura 74. Secciones sísmicas 3 y 4 con materiales, y sondeo sísmico 5.....	118
Figura 75. Localización de puntos magnéticos en la zona de estudio.	121
Figura 76. Mapa magnético de campo total.....	122



Figura 77. Mapa de campo total con reducción al polo.....	123
Figura 78. Mapa de anomalía residual.....	124
Figura 79. Mapa magnético de la Primera Derivada vertical	125
Figura 80. Mapa magnético de la Segunda Derivada vertical	125
Figura 81. Mapa de Señal Analítica.....	126
Figura 82. Mapa de la Derivada de Tilt.	127
Figura 83. Continuaciones ascendentes resultado de la aplicación del mapa de reducción al polo.	128
Figura 84. Resultados de la aplicación de la Decomvolucion Euler.....	129
Figura 85. Balasto presente en la zona de estudio.	133
Figura 86. Secciones geoelectricas sobre el mapa magnético con reducción al polo.....	135
Figura 87. Mapa de continuación ascendente 200m con secciones geoelectricas.....	135
Figura 88. Mapa general geofísico de la porción noreste de Estación Terrazas, Chihuahua.	138



1. GENERALIDADES

1.1 Introducción

La prospección geofísica se define como la ciencia y técnica que, a partir de fenómenos físicos, naturales o provocados, trata de conocer la distribución de los materiales en el subsuelo y sus propiedades (Custodio E., y Llamas M., 1976).

El área de estudio, conocida como Estación Terrazas, se encuentra al norte de Chihuahua capital, en esta zona se realizará una comparación de métodos geofísicos para caracterizar el subsuelo con los métodos Eléctrico, Magnético y Sísmico, interpretar la información y realizar dicha comparación de las interpretaciones dado como resultado cuales métodos se asemejan o cuales son los que mejor se adaptan a ciertas condiciones geológicas.

Estación Terrazas es un distrito minero con un yacimiento de cobre-zinc el cual se ha explotado desde 1800, en 1900 la compañía Río Tinto Copper extrajo mineral de alto grado, la mina y la fundición estuvieron en operación hasta 1915. La empresa Republic Steel realizó exploraciones durante los últimos años de 1920 enfocándose al potencial de sulfuros. Entre 1953 y 1957 American Smelting and Refining Company realizó exploraciones levantamiento geológico, muestreo en afloramientos, obras mineras y barrenación a diamante, obteniendo leyes de 0.42% a 1.10% de Cu. La compañía minera Frisco llevó a cabo estudios de polarización inducida, resistividad y barrenación a diamante sin conocer sus resultados (SGM, 2018).

De 1992 a 1993 la compañía minera Namiquipa realizó exploraciones obteniendo un potencial de 31 millones de toneladas de mineral de óxido de Cu con leyes de 0.67%. De 1994 a 1998 se llevaron a cabo exploraciones por las compañías Kennecott, Swannell Minerals Corp. y Northcoast obteniendo resultados poco alentadores. Para el año 2000, la compañía Summo Minerals desarrollo estudios geológicos, metalúrgicos y de prefactibilidad en donde define la viabilidad financiera del proyecto de cobre-zinc con los precios de \$0.90 por libra de cobre y de \$0.45 por el zinc. Del 2003 a 2008 Constellation Copper Corporation inicio barrenación adicional y pruebas metalúrgicas para definir la viabilidad del proyecto y estar en condiciones de construcción de mina y planta. En 2010 Andromeda Resources adquiere la propiedad y posteriormente pasa a manos de War Eagle Mining Company Inc., sin conocer resultados de las exploraciones que se han realizado. El Servicio Geológico



Mexicano (antes Consejo de Recursos Minerales), en el año 1998 realiza la cartografía geológica minera geoquímica y geofísica de las cartas Chihuahua a escala 1: 250,000 y en el año 2005 la carta Sacramento a escala 1: 50,000, y en el 2013, el SGM realiza bajo el Programa de Apoyo a la Exploración Minera, trabajos de excavaciones de frentes en callejones en calizas marmolizadas en el Predio El Quiote, municipio de Chihuahua (SGM, 2018).

La zona de estudio se encuentra dentro del acuífero El Sauz-Encinillas, el cual abastece de agua a una porción del estado de Chihuahua, teniendo varios estudios por la importancia que tiene este.

La Comisión Nacional del Agua ha realizado varios estudios hidrogeológicos en los cuales se han investigado las condiciones del acuífero, tanto disponibilidad de agua como estudios de evaluación de las condiciones del acuífero, realizando geofísica hidrogeoquímica, hidrología superficial, piezometrías, etc., toda la información necesaria para poder caracterizar el acuífero.

1.2 Justificación

La comparación de métodos geofísicos se realizará con la intención de calibrar los resultados de los diferentes métodos geofísicos utilizados. De manera, que se adapten estos, a las propiedades específicas de la estratigrafía de la zona de estudio. En resumidas cuentas, se busca la implementación de métodos geofísicos, que de manera conjunta definan las unidades hidrogeológicas del subsuelo de la zona de estudio.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general:

Integrar y comparar los resultados de diferentes métodos geofísicos aplicados en una misma zona, para obtener conclusiones del mejor comportamiento de cierto método geofísico a propiedades específicas del suelo, que permitan la interpretación de unidades geohidrológicas en el área de estudio.



1.3.2 Objetivos específicos:

- Realizar un levantamiento geofísico con: a) el Método Eléctrico, b) Sísmico y c) Magnético en la zona.
- Obtener datos estratigráficos de los resultados de cada método.
- Comparar los resultados de cada método con datos in situ (perforaciones, cortes geológicos, etc.).
- Caracterizar las unidades hidrogeológicas de la zona de estudio.
- Integrar estos resultados en un análisis para obtener una mayor certeza de los resultados e interpretaciones.

1.4 Antecedentes

Existen varios trabajos previos que han sido realizados en la zona de interés, a continuación, se describirán algunos que pudieron ser recopilados:

Texto guía, carta magnética Chihuahua H13-10, estado de Chihuahua con escala 1: 250,000. Servicio Geológico Mexicano (1998).

El objetivo del Consejo de Recursos Minerales fue realizar un programa de infraestructura Geológico-Minera del cual se lleva a cabo el cubrimiento aeromagnético sistemático de las áreas con mayor potencial minero en el territorio nacional, con el propósito de investigar las condiciones geológicas y estructurales del subsuelo que junto con la información geológico minera existente, nos permita seleccionar áreas prospectivas que conduzcan al descubrimiento de nuevos depósitos minerales.

Dentro de este programa se llevó a cabo el levantamiento aeromagnético de la Carta Chihuahua H13-10, a escala 1: 250,000 con formato cartográfico de INEGI, la cual se ubica en la porción centro occidental del estado de Chihuahua y comprende una superficie de 21,705 Km².

El levantamiento magnético se realizó con avión a una altura de 300 m sobre la superficie del terreno, con líneas de vuelo de rumbo N-S y separación de 1,000 m. Los datos geofísicos se presentan como curvas de contorno de campo magnético total indicando su intensidad con contrastes de color; se indica la interpretación litológica y estructural en la carta y los resultados se explican en el presente texto guía.



Actualización geohidrológica de los acuíferos: Chihuahua-Sacramento, Laguna el Diablo y El sauz-encinillas, estado de Chihuahua, El Sauz-Encinillas, tomo 1. Comisión Nacional del Agua, Dirección general del organismo de cuenca Rio Bravo.

El objetivo del estudio fue actualizar las condiciones hidrogeológicas del acuífero El Sauz-Encinillas, para determinar la disponibilidad de agua subterránea conforme a la NOM-011-CNA-2000.

En este acuífero se censaron un total de 623 aprovechamientos, de los cuales 523 son pozos y 100 son norias. De los pozos, 391 son activos y 132 inactivos y de las norias 30 se encuentran activas mientras 70 son inactivas. De los 523 pozos 29 de ellos son pozos de agua potable pertenecientes a la JCAS o JMAS, y solo 1 se encuentra inactivo.

La extracción total de agua subterránea en el acuífero El Sauz-Encinillas, se cuantificó en 133.0 Mm³, de la cual 105.5 Mm³ se destinan a la actividad agrícola 24.5 Mm³ al uso público urbano y el resto se destina a usos doméstico, abrevadero, industrial y otros.

De las mediciones piezométricas realizadas, se concluye que existen zonas con profundidades someras de alrededor de los 5 y 10 m en la zona centro norte del acuífero y que abarca la mayor extensión del mismo, las menores profundidades corresponden a los alrededores de la Laguna de Encinillas. En el resto del acuífero las profundidades varían generalmente entre 30 y 50 m aproximadamente. En la zona situada en el extremo sur del acuífero, donde se localiza la mayor parte de los pozos de agua potable de la primera etapa del acueducto El Sauz-Chihuahua, se tienen profundidades de la superficie freática superiores a los 80 m.

Con la información piezométrica disponible, se elaboró la configuración de la evolución del nivel estático. En ella se muestra que los valores de abatimiento medio anual varían de 0 a 3 m. Como es normal, los mayores abatimientos se registran en el extremo sur del acuífero, donde se presenta un cono de abatimiento causado por la concentración de pozos que conducen agua potable hacia la ciudad de Chihuahua.

En el acuífero del Sauz-Encinillas el flujo proveniente de las elevaciones que limitan el valle, es convergente en la porción centro norte hacia la zona lagunar que se presenta en la misma, y en la porción sur, es convergente hacia la zona de concentración de pozos de bombeo.



La recarga al acuífero ocurre por la infiltración de agua de lluvia en las elevaciones que bordean el valle, por la infiltración del agua de las corrientes superficiales provenientes de las sierras, en menor proporción por infiltración de agua de lluvia directa sobre el valle y por retorno de riego en la zona agrícola. La descarga ocurre por el bombeo de pozos y por evapotranspiración en la zona de influencia de la región lagunar que se localiza en la porción centro norte del acuífero.

El balance de aguas subterráneas realizado para el acuífero Sauz-Encinillas, permitió obtener para la recarga por infiltración de agua de lluvia un volumen medio anual de 68.2 Mm³. La disponibilidad de agua en el acuífero fue calculada en base a la normatividad establecida por la Comisión Nacional del Agua, resultando un volumen medio anual de 37.42 Mm³ negativo, por lo que no existe disponibilidad de agua subterránea en la zona ya que el volumen concesionado según registros en el REPDA es de 105.615811 Mm³.

Evaluación de las fuentes actuales de abastecimiento a la ciudad de Chihuahua, estudio de factibilidad de fuentes alternas y anteproyectos de infraestructura hidráulica necesaria, tomo 8, capítulo 3, acuífero: el sauz-encinillas. Junta Central de Aguas y Saneamiento, Facultad de Ingeniería, UACH.

Para el acuífero El Sauz-Encinillas y con base en información previa se construyeron 35 secciones geoelectricas con 211 sondeos, cada sección fue reinterpretada usando el programa de cómputo IPI2WIN, además, para verificar la interpretación geofísica se utilizó la información geológica disponible, ya fuera en forma de secciones o del plano geológico base, elaborados en este trabajo, o bien de cortes litológicos de pozos perforados en el acuífero. En general se determinaron cinco unidades geoelectricas características que son:

- 1) Material fino de naturaleza arcillosa de posible origen lacustre, con permeabilidad baja;
- 2) Material aluvial con granulometría fina a media (limos a arenas), con permeabilidad media;
- 3) Material de origen coluvial. Presencia de boleos y gravas en matriz limo-arenosa, con permeabilidad media a alta;
- 4) Rocas alteradas o fracturadas, posible conglomerado basal, cuya permeabilidad depende de las condiciones estructurales, y



5) Rocas cristalinas inalteradas, con permeabilidad nula.

Como parte de este estudio se llevaron a cabo 11 sondeos electromagnéticos, con separaciones del orden de los cinco km, mediante la aplicación de la técnica TEM o TDEM, que permite obtener información de la respuesta eléctrica del subsuelo para determinar la electrostratigrafía y poder localizar zonas geoeléctricas que puedan estar relacionadas con la zona saturada. Para la zona de estudio, se definieron básicamente tres Unidades Geoeléctricas o intervalos con algunas subdivisiones, las cuales se describen a continuación: U1a) Materiales sedimentarios de cobertura (limos y arcillas) y en algunos sectores toba. U1b) Material de origen volcánico con alto grado de fracturamiento y alteración y permeabilidad variable. U2a) Materiales granulares finos (limos y arcillas), posiblemente presenten saturación con agua salada en zonas menores de 4 ohm-m, considerándose impermeables. U2b) Materiales granulares medianos a gruesos (arenas, gravas, conglomerados y calizas lacustre), y/o rocas ígneas (basalto, toba riolítica, andesita), se considera de buena permeabilidad y potencial acuífero y U3) Rocas ígneas compactas de permeabilidad variable y/o Areniscas calcáreas, lutitas y/o calizas.



2. MARCO FÍSICO

2.1 Localización y vías de acceso

El área de estudio se localiza al noreste del poblado de Estación Terrazas, Chihuahua, México, dentro del acuífero El Sauz – Encinillas, comprendiendo un área aproximada de 23.84 km², y está localizada entre las coordenadas UTM 378452 N, 3206858 E y 384264 N, 3202757 E.

La zona de Estación Terrazas es un antiguo distrito minero de donde se explotaron cuerpos de skarn con mineralización de Au, Ag, Pb y Cu emplazados en la zona de contacto de la Caliza Aurora con un intrusivo granodiorítico. Este distrito produjo más de 150,000 toneladas de mineral de las cuales el 5% fue Cu. Actualmente su actividad se restringe al gambusinaje, sin embargo, se considera que tiene potencial de exploración en los bordes del intrusivo granodiorítico. (SGM)

El acceso principal se realiza por la carretera Chihuahua-Ciudad Juárez (Figura 1). La ruta de acceso más sencilla se realiza en automóvil por la carretera federal #45 Chihuahua-Villa Ahumada, en el kilómetro 39 aproximadamente, se gira a la derecha por el camino que lleva a la localidad de Estación Terrazas, pasando dicha localidad, se sigue la terracería con rumbo al Este, por aproximadamente 200 metros.

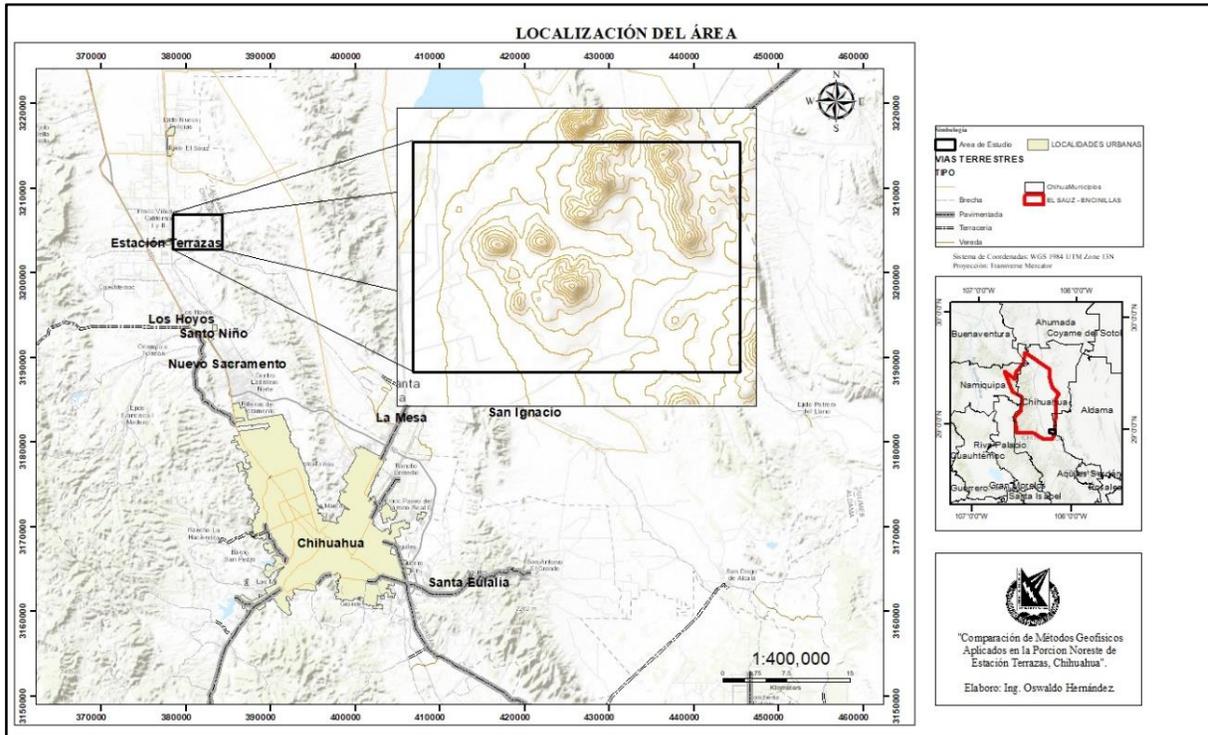


Figura 1. Localización y vías de acceso a la zona de estudio.

2.2 Fisiografía

El área de estudio se encuentra dentro de la Provincia Fisiográfica de Sierras y Llanuras del Norte, Occidental, esta provincia árida y semiárida se extiende desde el suroeste de los Estados Unidos dominando rocas volcánicas ácidas en el oeste (zona próxima a la Sierra Madre Occidental) (INEGI, 2003). Perteneciendo a la subprovincia del Bolsón de Mapimí, con un sistema de toposformas que van de llanura aluvial a sierra escarpada.

2.3 Hidrografía

La zona de estudio se ubica dentro de la Región Hidrológica No. 34 “Cuencas Cerradas del Norte”, subcuenca Laguna de Encinillas (Figura 2), en su mayor extensión, en la parte sureste de la misma se adentra en la Región Hidrológica No. 24 “Bravo Conchos”, subcuenca Sacramento. Las corrientes que se tiene son intermitentes ya que solo conducen agua en épocas de lluvia. Al noroeste de la zona se tiene el arroyo El Sauz, y en la porción sureste el arroyo el Mimbres.

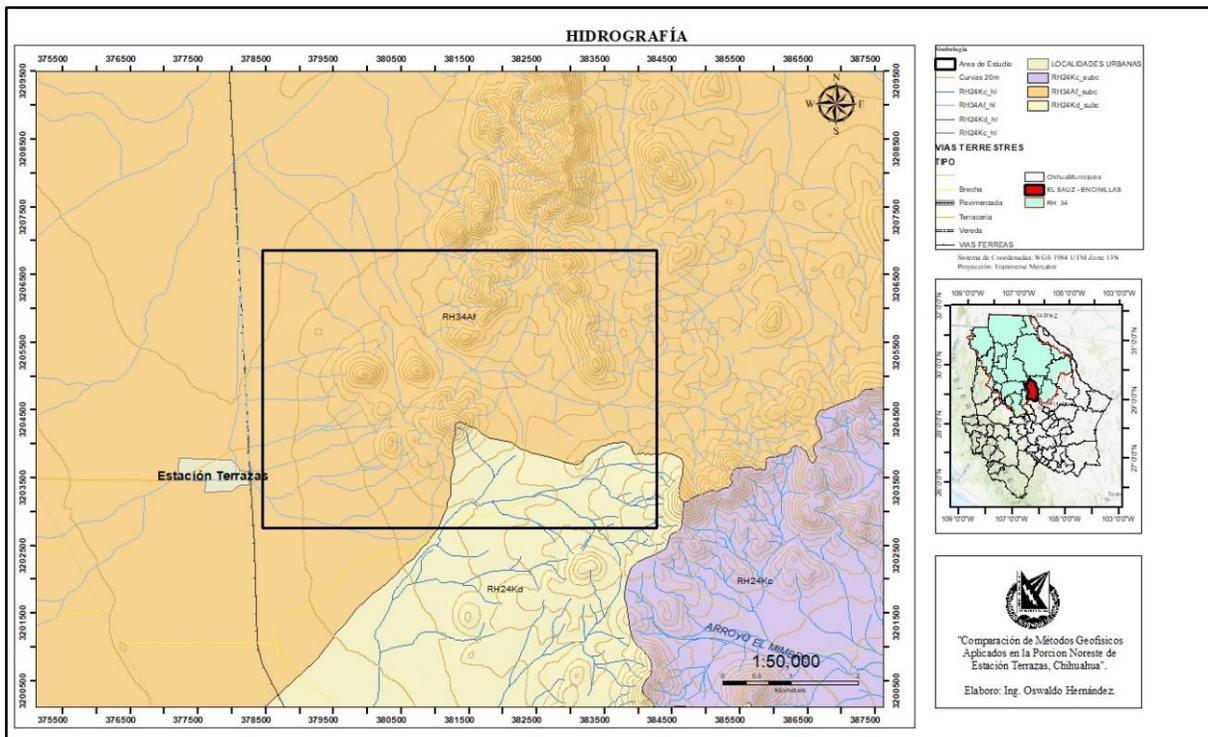


Figura 2. Hidrografía en la zona de estudio.

2.4 Clima

Según la clasificación de Köppen modificada por Enrique García, dentro de la zona de estudio existen dos diferentes tipos de climas BS0kw y BS0kw(w), que son tipos seco templado (CONAGUA, 2015), a continuación, se presenta la descripción de cada uno de ellos (Figura 3):

BS0kw. - Seco templado. Clima presente en la zona norte, así como en la parte central del área del acuífero, es el clima estepario más seco dentro de este grupo, templado, con verano cálido, temperatura media anual entre 12 y 18°C, de la del mes más frío entre -3 y 18°C y la del mes más caliente mayor a 18°C. El porcentaje de precipitación invernal oscila entre 5 y 10.2 del total anual, verano cálido. El régimen de lluvias de verano es por lo menos diez veces mayor la cantidad de lluvia en el mes más húmedo que en el más seco del año (CONAGUA, 2015).



BS0kw (w). - Seco templado. Abarca parte de la porción sureste del acuífero, es el clima estepario más seco, templado con lluvias en verano, el porcentaje de precipitación invernal es menor de 5%, es decir, presenta sequía en esta época del año, verano cálido. Temperatura media anual entre 12 y 18°C, del mes más frío entre -3 y 18°C y la del mes más cálido mayor a 18°C. El régimen de lluvias de verano es por lo menos diez veces mayor la cantidad de lluvia en el mes más húmedo que en el más seco del año (CONAGUA, 2015).

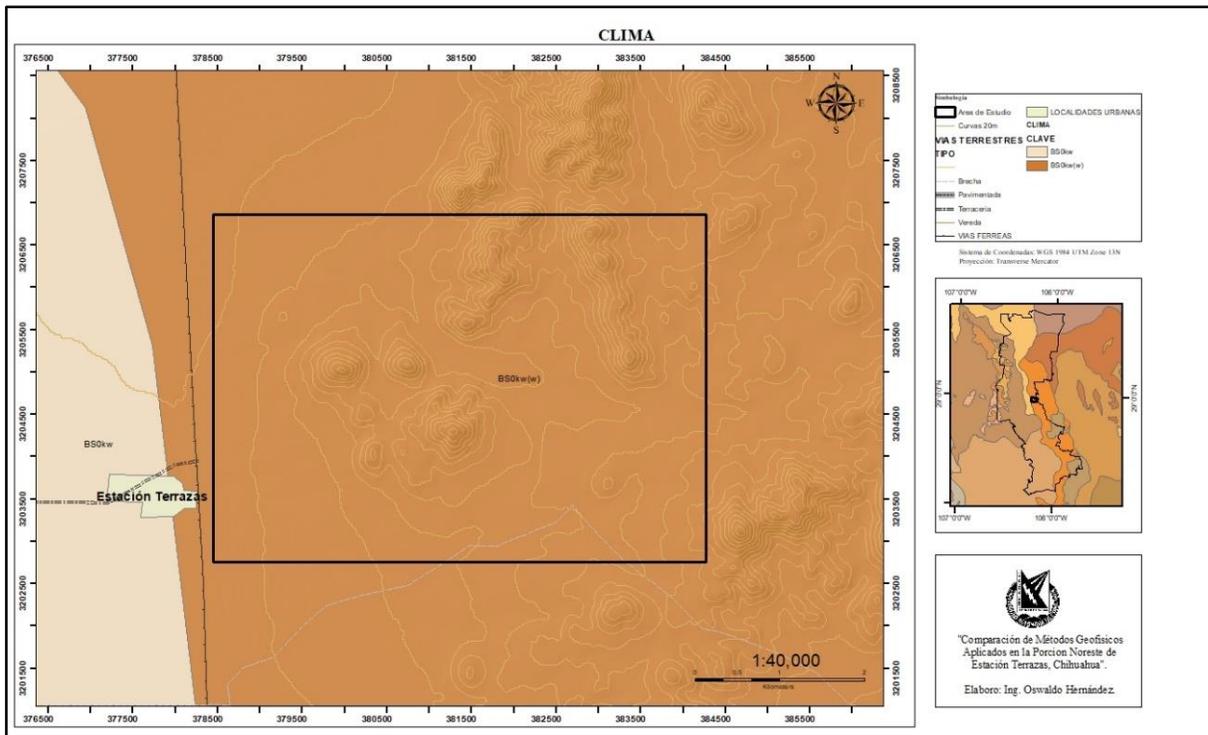


Figura 3. Mapa de Climas presentes en la zona de estudio extraído del shape de INEGI.

2.5 Edafología

A continuación, así como en la Figura 4, se presenta la información edafológica de la zona de estudio.

Regosol. Del griego, *reghos*: manto, cobija o capa de material que cubre la roca, su símbolo es R. Este suelo se puede observar alrededor del valle, justo donde termina el suelo litosol, además de pequeñas porciones hacia el oeste del acuífero. Suelos ubicados en diversos tipos de clima, vegetación y relieve. Son poco desarrollados y presentan capas muy



diferentes entre sí, son de color claro y pobres en materia orgánica con mucha similitud a la roca que los genera. Son poco profundos, su fertilidad es variable y su productividad está condicionada a la pedregosidad y profundidad que presentan (INEGI, 2004.)

Xerosol. Del griego, *xeros*: seco. Literalmente, suelo seco. Característico de zonas áridas y semiáridas, su símbolo es X, su vegetación natural es de matorral y pastizal, es uno de los suelos más frecuentemente encontrados en el territorio. Dentro del acuífero se distribuye principalmente en los alrededores del valle, concentrándose hacia los extremos sur y norte. Tienen una capa superficial de color claro debido al bajo contenido de material orgánico, puede existir un subsuelo rico en arcillas subyaciendo esta capa, generalmente presentan aglomeraciones de cal, cristales de yeso o caliche con algún grado de dureza. Su rendimiento agrícola se encuentra en función de la disponibilidad de agua, tienen baja susceptibilidad a la erosión la cual se incrementa conforme aumenta la inclinación del relieve, su vegetación natural es el pastizal y matorral (INEGI, 2004).

2.5.1 Subunidades de suelos

Háplico. Viene del griego, *haplos*: simple. Suelos que no presentan características de otras subunidades existentes en ciertos tipos de suelo. Unidades de suelo: Castañozem, Chernozem, Feozem, Xerosol y Yermosol (INEGI, 2004).

Eútrico. Proviene del latín, *eu*: bueno. Su símbolo es e. Suelos con pH ligeramente ácidos con tendencia a alcalinos, con buen grado de fertilidad, se observa en las siguientes unidades: Cambisol, Fluvisol, Histosol, Nitrosdol, Planosol y Regosol (INEGI, 2004).

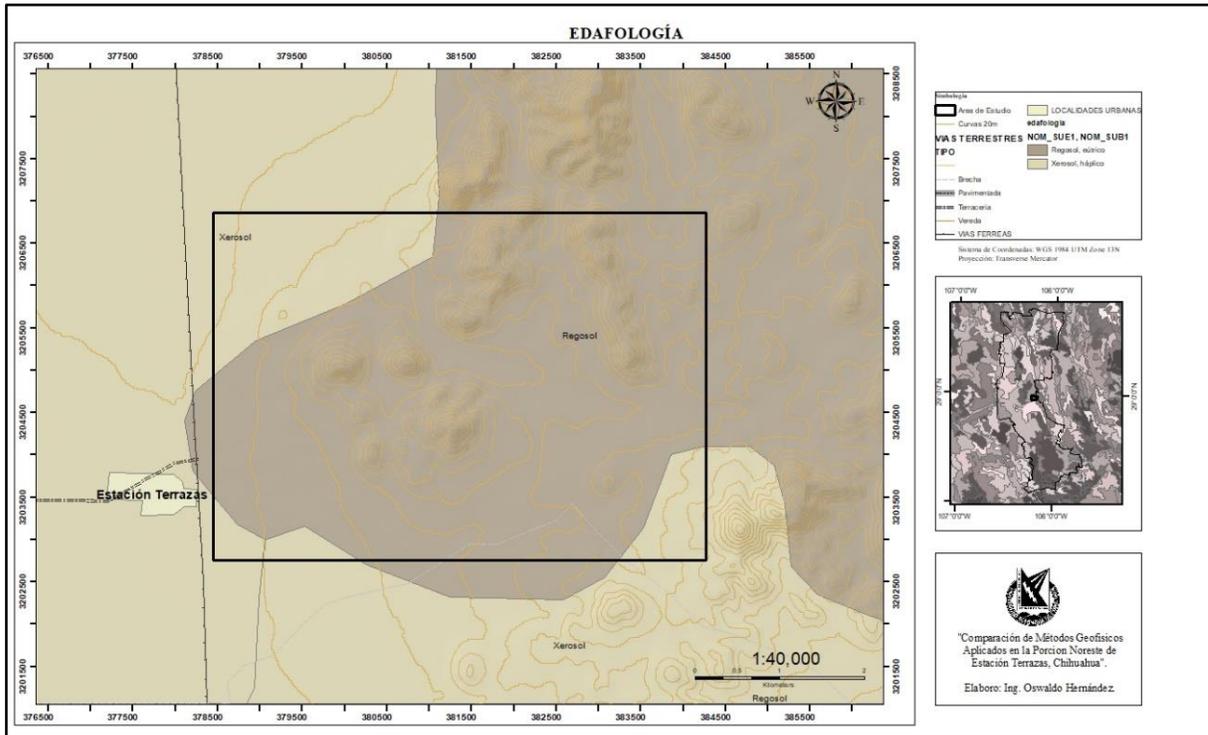


Figura 4. Mapa de unidades edafológicas presentes en la zona de estudio según el shape de INEGI.

2.6 Geomorfología

La zona de estudio se localiza en la porción sureste del acuífero El Sauz-Encinillas, en el área se tiene un relieve variado ya que se cuenta con una sierra que tiene una elevación aproximada de 250 metros con una orientación NW. La litología presente en la zona de estudio consiste de calizas cretácicas y en porciones se cuenta con rocas volcánicas terciarias. En la zona de valle se tiene una llanura aluvial compuesta por materiales producto de la erosión de las sierras circundantes, en la cercanía a las mismas de naturaleza coluvial y conforme se aleja de las elevaciones de naturaleza aluvial.

2.7 Geología

A continuación, se presenta una breve descripción elaborada por el SGM de las unidades geológicas presentes en el área de estudio (Figura 5).

2.7.1 Estratigrafía

Cretácico inferior



Formación Aurora (KiCz) Calizas. Clasificadas como wackstone-packstone, en estratos gruesos a masivos de color gris que intemperiza a gris claro, con bandas de pedernal negro en capas gruesas, en ocasiones con dolomías, así mismo están presentes margas y calizas arcillosas en capas medianas a laminares de color gris azulado que intemperiza gris claro, con abundantes concreciones de pedernal negro. Está expuesta en la porción central y septentrional de la sierra de la Mojina y en el distrito minero Terrazas, justamente en la Sierra El Sauz. Presenta afloramientos poco representativos dentro de la Sierra Nombre de Dios al norte de la ciudad de Chihuahua. El espesor medido en la sierra la Mojina es de aproximadamente 490 m, Ziga (1986) y Hernández (1977) midió 477 m en ese lugar. Fuera del área de trabajo otros autores midieron en la Sierra Azul 576 m; y por último en la Sierra Chaconeña 518 m. El contacto inferior es claro y concordante con la formación La Peña.

El contacto superior está erosionado. De acuerdo a fósiles y estratigrafía, esta unidad abarca del Albiano inferior a la parte media del Albiano medio, se correlaciona con la formación Tamaulipas superior en su base, y subyace a la formación Edwards y parcialmente a la formación Glen Rose. Su ambiente de depósito se llevó a cabo en una plataforma abierta, cerca de procesos arrecifales.

Formación Finlay (KaCz). Richardson en 1904 nominó con el nombre de Finlay a una secuencia de 100 m de espesor, de caliza de color gris en estratos masivos, con esporádicas capas delgadas de arenisca café que afloran al norte de las Montañas Finlay, sin determinar su localidad tipo (Barradas J., 1974). Se distribuye principalmente en el sector noreste, formando parte de los cerros La Chorreadora, así como los cerros que se encuentran al noreste y noroeste del rancho La Nopalera. Otros afloramientos se localizan en el sector noroeste, formando los cerros Santa Elena y Chino, al noreste de Estación Terrazas. El espesor de la formación es variable, se ha reportado en las sierras de Cuchillo Parado con 243 m; Boquillas 200 m; El Bronce 342 m; Las Vacas 256 m; Juárez 155 m y La Mojina 218 m. En subsuelo se han cortado espesores que van desde los 125 m hasta los 350 m (Escamilla H. 1991). De acuerdo con observaciones de campo, en este informe se le estima un espesor mayor a los 300 m al noroeste del cerro La Chorreadora. De acuerdo al contenido faunístico se considera del Albiano inferior-medio. Se correlaciona con la Formación Paila de la



plataforma Coahuila (Torres E. J. A., 1990), y con la parte superior de las formaciones Acatita de la plataforma de Coahuila y Tamaulipas superior del golfo Sabinas y cuenca de Tampico-Misantla (Ziga R. G., 1986). Su depósito se efectuó en ambientes someros con alta energía sobre una plataforma somera, durante una etapa regresiva (Escamilla H. A., 1991).

Cenozoico-Terciario

Riolitas (TpaR). Se incluyen en este término las riolitas bandeadas y no bandeadas del bloque Sacramento definidas por Mauger (1983 C). Afloran en la sierra de Sacramento, que se extiende desde el norte de la Cd. Chihuahua hasta el extremo sur del acuífero El Sauz-Encinillas. Dentro de ésta, se ubican cuatro principales áreas: cerro Cholomo, al norte de cerro Chilicote, cerros Colorados y cerros Nombre de Dios, con una superficie aproximada de 28 km². En cerro Cholomo, la unidad incluye lavas, brechas y depósitos piroclásticos; presentan un color rosa a rojo-naranja, correspondiente a la intensidad de la alteración, lo cual dificulta estimar el porcentaje original de fenocristales. Las riolitas bandeadas del cerro Nombre de Dios son esferulíticas, e intensamente oxidadas en cerro Colorado. La unidad sobre yace en discordancia erosional a calizas del Cretácico Inferior Subyace a andesitas del Paleoceno y tobas riolíticas del Oligoceno discordantemente. Se le asignó una edad del Paleoceno, aunque Mauger (1983 C) las extiende tentativamente hasta el Cretácico Superior.

Rocas Ígneas Intrusivas - Paleoceno

Pórfido riolítico (ToPR). Aflora al oriente de la Sierra El Cuervo, por el arroyo Los Fresnos, hacia el noreste del área de estudio. Presenta un color rosado claro, con textura holocristalina Porfídica, observándose hilos de cuarzo de hasta ocho cm. El espesor no se aprecia, superficialmente aflora de 30 a 40 m. Se presenta intrusionando a las rocas calcáreo-arcillosas de la formación Walnut. Estas rocas no han sido fechadas, pero por su posición y relaciones estratigráficas se le ubica tentativamente en el Terciario (Eoceno).

Granodiorita (ToGd). Se define a esta unidad como una roca plutónica intermedia, constituida esencialmente de feldespatos y de minerales ferromagnesianos. El cuarzo puede estar presente en pequeñas cantidades. Se distribuye únicamente al norte del poblado



2.7.2. Secciones geológicas

La sección geológica que se muestra a continuación (Figura 6) fue extraída de la carta geológica minera Sacramento H13-C56 del Servicio Geológico Mexicano con escala 1: 50,000, las unidades que se observan son las que afloran en la zona de estudio dando una idea de su distribución inferida en la toma de datos estructurales de la zona.

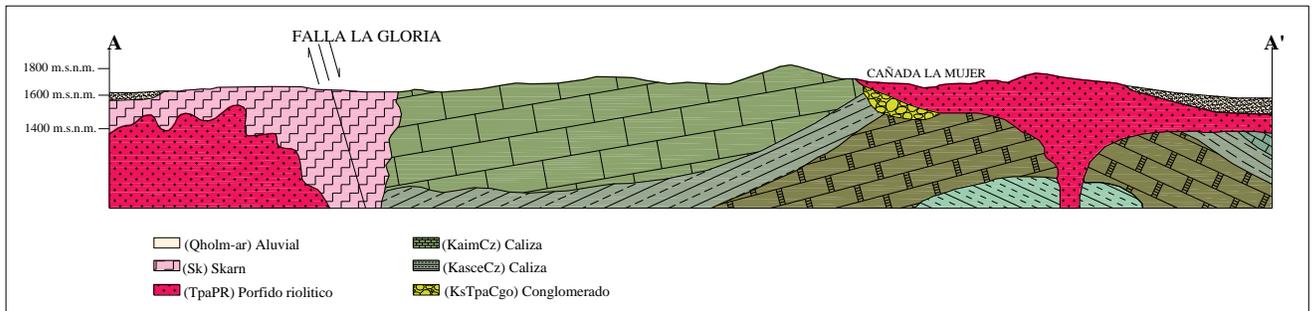


Figura 6. Secciones geológicas extraída de la carta geológica minera Sacramento H13-C56 del Servicio Geológico Mexicano con escala 1: 50,000.

2.8 Hidrogeología

2.8.1 Hidroestratigrafía

La naturaleza, distribución y movimiento del agua subterránea en un sistema geológico depende en gran medida de la litología, estratigrafía y estructura geológica de los depósitos y formaciones. Una vez definido el modelo geológico conceptual, es necesario el análisis hidroestratigráfico de las unidades geológicas que se han identificado. Las características litológicas de las unidades geológicas, así como la interpretación hidrogeomorfológica y de hidrología superficial analizada en el área de estudio constituyeron las bases para definir los materiales en los cuales tiene lugar el movimiento y almacenamiento del agua subterránea; de esta manera fue posible distinguir dos medios porosos principales: el medio granular y el medio fracturado, el primero de ellos es con mucho el más importante y más estudiado pues constituye normalmente el acuífero productor, y el segundo de ellos funciona hidrogeológicamente como área de recarga en las elevaciones y a profundidad participa en el sistema hidráulico subterráneo.

A continuación, se describen las unidades hidroestratigráficas determinadas en el área de estudio, de la más antigua a la más reciente (Figura 7):



Unidad 1.- Comprende las formaciones geológicas de calizas de las formaciones Aurora y Finlay (KiCz, KaCz) que afloran básicamente en algunos sitios al sur del acuífero. Posee porosidad secundaria por fracturamiento y disolución. De tal manera que además de funcionar como zona de recarga, a profundidad, bajo el relleno sedimentario del valle, puede constituir parte importante del acuífero. Esta unidad puede ser considerada de permeabilidad media a alta según su grado de disolución y fracturamiento.

Unidad 2.- En esta unidad se agruparon varias unidades litoestratigráficas, algunas de ellas relativamente poco importantes (Ks-A, TeR y TeA y TeA-B), en cuanto a extensión superficial. Al oeste de la laguna Encinillas se tienen afloramientos eocénicos de andesitas – basaltos. Aproximadamente ocho km al sur se presentan andesitas del cretácico superior. Las riolitas se identifican en superficie hacia el extremo oriental del acuífero, teniendo continuidad hacia el acuífero Laguna de Hormigas y con profundidades de esta formación hasta los 600 m. En general todas ellas presentan un medio poroso fracturado, con intercalaciones en algunas partes de la sección volcánica de materiales granulares, tanto volcánicos como clásticos, que representan zonas de recarga. Su permeabilidad se considera de mediana a baja.

Unidad 3.- Esta unidad comprende las formaciones geológicas (ToTR-Ig, TeTR-Ig y TGr) y se extiende a través de toda la porción occidental del acuífero correspondiendo a las zonas topográficamente más elevadas, constituye un medio poroso fracturado, con un medio granular subordinado, compuesto por sedimentos originados entre las épocas de quietud volcánica. Se consideran zonas potenciales de recarga menor, con una permeabilidad baja, considerando posibles variaciones debido al grado de fracturamiento de las mismas, como es el caso de la porción sur con mayores fallamientos.

Unidad 4.- Esta unidad tiene poca presencia dentro del acuífero, comprende las formaciones geológicas basálticas con cierto grado de fracturamiento por vesicularidad y zonas de brechamiento (ToB) en un área al suroeste del acuífero, con profundidades



relativamente pequeñas del orden de los 150 m y conglomerados polimícticos (TmCgp) ubicados al norte de Sierra Los Fresnos. Constituyen zonas de recarga en un medio poroso fracturado y granular, con permeabilidades medias.

Unidad 5.- Comprende los sedimentos clásticos de relleno de valle (Qal y QCgp) con espesores que llegan a ser de 400 a 500 m en la porción oriental del acuífero, que va disminuyendo conforme se acercan a las zonas que rodean las elevaciones topográficas del área. Constituyen el acuífero productor de la región. Representan un medio poroso granular de porosidad y permeabilidad de mediana a elevada, con pozos de buena producción. Sin embargo, dado el medio sedimentario de depósito es de esperar zonas de baja permeabilidad debido a facies lagunares o de llanura de inundación propias de este medio. A profundidad, el relleno de valle puede involucrar unidades litológicas más antiguas del Terciario Superior.

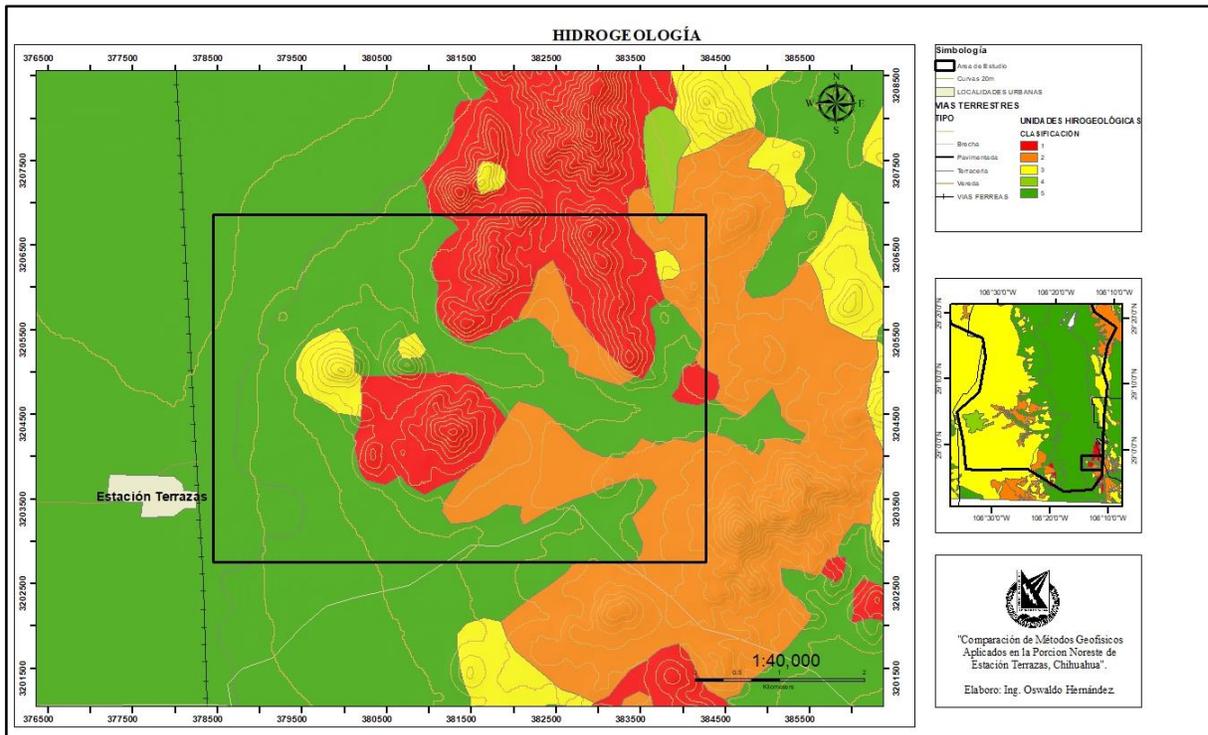


Figura 7. Mapa de unidades hidrogeológicas (CONAGUA).



3. GEOFÍSICA

La geofísica trata de todos los fenómenos físicos de la tierra. Inicialmente, abordo los fenómenos físicos del espacio próximo e incluso exterior, extrapolando las leyes que regulan los fenómenos físicos en la superficie terrestre, pero en una definición estricta, su campo de estudio no debe sobrepasar el del planeta tierra y espacio inmediato (Custodio E. y Llamas M., 1983).

La geofísica aplicada orienta los estudios de investigaciones a una finalidad práctica más o menos próxima y es una derivación de la geofísica, sin que puedan establecer límites precisos entre ambas (Custodio E. y Llamas M., 1983).

La prospección geofísica se define como la ciencia y técnica que, a partir de fenómenos físicos, naturales o provocados, trata de conocer la distribución de los materiales en el subsuelo y sus propiedades (Custodio E. y Llamas M., 1983).

3.1 Clasificación de métodos

En la clasificación tenemos en cuenta el fenómeno empleado y si es natural o creado artificialmente. Los segundos tiene la ventaja de controlar su origen en el tiempo y en el espacio, lo que en general permite un tratamiento matemático e interpretación más precisa.

Según Del Valle T. (1986), las propiedades físicas de las rocas que pueden ser investigadas por métodos geofísicos, y expresadas en conceptos geológicos de interés son mostradas en la Tabla 1, presentada a continuación:

Tabla 1. Métodos geofísicos con las propiedades que estudian (Del Valle T., 1986).

MÉTODO GEOFÍSICO	PROPIEDAD
Gravimétrico	Densidad
Magnético	Susceptibilidad magnética
Sísmico	Elasticidad
Eléctrico	Conductividad eléctrica
Electromagnético	Campos Electromagnéticos
GPR	Electricidad
Geotérmico	Variación de la temperatura
Radiactivo	Variación de la radiactividad



3.2 Métodos Eléctricos

Es la rama de la Geofísica que trata sobre el comportamiento de rocas y sedimentos en relación a la corriente eléctrica. Los métodos geoelectricos más empleados en Hidrogeología se basan en la inyección artificial de una corriente eléctrica (sondeos eléctricos verticales SEV y calicatas ecléticas CE); de menor utilidad son la polarización inducida (PI) y el potencial espontáneo (PE), este último basado en la medición de campos eléctricos naturales (Auge, M. 2008).

El flujo de una corriente eléctrica a través de las rocas o los sedimentos puede explicarse mediante la Ley de Ohm (Figura 8) que establece que la caída de potencial V entre 2 puntos por los que circula una corriente eléctrica de intensidad I , es proporcional a ésta y a la resistencia R que ofrece el medio al pasaje de la corriente (Auge, M. 2008).

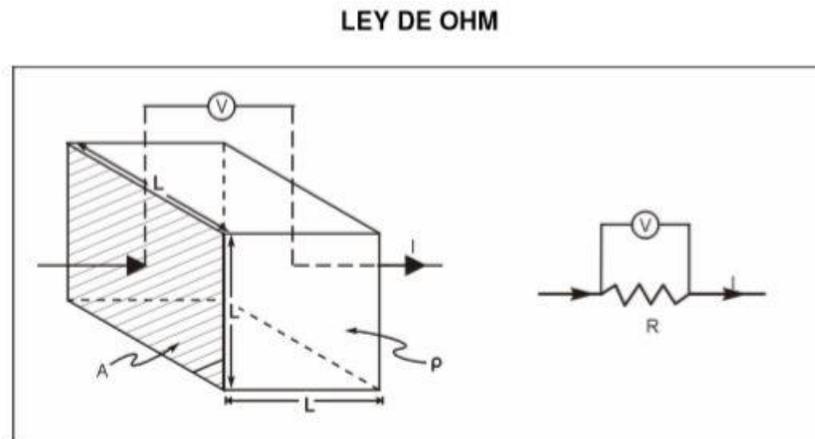


Figura 8.- Ley de ohm.

$$\Delta V = I * R \text{ (1).....Ecuación 1}$$

La resistencia es función de la naturaleza y la geometría del conductor y si esta puede asimilarse a un cilindro de longitud L y sección S :

$$R = \frac{\rho L}{S} \text{ (2).....Ecuación 2}$$

Ecuación en la que representa la naturaleza del conductor y se denomina resistividad. En el caso de la prospección geoelectrica, es la resistividad de las rocas o sedimentos. Reemplazando R de la ecuación (1) por su equivalente de la ecuación (2) si tiene que:



$$\Delta V = I * \frac{\rho * L}{S} \quad (3) \dots\dots\dots \text{Ecuación 3}$$

La resistividad es una propiedad inversa a la conductividad eléctrica y generalmente se expresa en ohm por metro ($\Omega.m$). La resistividad de la mayoría de las rocas y sedimentos secos es elevada, por lo que actúan como semiconductores, o conductores de baja capacidad. Este comportamiento cambia significativamente cuando las fisuras o los poros están ocupados por agua, lo que genera una disminución de la resistividad, o lo que es lo mismo en aumento en la capacidad de conducción de la corriente eléctrica. Además del grado de saturación también incide en la resistividad del medio, el contenido salino del agua; a mayor salinidad, menor resistividad y viceversa. Los contrastes en las resistividades son los que permiten aplicar exitosamente los métodos de prospección geoelectrica mediante la inyección de corrientes continuas (Auge, M. 2008).

3.2.1 Resistividad aparente:

La resistividad aparente es la variable experimental básica en todos los estudios geoelectricos. De este modo, la expresión general de la resistividad aparente del subsuelo tendrá la forma:

$$\rho a = \frac{(K * \Delta U)}{I} \dots\dots\dots \text{Ecuación 4}$$

Donde:

ρa = Resistividad aparente del subsuelo.

K = constante del dispositivo geoelectrico, que depende de la geometría del mismo.

ΔU = Voltaje medido.

I = Intensidad medida.

En los estudios cuando se mencione la resistividad, será importante observar si se trata de la resistividad aparente o de la resistividad verdadera del medio donde circula la corriente (ver Figura 9). La resistividad aparente y la resistividad verdadera sólo coinciden cuando el subsuelo es absolutamente homogéneo, sin heterogeneidades (Kirsh, R., 2009).

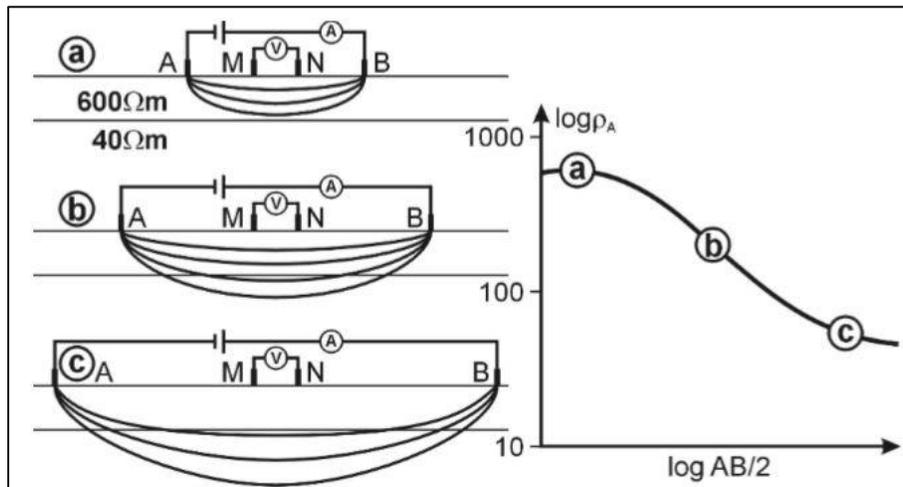


Figura 9. Medidas de resistencia aparente con espaciado e incremento de corriente del electrodo que conduce a las profundidades de penetración aumentadas de la corriente inyectada. Los resultados son compilados en la curva de resistividad (Kirsh, R., 2009).

3.2.2 Resistividad de rocas y minerales:

La resistividad de las rocas y suelos tiene un amplio rango de variación de un lugar a otro, ya que la mayoría de los minerales que los forman son prácticamente aislantes (Tabla 2). La conductividad de estos y el contenido de fluidos en ellos, determinan la resistividad de las rocas y suelos (Milsom, J., 2003).

Los metales y sulfuros metálicos conducen electricidad eficientemente por el flujo de electrones y los métodos eléctricos son por lo tanto importantes en investigaciones ambientales, donde objetos metálicos son a menudo los objetivos en la búsqueda de minerales (Milsom, J., 2003).

La mayor parte de los minerales que forman las rocas son muy pobres conductores y pero el agua que pueden contener es la que conduce la electricidad a través de estos medios. El agua pura es ionizada a solo un pequeño grado y la conductividad eléctrica del agua de los poros depende también de las sales disueltas, principalmente del cloruro de sodio. Los minerales de arcilla iónicamente activos y la buena conducción de la arcilla depende de su ambiente húmedo (Milsom, J., 2003).



Tabla 2. Resistividades para diversos materiales (Villalobos A., 2004).

Material	Resistividad (Ohm.m)
Salmuera	5×10^{-2}
Arcilla	1-100
Arcilla-limo	2-4
Arena	$10 - 2.2 \times 10^{-2}$
Agua dulce	0.5 – 300
Gravas y arenas saturadas	100
Caliza	1000
Arenisca	$7 \times 10^1 - 7 \times 10^3$
Conglomerado	$2 \times 10^3 - 1.3 \times 10^4$
Basalto	$10 - 1.3 \times 10^7$

3.2.3 Método de Resistividad (Sondeos Eléctricos Verticales)

Los sondeos eléctricos verticales (SEV) se aplican a una tierra horizontal o aproximadamente horizontalmente en capas. Los objetivos geológicos pueden ser, por ejemplo, rocas sedimentarias de diferentes litologías, acuíferos en capas de diferentes propiedades, rocas sedimentarias que recubren rocas ígneas o la zona de meteorización de rocas ígneas (Kirsch, R. 2009).

La finalidad de estos es determinar la variación de las propiedades eléctricas del subsuelo, en función de su profundidad, a partir de mediciones efectuadas desde la superficie (Auge, 2008).

Durante la ejecución del SEV, los impulsos eléctricos son enviados al terreno mediante dos electrodos de emisión A y B, a través de los cuales se hace circular cierta intensidad de corriente (I) por el subsuelo. El circuito se cierra mediante otros dos electrodos M y N denominados de potencial, en los que se percibe la respuesta del campo eléctrico generado por los primeros. De este modo se obtiene una diferencia de potencial (ΔV) que se manifiesta mientras perdure el campo. Al realizar un SEV se mantiene un arreglo en la distribución de los electrodos, que depende del objetivo a investigar y de la profundidad que se pretende alcanzar (Auge, 2008).



Estos se pueden aplicar de diferente manera utilizando el equipo correspondiente pero un sistema de arreglo de mayor conveniencia para el terreno. Los tipos de arreglos correspondientes a los sondeos eléctricos verticales son:

- Arreglo Wenner
- Arreglo Schlumberger
- Arreglo Dipolo-Dipolo
- Arreglo Polo-Polo
- Arreglo Polo-Dipolo

3.2.3.1 Arreglo Wenner

En 1915, el Dr. Frank Wenner del U.S. Bureau of Standards desarrolló la teoría de este método de prueba, y la ecuación que lleva su nombre (Kirsch, R. 2009).

Las medidas de este arreglo se toman colocan en línea recta (Figura 6), las mediciones de resistividad dependerán de la distancia entre electrodos y de la resistividad del terreno, estas distancias tienen que ser iguales (Kirsch, R. 2009).

La configuración de Wenner utiliza los cuatro electrodos deben moverse aumentando la propagación. El espaciado del electrodo $AM = MN = NB = a$ permanecer idéntico, y el factor geométrico se calcula de la siguiente manera: (Kirsch, R. 2009).

$$KWENNER = 2 \cdot \pi \cdot A \cdot R \dots \dots \dots \text{Ecuación 5}$$

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot A \cdot R}{\left[1 + \frac{2 \cdot A}{(A^2 + 4 \cdot B^2)^{0.5}} \right] - \frac{2 \cdot A}{(4A^2 + 4B^2)^{0.5}}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 6}$$

donde:

ρ = Resistividad promedio a la profundidad (A) en ohm-m

A = Distancia entre electrodos en metros

B = Profundidad de enterramiento en metros

R = Lectura en Ohm.m

Los resultados se plasman en ohm-m, como resultado de las ecuaciones representa la resistividad promedio de un hemisferio de terreno de un radio igual a la separación de los electrodos.

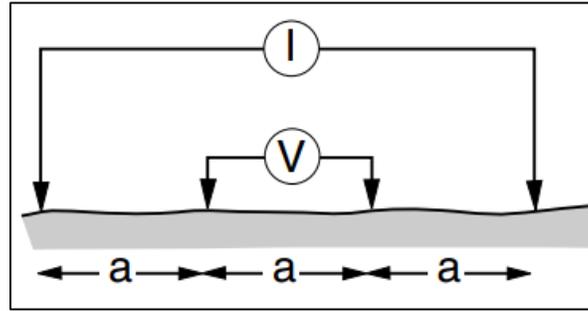


Figura 10. Arreglo Eléctrico Tipo Wenner

3.2.3.2 Arreglo Schlumberger

La configuración de Schlumberger se emplea para mediciones de la resistividad aparente. En la configuración de Schlumberger el operador expande el espaciamiento de los electrodos aumentando la distancia entre los electrodos corrientes durante el transcurso de las mediciones (Figura 11). El aumento del espaciamiento se realiza típicamente a escala logarítmica. La resistividad aparente medida en el centro de la configuración es (ecuación 6) (Auge, 2008):

$$pa = \pi \left\{ \left[\frac{s^2 - \left(\frac{a^2}{4}\right)}{a} \right] x \left[\frac{\Delta V}{I} \right] \right\} \dots\dots\dots \text{Ecuación 7}$$

donde:

S= Mitad del espaciamiento de los electrodos de corriente

a= Espaciamiento de los electrodos potenciales M y N

V= Diferencia de potencial

I= corriente introducida en el subsuelo

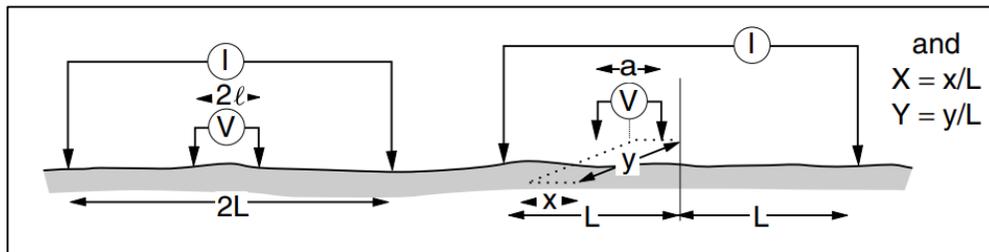


Figura 11. Arreglo Eléctrico Tipo Schlumberger.



El único arreglo que rivaliza con Wenner en disponibilidad de material interpretativo, todo lo cual se relaciona con el conjunto "ideal" con Distancia despreciable entre los electrodos interiores. Favorecido, junto con el Wenner, para trabajos de sondeo eléctrico de profundidad (Figura 12).

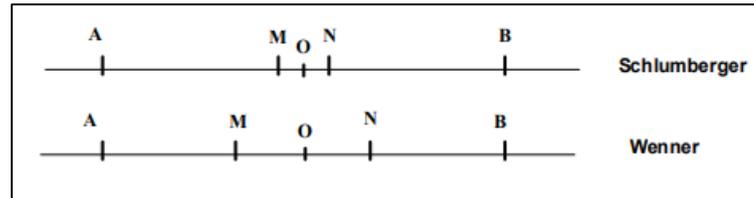


Figura 12. Comparación del método.

3.3 Método Magnético

El objetivo de un estudio magnético es investigar la geología del subsuelo y la base de las anomalías en el campo magnético de la Tierra que resultan de las propiedades magnéticas de las rocas subyacentes. Aunque la mayoría de los minerales formadores de roca son efectivamente no magnéticos, ciertos tipos de roca contienen suficientes minerales magnéticos para producir anomalías magnéticas significativas.

De manera similar, los objetos ferrosos hechos por el hombre también generan anomalías magnéticas. El levantamiento magnético tiene una amplia gama de aplicaciones, desde estudios de pequeña escala o estudios arqueológicos para detectar objetos metálicos enterrados, hasta estudios a gran escala realizados para investigar la estructura geológica regional. Los estudios magnéticos se pueden realizar en tierra, mar y aire. En consecuencia, la técnica se emplea ampliamente, y la velocidad de operación de las inspecciones aerotransportadas hace que el método sea muy atractivo en la búsqueda de tipos de depósitos de mineral que contienen minerales magnéticos (Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. 2002).

3.3.1 Componentes del campo magnético

La dirección y la magnitud del campo geomagnético en cualquier punto de la superficie terrestre están representadas por un vector paralelo a la dirección del campo, apuntando en la dirección de la fuerza en un polo positivo, y que tiene una longitud proporcional a la fuerza del campo en ese punto (Nettleton, 1976), ver la Figura 13. La



inducción magnética \vec{B} tiene carácter vectorial, es decir, en cada punto de la superficie terrestre donde se encuentra presente, cuenta con un módulo, dirección y sentido. Debido a ello se le ha llamado comúnmente vector de campo geomagnético, dicho vector cuenta con siete componentes magnéticas actuando en todo momento sobre la superficie de nuestro planeta, cinco de las cuales son modulares y dos angulares (Nava Flores, 2005).

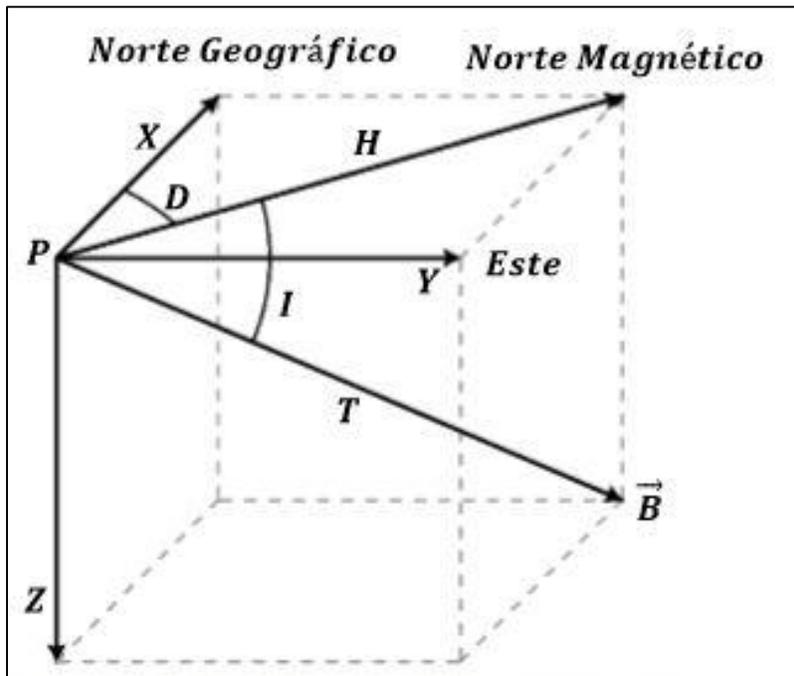


Figura 13. Definición y representación geométrica de las componentes del vector de campo geomagnético inferido a un punto P.

T = Intensidad total o modulo del vector \vec{B}

X = Componente Norte-Sur, es la proyección del vector \vec{B} sobre un eje horizontal con dirección y sentido al norte geográfico.

Y = Componente Este-Oeste, es la proyección del vector \vec{B} sobre un eje horizontal con dirección y sentido al este geográfico

Z = Componente vertical, es la proyección del vector \vec{B} sobre un eje vertical.

H = componente horizontal, es la proyección del vector \vec{B} sobre un plano horizontal.



D = ángulo de declinación, es el ángulo entre la dirección de los componentes horizontales H (Norte Magnético) y X (Norte Geográfico).

I = Angulo de Inclinación, es el ángulo formado por la componente H y el vector \vec{B} .

3.3.2 Declinación Magnética

En un punto de la Tierra es el ángulo comprendido entre el norte magnético local y el norte verdadero (o norte geográfico). En otras palabras, es la diferencia entre el norte geográfico y el indicado por una brújula (el denominado también norte magnético). Por convención, a la declinación se le considera de valor positivo si el norte magnético se encuentra al este del norte geográfico, y negativa si se ubica al oeste (Ramírez J.P., 2013).

3.3.3 Inclinación magnética

Se llama inclinación magnética de un lugar, al ángulo “ i ” que forma la aguja magnética colocada en ese lugar, con el plano horizontal. Si se apoya una aguja por su punto medio, sobre un eje horizontal de modo que pueda girar libremente alrededor de él, la aguja oscila un rato, y luego se detiene en una posición que no es la horizontal.

Con los datos de inclinación y declinación magnéticas se dibujan los mapas magnéticos, en donde hay dos juegos de líneas: las isógonas, que unen los puntos de igual declinación, a la que se llama también longitud magnética y las isóclinas, que unen los lugares de igual inclinación magnética, a la que también se llama latitud magnética. Hay un ecuador magnético, que no coincide con el geográfico, en el cual la inclinación es nula, de modo que la aguja de inclinación permanece horizontal. En los polos magnéticos, en cambio, la aguja se mantiene vertical, es decir, la inclinación es de $\pm 90^\circ$ (Ramírez J.P., 2013).

3.3.4 Susceptibilidad magnética

Para un medio lineal homogéneo e isótropo, la magnetización de un cuerpo es directamente proporcional a la intensidad \vec{H} , de la siguiente forma:

$$\vec{M} = \chi_M \vec{H} \dots\dots\dots \text{Ecuación 8}$$

donde χ_M es la susceptibilidad magnética del material.



Las propiedades magnéticas en un material se generan por el movimiento de partículas cargadas eléctricamente. Así, un electrón tiene una magnetización asociada tanto con su giro axial (spin axial), como con su movimiento orbital alrededor de su núcleo. Cuando un material se expone a un campo magnético, el giro de sus electrones se bambolea hasta producir un momento magnético paralelo al campo al que está expuesto; esto es, en el material se ha inducido una magnetización (M) que es proporcional (χ) al campo de exposición (H), (Reséndiz, P., 2015).

Si se coloca un cuerpo magnetizable bajo la influencia de una fuerza de magnetización los momentos dipolares del cuerpo se alinearán en la misma dirección de la fuerza de magnetización por lo tanto el grado de magnetización de este cuerpo será proporcional a la fuerza de magnetización. Entonces, la susceptibilidad magnética χ es una medida del caso de magnetización y puede considerarse como una medida del número de dipolos elementales por unidad de volumen del material y de su movilidad, o la facilidad con la que pueden ser orientados (Reséndiz, P., 2015).

La susceptibilidad magnética es una constante adimensional para cada material, cuando un material tiene una susceptibilidad magnética positiva ($\chi > 0$) entonces se dice que el material es paramagnético, y cuando la susceptibilidad es negativa ($\chi < 0$) se dice que el material es diamagnético.

No todos los materiales a nivel atómico se comportan de la misma manera al exponerse a un campo magnético externo. En la mayoría, el momento magnético producido paralelo al campo externo se pierde tan pronto como el campo es retirado –esto es, tienen susceptibilidades magnéticas bajas– y sólo unos cuantos –aquellos con susceptibilidades magnéticas mucho más altas– son capaces de conservar una magnetización remanente, (Reséndiz, P., 2015).

Por lo tanto, los materiales se pueden clasificar magnéticamente, según el valor de su susceptibilidad magnética, en tres grupos principales:

3.3.5.1 Materiales Diamagnéticos

Son aquellos materiales cuyos espines de sus átomos se orientan paralela, pero inversamente al campo externo; su magnetización es débil y en sentido opuesto al campo,



por lo tanto, su susceptibilidad k es negativa y de valor bajo, estos materiales son repelidos muy ligeramente ante un campo magnético. Se tienen numerosos ejemplos de ellos entre los principales constituyentes de las rocas, tales como el sílice (cuarzo), el carbonato de calcio (calcita), los silico-aluminatos (feldespatos), el Carbono y los materiales orgánicos, así como la mayoría de los metales de la tabla periódica: Cobre, Zinc, Plata, Cadmio, Oro, Plomo y Bismuto (Reséndiz, P., 2015).

3.3.5.2 Materiales Paramagnéticos

Son aquellos materiales que, al exponerse a un campo externo, los espines de sus átomos se orientan paralelos y en el mismo sentido que el campo externo, su magnetización es débil y en el mismo sentido del campo. Su susceptibilidad χ es positiva y de magnitud baja (poco mayor que los materiales diamagnéticos). Estos materiales se pueden distinguir porque son ligeramente atraídos por un campo magnético. Se tienen numerosos ejemplos de estos materiales entre los constituyentes formadores de rocas, principalmente los silicatos de hierro (biotita, clorita, anfíboles, piroxenos, olivino), así como carbonatos de hierro y magnesio, y arcillas (Reséndiz, P., 2015).

3.3.5.3 Materiales Ferromagnéticos

Son aquellos materiales que conservan una magnetización remanente, aun en ausencia de un campo externo, son materiales fácilmente identificables ya que son atraídos por un campo magnético (o un imán). En ellos los espines de sus electrones se acoplan de forma espontánea, alineándose paralelamente mediante una interacción que permanece aún en ausencia de campo externo. Ejemplos de materiales ferromagnéticos son el hierro, níquel, cobalto y sus compuestos, (Reséndiz, P., 2015).

3.3.6 Susceptibilidad de rocas y minerales.

La susceptibilidad de una roca por lo general depende de su contenido de magnetita. Los sedimentos y las rocas ígneas ácidas tienen pequeñas susceptibilidades, mientras que los basaltos, doleritas, gabros y serpentinitas suelen ser fuertemente magnéticos. La intemperie generalmente reduce la susceptibilidad porque la magnetita se oxida a hematita, pero algunas



lateritas son magnéticas debido a la presencia de magnetita y hematita remanentemente magnetizada. Las susceptibilidades, en unidades SI racionalizadas, de algunas rocas y minerales comunes se dan en la Tabla 3, que se muestra a continuación:

Tabla 3. Susceptibilidades magnéticas de rocas y minerales según Reynolds J., 1997. Los valores que encierran en paréntesis la letra “d” corresponden a un material diamagnético, la letra “o” para mineral.

Susceptibilidades de rocas y minerales (Racionalizado en unidades SI)					
Tipo de Roca y Mineral	Susceptibilidad	Tipo de Roca y Mineral	Susceptibilidad	Tipo de Roca y Mineral	Susceptibilidad
Sedimentario		Ígneas		Minerales	
Dolomita pura	-12.5 a +44	Granito	10 a 65	Hielo (d)	-9
Dolomita Impura	20 000	Granito (m)	20 a 50 000	Sal (d)	-10
Caliza	10 a 25 000	Riolita	250 a 37 700	Yeso (d)	-13
Arenisca		Pegmatita	3000 a 75 000	Cuarzo (d)	-15
Lutita		Gabro	800 a 76 000	Grafito	-80 a -200
		Basalto	500 a 182 000	Calcopirita	400
		Basaltos Oceánicos	300 a 196 000	Pirita (o)	50 a 5000
Metamórfico		Peridotita	95 000 a 196 000	Hematita (o)	420 a 38 000
Esquisto	315 a 3000			Pirrotita (o)	1250 a 6.3×10^6
Pizarra	0 a 38 000			ilmenita (o)	314 000 a 3.8×10^6
Gneiss	125 to 25 000			Magnetita (o)	70 000 a 2×10^7
Serpentinita	3100 a 75 000				

3.3.7 Campo Magnético

Las anomalías magnéticas causadas por las rocas son efectos localizados superpuestos en el campo magnético normal de la Tierra (campo geomagnético). En consecuencia, el conocimiento del comportamiento del campo geomagnético es necesario tanto en la reducción de datos magnéticos a un dato adecuado como en la interpretación de las anomalías resultantes. El campo geomagnético es geoméricamente más complejo que el campo gravitatorio de la Tierra y muestra una variación irregular tanto en la orientación como en la magnitud con la latitud, la longitud y el tiempo. En cualquier punto de la superficie de la Tierra, una aguja magnética suspendida libremente asumirá una posición en el espacio en la dirección del campo geomagnético ambiental. Esto generalmente estará en ángulo con el norte vertical y geográfico.

Para describir el vector de campo magnético, se hace uso de descriptores conocidos como los elementos geomagnéticos (Figura 14). En el hemisferio norte, el campo magnético



generalmente desciende hacia el norte y se vuelve vertical en el polo magnético norte (Figura 15). En el hemisferio sur, la inclinación es generalmente hacia arriba hacia el norte. La línea de inclinación cero se aproxima al ecuador geográfico, y se conoce como el ecuador magnético.

Aproximadamente el 90% del campo de la Tierra puede representarse por el campo de un dipolo magnético teórico en el centro de la Tierra inclinado aproximadamente 11.5° al eje de rotación.

El momento magnético de este dipolo geocéntrico ficticio se puede calcular a partir del campo observado. Si este campo dipolo se resta del campo magnético observado, el campo residual se puede aproximar luego por los efectos de un segundo dipolo más pequeño.

El proceso puede continuarse ajustando dipolos de momento cada vez menor hasta que el campo geomagnético observado se simule a cualquier grado de precisión requerido. Los efectos de cada dipolo ficticio contribuyen a una función conocida como armónica y la técnica de aproximaciones sucesivas del campo observado se conoce como análisis armónico esférico, el equivalente del análisis de Fourier en coordenadas polares esféricas (Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. 2002).

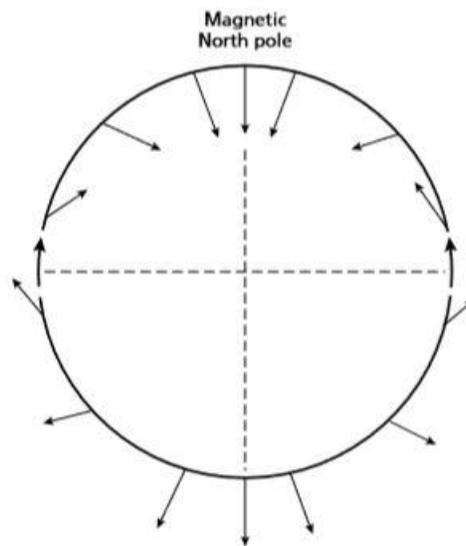


Figura 14. La variación de la inclinación del campo magnético total con latitud basada en una aproximación de un dipolo simple del campo geomagnético.

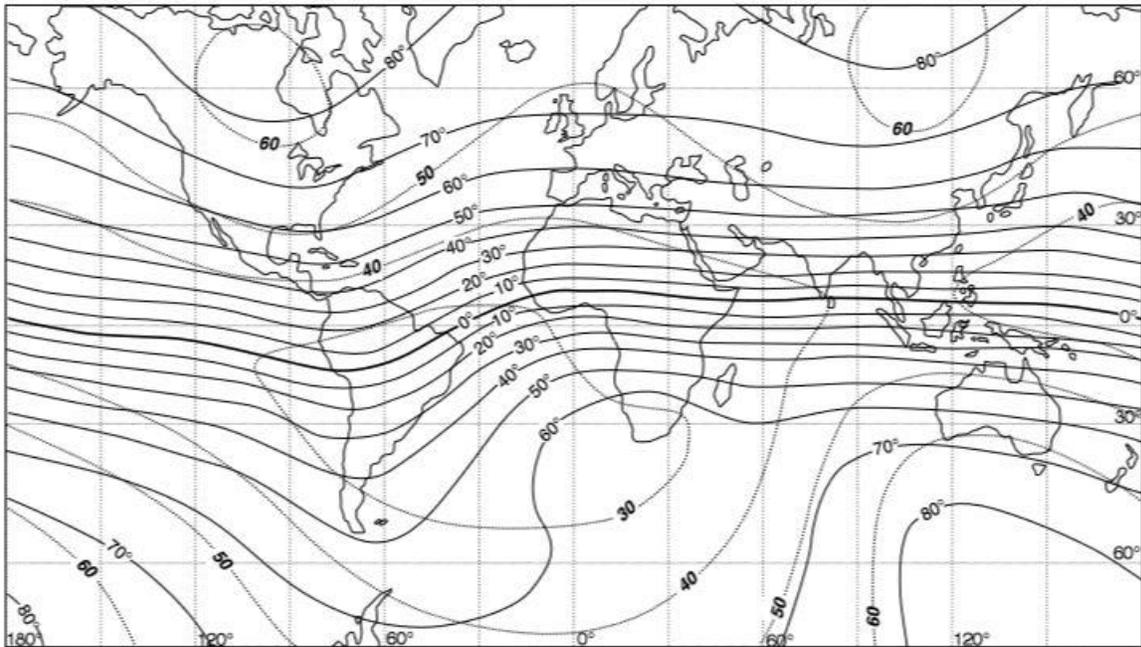


Figura 15. Inclutación (líneas continuas y valor en grados) e intensidad (línea punteada y valores en cientos de nT) del campo magnético de la Tierra. (Milsom, J., 2003).

3.3.8 El campo de Referencia Geomagnético Internacional (IGRF)

Las variaciones del campo principal de la Tierra con latitud, longitud y tiempo están descritas por ecuaciones del Campo de Referencia Geomagnética Internacional (IGRF) determinadas experimentalmente, definidas por 120 coeficientes armónicos esféricos, de orden $N = 10$, complementados por un modelo de variación secular predictiva de orden $N = 8$. La longitud de onda más corta presente es de unos 4000 km. Los IGRFs proporcionan representaciones razonables de los campos regionales reales en áreas bien encuestadas, donde pueden usarse para calcular correcciones regionales, pero pueden ocurrir discrepancias de hasta 250 nT (nano-Tesla) en áreas de las que había poca información disponible en el momento de la formulación.

Debido a que los cambios seculares a largo plazo no son predecibles excepto por extrapolación de observaciones pasadas, el IGRF se actualiza cada cinco años sobre la base de observaciones en observatorios fijos y también se revisa retrospectivamente para dar un modelo definitivo (DGRF). Las correcciones de GRF son vitales cuando se comparan o



combinan los levantamientos aéreos o marítimos realizados meses o años aparte, pero son menos importantes en los levantamientos terrestres, donde las estaciones base pueden reocuparse (Milsom, J. 2003).

3.3.9 Variaciones diurnas

El campo magnético de la Tierra también varía debido a los cambios en la fuerza y la dirección de las corrientes que circulan en la ionosfera. En el patrón normal de energía solar (S_q), el campo de fondo es casi constante durante la noche, pero disminuye entre el amanecer y alrededor de las 11 a.m., aumenta nuevamente hasta aproximadamente las 4 p.m. y luego disminuye lentamente hasta el valor nocturno (Figura 16).

Las amplitudes pico a través en latitudes medias son del orden de unas pocas decenas de nano Tesla. Dado que la ionización de la atmósfera superior es causada por la radiación solar, las curvas diurnas tienden a estar directamente relacionadas con el tiempo solar local, pero las diferencias de amplitud de más del 20% debido a las diferencias en la conductividad de la corteza pueden ser más importantes que la dependencia del tiempo para puntos de hasta unos pocos cientos de kilómetros aparte.

Las micropulsaciones de periodo corto, polarizadas horizontal y aproximadamente sinusoidales son significativas solo en levantamientos que deben ser contorneados a menos de 5 nT. Aproximadamente a 5° del ecuador magnético, la variación diurna está fuertemente influenciada por el electrojet ecuatorial, una banda de alta conductividad en la ionosfera de aproximadamente 600 km (5° de latitud) de ancho. Las amplitudes de las curvas diurnas en las regiones afectadas pueden ser superiores a 100 nT y pueden diferir entre 10 y 20 nT en puntos separados por unas pocas decenas de kilómetros. Muchos de los fenómenos magnéticos observados en las regiones polares pueden explicarse por un electrojet auroral sujeto a fluctuaciones severas de corto período. Tanto en las regiones ecuatoriales como en las polares, es particularmente importante que las variaciones de fondo se controlen continuamente. Regresar a una estación base a intervalos de una o dos horas puede ser bastante insuficiente (Milsom, J. 2003).

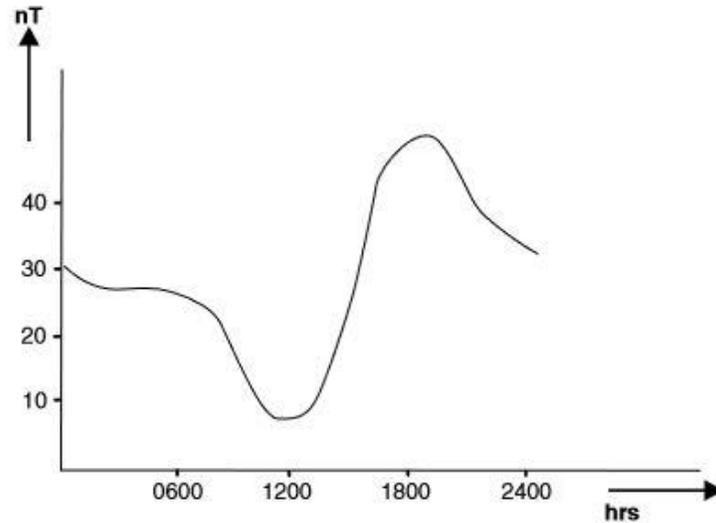


Figura 16. Variación típica del campo magnético de un "día tranquilo" en latitudes medias.

3.3.10 Reducción de las observaciones magnéticas

La reducción de los datos magnéticos es necesaria para eliminar todas las causas de variación magnética de las observaciones que no sean las derivadas de los efectos magnéticos del subsuelo (Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. 2002).

3.3.10.1 Corrección de la variación diurna

Los efectos de la variación diurna pueden eliminarse de varias maneras. En tierra puede emplearse un método similar al monitoreo de la desviación gravimétrica en el que el magnetómetro se lee en una estación base fija periódicamente durante el día. Las diferencias observadas en las lecturas de la base se distribuyen entre las lecturas en las estaciones ocupadas durante el día según la hora de observación. Debe recordarse que las lecturas de la base tomadas durante un levantamiento por gravedad se realizan para corregir tanto la deriva del gravímetro como los efectos de las mareas.

Los magnetómetros no se desvían y las lecturas de la base se toman únicamente para corregir la variación temporal en el campo medido. Dicho procedimiento es ineficaz, ya que el instrumento debe devolverse periódicamente a una ubicación de base y no es práctico en las inspecciones marítimas o aéreas. Estos problemas se pueden superar mediante el uso de



un magnetómetro de base, un instrumento de lectura continua que registra las variaciones magnéticas en una ubicación fija dentro o cerca del área de estudio. Este método es preferible en tierra, ya que el estudio avanza más rápido y las variaciones diurnas están completamente registradas. Cuando la encuesta es de alcance regional, se pueden utilizar los registros de un observatorio magnético. Tales observatorios registran continuamente cambios en todos los elementos geomagnéticos. Sin embargo, las variaciones diurnas difieren bastante marcadamente de un lugar a otro, por lo que el observatorio utilizado no debe estar a más de unos 100 km del área de la encuesta.

La variación diurna durante un levantamiento aeromagnético puede evaluarse alternativamente al organizar numerosos puntos de cruce en el plan de levantamiento. El análisis de las diferencias en las lecturas en cada cruce, que representa el cambio de campo en una serie de diferentes períodos de tiempo, permite el conjunto La encuesta debe corregirse para la variación diurna mediante un proceso de ajuste de la red, sin la necesidad de un instrumento de base. Las variaciones diurnas, sin embargo, registradas, deben ser examinadas cuidadosamente. Si se observan grandes variaciones de alta frecuencia, resultantes de una tormenta magnética, los resultados de la encuesta deben descartarse (Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. 2002).

3.3.10.2 Reducción al Polo

El proceso de reducción al polo es una transformación utilizada para facilitar la interpretación de la información magnética en donde se elimina la distorsión producida por la inclinación del campo geomagnético, eliminando o minimizando la asimetría y los desplazamientos laterales de las anomalías del campo magnético total, relacionados con las desviaciones de las direcciones de magnetización. Este método permite obtener anomalías que responden a la verdadera ubicación de las heterogeneidades del medio (Reséndiz, P., 2015).

La expresión de la Reducción al Polo es (Nava Flores, 2010):

$$RTP(p, q) = \frac{k^2}{[ip\alpha + iq\beta + \gamma\sqrt{p^2 + q^2}][ip\alpha M + iq\beta M + \gamma M\sqrt{p^2 + q^2}]}$$

.....Ecuación 9



Donde:

$$\alpha = \cos(I)\cos(D)$$

$$\alpha M = \cos(IM)\cos(DM)$$

$$\beta = \cos(I)\sin(D)$$

$$\beta M = \cos(IM)\sin(DM)$$

$$\gamma = \sin(I)$$

$$\gamma M = \sin(IM)$$

$$k = \sqrt{p^2 + q^2}$$

3.3.10.3 Derivados

Los derivados tienden a afilar los bordes de las anomalías y, por lo tanto, a las características poco profundas. Los mapas de primera y segunda derivación vertical son los más comunes. Los mapas derivados pueden ser hechos por algunas técnicas usadas para datos de gravedad. La primera derivada vertical también se mide en la encuesta de gradiómetro (Telford W. M., Geldart L. P., Sheriff R. E., 1990).

3.3.10.3.1 Primera y Segunda derivada vertical

La primera y segunda derivada vertical se usa principalmente para el realce de las fuentes someras. Cuando varias fuentes magnéticas se encuentran muy próximas unas de otras, sus anomalías se sobreponen, y se tiene una anomalía compuesta. Para estos casos se recurre a las derivadas verticales (de primero y segundo orden). Cabe señalar que este proceso favorece o realza la información asociada a altas frecuencias, pero oculta la información debida a bajas frecuencias; la información ligada a bajas frecuencias está asociada a fuentes de carácter regional (Alldrege, 1965); entonces se puede decir que un mapa de la derivada vertical está libre de los efectos de estas estructuras regionales o profundas (Reséndiz, P., 2015).

La primera derivada vertical físicamente equivale a medir simultáneamente el campo magnético en dos puntos a diferentes alturas sobre el mismo vertical y después obtener la diferencia de los datos obtenidos y dividiendo el resultado entre la separación vertical de los puntos de medición. Este cálculo, como ya se mencionó, elimina las longitudes onda larga,



los efectos regionales y ayuda a separar los efectos de las anomalías adyacentes, asociadas a rocas cercanas a la superficie (Reséndiz, P., 2015).

Las derivadas verticales amplifican información de longitudes de onda corta a expensas de la información de longitudes de onda larga. De la derivada vertical de los mapas, por lo general la primera o segunda derivada vertical, acentúan gradientes largos de los bordes de las fuentes magnéticas someras. De ahí que a veces se utilizan para localizar los bordes de los cuerpos magnéticos y hacer hincapié en las fuentes a poca profundidad (Reséndiz, P., 2015).

3.3.10.3.2 Deconvulación de Euler

El método de Deconvulación de Euler es muy utilizado en la interpretación de datos magnéticos (y en general de datos potenciales) debido a que puede ser utilizado aun con presencia de magnetismo remanente ya que los resultados son independientes de la dirección del campo magnético de la Tierra. Por tal motivo, este método puede ser utilizado en datos de campo magnético total sin necesidad de llevar a cabo la reducción al polo o realizando la reducción al polo, y esto dependerá del intérprete y los resultados que se busquen obtener (Reséndiz, P., 2015).

El método consiste en la solución de la ecuación de homogeneidad de Euler para localizar fuentes magnéticas y estimar su profundidad, además de identificar el tipo de estructura geológica al que se asocian las anomalías presentes mediante el uso de un Índice Estructural para cada tipo de estructura.

El método de Deconvulación de Euler utiliza las derivadas de primer orden para la estimación de la profundidad y posición de las fuentes magnéticas, pero requiere una suposición acerca de la naturaleza de la fuente (índice estructural). Si (x_0, y_0, z_0) es la posición de una fuente magnética cuyo campo total f se mide en (x, y, z) y el campo total tiene un valor regional de B , entonces la ecuación de Euler 3D se escribe como (Reid et al, 1990; Thompson, 1982):

$$(x - x_0) \frac{\partial f}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial f}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial f}{\partial z} = N(B - f) \text{ Ecuación 10}$$



donde (x, y, z) son las coordenadas de un punto de observación, (x_0, y_0, z_0) son las coordenadas de la ubicación de la fuente, y B es un nivel de base. El índice estructural (SI, por sus siglas en inglés) N o grado de homogeneidad, define la tasa de atenuación de la anomalía en el punto de observación (Oruç & Selim, 2011), es decir, es una medida de la tasa de cambio que tiene el campo respecto a la distancia y depende de la geometría de la fuente. En otras palabras, el índice estructural indica el tipo de fuente que representa mejor a la anomalía.

Dos parámetros importantes de la Deconvolución de Euler son la elección de la ventana y el índice estructural N , el valor N debe asumirse como información a priori, pero si no se sabe con certeza el tipo de estructuras que se busca delimitar será necesario probar con diferentes índices estructurales de acuerdo a la tabla propuesta por la Northwest Geophysical Associates, Reid (1990) y Thompson (1982) demostraron que el índice estructural óptimo generalmente da el grupo de soluciones más ajustado. Es decir, el índice correcto para una característica particular ofrece la mejor agrupación de soluciones y en consecuencia, las mejores estimaciones de profundidad. Por lo tanto, la elección de un índice estructural apropiado es crucial para que las soluciones converjan sobre las estructuras magnéticas y se puedan estimar las profundidades con mayor certeza.

Un índice que es demasiado bajo estima profundidades que son demasiado someras y un índice que es demasiado alto da estimaciones que son muy profundas (Tabla 4). Schmidt (2006) ha mostrado que el valor N también se podría resolver y la precisión de la ED al tensor de gradiente magnético se mejora (Reséndiz, P., 2015).



Tabla 4. Índices estructurales y modelos geológico recomendados por “Northwest Geophysical Associates” (Reséndiz, P., 2015).

Índice Estructural	Modelo Geológico Simple
0	Dipolos aislados. Rocas magnéticas aisladas.
0.5	Lineamientos.
1	Líneas de dipolos magnéticos, fallas, fracturas.
1.5	Líneas de dipolos finitos, contactos, fallas.
2	Estructuras bidimensionales, diques, galerías bien delimitadas.
2.5	Estructuras cuasidimensionales en 2D, cuerpos de magnetización contrastante con respecto al medio que se extiende horizontalmente.
3	Cuerpos de volumen finito

3.3.11 Magnetómetro de Protones

El magnetómetro más comúnmente utilizado para trabajos de inspección y observación es actualmente la precesión nuclear o magnetómetro de protones. El dispositivo sensor del magnetómetro de protones es un contenedor lleno de un líquido rico en átomos de hidrógeno, como el queroseno o el agua, rodeado de una bobina (Fig. 17 (a)). Los núcleos de hidrógeno (protones) actúan como pequeños dipolos y normalmente se alinean en paralelo al campo geomagnético ambiental (Fig. 17 (b)). Se pasa una corriente a través de la bobina para generar un campo magnético B_p 50–100 veces más grande que el campo geomagnético, y en una dirección diferente, haciendo que los protones se realineen en esta nueva dirección (Fig. 17 (c)). La corriente de la bobina se desconecta para que el campo polarizador se elimine rápidamente. Los protones vuelven a su alineación original con B_e en espiral, o precesión, en fase alrededor de esta dirección (Fig. 17 (d)) con un período de aproximadamente 0,5 ms, lo que requiere de 1–3 s para lograr su original Orientación.

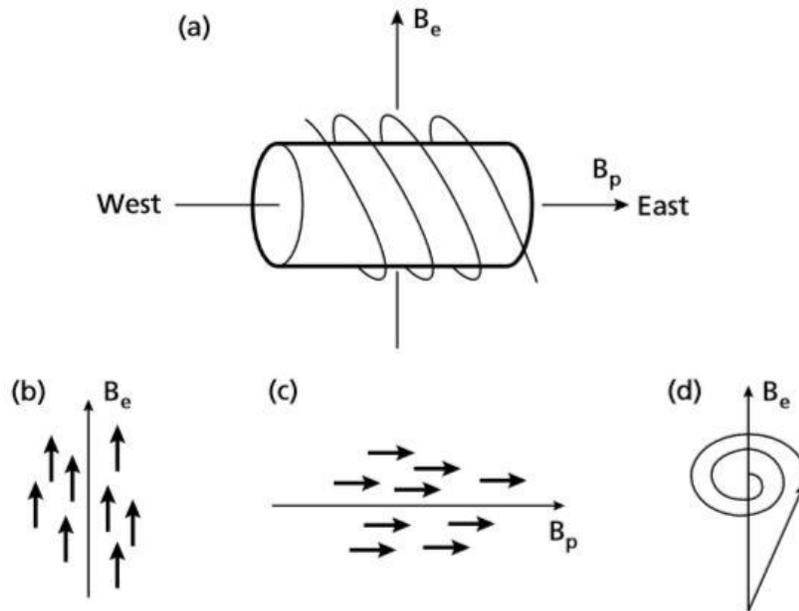


Figura 17. Principio del magnetómetro de protones.

La frecuencia de esta precesión viene dada por

$$f = \frac{\gamma_p B_c}{2\pi} \dots\dots\dots \text{Ecuacion 11}$$

donde γ_p es la relación gyromagnética del protón, una constante conocida con precisión. En consecuencia, la medición de f , aproximadamente 2 kHz, proporciona una medición muy precisa de la fuerza del campo geomagnético total. f se determina mediante la medición de la tensión alterna de la misma frecuencia inducida para que fluya en la bobina por los protones de procesamiento.

Los instrumentos de campo proporcionan lecturas absolutas del campo magnético total con una precisión de $\pm 0.1\text{nT}$, aunque se puede lograr una precisión mucho mayor si es necesario. El sensor no tiene que estar orientado con precisión, aunque idealmente debe estar en un ángulo apreciable con respecto al vector de campo total. En consecuencia, las lecturas pueden ser tomadas por sensores remolcados detrás de barcos o aeronaves sin la necesidad de mecanismos de orientación. La topografía aeromagnética con magnetómetros de protones puede sufrir la pequeña desventaja de que las lecturas no son continuas debido al período de



ciclo finito. Pueden perderse pequeñas anomalías ya que una aeronave recorre una distancia significativa entre las mediciones discretas, que pueden espaciarse a intervalos de unos pocos segundos.

Este problema ha sido obviado en gran medida por instrumentos modernos con períodos de reciclaje del orden de un segundo. El magnetómetro de protones es sensible a los gradientes magnéticos agudos que pueden causar que los protones en diferentes partes del sensor se procesen a diferentes velocidades, con el consiguiente efecto adverso sobre la intensidad de la señal de precesión.

Muchos magnetómetros de protones modernos utilizan el Efecto Overhauser. Al fluido del sensor se le agrega un líquido que contiene algunos electrones libres en órbitas "no emparejadas". Luego, los protones se polarizan indirectamente utilizando energía de radiofrecuencia cerca de 60MHz. El consumo de energía de tales instrumentos es solo alrededor del 25% de los magnetómetros de protones clásicos, de modo que los instrumentos son más ligeros y compactos. La señal generada por el fluido es aproximadamente 100 veces más fuerte. Así que hay mucho menor ruido; la tolerancia al gradiente es unas tres veces mejor; Las tasas de muestreo son más rápidas (Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. 2002).

3.4 Métodos Sísmicos

El principio básico de la sismología de exploración es que una señal se genere como un tiempo que se conoce exactamente y que las ondas sísmicas resultantes viajen a través de los medios subsuperficiales, se reflejen y se refracten a la superficie donde se detectan las señales de retorno. El tiempo transcurrido entre la fuente que se dispara y la llegada de las distintas ondas se utiliza para determinar la naturaleza de las capas subsuperficiales. La grabación sofisticada y el posterior procesamiento de datos permiten un análisis detallado de las formas de onda sísmicas que se realizarán. La información derivada se utiliza para desarrollar imágenes de la estructura de la subsuperficie y un conocimiento de las propiedades físicas de los materiales presentes (Reynolds J., 1997).



3.4.1 Ondas sísmicas

Una onda sísmica es la energía acústica transmitida por la vibración de las partículas de roca. Las ondas de baja energía son aproximadamente elásticas, dejando la masa rocosa sin cambios por su paso, pero cerca de una fuente sísmica, la roca puede romperse y distorsionarse permanentemente (Milsom, J. 2003).

3.4.1.2 Tipos de onda elástica

Cuando una onda de sonido viaja en el aire, las moléculas oscilan hacia atrás y hacia adelante en la dirección del transporte de energía. Esta presión u onda de "empuje" viaja como una serie de compresiones y rarezas. La onda de presión en un medio sólido tiene la velocidad más alta de cualquiera de los movimientos de onda posibles y, por lo tanto, también se conoce como la onda primaria o simplemente la onda P.

Las partículas que vibran en ángulos rectos con respecto a la dirección del flujo de energía (que solo puede ocurrir en un sólido) crean una onda S (cortante, "sacudida" o, debido a su velocidad relativamente lenta, secundaria). La velocidad en muchas rocas consolidadas es aproximadamente la mitad de la velocidad de la onda P. Depende ligeramente del plano en el que vibran las partículas, pero estas diferencias no son significativas en estudios a pequeña escala.

Las ondas P y S son ondas corporales y se expanden dentro de la masa rocosa principal (Figura 18). Otras ondas, conocidas como Ondas Love, se generan en las interfaces, mientras que las partículas en la superficie de la Tierra pueden seguir caminos elípticos para crear ondas Rayleigh. Las ondas Love y Rayleigh pueden transportar una proporción considerable de la energía de origen, pero viajan muy lentamente (Milsom, J. 2003).

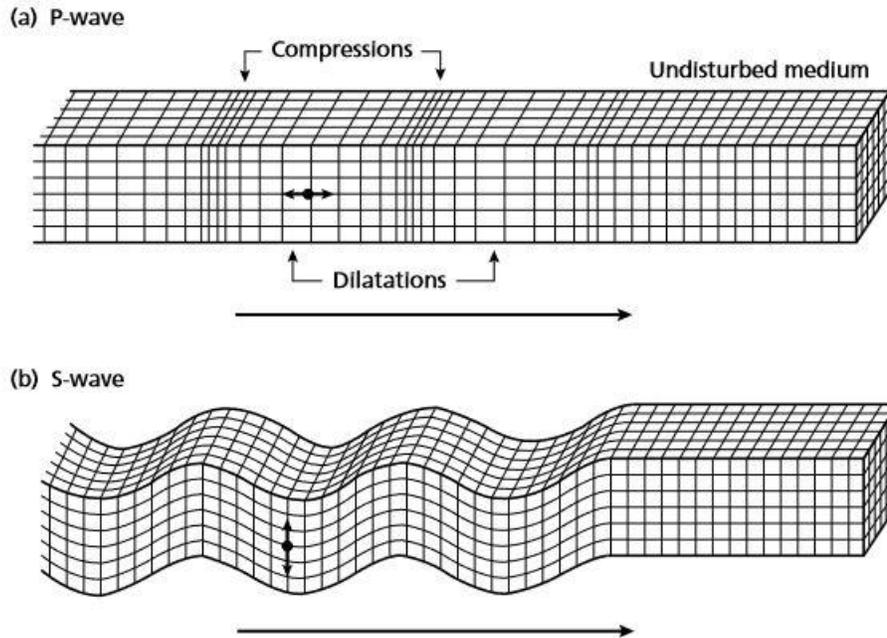


Figura 18. Deformaciones elásticas y movimientos de partículas en el suelo asociados con el paso de las ondas corporales. (a) Onda P. (b) Onda S.

3.4.2 Velocidades Sísmicas

Las velocidades sísmicas de las rocas son las velocidades a las que los movimientos de las ondas viajan a través de ellas. Son bastante diferentes de las velocidades continuamente variables de las partículas de roca oscilante individuales.

Cualquier velocidad de onda elástica (V) se puede expresar como la raíz cuadrada de un módulo elástico dividida por la raíz cuadrada de la densidad (ρ). Para las ondas P, la elasticidad elongacional, j es apropiada, para las ondas S, el módulo de corte, μ . Las ecuaciones:

$$V_p = \sqrt{j / \rho} \quad V_s = \sqrt{\mu / \rho} \dots\dots\dots \text{Ecuación 12}$$

Sugieren que los bloques de alta densidad deberían hacer una búsqueda de las viscosidades, pero como las constantes elásticas normalmente aumentan rápidamente con la densidad, lo contrario suele ser cierto. La sal es la única roca común que tiene una alta velocidad, pero una baja densidad. Si se conocen la densidad y las velocidades de las ondas



P y S de una masa rocosa, se pueden calcular todas las constantes elásticas, ya que están relacionadas por las ecuaciones:

$$\begin{aligned}(V_p / V_s)^2 &= 2(1 - \sigma) / (1 - 2\sigma) && \text{Ecuación 13} \\ \sigma &= [2 - (V_p / V_s)^2] / 2 [1 - (V_p / V_s)^2] \\ j &= q(1 - \sigma) / (1 + \sigma)(1 - 2\sigma) \\ \mu &= q / 2(1 + \sigma) \\ K &= q / 3(1 - 2\sigma)\end{aligned}$$

donde σ es la relación de Poisson, q es el módulo de Young y K es el módulo de volumen. Se deduce que $j = K + 4\mu / 3$ y que una onda P siempre viaja más rápido que una onda S en el mismo medio. La relación de Poisson es siempre inferior a 0,5. En este límite, V_p / V_s es infinito. La mayoría de las prospecciones sísmicas proporcionan estimaciones solo de las velocidades de onda P, que son guías bastante aproximadas de la calidad de la roca. La tabla 5 muestra los rangos de velocidad para las rocas comunes (Milsom, J. 2003).

3.4.3 Método Sísmico de Refracción

En este método la fuente y los detectores se encuentran alineados en la superficie del terreno. Se obtienen registros de las ondas que viajan desde la fuente hasta los detectores a través del subsuelo siguiendo diversas trayectorias o caminos. En particular aquí interesan aquellas ondas que siguen la trayectoria de tiempo mínimo y que son las primeras que llegan a cada detector. Con ellas se dibuja un gráfico donde las abscisas son distancias desde la fuente hasta cada detector y el eje de las ordenadas son los respectivos tiempos de primera llegada. Este gráfico se denomina gráfico tiempo-distancia, y las curvas representadas son las dromocrónicas. En principio, a partir de este gráfico es posible calcular el perfil de espesores y la velocidad de propagación de las ondas sísmicas primarias de cada estrato en el subsuelo (Cavada, J. M., 2000).



3.4.3.1 Recogida de las llegadas de refracción.

La selección de los primeros arribos en los registros de refracción se basa en estimaciones subjetivas de las primeras posiciones de ruptura y puede ser difícil en geófonos remotos donde la relación señal-ruido es baja. Es probable que algunos de los picos y depresiones posteriores en el mismo tren de ondas sean más fuertes y, a veces, es posible trabajar con ellos para estimar la posición de la primera ruptura. Sin embargo, debido a que las altas frecuencias se absorben selectivamente en el suelo, la distancia entre la primera ruptura y cualquier pico posterior aumenta gradualmente a medida que aumenta la distancia desde la fuente. Además, la traza más allá de la primera rotura se ve afectada por muchas otras llegadas, así como por partes posteriores del tren de olas primarias, que modificarán las ubicaciones de pico y valle. El uso de características posteriores para estimar los tiempos de primera llegada siempre debe considerarse como un sustituto deficiente de la selección directa (Milsom, J. 2003).

Tabla 5. Velocidades de ondas primarias (Reynolds J.M., 1997).

Material	V_p (m/s)	Material.	V_p m/s
Aire	330	Arenisca	1400-4500
Agua	1450-1530	Caliza (suave)	1700-4200
Petroleo	1300-1400	Caliza (dura)	2800-7000
Suelo	100-500	Dolomita	2500-6500
Nieve	350-3000	Anhidrita	3500-5500
Hielo Glaciar solido	3000-4000	Yeso	2000-3500
Arena (suelta)	200-2000	Lutitas	2000-4100
Arena (seca, suelta)	200-1000		
Arena (saturada,suelta)	1500-2000	Granito	4600-6200
Morrena glaciar	1500-2700	Basalto	5500-6500
Arena y grava (cerca de superficie)	400-2300	Gabro	6400-7000
Arena y grava (a 2km de profundidad)	3000-3500	Peridotita	7800-8400
Arcilla	1000-2500	Serpentina	5500-6500
Estuario lodo/arcilla	300-1800	Gneiss	3500-7600
Llanura aluvial de inundacion	1800-2200	Marmol	3780-7000
Permafrost (sedimentos cuaternarios)	1500-4900		
		Sulfuros	3950-6700



4. METODOLOGIA

4.1. Selección del área de estudio

La primera actividad realizada fue plantear una zona en la cual se tuviera un contraste geológico significativo, para poder aplicar la comparación de los métodos geofísicos. El área de Estación Terrazas fue la zona seleccionada ya que en este lugar se encuentra el Distrito Minero Terrazas el cual esta emplazo en una provincia metamórfica de contacto, teniendo como roca intrusiva una granodiorita que contacta a calizas de la formación Aurora dando como resultado un Skarn de granate.

Hidrogeológicamente la zona tiene potencial de explotación de agua sobre la sierra fracturada al nor-noreste de Estación Terrazas, en la zona la Junta Municipal de Aguas y Saneamiento tiene pozos ubicados sobre las fracturas conductoras de agua, estas fracturas son visibles al realizar un análisis fotogeológico.

Para la delimitación de la zona de estudio fue necesario realizar la revisión de los antecedentes de la zona, donde diferentes dependencias proporcionaron esta información resultado de diferentes estudios. La CONAGUA, la Junta Municipal de Aguas y Saneamiento y la Junta Central de Aguas y Saneamiento fueron punto clave ya que estas instituciones proporcionaron la información que estaba a su alcance para lograr el objetivo de recopilación de información, pasando estudios del Acuífero Sauz-Encinillas de donde se filtraron los datos de utilidad para el área de Estación Terrazas, Chihuahua. La información geológica fue revisada con las cartas geológico-mineras que expide el Servicio Geológico Mexicano así como la información geofísica que se tiene por parte de esta institución.

Con este análisis se logró ubicar puntos ideales para la realización de sondeos eléctricos verticales, sondeos sísmicos de refracción y levantamiento de puntos magnéticos en la zona.

El área de estudio seleccionada se describe en el apartado de localización (Figura 1) en donde se ubicaron puntos para realizar sondeos eléctricos verticales, sondeos sísmicos de refracción y por último el levantamiento magnético de la zona.



4.2 Análisis Geológico de la zona de estudio.

Una actividad de suma importancia fue la revisión de la información geológica que se contaba en la zona, para esto se checo la geología de las cartas del Servicio Geológico Mexicano y la información de los documentos realizados por parte de la CONAGUA, tales como las actualizaciones y documentos de estudio específicos del Acuífero El Sauz-Encinillas ya que la zona se localiza en la parte sureste del mismo.

Debido a las discrepancias observadas entre la información recopilada se realizaron recorridos geológicos en la zona para comprobar las unidades que se mencionan en los estudios, dando como resultado una combinación de unidades de ambos estudios para realizar un nuevo mapa más acorde a lo visto en las visitas a campo. El mapa final se observa en el apartado de Geología con el nombre de Figura 5.

4.3 Estudios geofísicos previos

4.3.1. Método eléctrico

Del estudio elaborado por CONAGUA en 2011, se extrajo información geofísica clave de la zona de estudio ya que en este documento se realizaron Sondeos eléctricos Verticales y con ellos se generaron secciones geoeléctricas, esto nos da una idea de los materiales que probablemente se tienen en la zona. Para esto se tomó la sección geoeléctrica 08 (SG-08) la cual está dentro del área que se estudiara. Los sondeos se reinterpretaban para corroborar las unidades geoeléctricas obtenidas en el estudio.

A continuación, la descripción de la sección geoeléctrica 08:

Sección geoeléctrica 08 (SG-08): Está compuesta por los sondeos 1103, 1104, 1105, 3 y 1. Tiene una orientación noroeste-sureste. Está ubicado en sector sureste del acuífero. La máxima profundidad de penetración fue de 205 m en el SEV 1103. Se detecta la presencia de rocas en todos los SEV's (posiblemente tanto rocas carbonatadas como rocas riolíticas). Esta interpretación es confirmada por el corte litológico del pozo 03-21, localizado cerca del SEV 3, en el cual se cortó roca. Cubriendo a esta unidad se deposita una capa de material fino (arcilloso) con un espesor de hasta 80 m en la porción izquierda y de hasta 20 m en la porción derecha. Sobre este material se encuentran depósitos limo-arenosos de hasta 100 m



de espesor en los sectores izquierda y central. El potencial hidrogeológico de esta sección es regular, debido a lo delgado de su espesor y a la presencia de los lentes de material arcilloso (CONAGUA, 2011).

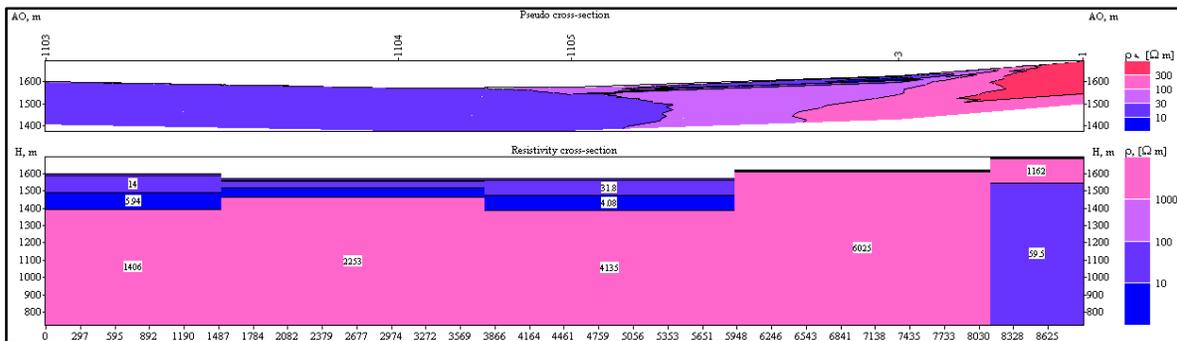


Figura 19. Sección Geoeléctrica 08 realizada por CONAGUA en 2011.

Los sondeos eléctricos fueron interpretados con el programa de cómputo IPI2WIN, junto con las secciones correspondientes.

4.3.2. Método magnético

En la búsqueda de información para la aplicación de este método se localizaron las cartas magnéticas a diferentes escalas y aplicaciones de filtros que el Servicio Geológico Mexicano tiene publicadas, dando como resultado la obtención de la carta magnética de campo total con reducción al polo “Chihuahua H13-10” con una escala de 1: 250,000, y la carta magnética de campo total “Sacramento H13-C56” con escala de 1: 50,000.

En la búsqueda de estas cartas se encontró el Texto guía, de la carta magnética “Chihuahua H13-10”, antes mencionada el cual nos da la descripción de los dominios magnéticos interpretados en la elaboración de la carta y como fue el procedimiento de la recolecta de datos aeromagnéticos en la zona.

La interpretación del dominio magnético que nos interesa se describe a continuación:

El dominio magnético identificado como A_1 se atribuye a rocas ígneas intrusivas de composición félsica a intermedia. Se caracteriza por una respuesta en forma de monopolos y pequeños dipolos magnéticos cuya intensidad varia de -100 a +250 nT (nano Tesla), su expresión magnética es de anomalías de bajo gradiente y forma regular, la mayoría de las veces la respuesta está distorsionada por el efecto de las rocas volcánicas superficiales. Esto



se refiere al dominio A_1 en general, siguiendo el texto desglosa este dominio en varios, los cuales describe con más detalle. Para Estación Terrazas lo define como anomalías monopolares con intensidad de +150nT y +250 nT (SGM, 1998).

Los siguientes mapas son resultado de la georeferenciación de las cartas antes mencionadas para observar la distribución del dominio magnético y la repuesta magnética en la zona de Estación Terrazas.

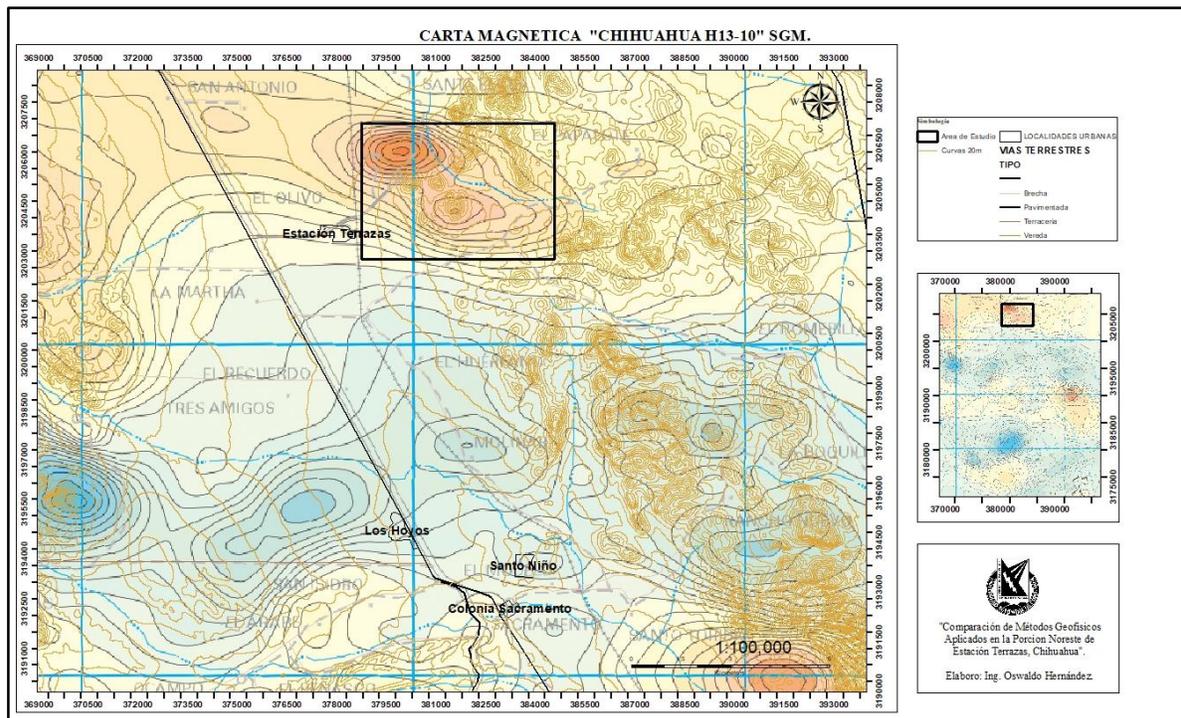


Figura 20. Carta Magnética Chihuahua H13-10 del SGM, georeferenciada para la ubicación del área.

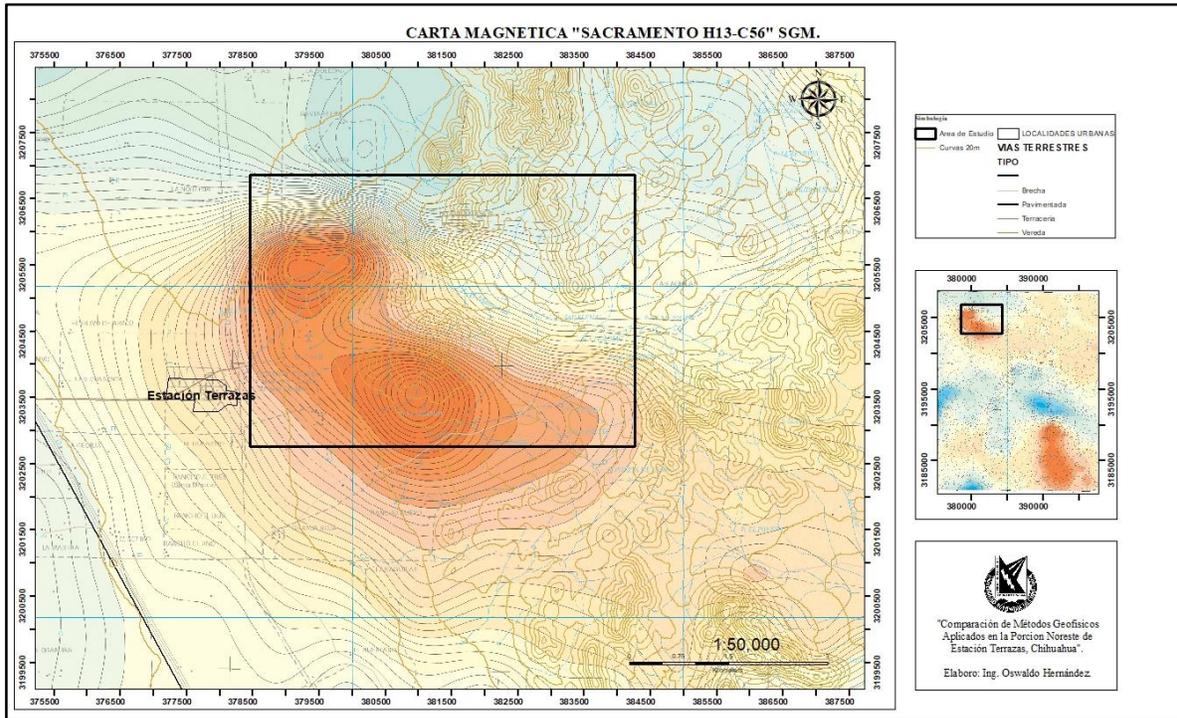


Figura 21. Carta Magnética Sacramento H13-C56 del SGM, georeferenciada para la ubicación del área del estudio.

4.4. Obtención, Procesamiento y Análisis de información

4.4.1. Obtención de datos por método eléctrico

Para la aplicación del método eléctrico en los dos arreglos seleccionados, Schlumberger y Wenner, se tomaron 5 sondeos eléctricos del estudio realizado por parte de CONAGUA en 2011, estos sondeos se reinterpretaron y fueron esenciales para proponer puntos y obtener una idea de los materiales que se encuentran en el subsuelo.

La obtención de las medidas de resistividad de los SEV's realizados se utilizaron dos equipos, el equipo eléctrico Sting R1 marca AGI y el equipo eléctrico Syscal Jr. Marca IRIS (Figura 22).



Figura 22. Equipos de resistividad propiedad de la Facultad de Ingeniería, los cuales fueron utilizados para obtener lecturas in situ.

En la aplicación del método eléctrico en arreglo Wenner se realizaron 10 SEV's en la zona para detallar con más exactitud los materiales subsuperficiales de la zona, más aparte la finalidad de comparar los resultados de arreglo, a arreglo. La obtención de las medidas de resistividad fueron los mismos equipos para la toma de medidas resistivas en arreglo Schlumberger (ver figura 22).

Las aperturas máximas de sondeo fueron de 60 metros entre electrodos A y B, esto también tiene la finalidad de comparar los resultados interpretados con el equipo sísmico de refracción que más adelante se detallara.

4.4.1.1. Procesado de datos eléctricos

Los datos de campo se insertaron en el software WinSev6 (W_Geosoft), este programa grafica los datos de campo en un gráfico logarítmico de distancia AB contra resistividad aparente (Figura 23). Después se calcula la curva suavizada con un modelo matemático, y es ajustada con el menor porcentaje de erros posibles, esto implica muchas veces se realiza a mano, una vez suavizada la curva, se obtienes los datos de resistividades, espesores y profundidades, que se ajustan con la suavización de la curva y la información geológica de la zona para una mejor interpretación de las unidades geoelectricas que se tiene en ese punto.

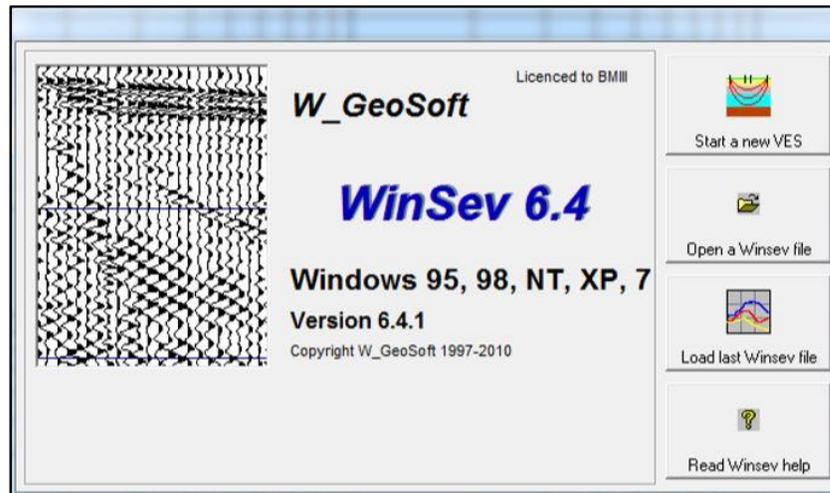


Figura 23. Pantalla de bienvenida del software WinSEV 6.4.

4.4.2. Obtención de datos por método sísmico

Para la aplicación de este método se tomaron en cuenta la ubicación de las estructuras geológicas y los SEV's en arreglo Wenner, para este método se aplicaron dos aperturas totales, 60 metros y 120 metros (Figura 24), esto con la finalidad de obtener diferentes profundidades ya que esta depende de la apertura realizada.

En las líneas de 120 metros se realizó una extensión con el cable original del sísmógrafo, esto tomando como referencia que la separación de geófonos en el carrete original es de 5 metros, con las extensiones se duplicó la separación a 10 metros.

Se coloca una placa metálica que se impacta con un marro de 14 libras, para tener las ondas que serán registradas por los geófonos, en el caso de las líneas de 60 metros la zona de impacto se colocó a 10 metros del primer geófono, en las líneas de 120 metros la zona de impacto se colocó a 15 metros del primer geófono.

La figura 24 muestra gráficamente los distanciamientos y la colocación de cada elemento para realizar la toma de datos sísmicos de refracción:

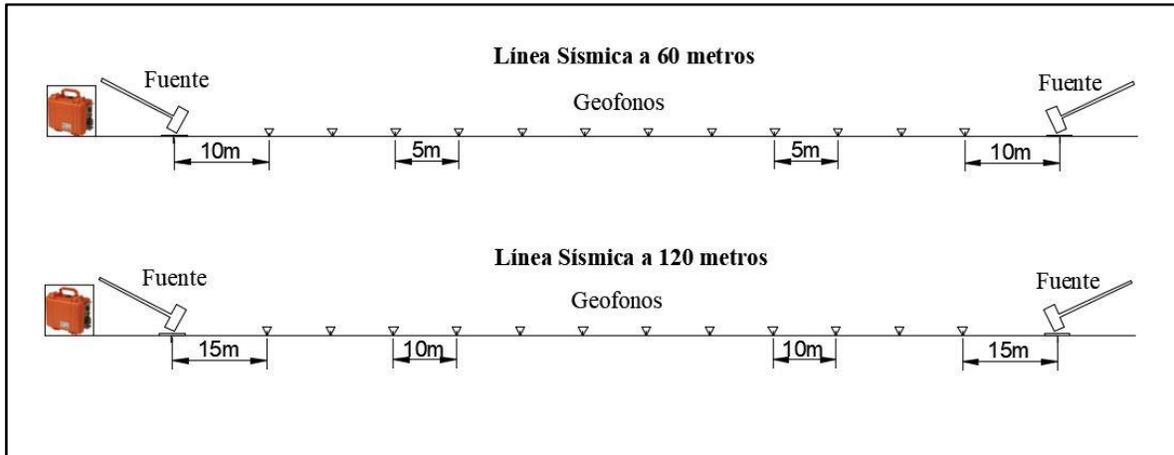


Figura 24. Arreglo físico para realización de sondeos sísmicos.

La recolección de datos en este método se utilizó el sismógrafo ES-3000 marca GEOMETRICS (Figura 25).



Figura 25. Sismógrafo WS-3000 de Geometrics.

4.4.2.1. Procesado de datos sísmicos

El procesado de los datos se realizó con la ayuda del Software PickWin (GEOMETRICS, versión Demo) para marcar las ondas primarias y obtener las curvas dromocrónicas propias de cada sondeo sísmico. Una vez obtenidas las curvas y corregidas en el propio software se pasan los archivos a un nuevo software llamado PLOTREFA (GEOMETRICS, versión Demo) en el cual se procesa la información para obtener los perfiles sísmicos con las velocidades arrojadas de los modelos matemáticos que tiene el programa.



Con estos perfiles y las velocidades se interpreta con ayuda de la información previa y la geología de la región.

4.4.3. Obtención de datos por método magnético

Antes de realizar el levantamiento magnético se debe tener en cuenta aspectos importantes, como lo es, el checar el campo total que existe en la zona para saber el valor natural de este en la zona de estudio, otra cosa importante es saber si en los días de levantamiento no se tendrán tormentas solares, ya que estas afectan los valores medidos. Todo esto se checa en la página web “NOAA” (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) del departamento de comercio de los Estados Unidos de América. En este se ingresan las coordenadas centrales del polígono, también da un estimado de la Inclinación y Declinación magnética de la zona a estudiar.

El levantamiento de los puntos magnéticos se elaboró con un solo magnetómetro en este caso de Protón, de la marca GEOMETRICS modelo G-856AX (Figura 26).



Figura 26. Magnetómetro de protón modelo G-856AX de GEOMETRICS.

4.4.3.1. Procesado de datos magnéticos

El procesado de los datos magnéticos se realizó con ayuda del Software Oasis Montaj de Geosoft con versión estudiante, con esta herramienta se obtendrán los mapas correspondientes, los cuales se filtrarán para obtener los resultados deseados, como la reducción al polo del mapa de campo total, continuaciones ascendentes para tener mapas a diferentes profundidades, mapa de anomalía residual el cual muestras las anomalías someras en la zona, señales analíticas, derivadas y Deconvulación Euler.



5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Método Eléctrico

5.1.1 Arreglo Schlumberger

Las coordenadas de los sondeos reinterpretados se muestran en las Tablas 6 y 7, presentadas a continuación:

Tabla 6. Coordenadas de los sondeos reinterpretados proporcionados por la CONAGUA.

No. SEV	Coordenada X	Coordenada Y
1	380780	3204133
3	380851	3205719
1103	373987	3206816
1104	376988	3207260
1105	378095	3206260

Se realizaron 16 SEV's en arreglo Schlumberger en la zona (Figura 27) a una apertura máxima de 1000 m entre electrodos A y B, en algunos sondeos se varió la apertura por las condiciones del terreno. Las coordenadas se muestran en la Tabla 7:

Tabla 7. Coordenadas de los SEV's realizados en la zona de estudio.

No. SEV	Coordenada X	Coordenada Y
SEV 1	379120	3204531
SEV 2	378986	3204020
SEV 3	379231	3205129
SEV 4	378875	3205450
SEV 5	379141	3203498
SEV 6	378870	3206885
SEV 7	379829	3205802
SEV 8	380146	3206595
SEV 9	379688	3204489
SEV 10	379879	3203564
SEV 11	381661	3202936
SEV 12	382778	3203663
SEV 13	382897	3204166
SEV 14	381088	3202709
SEV 15	382554	3204866
SEV 16	382330	3205696

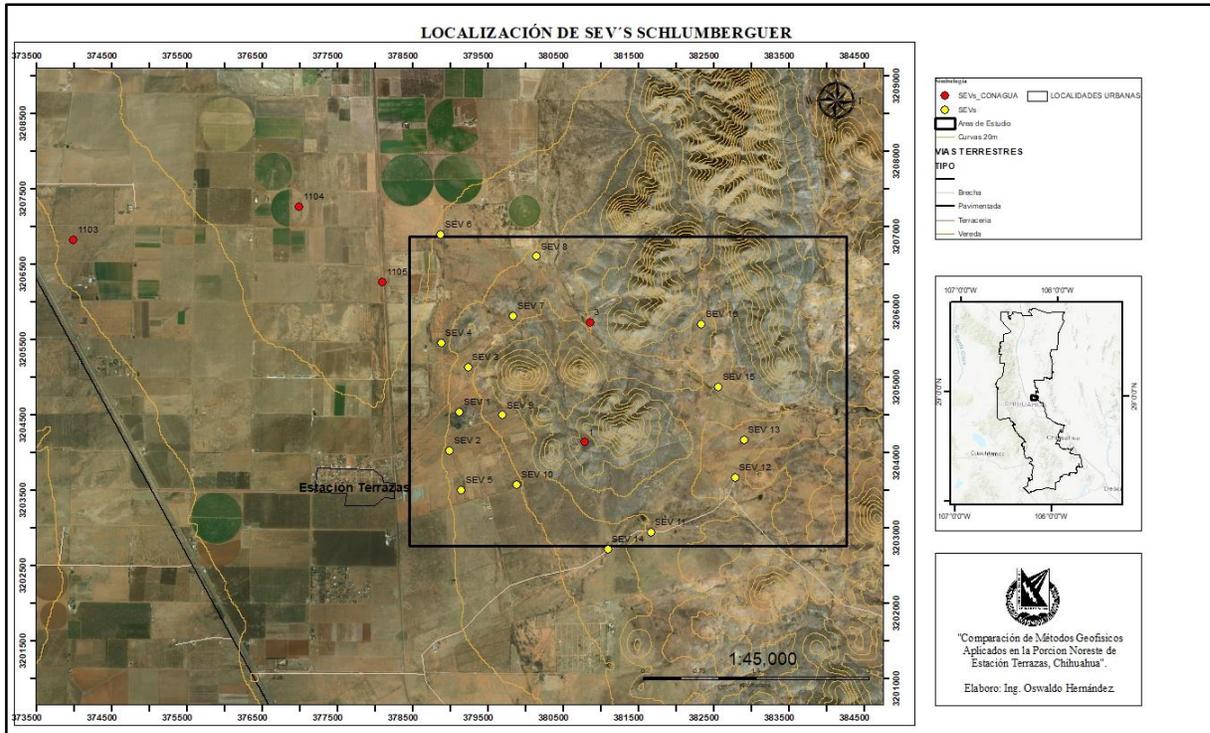


Figura 27. Mapa de localización de SEV's.



Tabla 8. Interpretación del SEV 1:

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
289	1.1		Material producto de la erosión
188	3	1.1	Gravas
72	147	4.1	Arena
30	62	151.1	Limo-arena

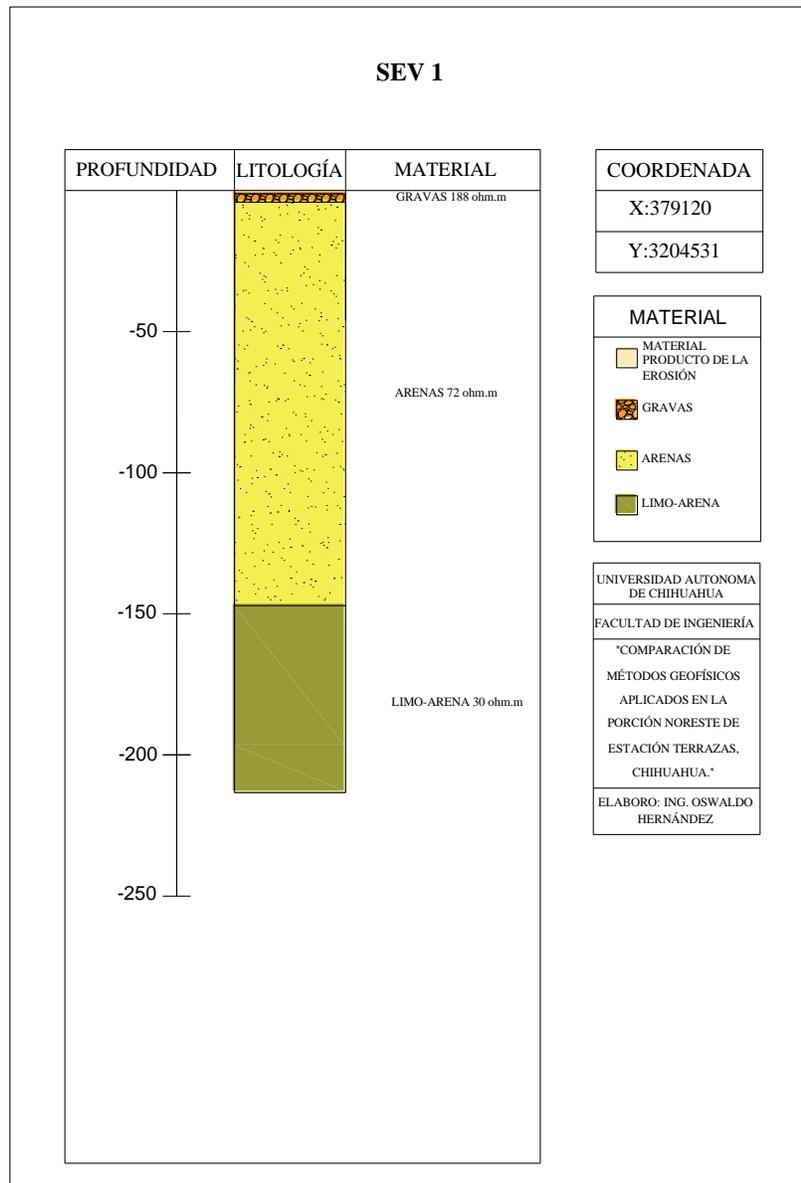


Figura 28. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 1.



Tabla 9. Interpretación del SEV 2:

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
103	1.1		Material producto de la erosión
40	8.4	1.1	Arena
15	323.3	9.7	Arcillas

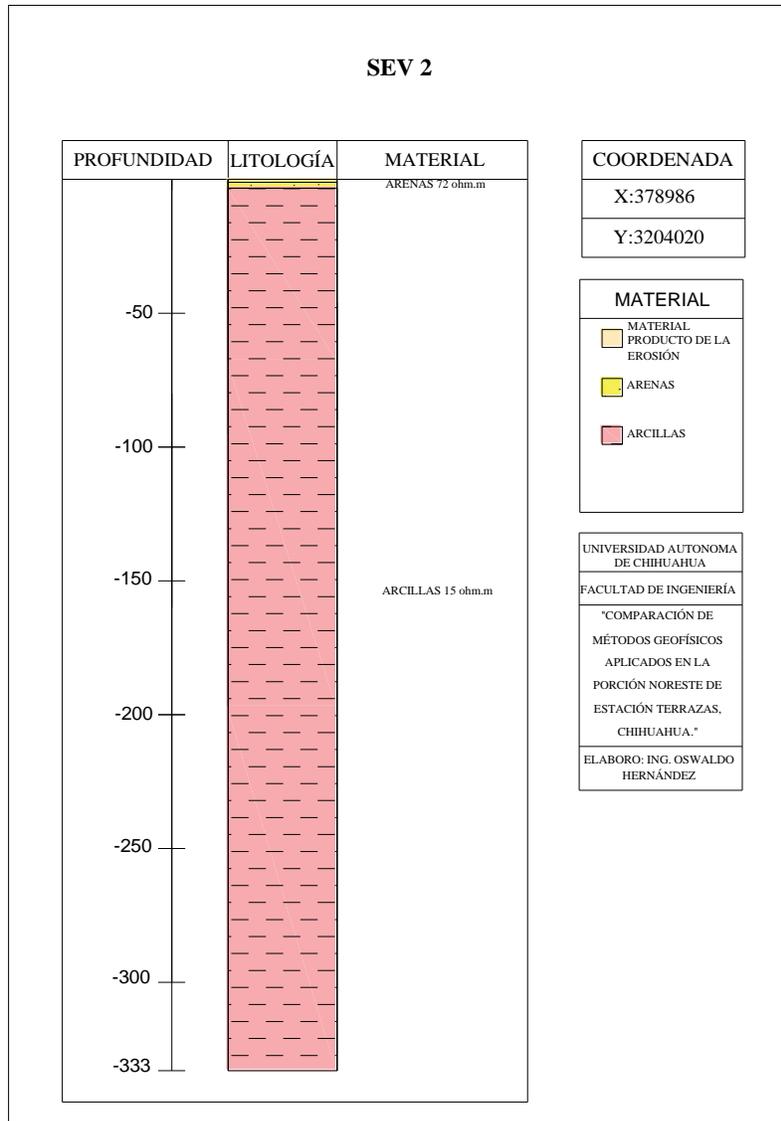


Figura 29. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 2.



Tabla 10. Interpretación del SEV 3:

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
354	1.4		Material producto de la erosión
126	27.8	1.4	Gravas
40	136	29	Arena
550	197	136	Roca

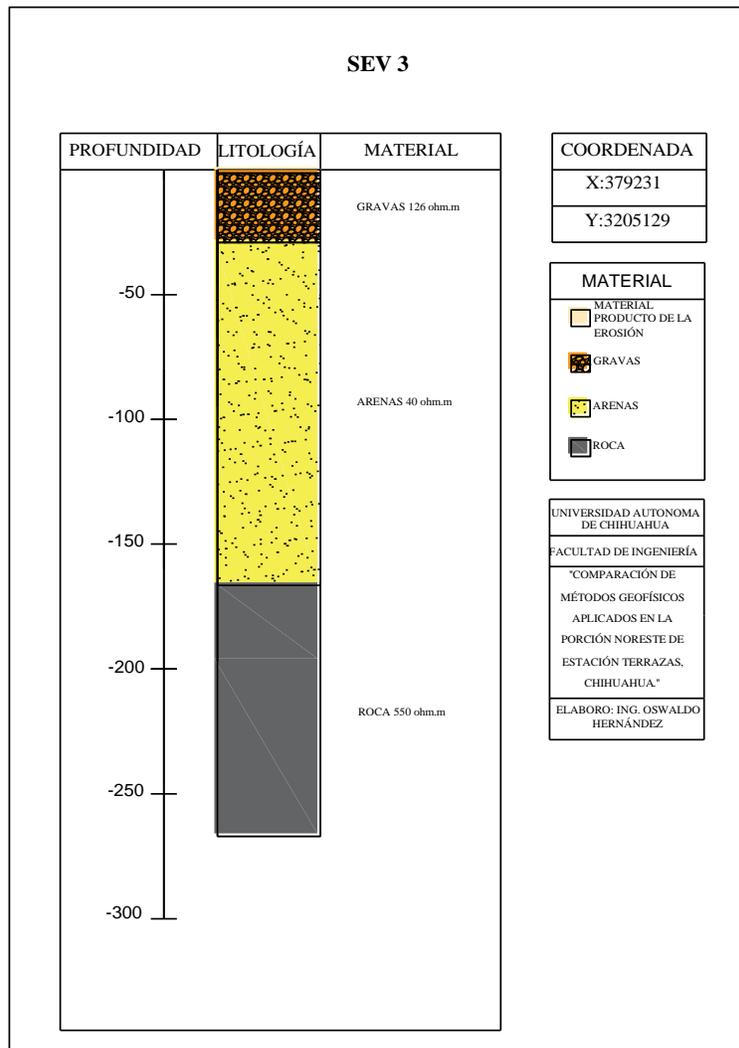


Figura 30. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 3.



Tabla 11. Interpretación de SEV 4:

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
256	3.3		Material producto de la erosión
135	48.3	3.3	Grava
50	281	52	Arena

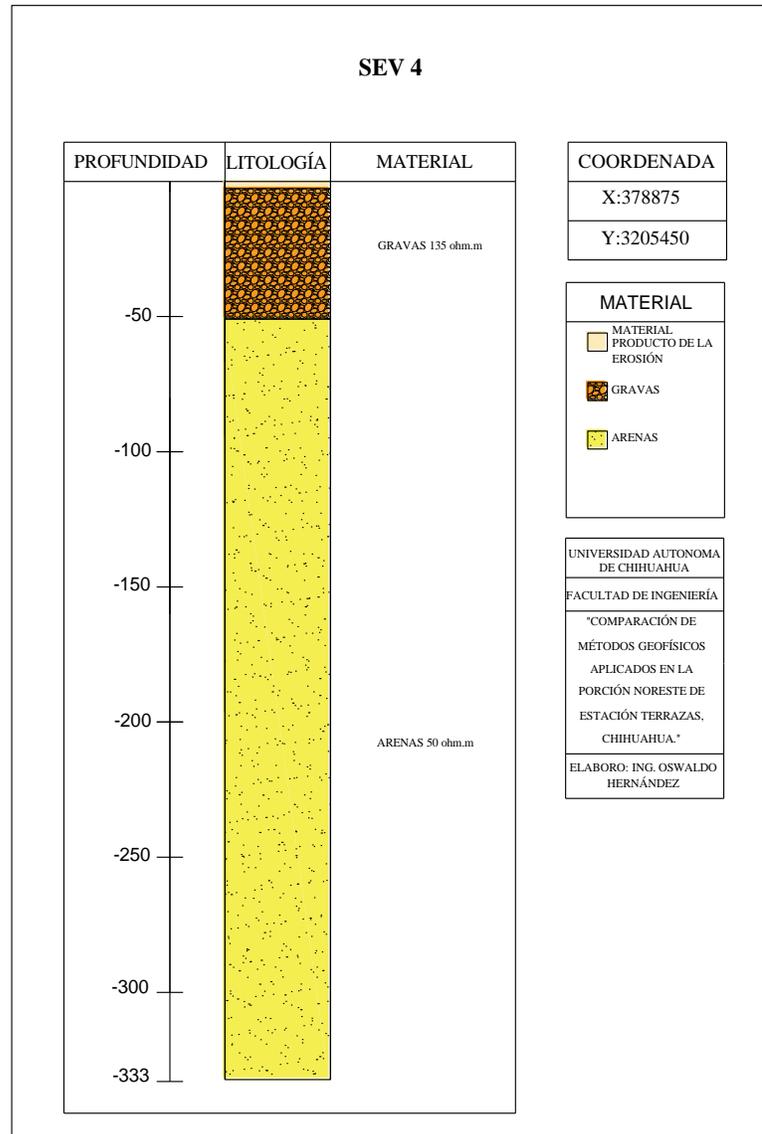


Figura 31. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 4.



Tabla 12. Interpretación del SEV 5:

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
100	1.3		Grava
36	2.8	1.3	Arena
17	328.9	4.1	Arcillas

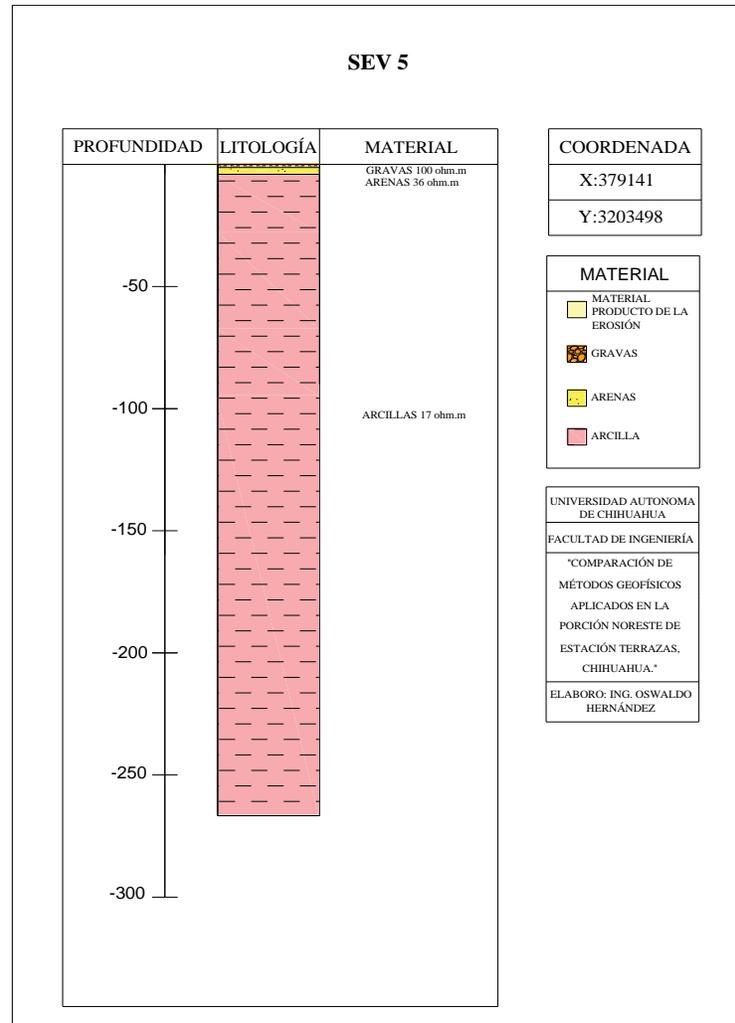


Figura 32. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 5.



Tabla 13. Interpretación del SEV 6:

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
1040	0.81		Material producto de la erosión
120	5.2	0.81	Grava
47	35	6	Arena
15	292	41	Arcillas

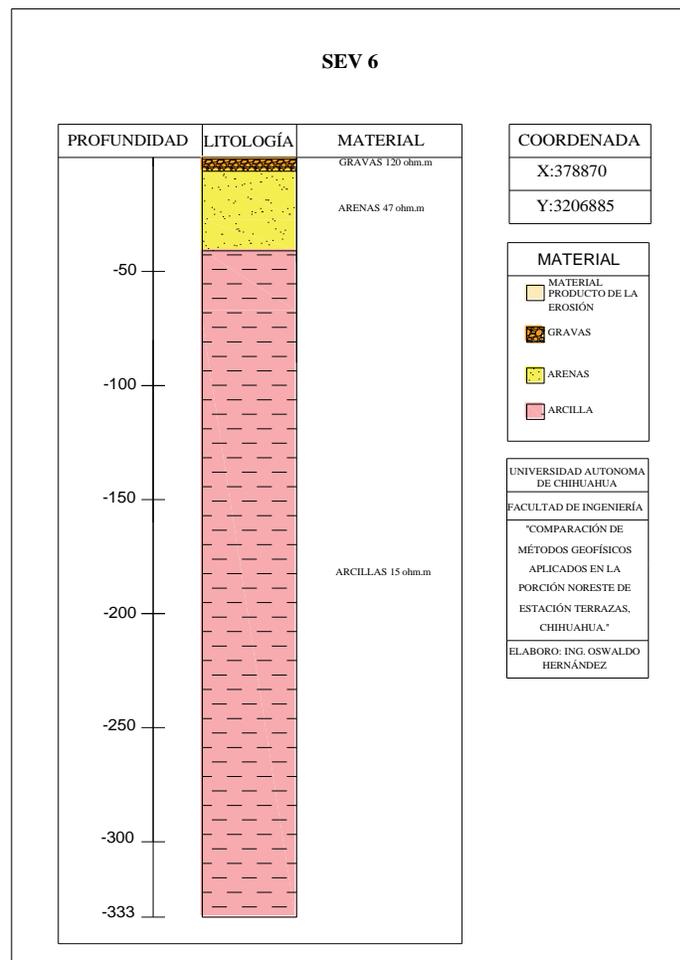


Figura 33. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 6.



Tabla 14. Interpretación del SEV 7:

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
82	2.4		Grava
51	40.6	2.4	Grava-Arena
60	77	43	Arena
201	213	120	Roca

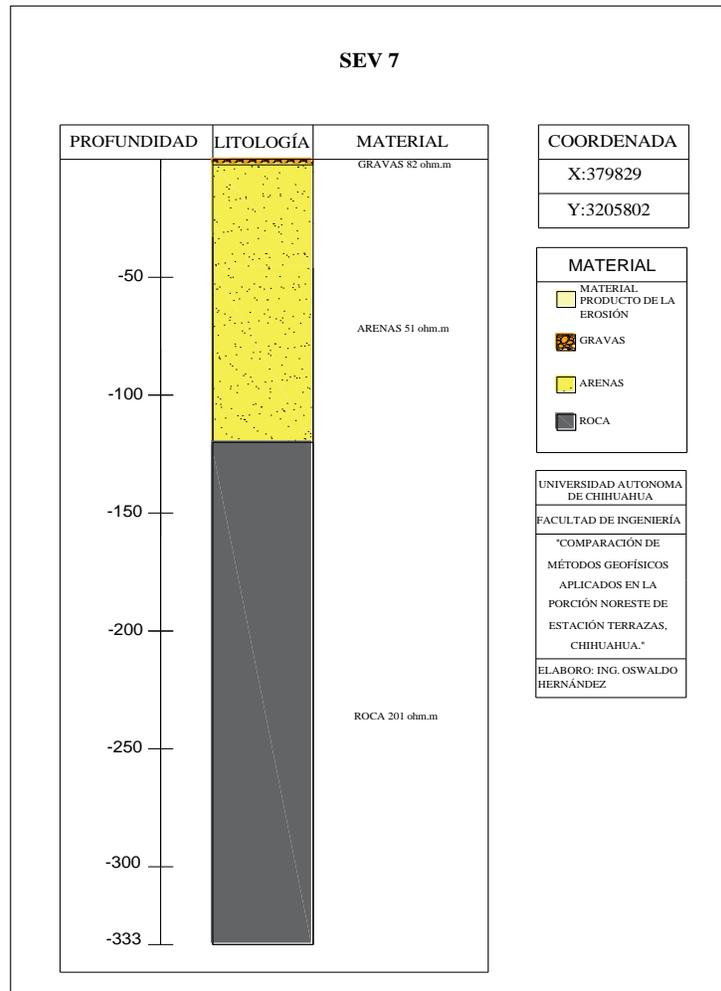


Figura 34. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 7.



Tabla 15. Interpretación del SEV 8:

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
92	42		Grava
31	110	42	Arena
124	138	152	Grava
2.7	43	290	Arcilla

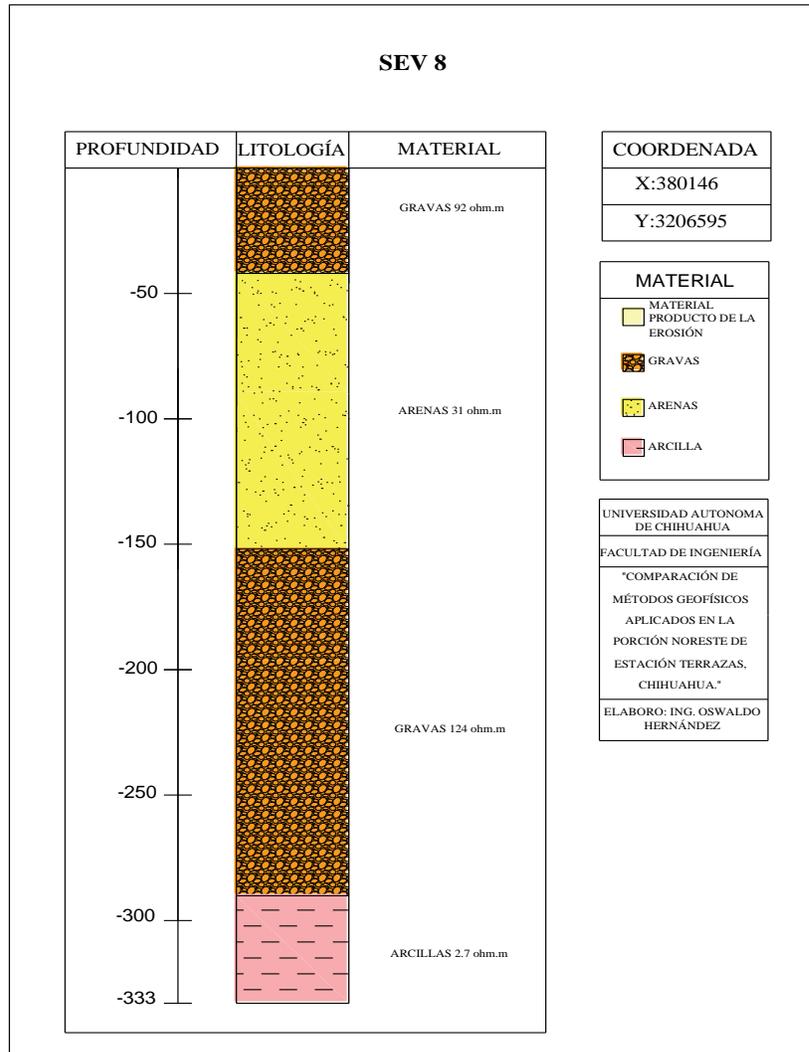


Figura 35. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 8.



Tabla 16. Interpretación del SEV 9:

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
312	1		Material producto de la erosión
127	5.5	1	Grava
38	200	6.5	Arena
7	127	206	Arcillas

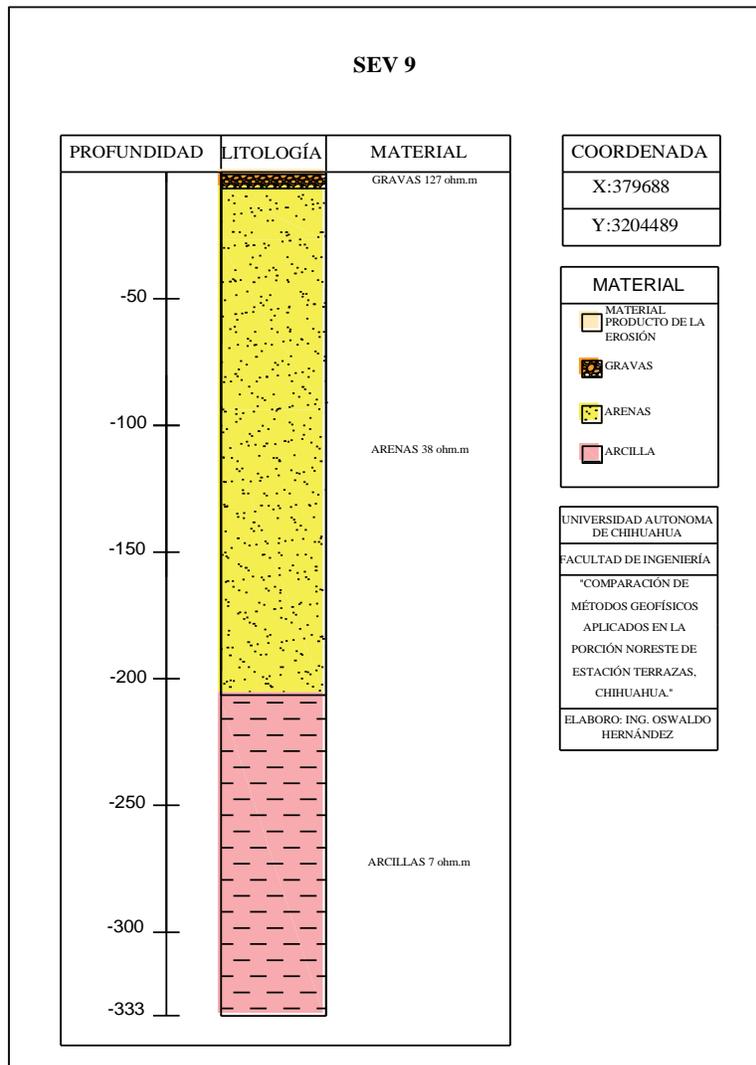


Figura 36. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 9.



Tabla 17. Interpretación del SEV 10:

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
471	2.3		Material producto de la erosión
174	1.7	2.3	Gravas
58	329	4	Arenas

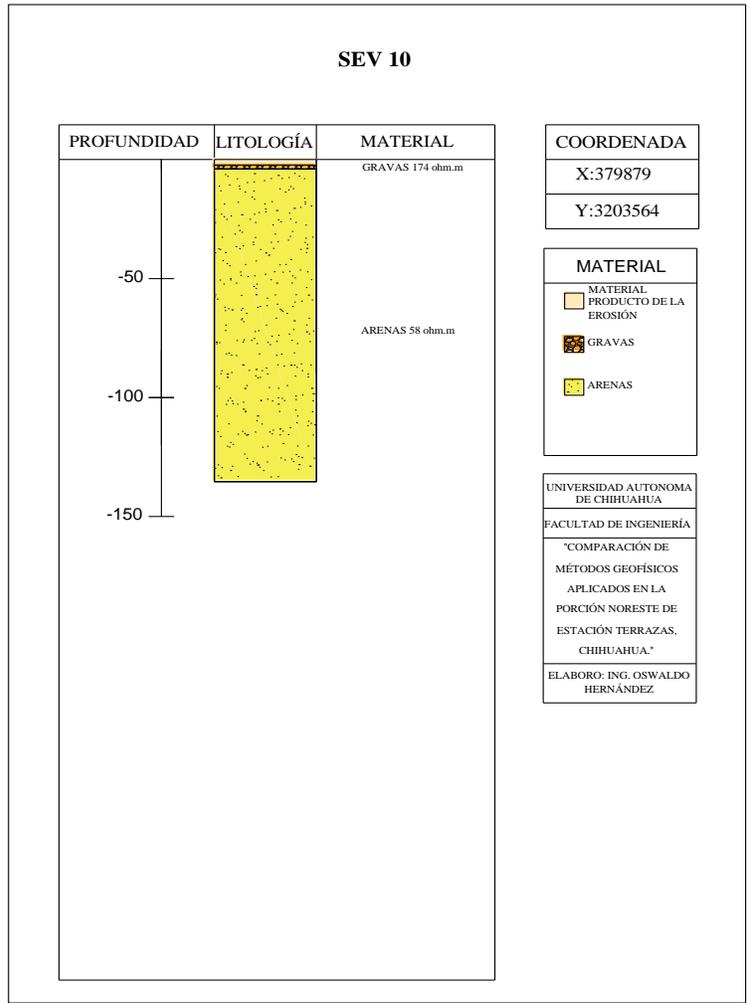


Figura 37. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 10.



Tabla 18. Interpretación del SEV 11:

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
274	1.2		Material producto de la erosión
60	9.6	1.2	Arenas
43	13	11	Arenas
97	8	24	Arenas
78	301	32	Arenas

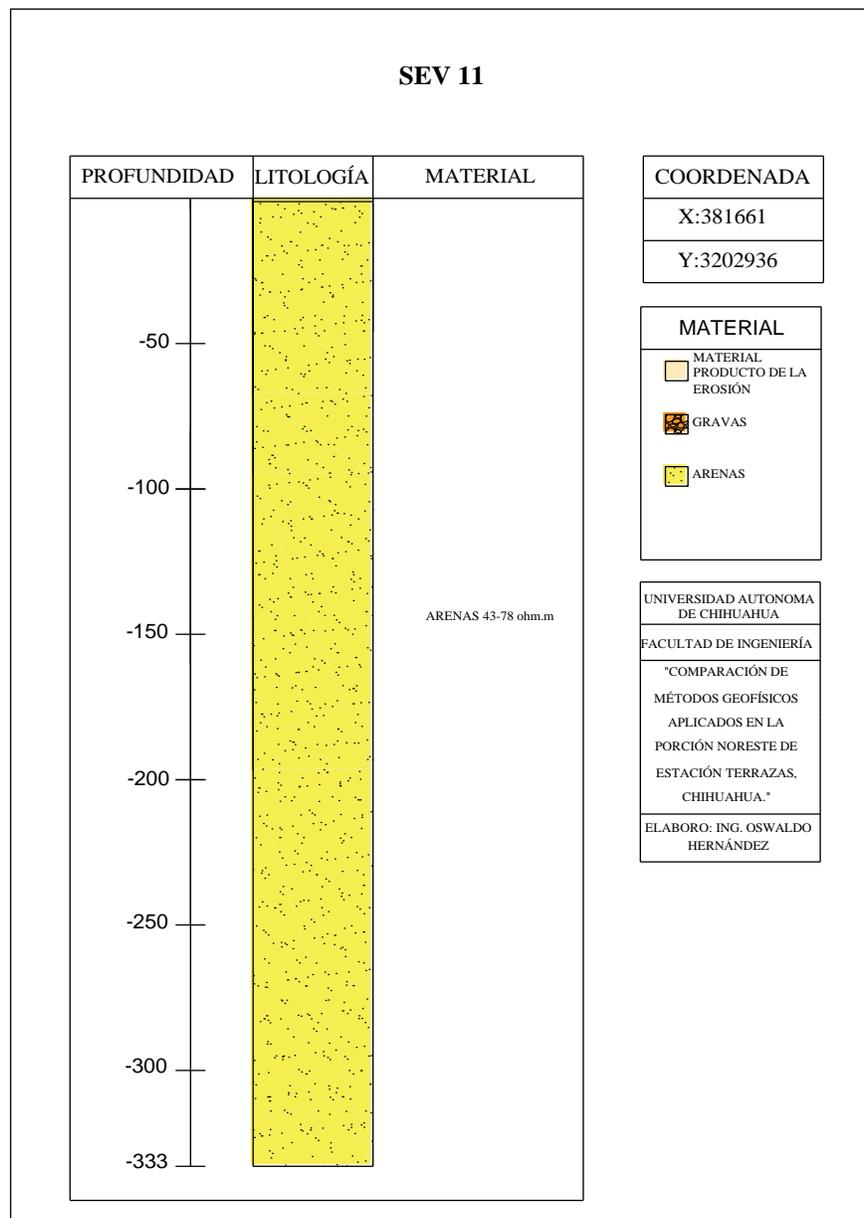


Figura 38. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 11.



Tabla 19. Interpretación del SEV 12:

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
1191	1.4		Material producto de la erosión
635	2.8	1.4	roca
75	15	4.2	roca fracturada y/o alterada
149	290	19	roca fracturada y/o alterada
220	24	309	roca

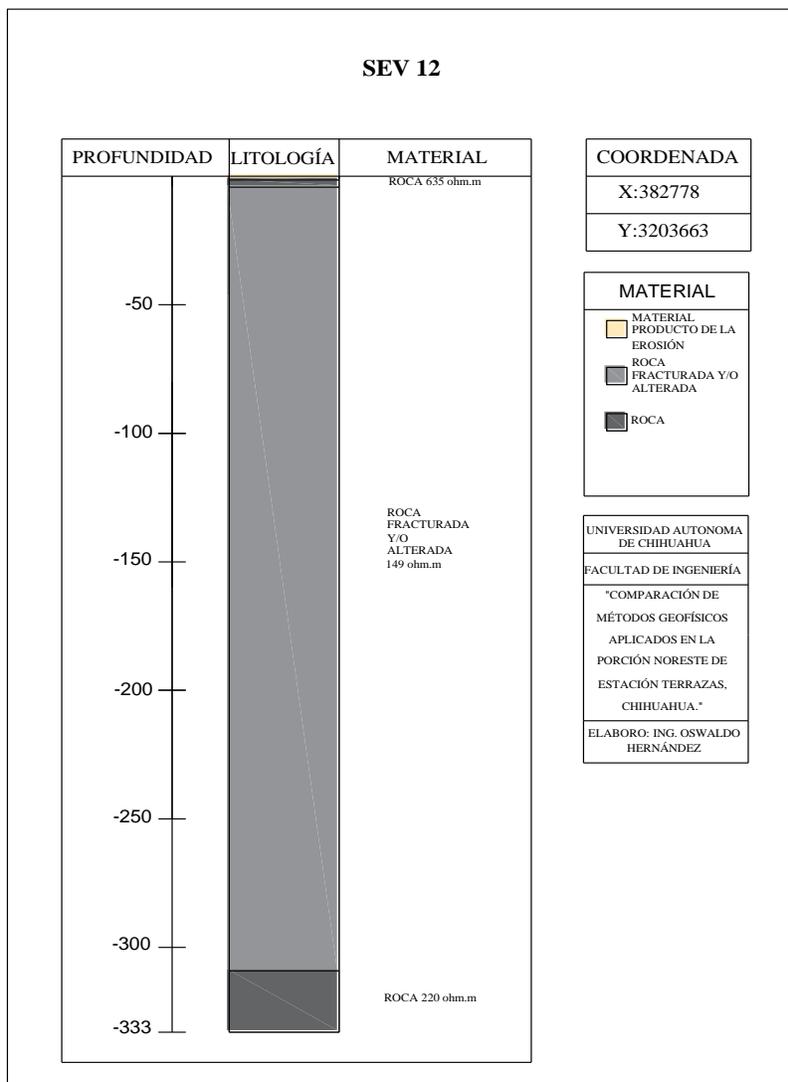


Figura 39. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 12.



Tabla 20. Interpretación del SEV 13:

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
923	0.85		Material producto de la erosión
87	1.5	0.85	Arenas
239	2.5	2.4	Roca
170	26	4.9	Roca fracturada y/o alterada
119	37	31	Roca fracturada y/o alterada
93	39	68	Roca fracturada y/o alterada
150	63	107	Roca fracturada y/o alterada
800	163.33	170	Roca

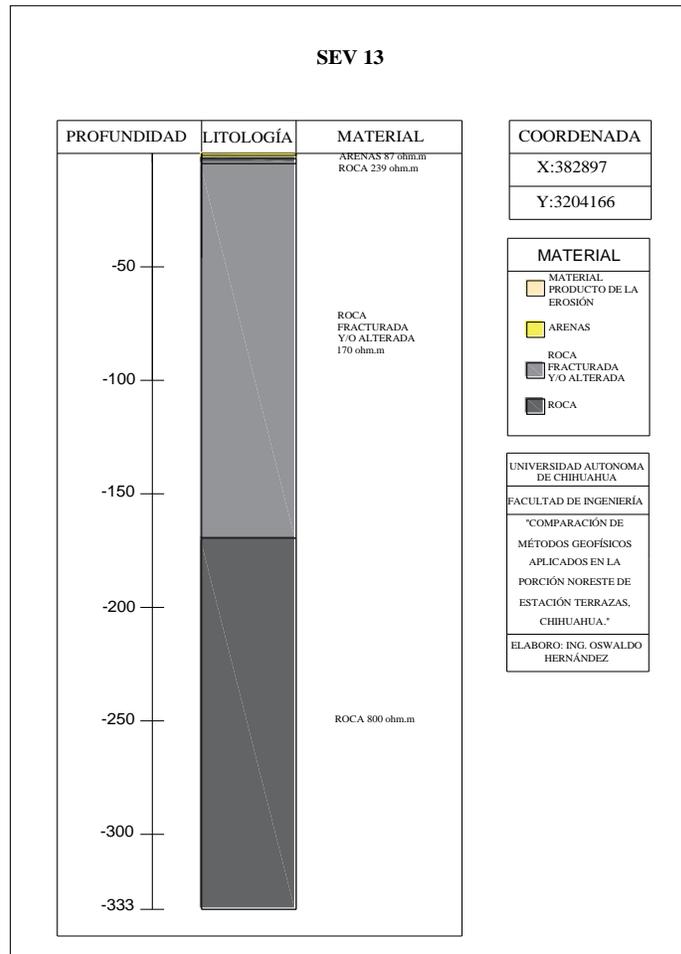


Figura 40. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 13.



Tabla 21. Interpretación del SEV 14:

Resistividad	Esesor	Profundidad	Material
179	0.86		Material producto de la erosión
68	14	0.86	arenas
40	38	15	arenas
90	63	63	arenas
31	217	116	limo-arena

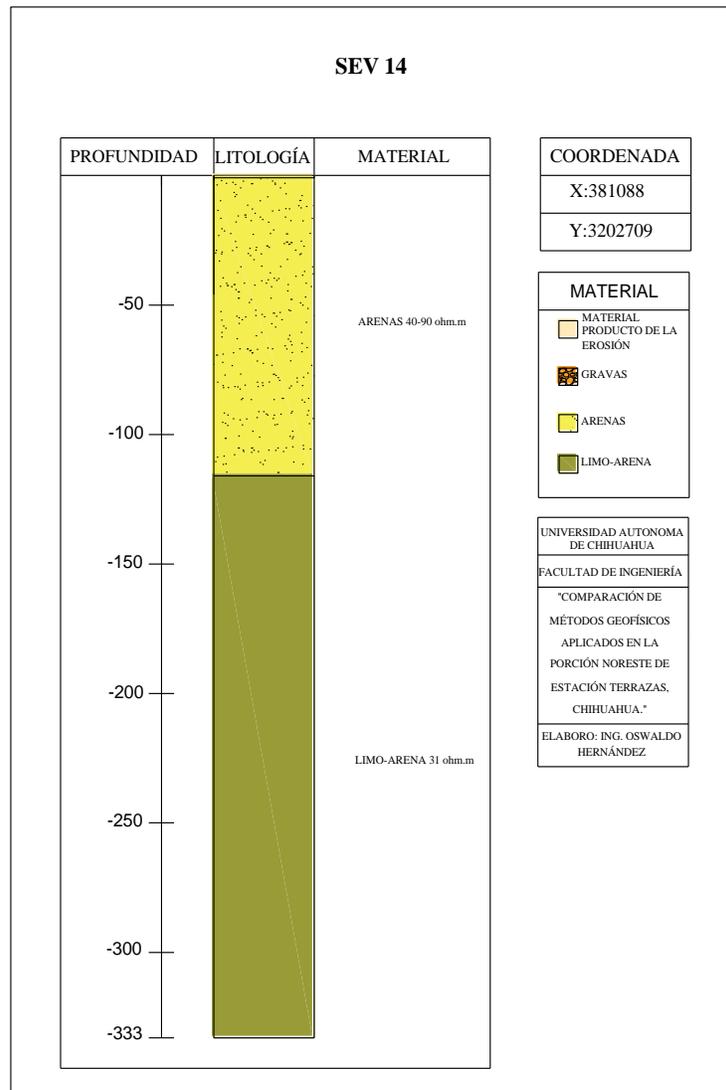


Figura 41. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 14.



Tabla 22. Interpretación del SEV 15:

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
111	0.84		Material producto de erosión
52	1.4	0.84	arenas
71	5.8	2.2	arenas
87	15	8	arenas
94	88	23	arenas
268	221	112	roca

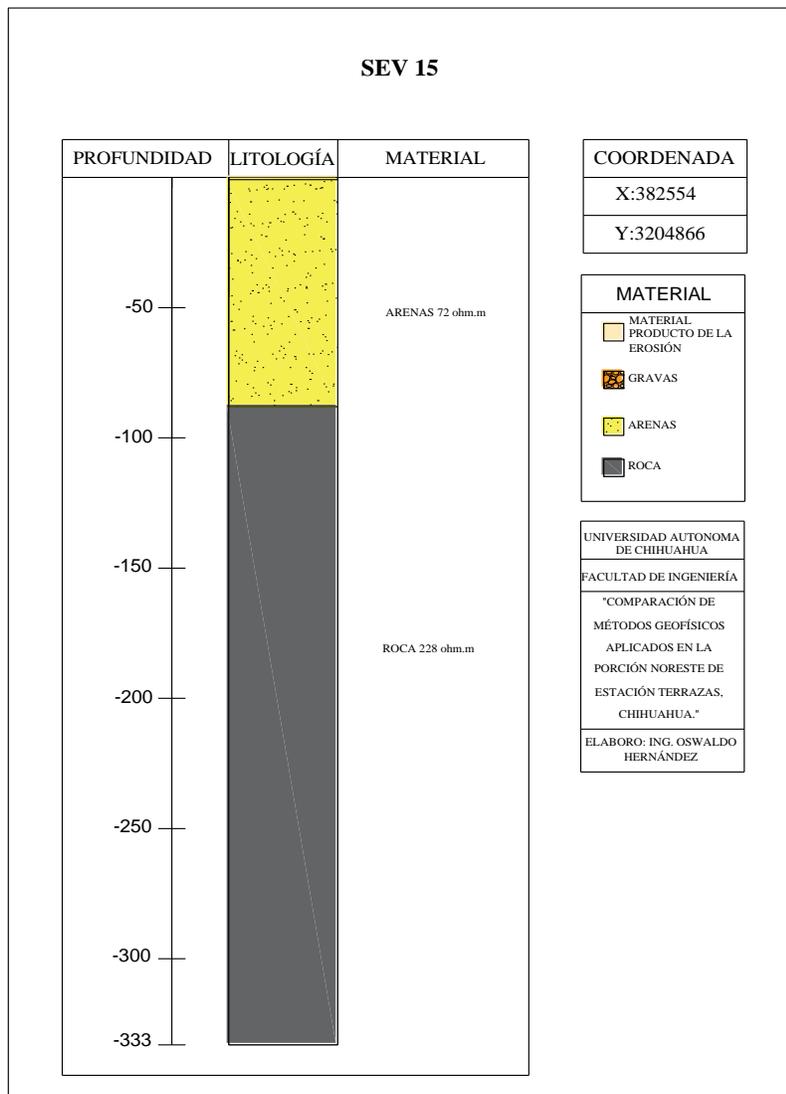


Figura 42. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 15.



Tabla 23. Interpretación del SEV 16:

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
87	1.3		Material producto de la erosión
204	6.8	1.3	Roca
137	36	8.1	roca fracturada y/o alterada
150	34	44	roca fracturada y/o alterada
256	88	78	roca

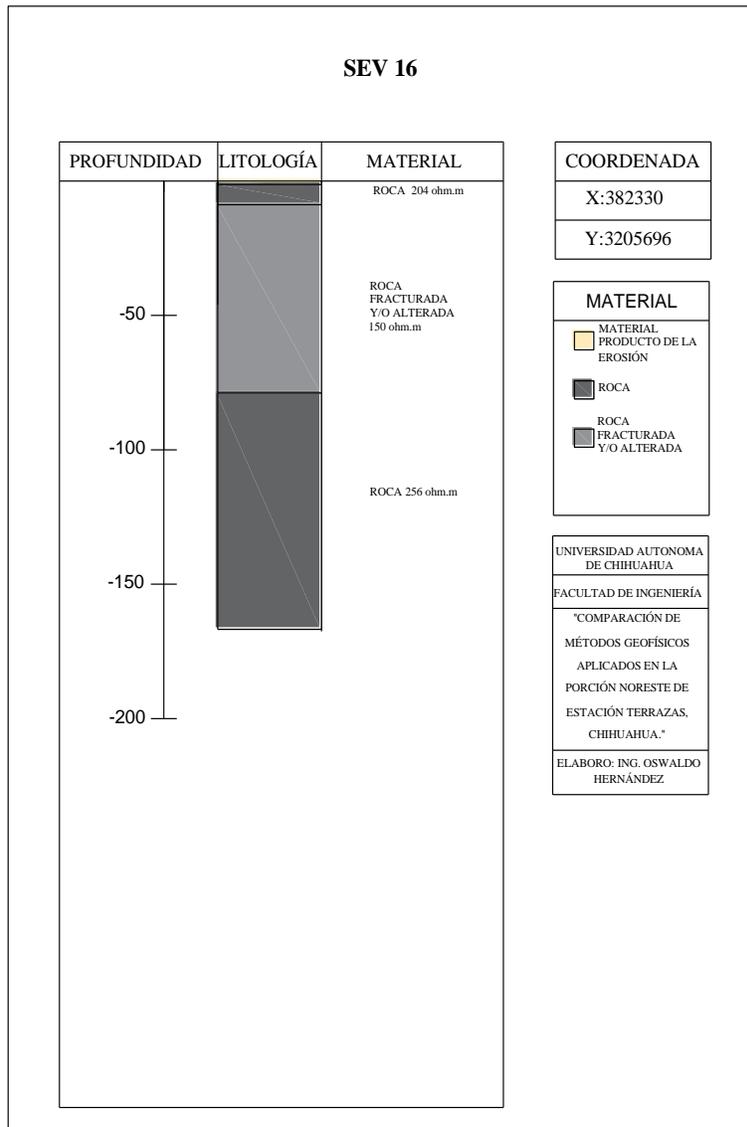


Figura 43. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 16.



Tabla 24. Interpretación del SEV 1 CONAGUA:

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
223	1.6		Material producto de la erosión
104	5.2	1.6	Gravas
294	49	6.8	Roca
97	210	56	Roca fracturada

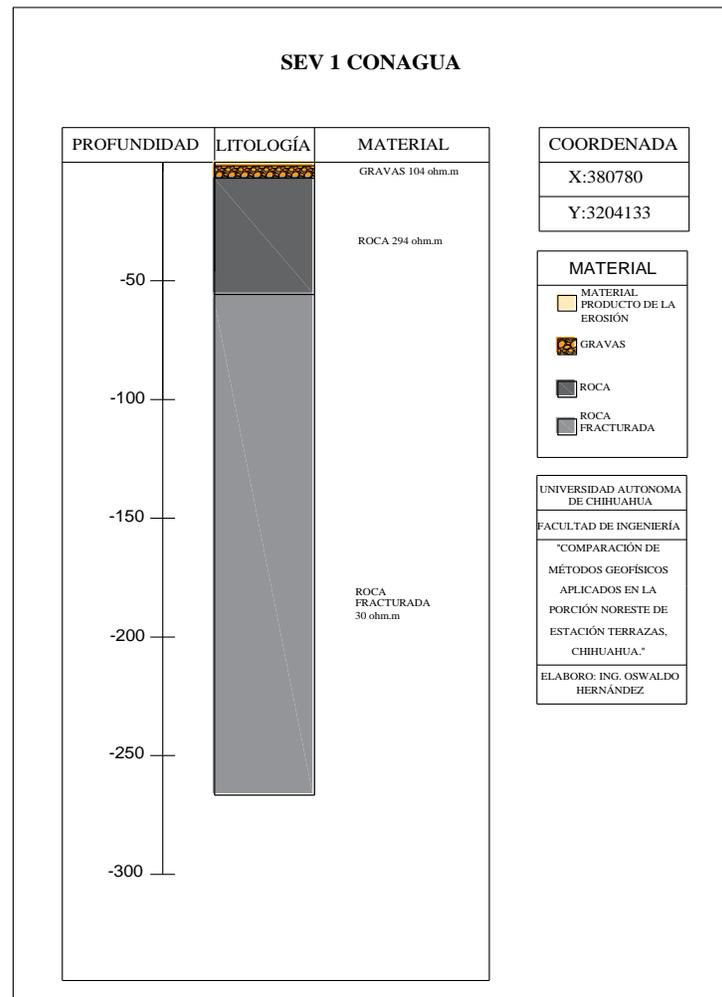


Figura 44. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 1 CONAGUA.



Tabla 25. Interpretación del SEV 3 CONAGUA:

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
130	0.56		Material producto de la erosión
55	2.6	0.56	Arenas
90	3	3.2	Arenas
14	25	6.2	Arcillas
150	15	31	Gravas
819	287	46	Roca

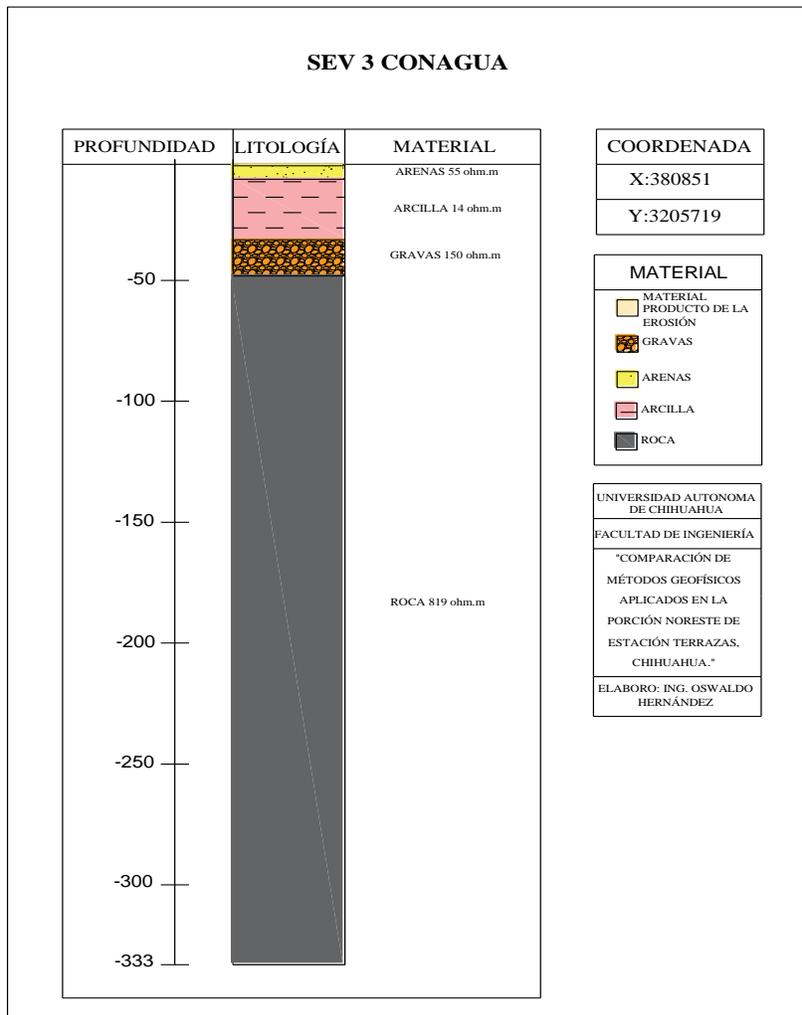


Figura 45. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 3 CONAGUA.



Tabla 26. Interpretación del SEV 1103 CONAGUA:

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
80	1.2		Arena
29	2.5	1.2	Limo-arena
25	6.7	3.7	Limo-arena
16	6.4	10	Arcilla
13	208	16	Arcilla
18	42.66	224	Arcilla

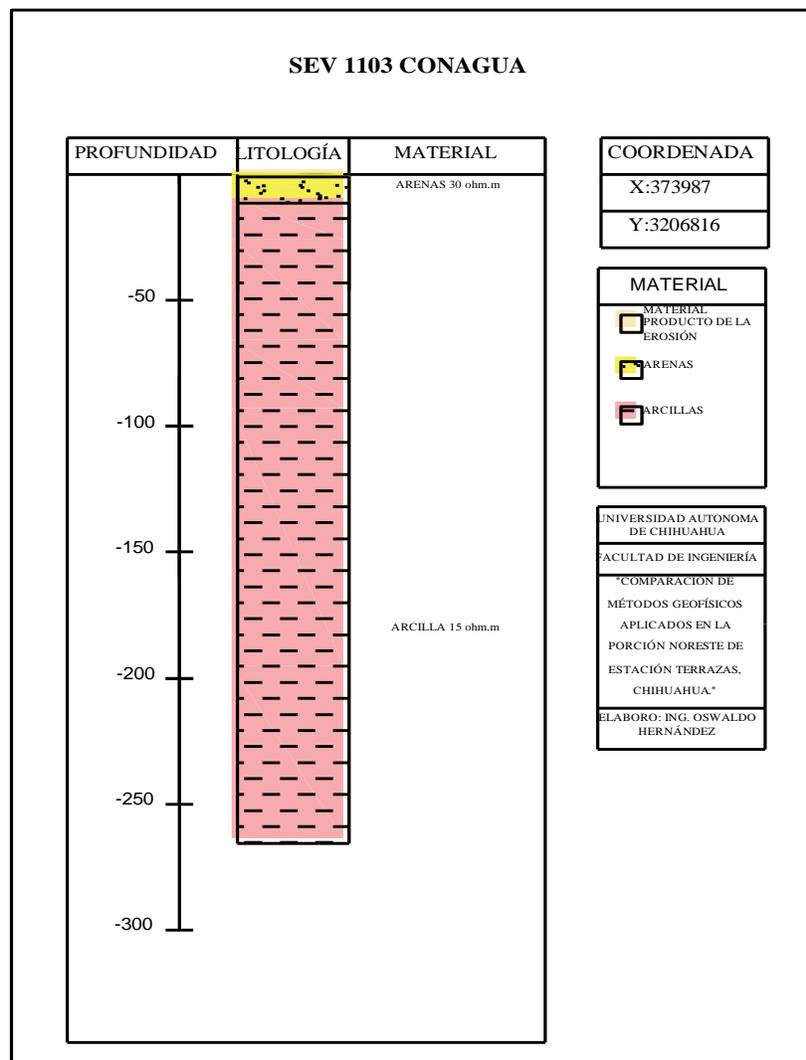


Figura 46. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 1103 CONAGUA.



Tabla 27. Interpretación del SEV 1104 CONAGUA:

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
25	0.41		limo-arenas
22	3.4	0.41	limo-arenas
21	2	3.8	limo-arenas
9	7.4	5.8	arcillas
11	6.6	13	arcillas
15	36	20	arcillas
11	210	56	arcillas

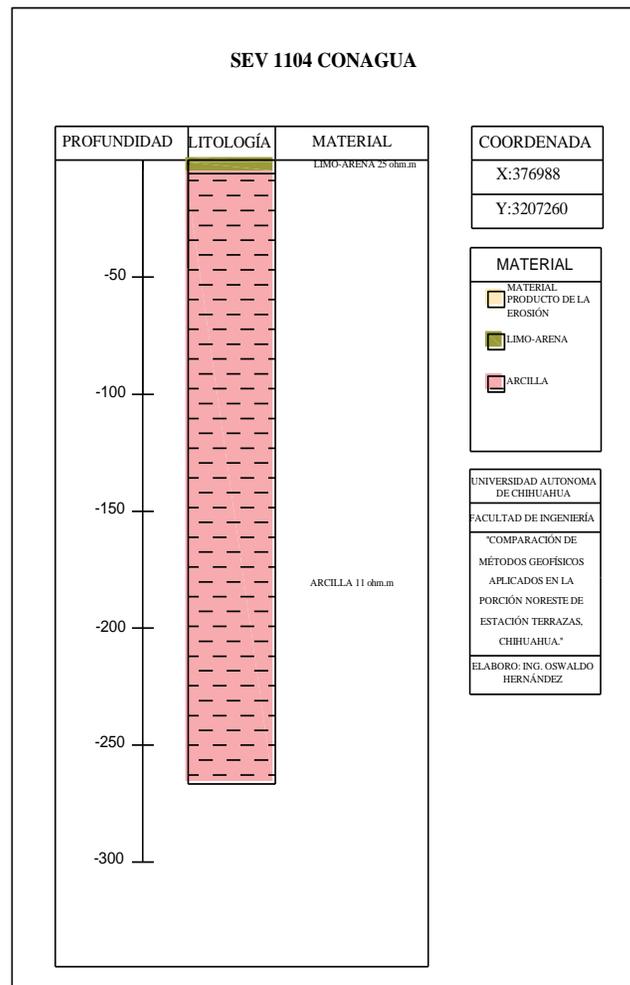


Figura 47. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 1104 CONAGUA.



Tabla 28. Interpretación del SEV 1105 CONAGUA:

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
43	0.96		Material producto de la erosión
72	2.2	0.96	arenas
52	8.6	3.2	arenas
34	21	12	arenas
26	79	33	limo-arena
10	154	112	arcillas

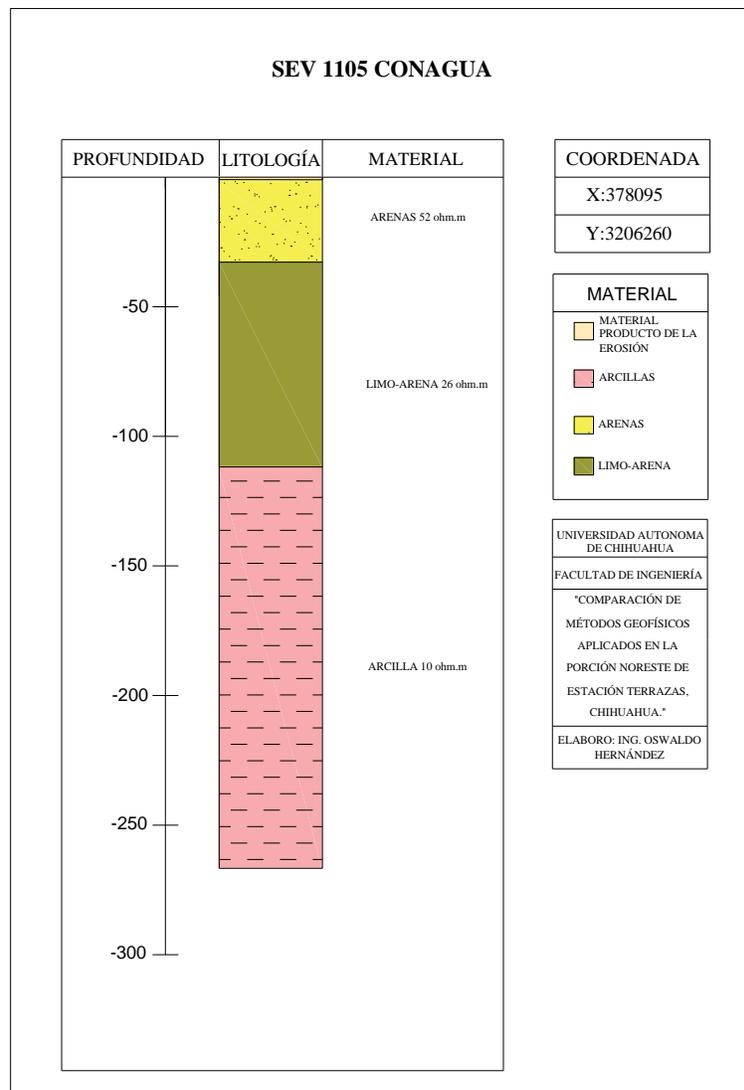


Figura 48. Representación gráfica de las unidades geoelectricas del SEV 1105 CONAGUA.



5.1.2 Secciones Geoeléctricas del arreglo Schlumberger.

Se realizaron 4 secciones geoeléctricas en la zona de estudio tomando las interpretaciones de los sondeos eléctricos realizados. La sección geoeléctrica SG-CONAGUA se realizó con los sondeos reinterpretados.

Con las secciones se tiene una mejor visualización de la distribución de los materiales interpretados en la zona de estudio. La Figura 49 muestra la localización de cada sección geoeléctrica. A continuación, se describen las secciones geoeléctricas realizadas en el área de estudio:

Sección geoeléctrica CONAGUA (SG-CONAGUA). - Esta sección geoeléctrica (Figura 50) se realizó con los SEV's reinterpretados, con una orientación este-oeste preferencialmente. En la sección geoeléctrica predominan los materiales arcillosos, teniendo en la parte este, grandes espesores de este material, conforme a la sierra se tiene materiales de granulometrías más grandes como limos y arenas con espesores de 40 metros aproximadamente, estos materiales teniendo un posible origen aluvial. En la base de la sierra se tiene materiales gravosos de posible origen coluvial.

Sección geoeléctrica 1 (SG-1). - La sección geoeléctrica 1 (Figura 51) se realizó con los sondeos 6, 4, 1, 2 y 5, la sección tiene una orientación preferencial norte-sur. En la sección geoeléctrica en los límites de la sección se presentan los espesores más grandes de material arcilloso de aproximadamente 300. En la parte intermedia se tiene materiales arenosos predominantemente de 280 metros de espesor aproximadamente, un lente de limos y arenas finas en el sondeo 1. En la parte superior se tiene material gravoso con espesores variantes con un máximo de 60 metros aproximadamente.

Sección geoeléctrica 2 (SG-2). - La sección geoeléctrica 2 (Figura 52) se realizó con los sondeos 3, 7 y 8, al noreste de esta, el sondeo 8 presenta una intercalación material gravoso y arenoso, con espesores variables de 50 a 150 metros aproximadamente de gravas y un espesor aparentemente continuo de 100 metros en arenas, en la zona de mayor profundidad se tiene un aparente lente de material arcilloso con un espesor de 50 metros aproximadamente. En la parte media de la sección en los sondeos 7 y en el sondeo 3 se tiene roca con un espesor de 200 metros aproximadamente.



Sección geoelectrica 3 (SG-3). - La sección geoelectrica 3 (Figura 53) se realizó con los sondeos 14, 11, 12, 13, 15 y 16, con una orientación variada del sondeo 14 al 12 se tiene una dirección preferencial noreste-suroeste y del sondeo 13 al 16 la dirección cambia a noreste-sureste. El sondeo presenta materiales arenosos con espesores que van de los 50 metros a los 320 metros, se presentan materiales limo-arenosos con espesores de 220 metros aproximadamente. En los sondeos 12, 13 y 16 se presenta roca es su totalidad.

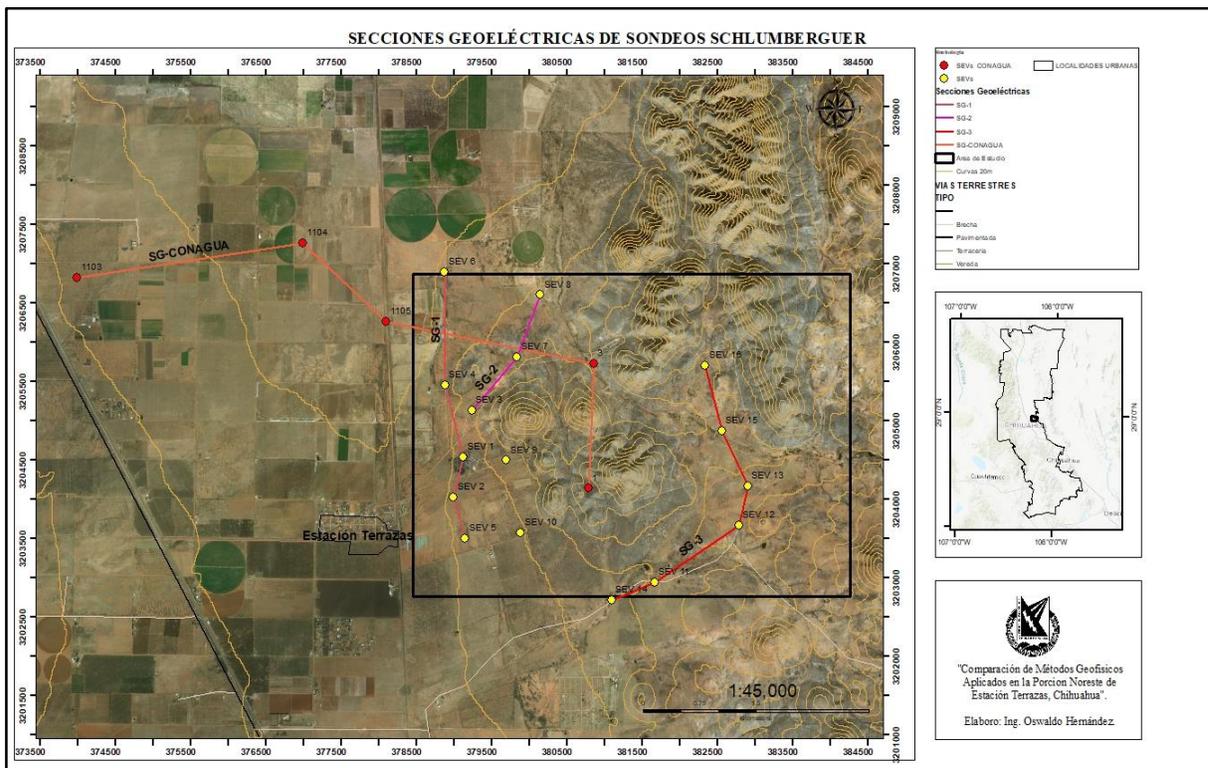


Figura 49. Localización de secciones geoelectricas sondeos eléctricos en arreglo Schlumberger.

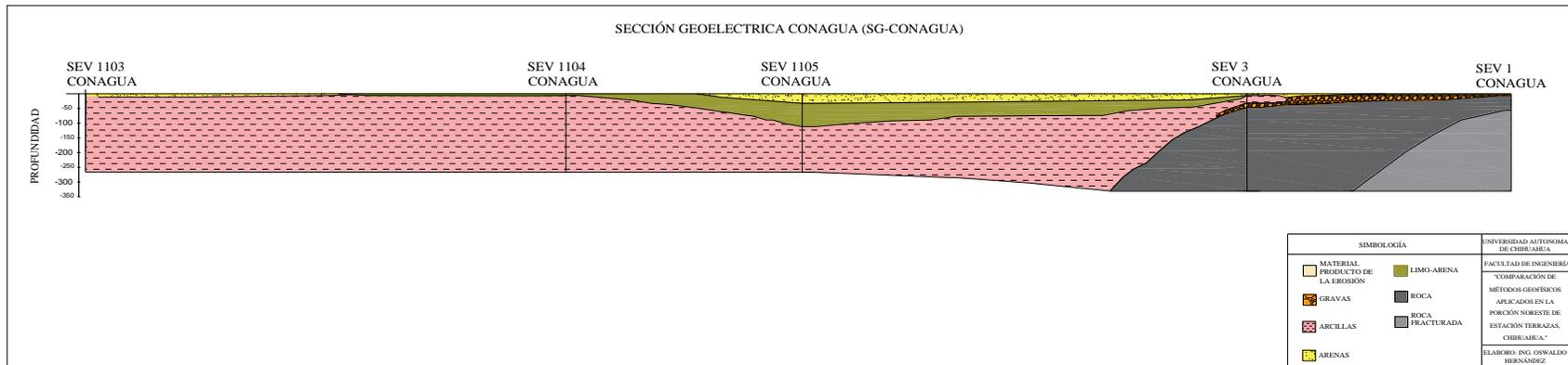


Figura 50. Sección geoelectrica CONAGUA de los SEV' reinterpretados.

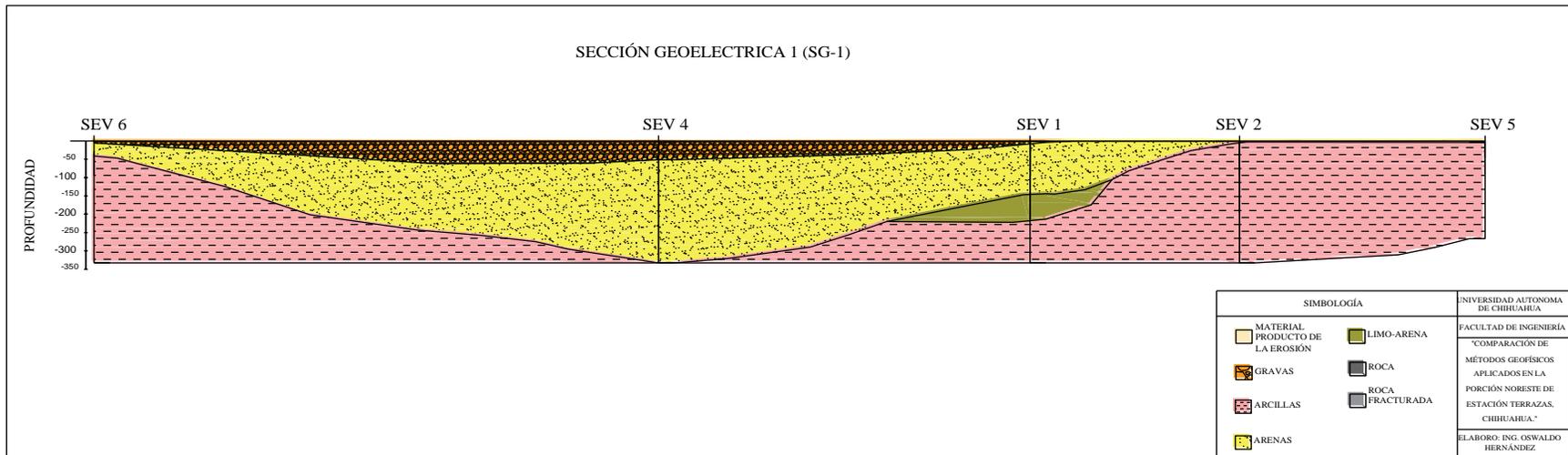


Figura 51. Sección geoelectrica 1 de los SEV's en arreglo Schlumberger.

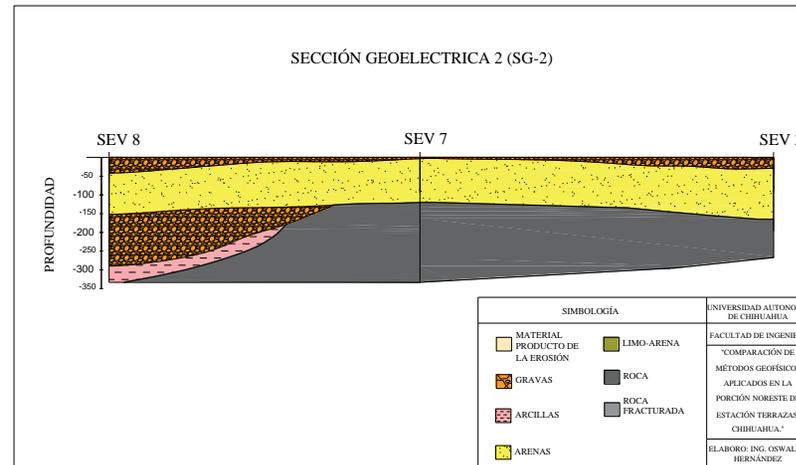


Figura 52. Sección geoelectrica 2 de los SEV's en arreglo Schlumberger.

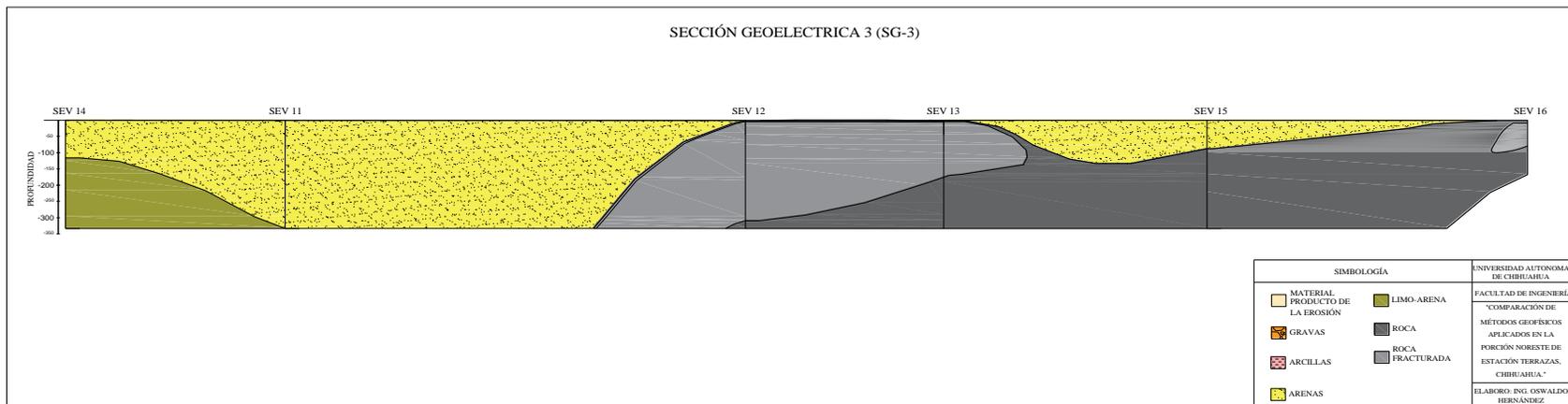


Figura 53. Sección geoelectrica 3 de los SEV's en arreglo Schlumberger.



5.1.3. Unidades Geoeléctricas

Con las interpretaciones correspondientes a cada sondeo se realizaron unidades geoeléctricas que describieran los materiales y como varían en cuanto a resistividades y espesores.

Unidad geoeléctrica 1.- Consiste en material de origen arcilloso con resistividades que van de 5 Ω .m a 20 Ω .m con espesores variables de 20 hasta 320 metros, en ocasiones se tiene espesores menores a 20 metros.

Unidad geoeléctrica 2.- Consiste en material arenoso a limos con resistividades que van desde los 20 Ω .m hasta los 100 Ω .m, con espesores variables de 8 metros hasta 330 metros, teniendo en zonas espesores de 2 metros.

Unidad geoeléctrica 3.- Consiste en material gravoso con resistencias que van desde los 100 Ω .m hasta los 200 Ω .m, con espesores variables de 3 metros hasta 140 metros.

Unidad geoeléctrica 4.- Consiste en roca con resistividades variables de 200 Ω .m a 800 Ω .m, en ocasiones se tienen resistencias menores que oscilan de 70 Ω .m a 170 Ω .m esto por las condiciones de la misma como si está en una zona de alteración o se encuentra fracturada. Esto se presenta en la zona de estudio ya que se tiene un distrito minero y fracturación de la sierra en dos direcciones.

Estas unidades geoeléctricas aplican de igual manera para los sondeos eléctricos en arreglo Wenner que se muestran más adelante.

5.2.1 Arreglo Wenner

Se realizaron 10 SEV's en arreglo Wenner para tener una mejor resolución de los materiales superficiales ya que este método es más sensible a los cambios horizontales en el subsuelo. La apertura total entre electrodos AB fue de 60 metros, con una profundidad estimada de 20 metros.



Tabla 29. Coordenadas de los SEV's en arreglo Wenner:

No. SEV	Coordenada X	Coordenada Y
SEV 1W	378889	3206777
SEV 2W	378876	3205483
SEV 3W	379220	3205111
SEV 4W	380024	3204783
SEV 5W	379745	3204521
SEV 6W	379015	3204560
SEV 7W	378484	3203771
SEV 8W	378643	3203571
SEV 9W	378992	3203853
SEV 10W	379149	3203496

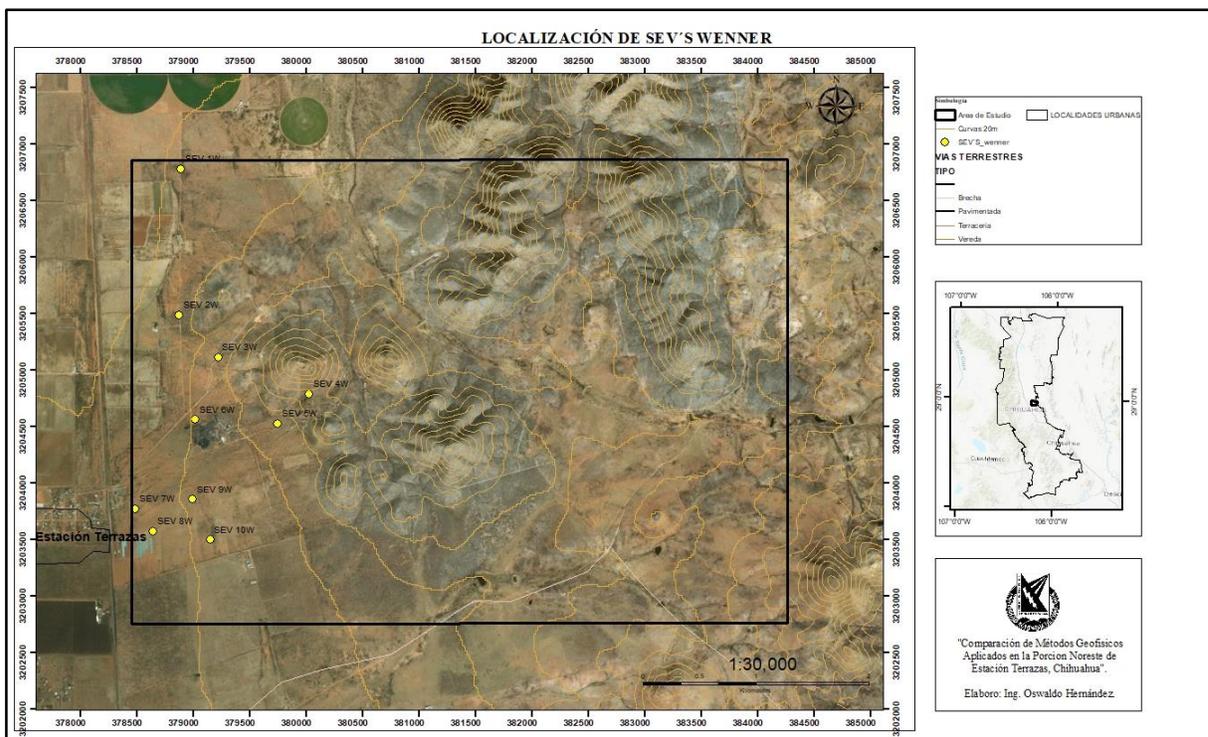


Figura 54. Localización de sondeos eléctricos en arreglo Wenner.



Tabla 30. Interpretación del SEV 1 en arreglo Wenner

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
123	1.4		Grava
53	1.1	1.4	Arena
27	17.2	12	Limo-arena

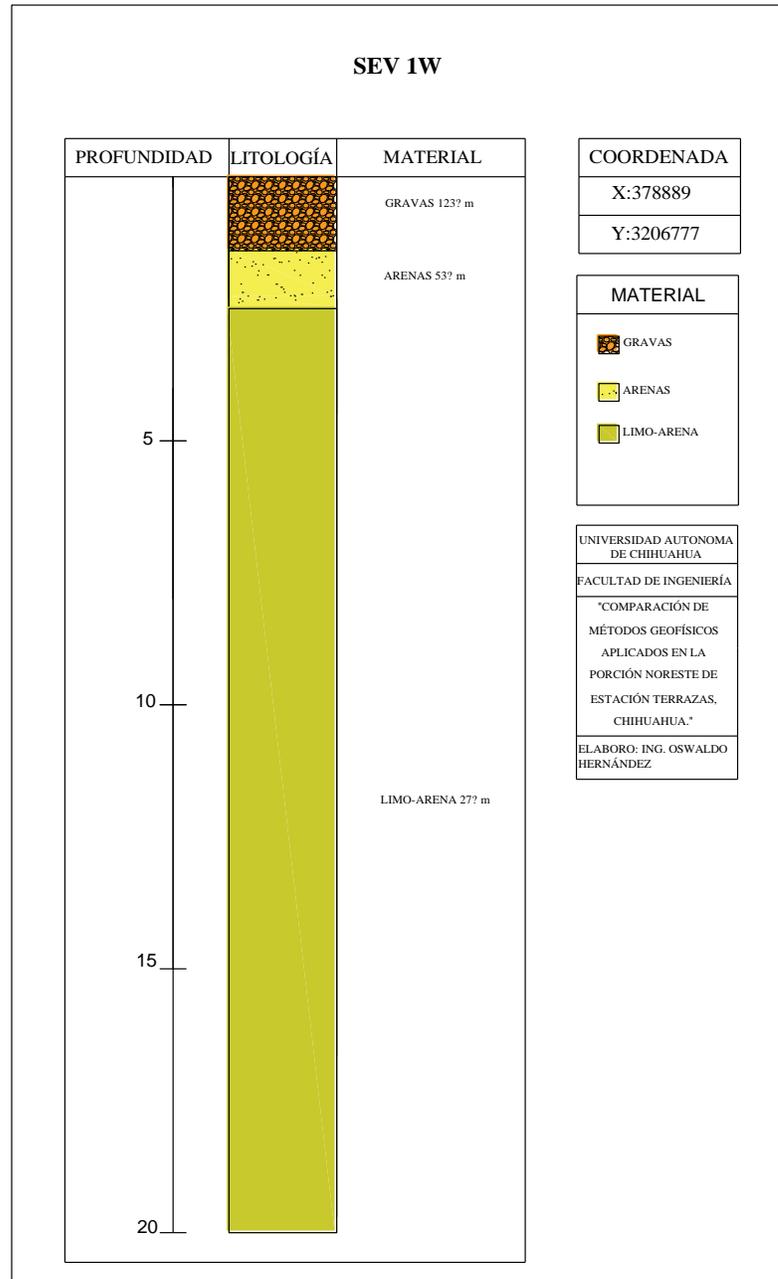


Figura 55. Unidades geoelectricas inferidas mediante el uso del arreglo Wenner.



Tabla 31. Interpretación del SEV 2 en arreglo Wenner

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
399	1.9	0	Material producto de la erosión
98	1.1	1.9	Gravas
279	17	13	Boleo

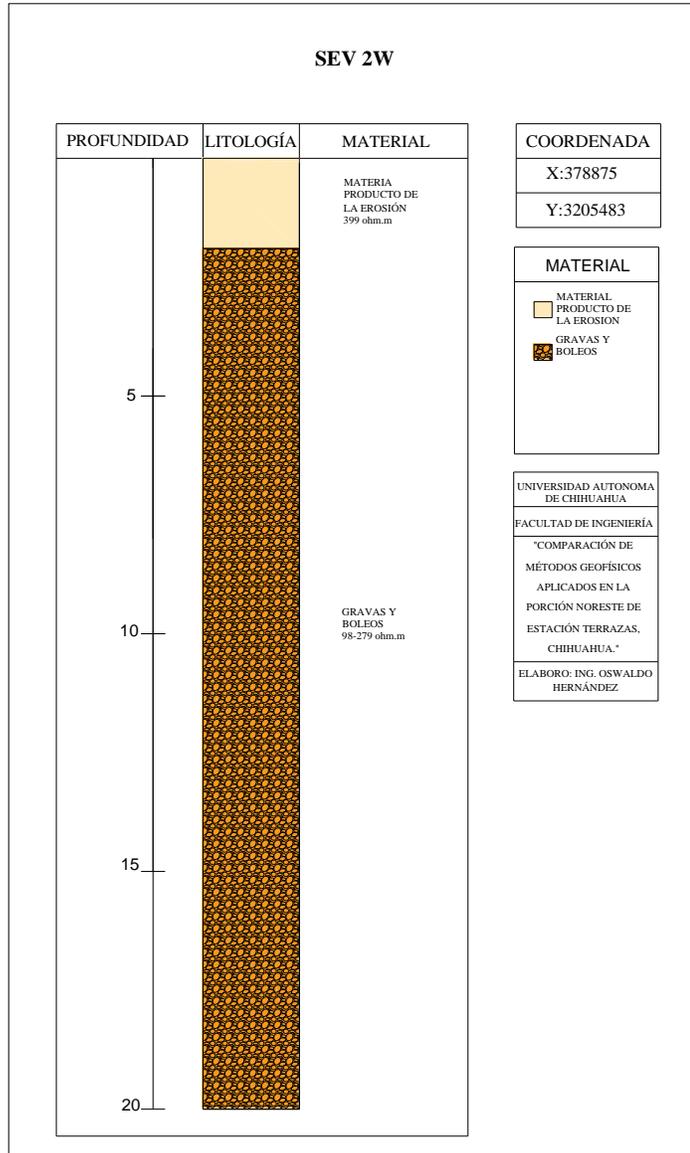


Figura 56. Unidades geoelectricas inferidas mediante el uso del arreglo Wenner.



Tabla 32. Interpretación del SEV 3 en arreglo Wenner

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
160	6.5		Grava
129	12	6.5	Grava
5.6	1.5	18.5	Arcilla

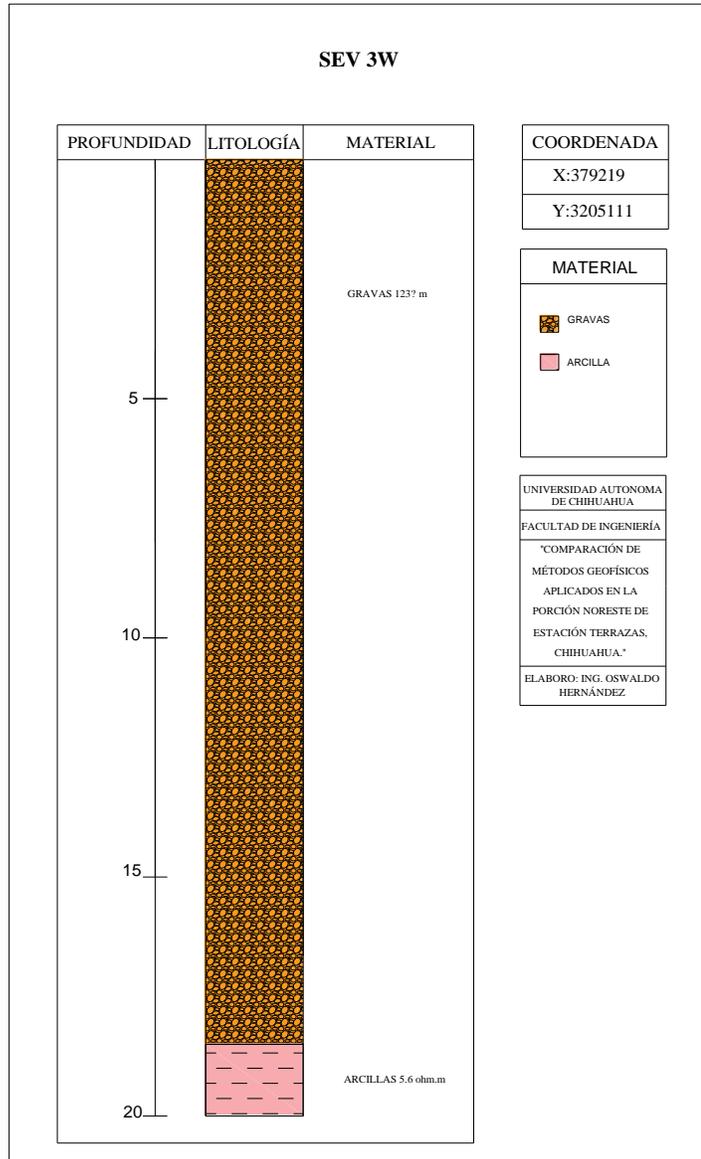


Figura 57. Unidades geoelectricas inferidas mediante el uso del arreglo Wenner.



Tabla 33. Interpretación del SEV 4 en arreglo Wenner

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
44	1.1		Arena
120	18.9	1.1	Grava

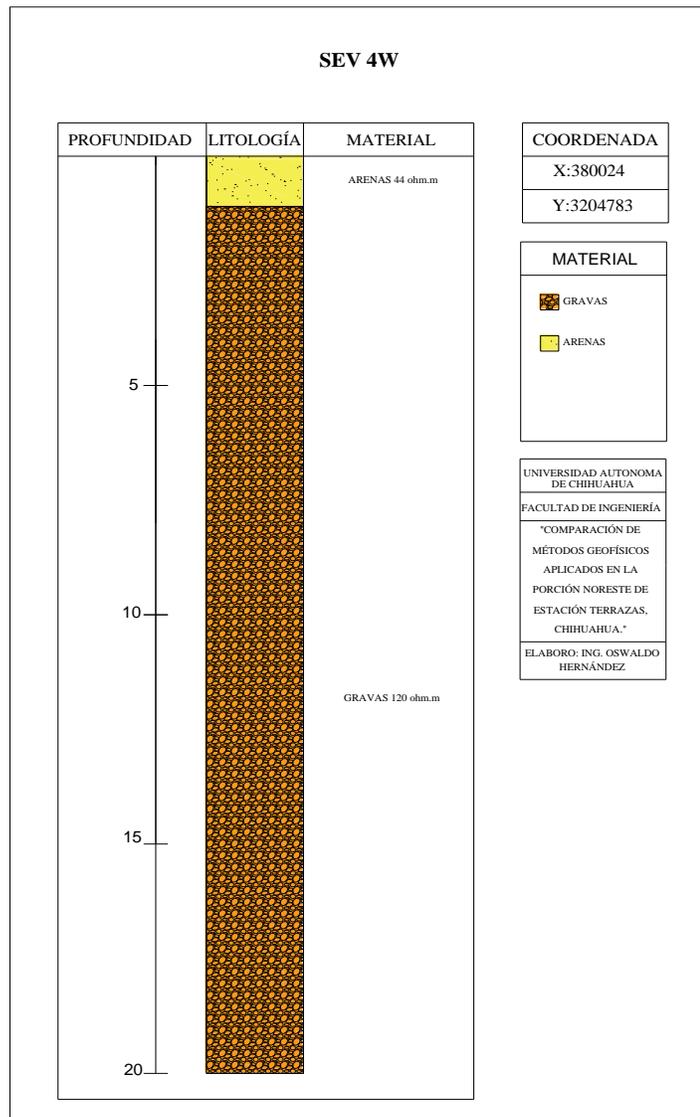


Figura 58. Unidades geoelectricas inferidas mediante el uso del arreglo Wenner.



Tabla 34. Interpretación del SEV 5 en arreglo Wenner

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
265	3		Material producto de la erosión
80	10	3	Arena
50	7	13	Arena

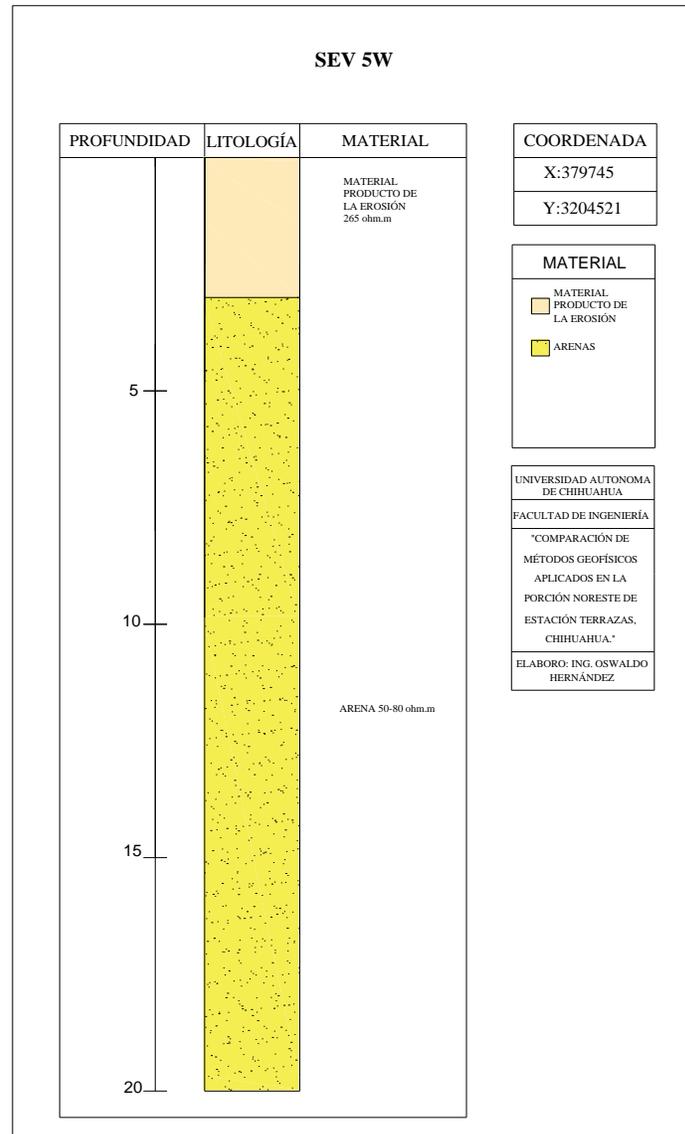


Figura 59. Unidades geoelectricas inferidas mediante el uso del arreglo Wenner.



Tabla 35. Interpretación del SEV 6 en arreglo Wenner

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
45	2		Arena
20	12	2	Limo-arena
80	3	14	Arena
20	3	17	Limo-arena

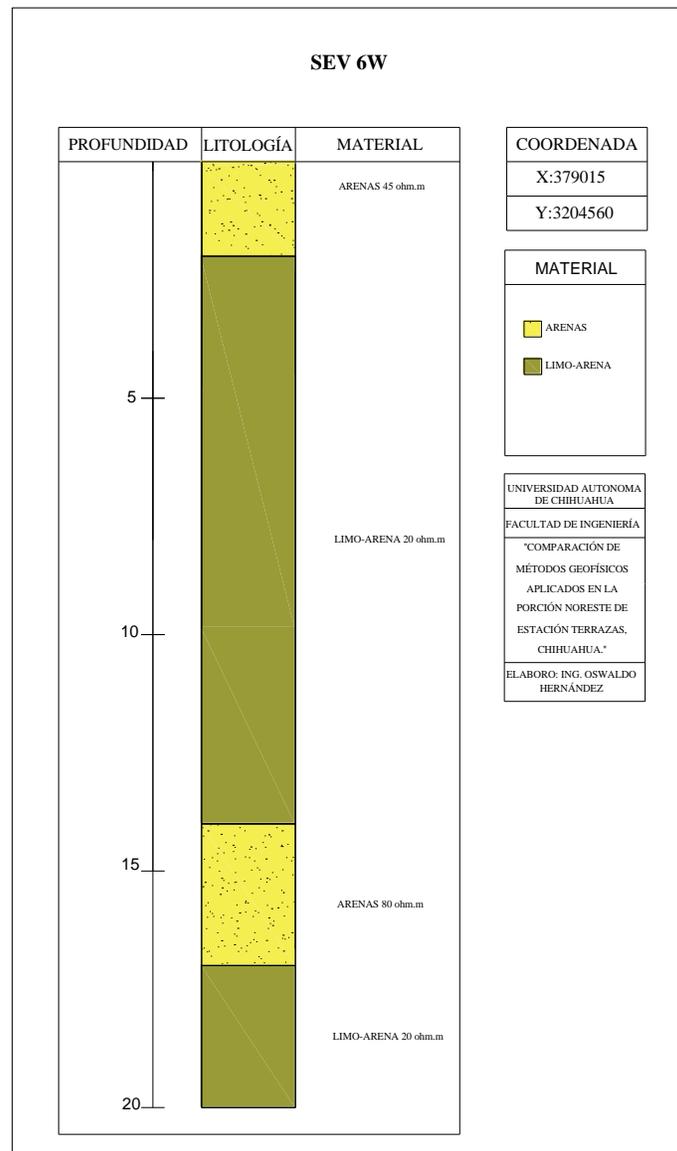


Figura 60. Unidades geoelectricas inferidas mediante el uso del arreglo Wenner.



Tabla 36. Interpretación del SEV 7 en arreglo Wenner

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
71	6.1		Arena
18	13.9	6.1	Arcillas

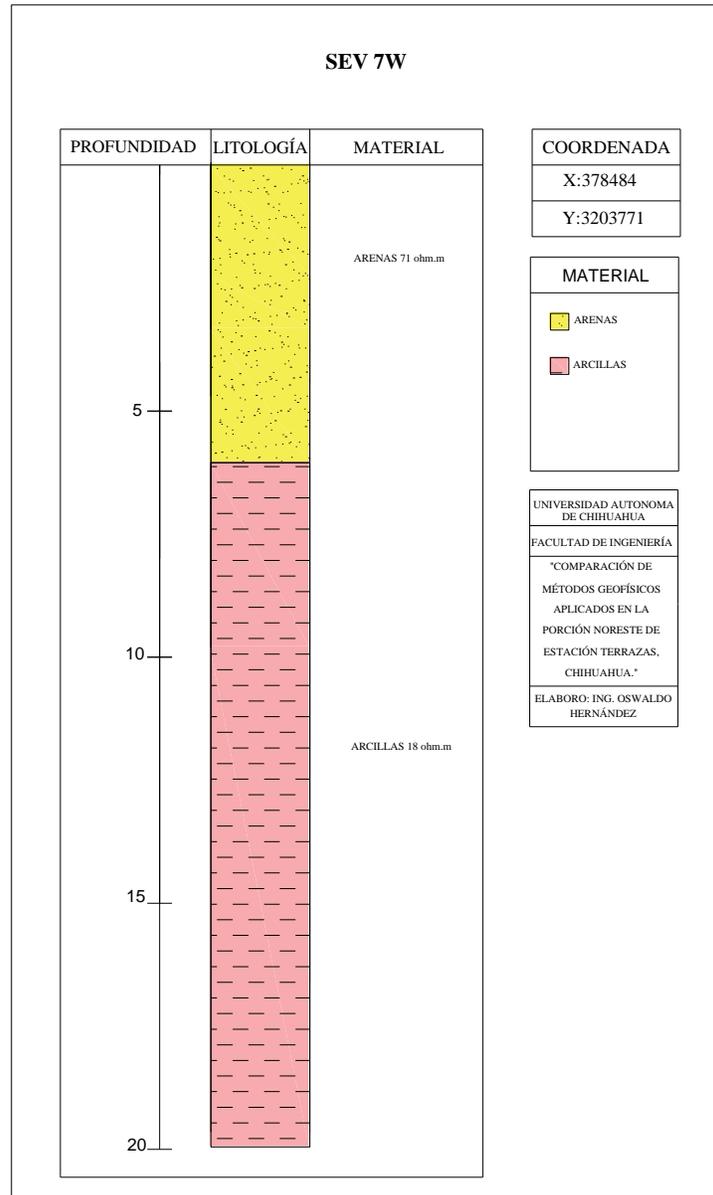


Figura 61. Unidades geoelectricas inferidas mediante el uso del arreglo Wenner.



Tabla 37. Interpretación del SEV 8 en arreglo Wenner

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
48	3.9		Arena
13	16.1	3.9	Arcillas

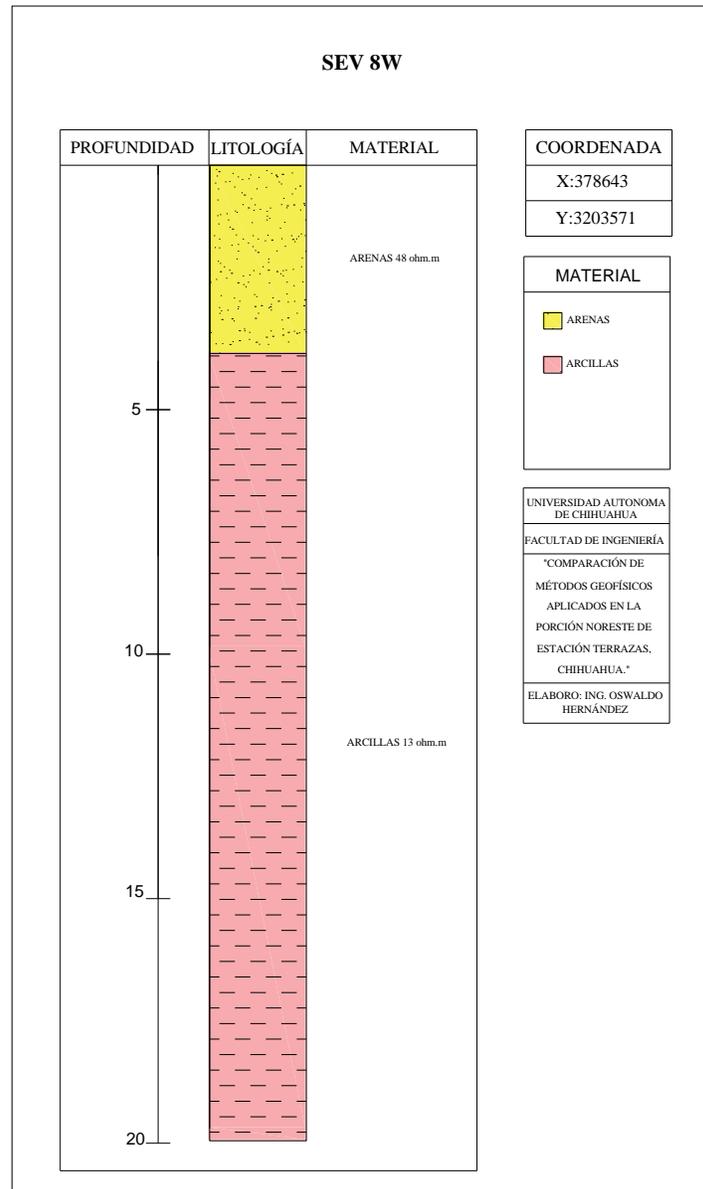


Figura 62. Unidades geoelectricas inferidas mediante el uso del arreglo Wenner.



Tabla 38. Interpretación del SEV 9 en arreglo Wenner

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
65	3.5		Arena
12	16.5	3.5	Arcillas

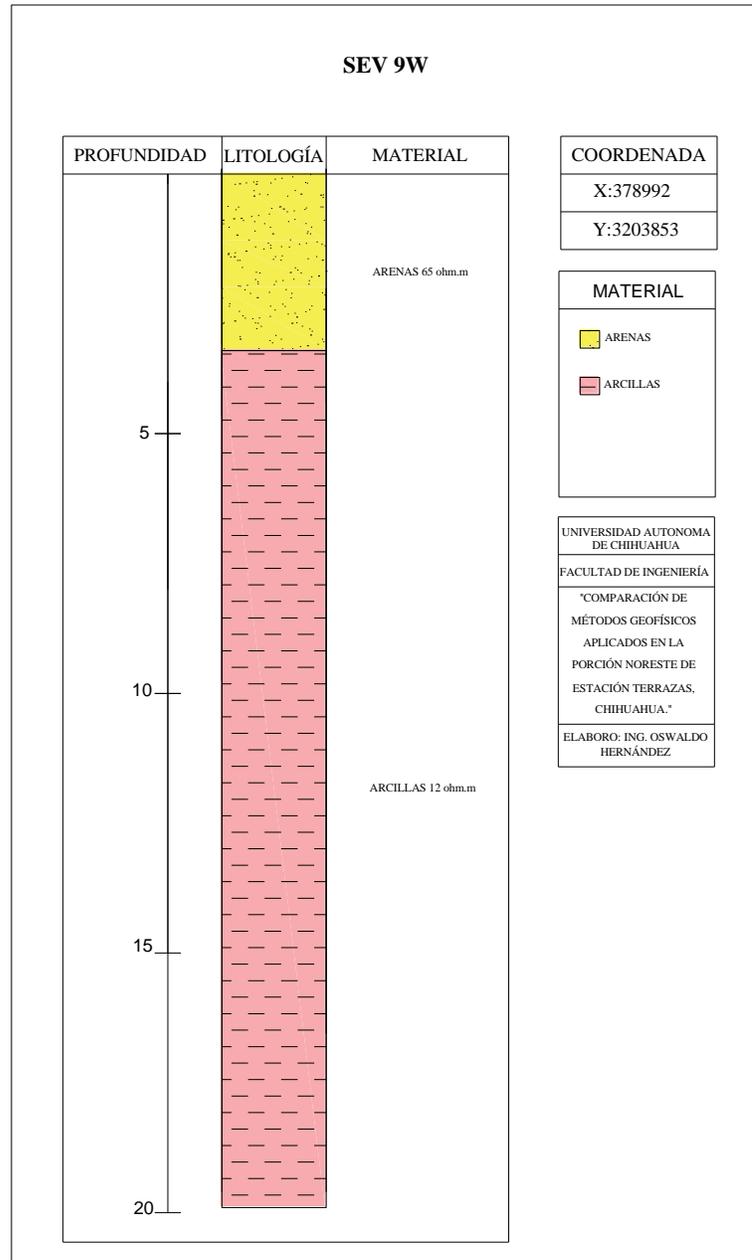


Figura 63. Unidades geoelectricas inferidas mediante el uso del arreglo Wenner.



Tabla 39. Interpretación del SEV 9 en arreglo Wenner

Resistividad	Espesor	Profundidad	Material
80	3.4	0	Arenas
16	16.6	3.4	Arcillas

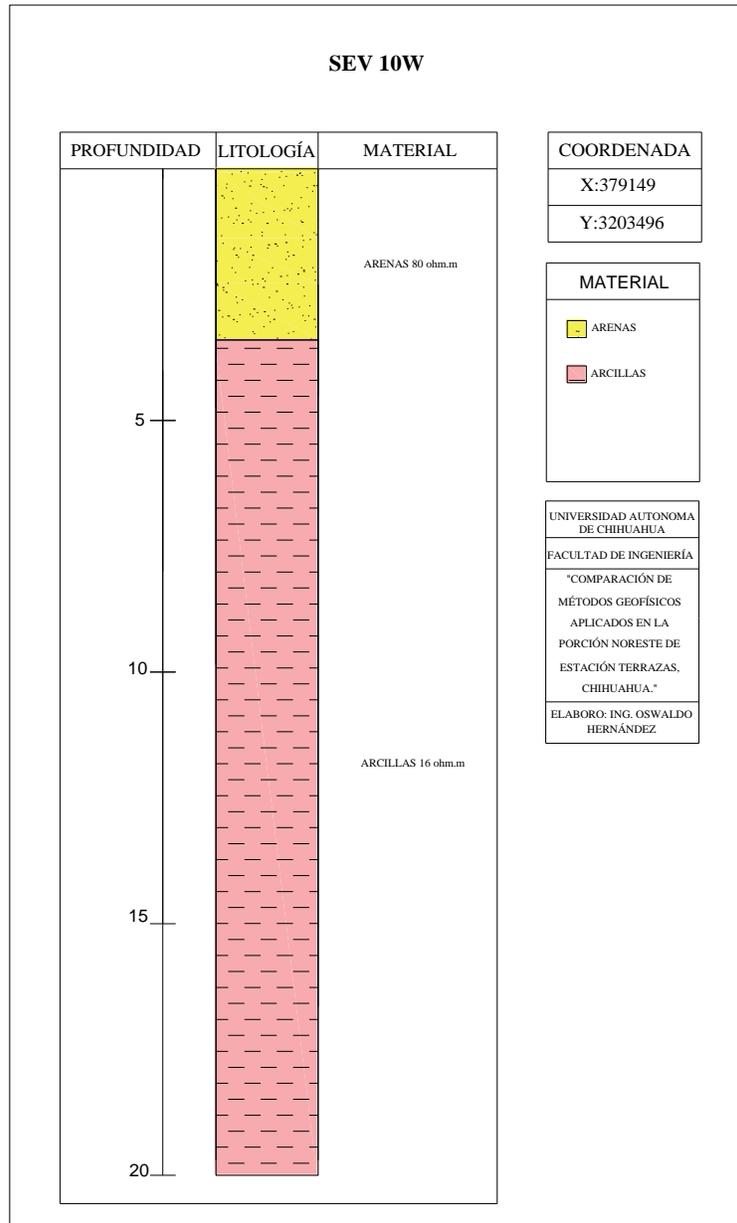


Figura 64. Unidades geoelectricas inferidas mediante el uso del arreglo Wenner.



5.2.2. Secciones Geoeléctricas en arreglo Wenner

Se realizaron 2 secciones geoeléctricas con el arreglo Wenner para una mejor visualización de las unidades interpretadas con los SEV's realizados, dichas secciones se describen a continuación:

Sección geoeléctrica 1W (SG-1W). - La sección geoeléctrica 1W (Figura 66) se realizó con los sondeos 1, 2, 6, 9 y 10, con una orientación preferencial norte-sur. En la parte norte de la sección se presentan materiales limo-arenosos a profundidad, en dirección al sondeo 2W se aumenta el espesor de material gravoso, este material disminuye y vuelven los materiales limo-arenosos a profundidad y en la parte superior se tiene arenas. Del sondeo 9 al 10 aparecen materiales arcillosos a profundidad y prevalece las arenas en la capa superficial.

Sección geoeléctrica 2W (SG-2W). - La sección geoeléctrica 2W (Figura 67) se realizó con los sondeos 9W, 8W, 5W y 4W, con una orientación preferencial noreste-suroeste. En la parte sureste se tiene en la parte superior arenas y por debajo material arcilloso estos de posible origen aluvial, en la parte noreste los sondeos 5W y 4W están en las faldas del cerro, esto nos da como resultado material arenoso y gravoso de posible origen coluvial, teniendo el mayor espesor de gravas en el sondeo 4W.

La figura 65 muestra la localización de las secciones en el área de estudio.

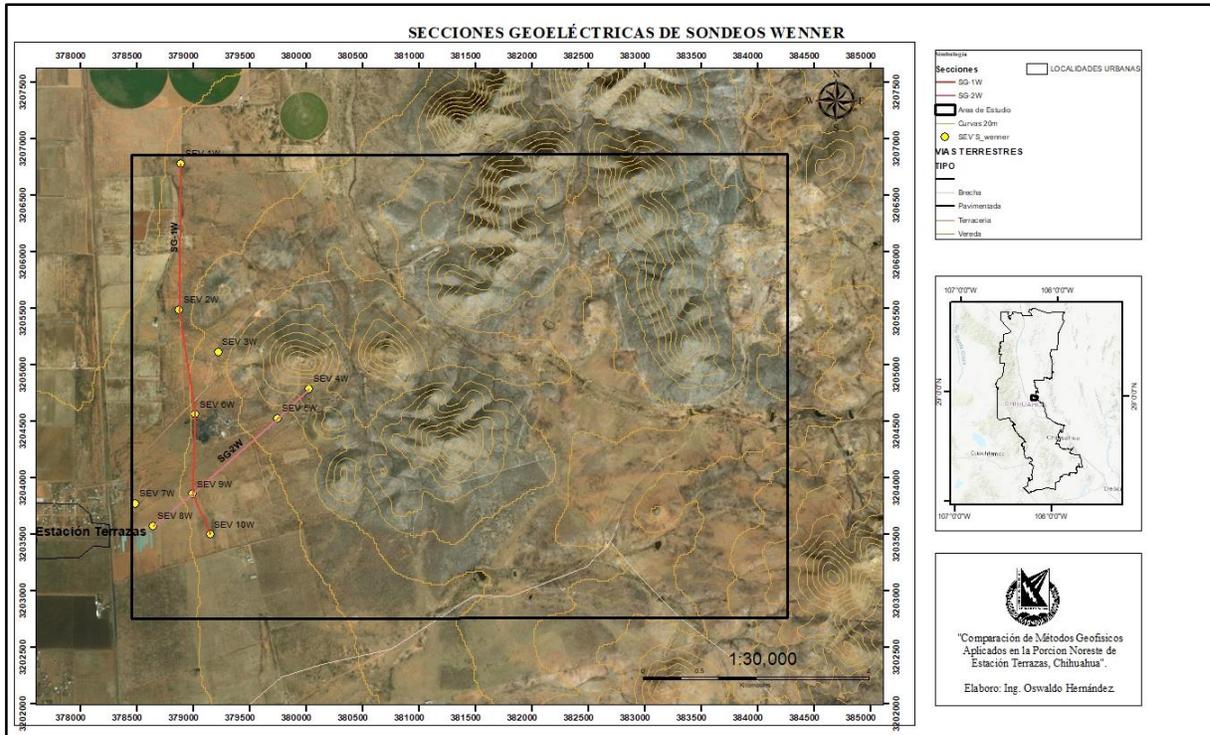


Figura 65. Secciones geoelectricas de los SEV's en arreglo Wenner.

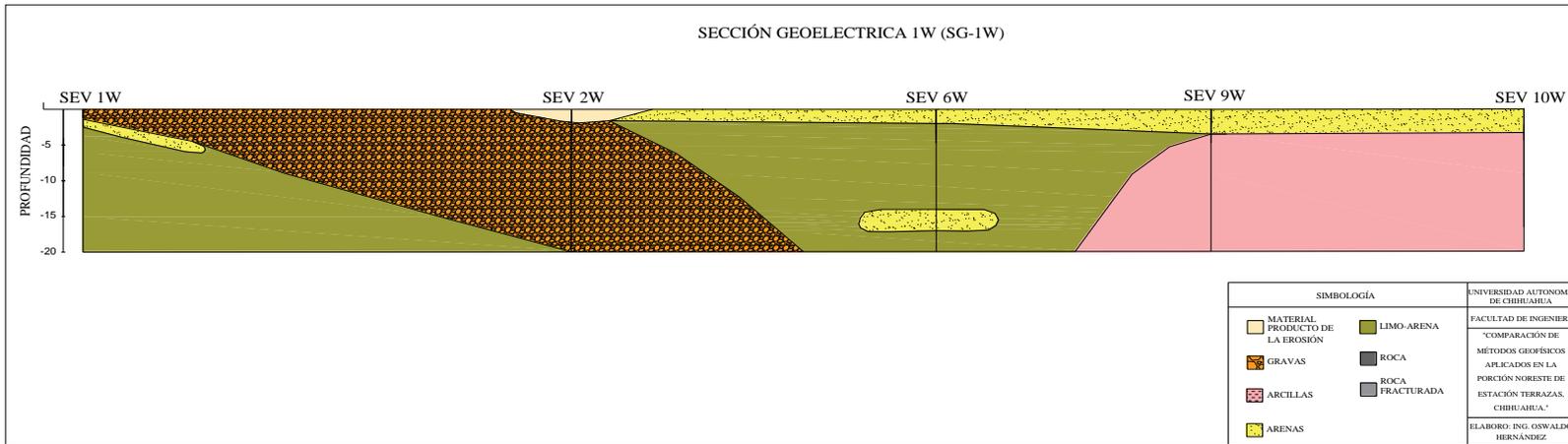


Figura 66. Sección geoelectrica 1W de los SEV's en arreglo Wenner.

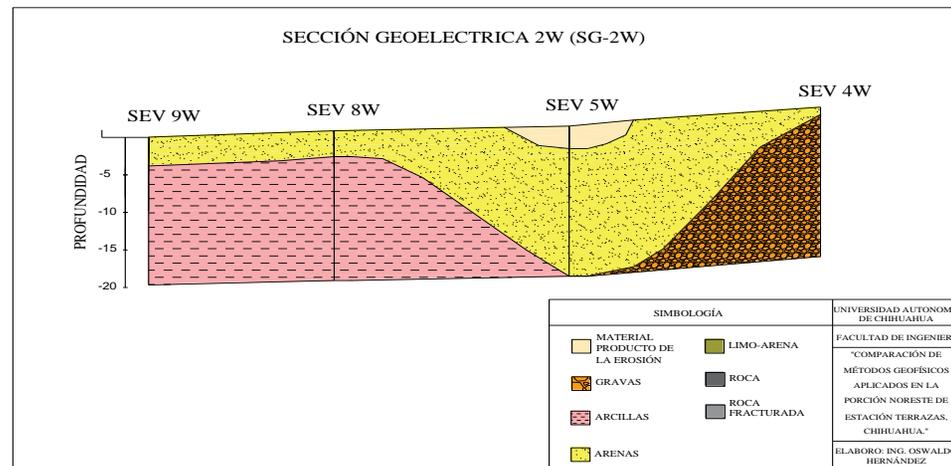


Figura 67. Sección geoelectrica 2W de los SEV's en arreglo Wenner.



5.3. Método Sísmico de Refracción.

Se realizaron 9 líneas sísmicas en total, 5 de ellas se realizaron a 60 metros y los 4 restantes a 120 metros (Tabla 10), esto con la finalidad de tener valores a mayor profundidad ya que esta depende de la apertura total de la línea de geófonos y de la fuente con la cual se generan las ondas, en este caso la fuente fue un marro de 16 libras.

Tabla 40. Coordenadas de los sondeos sísmicos de refracción:

No. Sondeo	Sondeos Sísmico	Coordenada X	Coordenada Y
1	S1-60M-FN	379985	3204779
	S1-60M-IN	380051	3204806
2	S2-120M-FN	379933	3204741
	S2-120M-IN	380055	3204808
3	S3-60M-FN	380391	3204873
	S3-60M-IN	380457	3204900
4	S4-120M-FN	380330	3204870
	S4-120M-IN	380461	3204904
5	S5-60M-FN	378871	3205524
	S5-60M-IN	378875	3205464
6	S6-60M-FN	380143	3205731
	S6-60M-IN	380217	3205743
7	S7-120M-FN	380083	3205723
	S7-120M-IN	380217	3205743
8	S8-60M-FN	379923	3205700
	S8-60M-IN	379997	3205712
9	S9-120M-FN	379865	3205692
	S9-120M-IN	379997	3205712

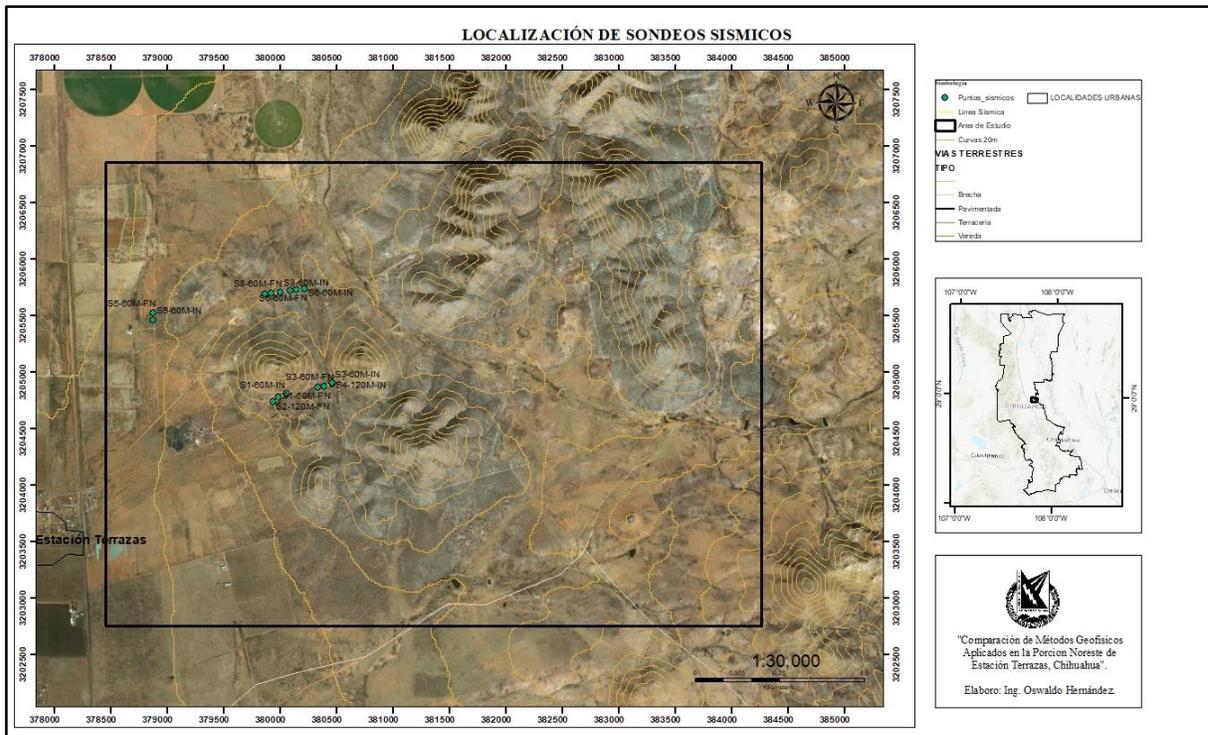


Figura 68. Localización de sondeos sísmicos.

La ubicación de los sondeos sísmicos de refracción se realizó con el análisis geológico de la zona (Figura 5) con la finalidad de caracterizar las zonas de contraste. Teniendo esto en cuenta, se ubicaron en zonas de falla cartografiadas previamente, para obtener el resultado deseado.

Una vez interpretados los sondeos se realizaron secciones sísmicas uniendo sondeos para tener un mejor comprendimiento de la distribución de los materiales presentes en el subsuelo, siendo las secciones de los sondeos S2-120M, S4-120M, S7-120M y S9-120M las que muestran mejores resultados, la razón es porque se cubre una extensión más grande con la línea de geófonos, esto generó una variación entre los sondeos localizados sobre las mismas líneas antes mencionadas, pero con apertura a 60 metros.

A continuación, se muestran las secciones sísmicas con velocidades obtenidas con el software Plotrefa (versión Demo) de los sondeos sísmicos:

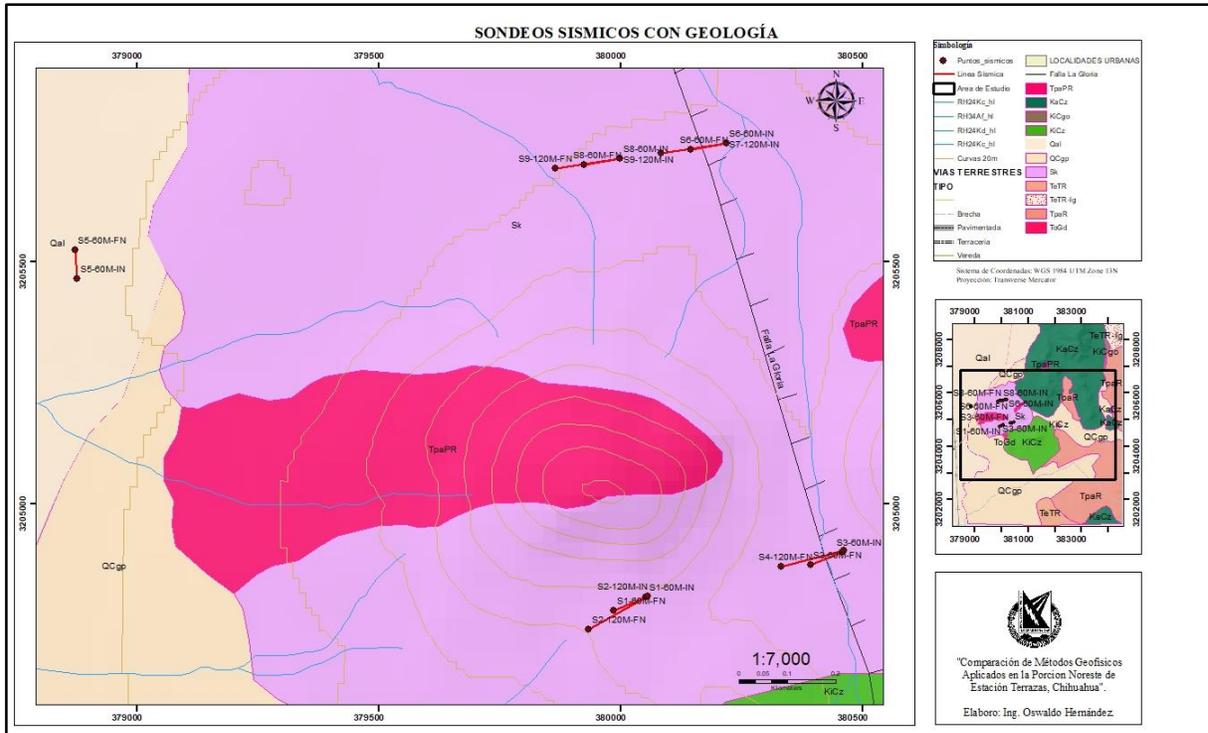


Figura 69. Mapa de localización de sondeos sísmicos sobre el mapa geológico de la zona.

Para atribuir los materiales a las velocidades obtenidas se tomó como referencia la tabla 5 que nos da ejemplos de velocidades de ondas p, esto conjugado con la geología de la zona de logro generar secciones sísmicas con materiales geológicos que tuvieran lógica.

Para el sondeo S4-120M se presentó un problema al momento de realizar el contragolpe, el equipo no registraba las ondas correctamente, para la procesado e interpretación de este sondeo se forzó la trayectoria de las ondas p en el software PickWin, esto trajo como resultado un sondeo con un porcentaje de error del 15% aproximadamente. Para la atribución de materiales fue importante el análisis geológico para correlacionar las velocidades y ajustar las profundidades obtenidas y tener la mejor coherencia geológica para el sondeo.

La Figura 70 muestra la localización de las secciones sísmicas.

Las secciones sísmicas se muestran inicialmente con los valores de velocidad calculados por el software, se realizó una sección con los sondeos S1-60M y S3-60M, otra con los sondeos S2-120M y S4-120M, para las demás secciones se utilizaron los sondeos S6-60M y S8-60M, otra con los sondeos S7-120M y S9-120M. El sondeo S5-60M sólo se

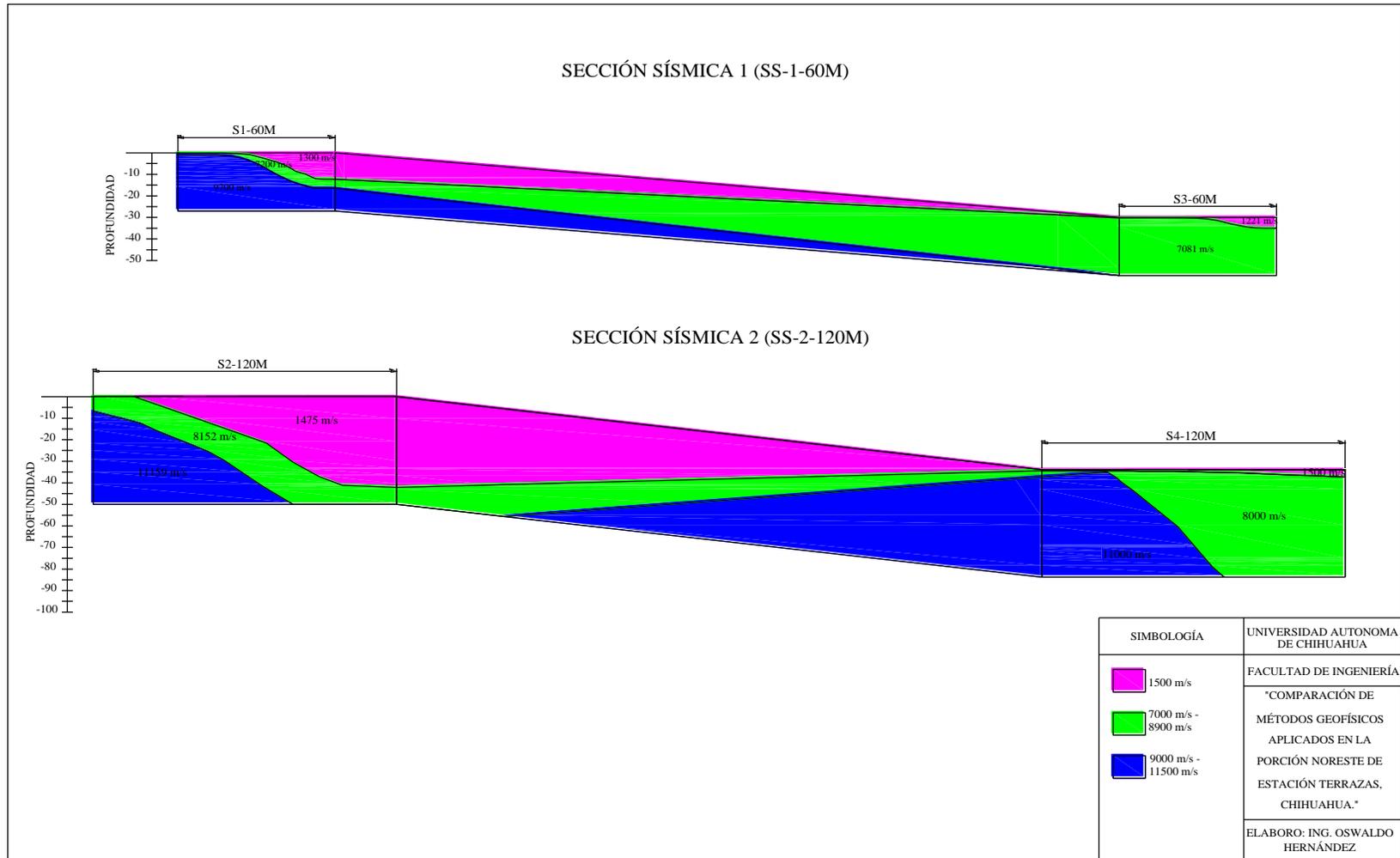


Figura 71.-Secciones sísmicas con velocidades de ondas p.

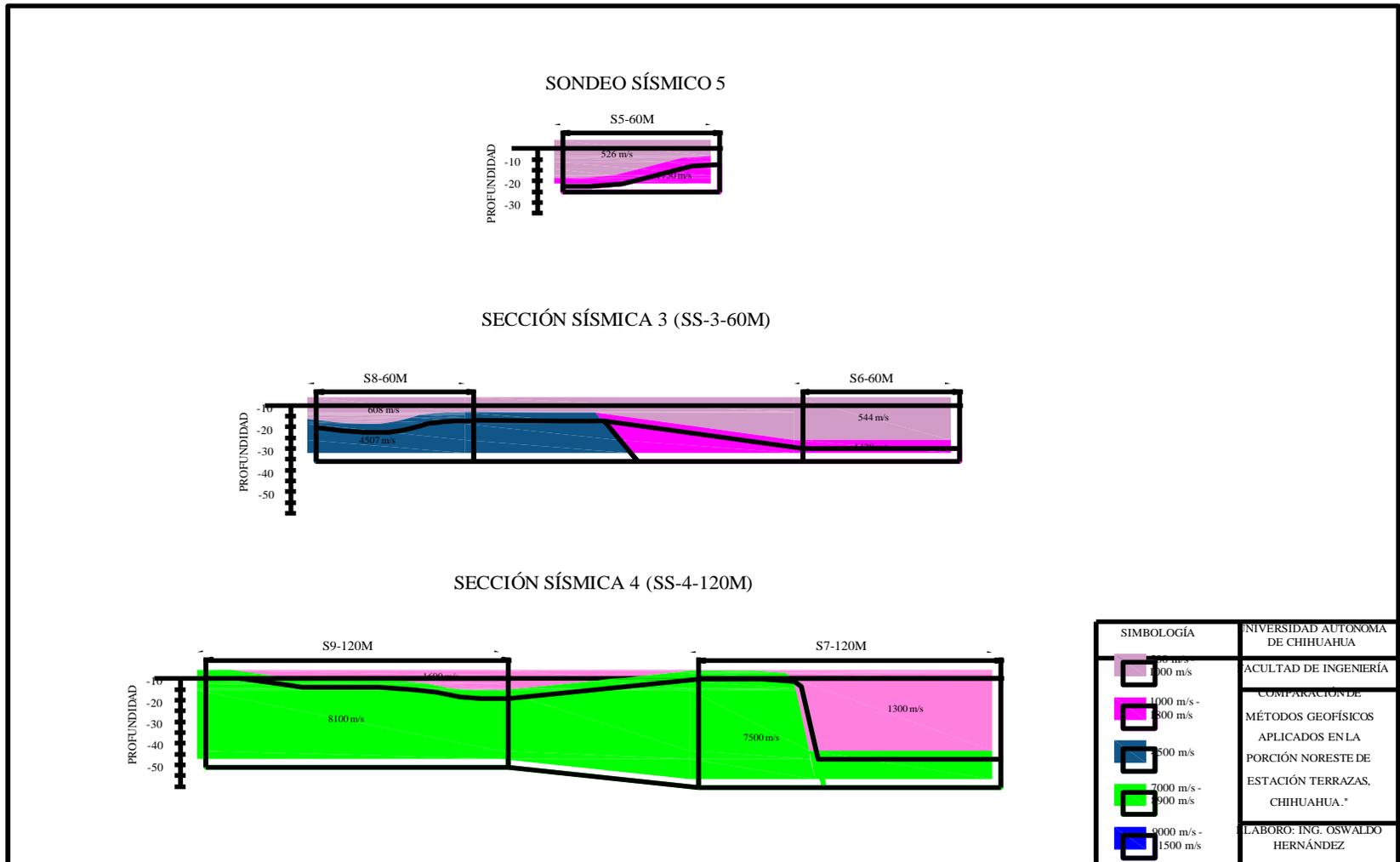


Figura 72. Secciones sísmicas con velocidades de ondas p.



Para la interpretación de las secciones realizadas se generó una tabla de rangos de velocidad para establecer los materiales que se atribuyen a dichas velocidades.

Estos materiales se dan por las condiciones geológicas en las que están localizados las secciones sísmicas, tomando los valores con altas velocidades como roca compacta, se tiene una velocidad intermedia la cual se puede atribuir a que en la zona se tiene alteraciones por la mineralización existente y esta pueda ser la causante de esta baja en la velocidad. Tomando como referencia la tabla 5, las velocidades altas que se obtuvieron son típicas de rocas metamórficas coincidiendo con la ubicación de los sondeos.

Tabla 41. Rango de velocidades para la interpretación de sondeos sísmicos.

Rango de Velocidad (m/s)	Material
500-1000	Material arenoso a limoso
1000-1800	Gravas y arenas
4500	Roca alterada
7000-11500	Roca compacta

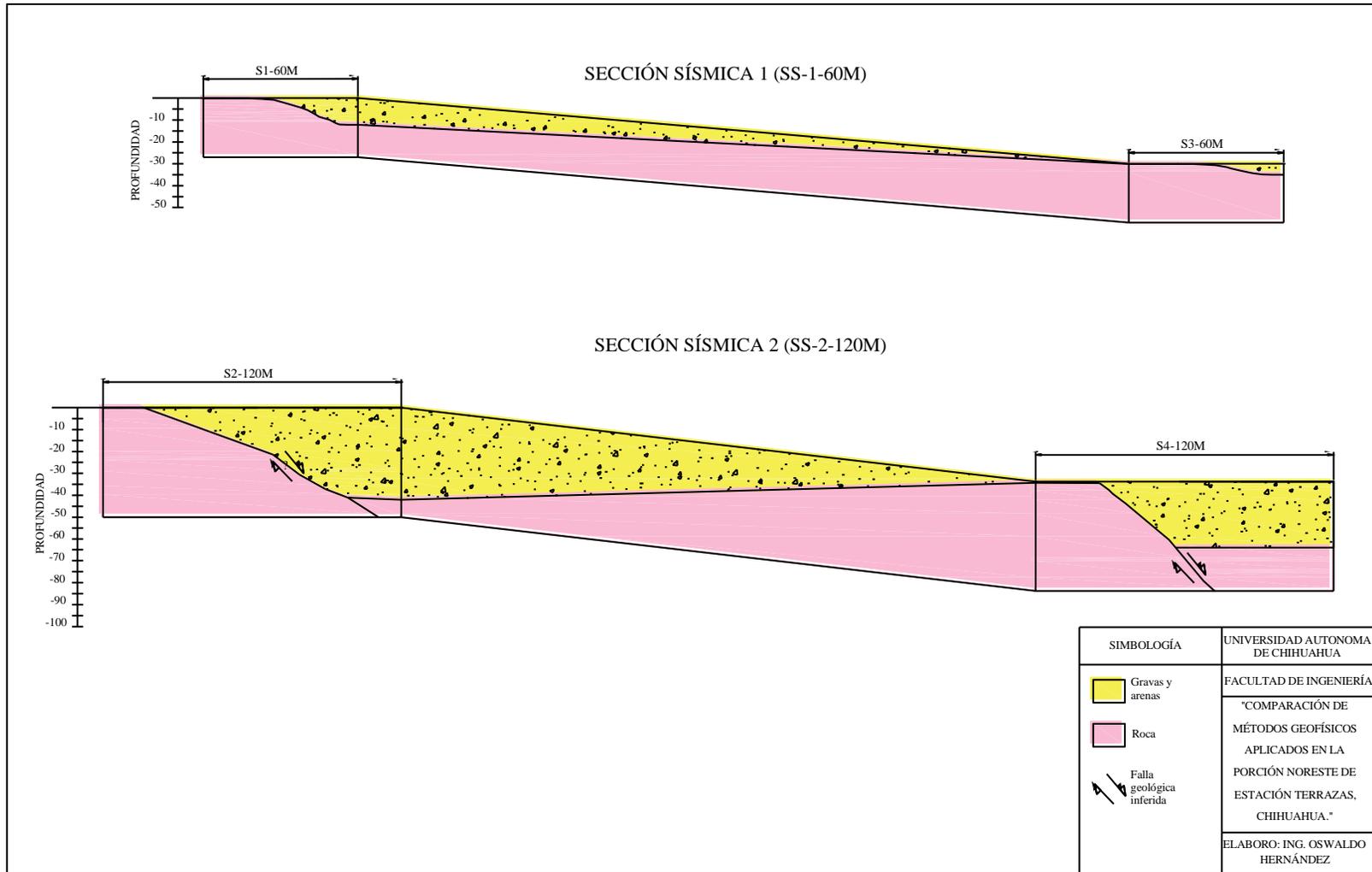


Figura 73. Secciones sísmicas 1 y 2 con materiales.

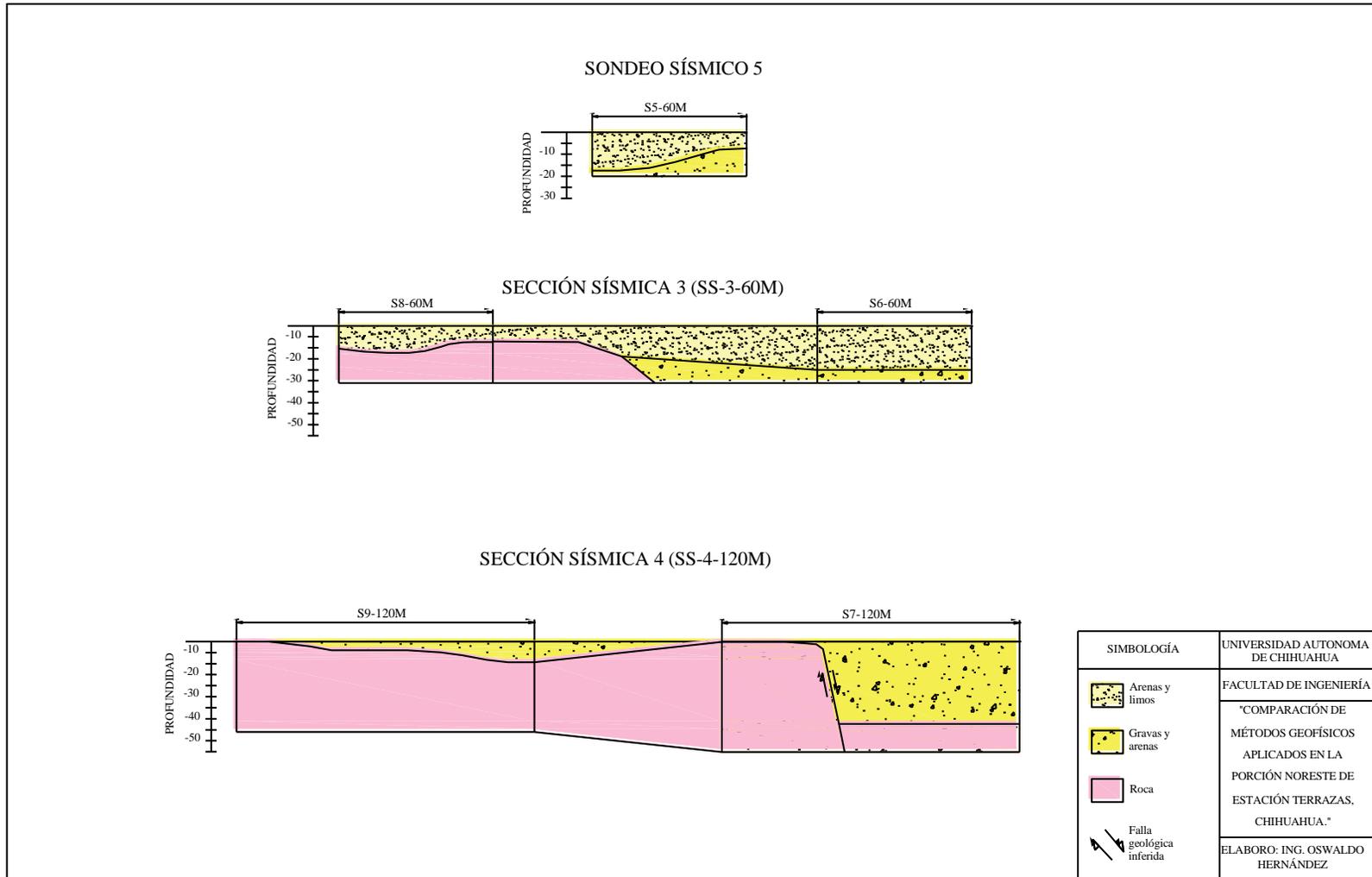


Figura 74. Secciones sísmicas 3 y 4 con materiales, y sondeo sísmico 5.



5.3.1. Secciones sísmicas

Sección sísmica 1 (SS-1-60M). - La sección sísmica 1 se realizó con los sondeos S1-60M Y S3-60M con una orientación preferencial oeste-este. En la mayor parte de la sección se tiene roca a profundidad teniendo un material areno-gravoso que tiene un espesor baribal de 1 metro hasta 15 metros, estos materiales tienen un posible origen coluvial.

Sección sísmica 2 (SS-2-120M). - La sección sísmica 2 se realizó con los sondeos S2-120M y S4-120M con una orientación preferencial oeste-este. En la mayor parte de la sección se tiene roca a profundidad, pero en este caso se observan desplazamientos de aproximadamente 40 metros, esto se atribuye a fallas geológicas presentes en la zona de estudio, en el sondeo S2-120M se infiere un desplazamiento del bloque de techo teniendo una posible falla normal, esto se infiere por el análisis geológico de la zona y el recorrido geológico realizado previo a la realización de los sondeos. Para el sondeo S4-120M se tiene un desplazamiento de bloques de igual manera a 40 metros aproximadamente, para este sondeo de tiene una falla marcada por el SGM en la carta Sacramento con escala 1: 50,000., este desplazamiento coincide con la falla marcada asumiendo que es la prolongación a profundidad de la misma, pero con un cambio de pendiente en el buzamiento de la misma.

Sección sísmica 3 (SS-3-60M). - La sección sísmica 3 se realizó con los sondeos S6-60M y S8-60M con una orientación preferencial oeste-este. en el sondeo S8-60M se tiene roca a una profundidad de 15 metros, cubierta por materiales limosos y arenosos, para el sondeo S6-60M la roca desaparece, pero se tiene materiales gravosos y arenosos en a una profundidad de 25 metros, en la parte superior al igual que el sondeo 8 se tiene materiales limosos y arenosos.

Sección sísmica 4 (SS-4-120M). - La sección sísmica 4 se realizó con los sondeos S7-120M y S9-120M con una orientación preferencial oeste-este. En el sondeo S9-120M predomina la roca teniendo una capa superficial de gravas y arenas que varía su espesor de 1 metro a 8 metros aproximadamente, para el sondeo S7-120M se tiene un desplazamiento de bloques de aproximadamente 35 metros, evidenciando una posible falla geológica, esto se asume por la falla marcada por el SGM en la carta Sacramento con escala 1: 50,000., el material de relleno se toma como material gravoso y arenas.



5.3.2. Unidades sísmicas

Unidad sísmica 1.- Consiste en material de granulometría fina como limos y arenas finas con velocidades que van de los 500 m/s a los 1000 m/s. Los espesores varían de 7 metros a 20 metros.

Unidad sísmica 2.- Consiste en materiales gravosos y arenosos con velocidades que van de los 1000 m/s a los 1800 m/s. Los espesores varían de 1 metros a 37 metros.

Unidad sísmica 3.- Consiste en roca la cual tiene velocidades que van de los 7000 m/s hasta los 11500 m/s, en ocasiones presenta velocidades de 4500 m/s esto puede darse por las condiciones en las que se encuentra como si esta alterada o fracturada.

5.4. Método magnético

Se levantaron 150 puntos magnéticos (ver anexo 4) con los cuales se realizaron los mapas magnéticos con ayuda del software Oasis Montaj.

Previo a la salida se checaron los valores campo total, declinación e inclinación magnética en la página NOAA antes descrita para al momento de calcular estos datos en el software se tenga con más certeza que estos están correctos.

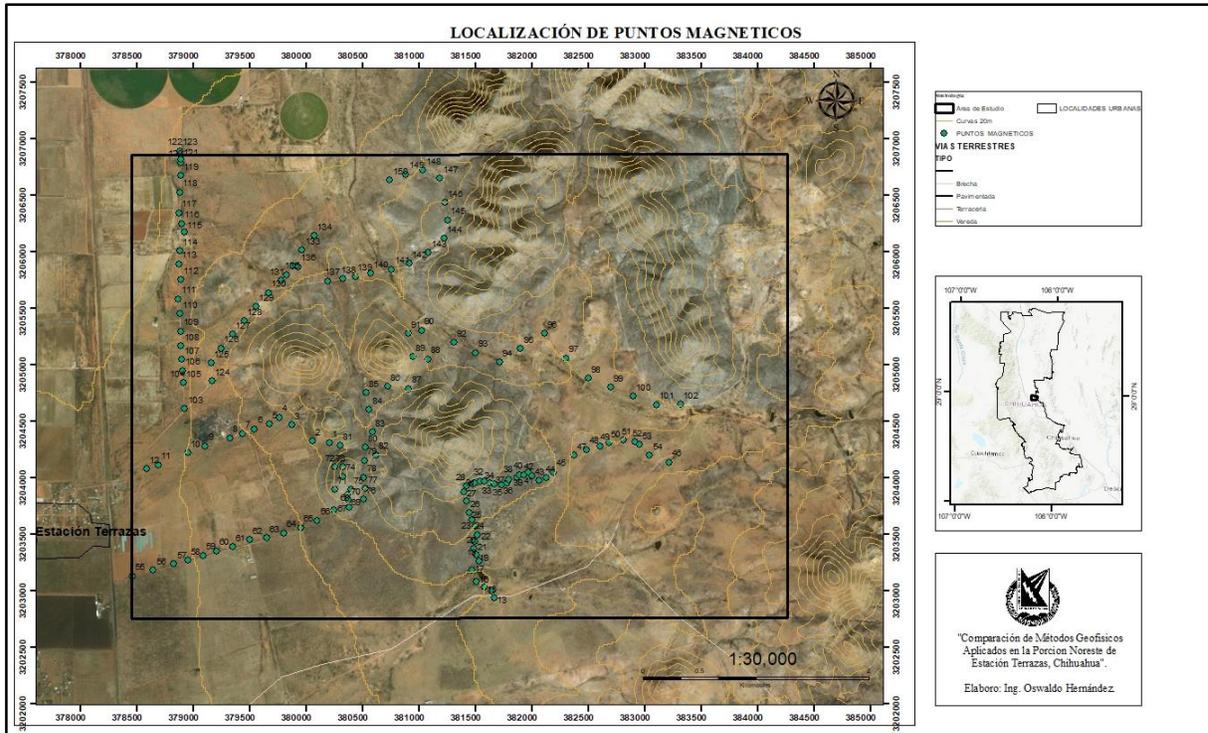


Figura 75. Localización de puntos magnéticos en la zona de estudio.

Una vez que se verifican estos valores se procede a realizar el mapa de campo total con la interpolación de puntos por el método de mínima curvatura que el propio software ofrece, la figura 76 muestra el mapa de campo total.

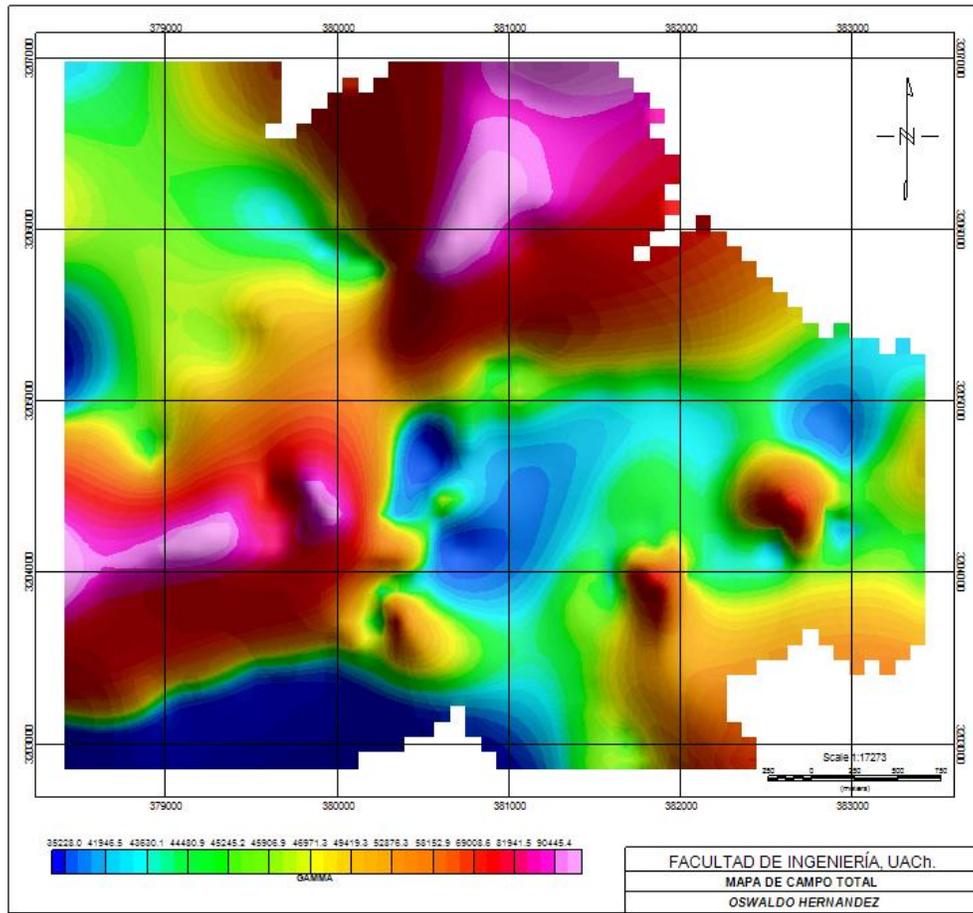


Figura 76. Mapa magnético de campo total.

Posterior a esto se preparó el mapa de campo total para la realización de la reducción al polo magnético el cual ajusta las anomalías como se menciona en el apartado de reducción al polo (página 40). Para esto se genera el mapa regional con el suavizado mediante un promedio ponderado con una matriz de 3x3 el cual se nombra en el software como 3x3 convolution. A este mapa se le aplica otro suavizado para obtener el mapa de tendencia magnética y así realizar las continuaciones ascendentes las cuales nos darán mapas a distintas profundidades partiendo del mapa de campo total con reducción al polo, o tomando el mapa de tendencia magnética.

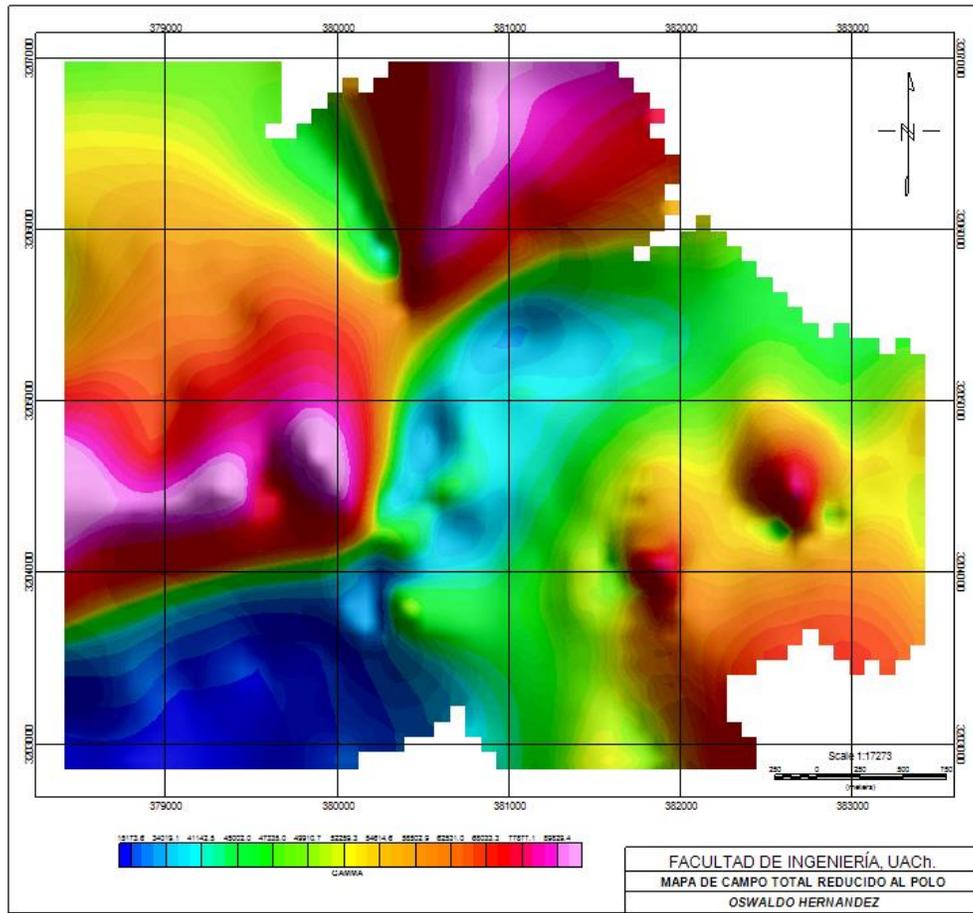


Figura 77. Mapa de campo total con reducción al polo.

Para la obtención del mapa residual, el cual muestra anomalías someras se deben restar el mapa campo total con reducción al polo menos el mapa 3x3 convulsion, el resultado se muestra en la figura 78, teniendo las anomalías someras de la zona de estudio.

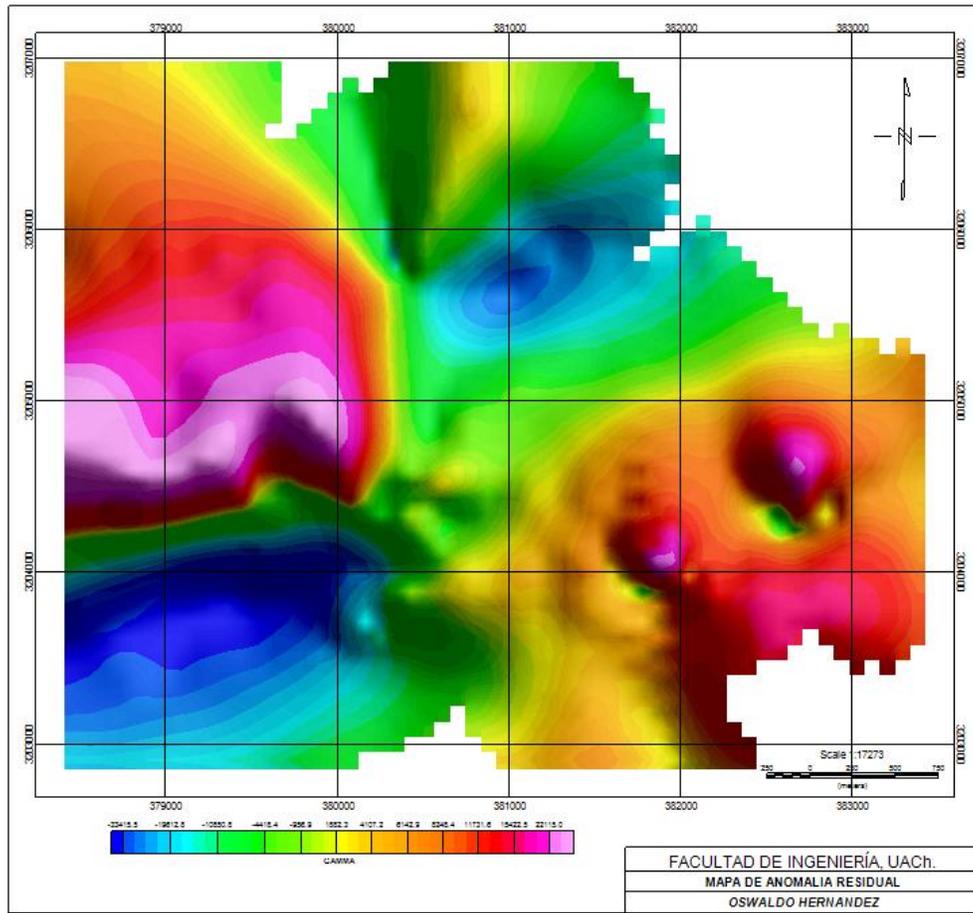


Figura 78. Mapa de anomalía residual.

5.4.1. Primera y Segunda Derivada

La finalidad de la aplicación este procesamiento es realzar anomalías someras y atenuar las anomalías profundas, para esto se apoyó de la primera derivada aplicada al mapa magnético de reducción al polo, el cual nos da como resultado que, en efecto, existen anomalías que por su cercanía generaban una fuente magnética compuesta la cual afectaba la delimitación de los bordes magnéticas de cada una.

Para el caso de la segunda derivada al igual que se mencionó con la primera se tiene una delimitación más precisa de las fuentes magnéticas a profundidad, teniendo menor tamaño. En el mapa de la segunda derivada se observan que las anomalías tienen un efecto adicional que da la apariencia de un rasgado que principalmente se observa en las altas intensidades magnéticas.

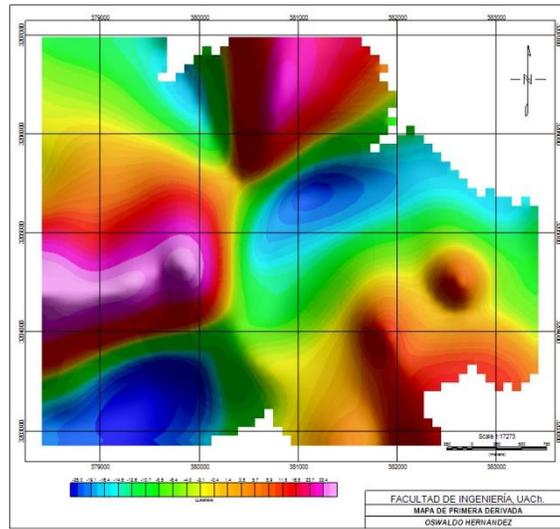


Figura 79. Mapa magnético de la Primera Derivada vertical

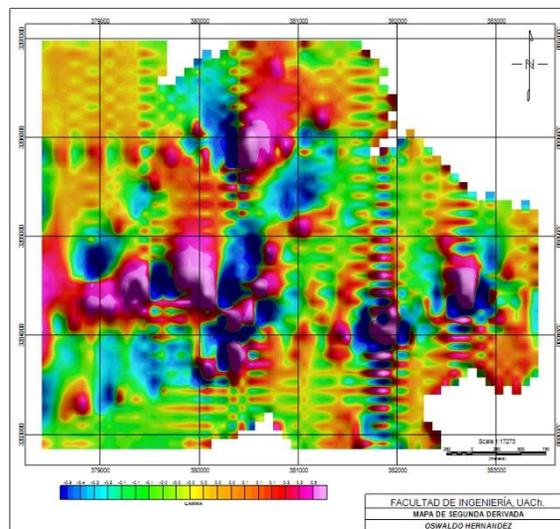


Figura 80. Mapa magnético de la Segunda Derivada vertical

5.4.2. Señal analítica

Este mapa nos muestra un delineamiento de los bordes de las fuentes magnéticas, ya que al observar el mapa nos percatamos que las anomalías se delimitan mejor. Para esto se utilizaron las derivadas direccionales en X, Y y Z. esto basándose en lo dicho por Reséndiz, P. 2015, y aplicándolo en el software Oasis Montaj.

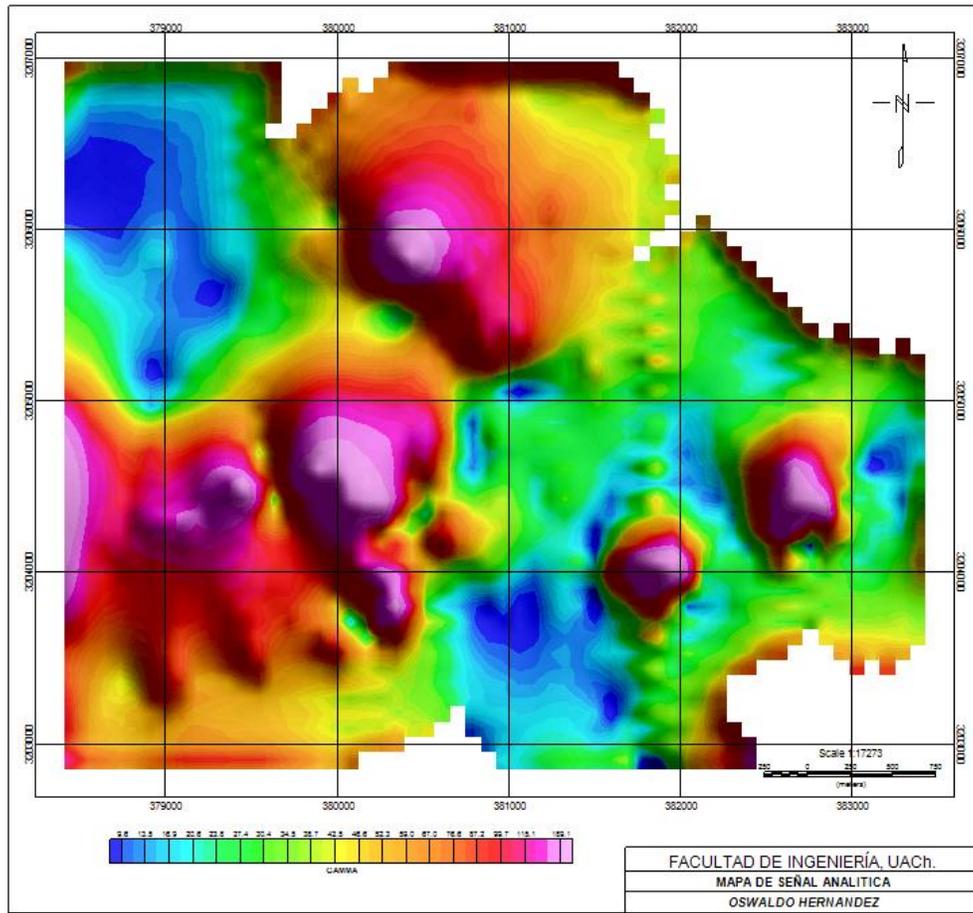


Figura 81. Mapa de Señal Analítica.

5.3.3. Derivada de Tilt

Para la elaboración del este mapa se hace uso de derivadas direccionales ya que se trata del ángulo tangente del cociente de la derivada vertical respecto al gradiente horizontal (Reséndiz, 2015), como en el procesado ya se contaba con esta información solo se aplicó la expresión, misma que el software incluye dentro de su repertorio. Este procesado genero un mayor número de anomalías en comparación del mapa residual o regional magnético, estas tienen una similitud a los mapas mencionados solo que, en menor tamaño, pero la relación entre anomalías.

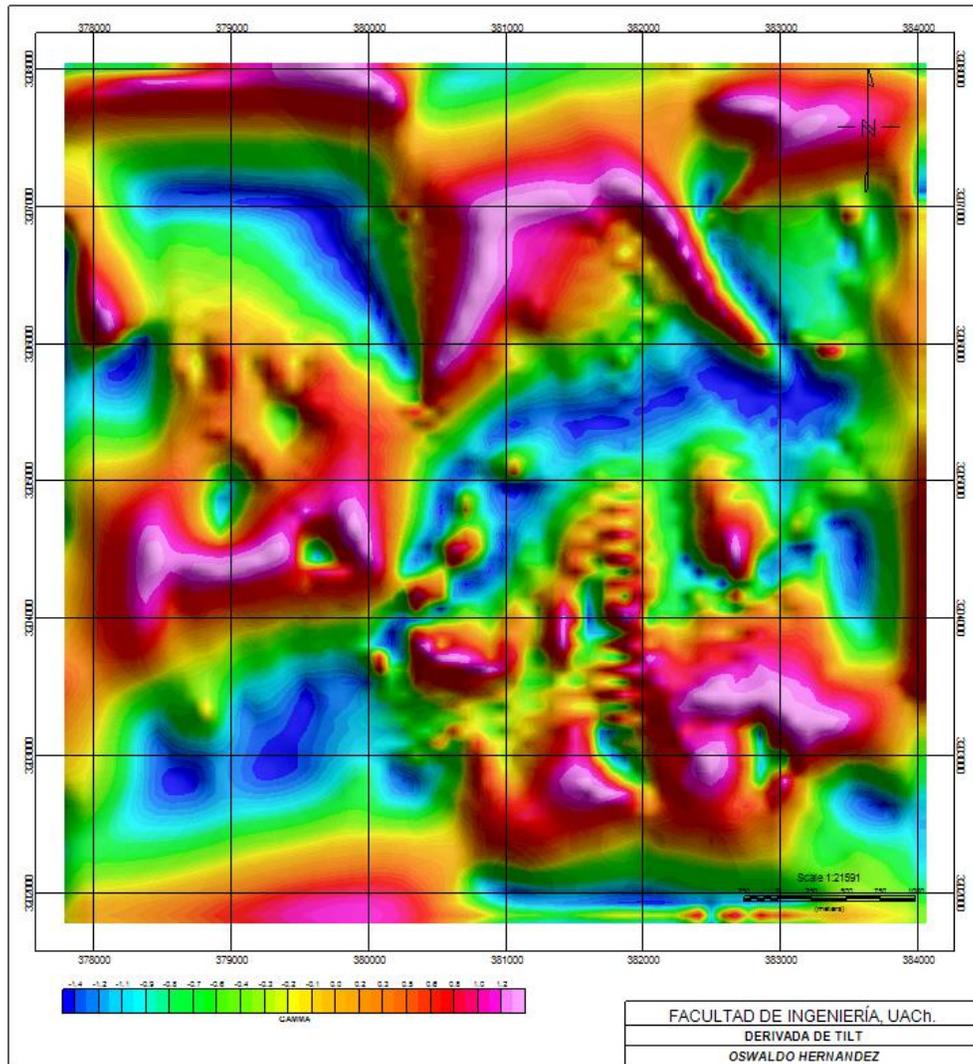


Figura 82. Mapa de la Derivada de Tilt.

5.4.4. Continuaciones Ascendentes

Para este caso se realizaron cuatro mapas a diferentes profundidades 50m, 100m, 200m y 350m esto se tomó así para tener puntos de comparación con los SEV's ya que la profundidad máxima que se alcanzó con estos fue de 350 metros aproximadamente.

En los mapas se observan las anomalías regionales y cómo van cambiando los bordes magnéticos e incluso llegan a desaparecer como lo muestra el mapa de continuación ascendente con profundidad de 350m.

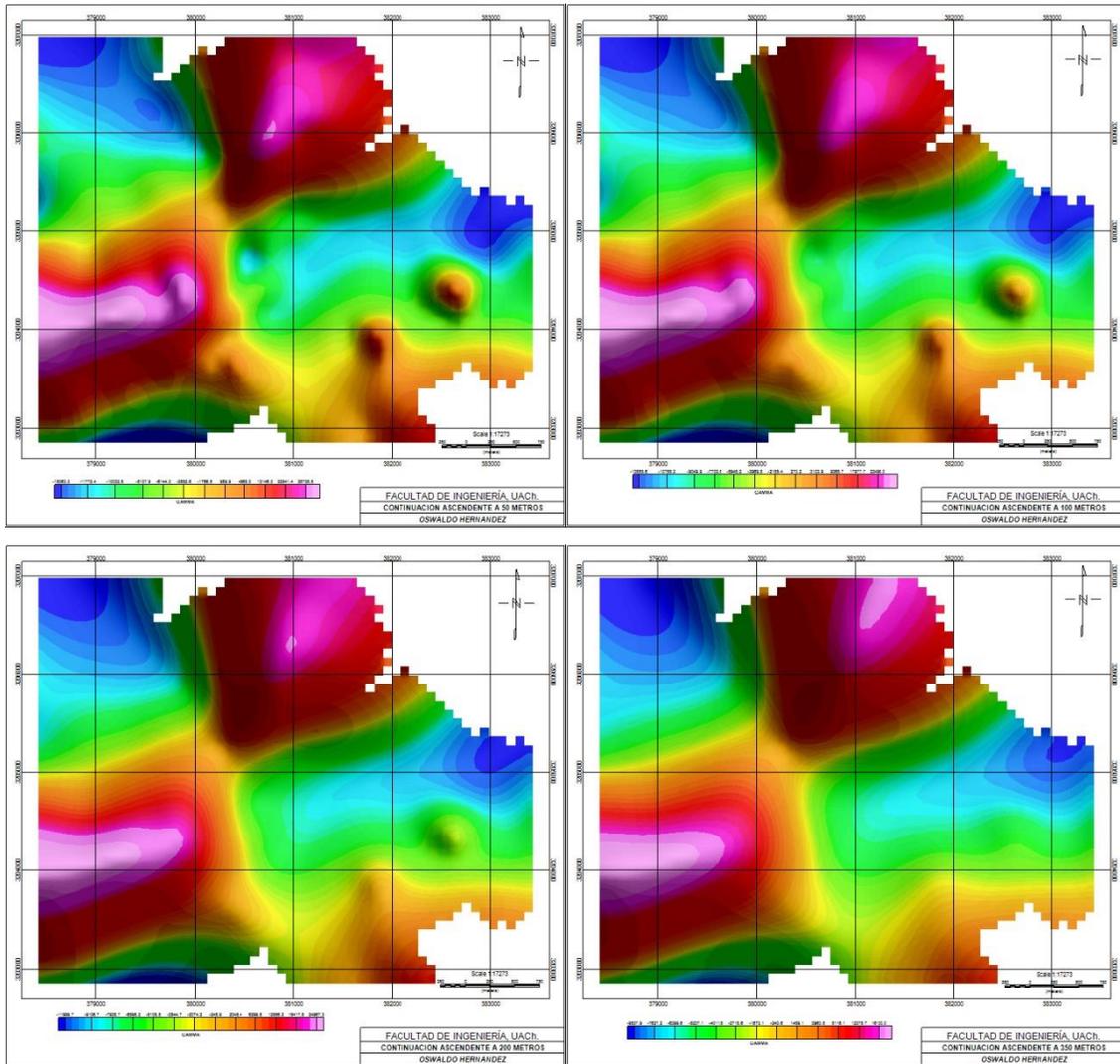


Figura 83. Continuaciones ascendentes resultado de la aplicación del mapa de reducción al polo.

5.4.4. Deconvulación Euler

Esta técnica se utilizó principalmente para identificar estructuras geológicas presentes en la zona de estudio, así como para inferir su profundidad, esto usando índices estructurales descritos anteriormente, para el presente estudio se utilizó el índice utilizando un tamaño de ventana de 10x10 con porcentaje de tolerancia de 15%. Para discriminar la cantidad de soluciones que arroja el método ya que al partir de un modelo matemático arrojará soluciones que muchas veces no son útiles para el caso de estudio.

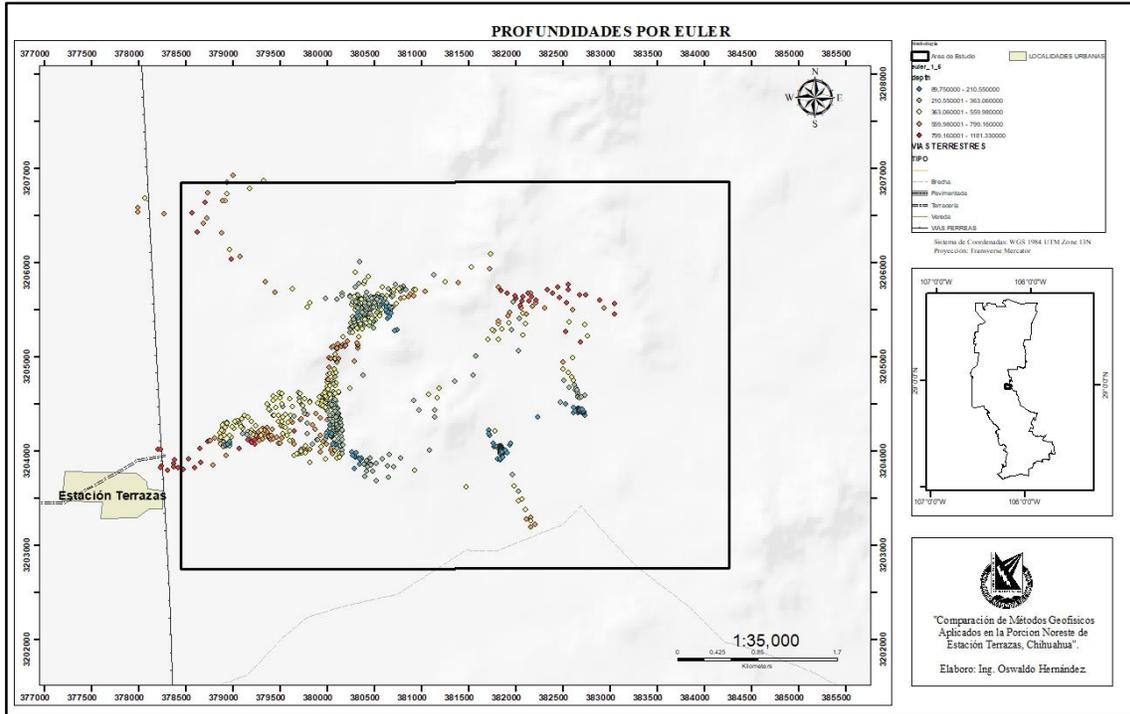


Figura 84. Resultados de la aplicación de la Deconvulación Euler.



6. COMPARACION DE METODOS.

La finalidad del presente estudio es comparar los resultados obtenidos mediante métodos geofísicos, mismos que en conjunto, caracterizaran con mayor calidad las condiciones hidrogeológicas del subsuelo.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se realizará la comparación de las interpretaciones.

Para los datos geoeléctricos y sísmicos de refracción se crearon unidades las cuales definen a un material por su valor de resistividad (ohm.m) y velocidad de propagación de onda primaria (ondas P).

En el caso de los sondeos eléctricos en arreglo Wenner se alcanzó análisis a una profundidad de 20 metros con la finalidad de poder empatar los resultados del método sísmico de refracción. Cabe resaltar que para el caso sísmico se tiene 2 arreglos, se tienen geófonos espaciados 5 metros en una línea y en otras a 10 metros. Esto da como resultado una mayor profundidad de exploración para el caso de mayor apertura.

Las unidades que se comparan para este caso se muestran en la siguiente tabla resumen:

Tabla 42. Unidades generadas a partir de los resultados de resistividad y velocidad P.

UNIDADES GENERADAS					
MÉTODO ELÉCTRICO WENNER			MÉTODO SÍSMICO DE REFRACCIÓN		
NOMBRE	RANGO OHM.M	MATERIAL	NOMBRE	RANGO M/S	MATERIAL
UNIDAD GEOELÉCTRIC A 1	5-20	material arcilloso	UNIDAD SISMICA 1	500 - 1000	materiales finos como limos y arcillas
UNIDAD GEOELÉCTRIC A 2	20-100	materiales arenosos a limosos	UNIDAD SISMICA 2	1000 - 1800	materiales gravosos y arenosos
UNIDAD GEOELÉCTRIC A 3	100-200	materiales gravosos	UNIDAD SISMICA 3	4500 - 11500	Roca



<p style="text-align: center;">UNIDAD GEOELÉCTRICA A 4</p>	<p style="text-align: center;">170-200- 800</p>	<p style="text-align: center;">Roca (presenta valores más bajos por las condiciones de fractura y/o alteración</p>	-	-	-
--	---	--	---	---	---

La tabla anterior nos muestra los valores interpretados, para tener punto de comparación sobre estos métodos.

Para el método sísmico de refracción se engloban materiales gravosos y arenosos predominando los materiales de granulometría más grande por la localización del mismo, esto a pie de monte donde se tiene materiales coluviales.

Un detalle para resaltar es que el método sísmico nos arrojó estructuras geológicas que se observan en el apartado de geología y algunas observadas en campo, las cuales no están mapeadas, esto por la escala de dicho mapeo geológico, cosa que en las zonas donde se tiene los sondeos eléctricos verticales en arreglo Wenner no se observó ya que variaba la ubicación de estos.

Las secciones geoelectricas y sísmicas interpretadas nos muestra como es la distribución espacial inferida de los materiales en el subsuelo, teniendo en cuenta esta información, los dos métodos presentan similitudes en sus materiales propuestos.

Cabe resaltar que ambos tienen ya, un objetivo dentro del marco geofísico, pero se hace hincapié en que los dos métodos dan resultados parecidos, claro teniendo en cuenta las variaciones que afectan a los mismos, como lo es, que en refracción sísmica no se pueden observar capas pequeñas de materiales, esto se describe a detalle en el marco teórico del método. Para los dos métodos es importante conocer el medio geológico sobre el cual se realizarán las mediciones ya que este aspecto marca una pauta al momento de tomar la decisión de cómo se interpretarán los valores y rangos a tomar para definir unidades las cuales engloben materiales en el subsuelo.

Para el caso de los sondeos eléctricos verticales en arreglo Schlumberger se comparan con los resultados obtenidos por el método magnético, este método resulta interesante por la



cuestión de que puedes observar, bordes magnéticos los cuales delimitan materiales geológicos con contenido mineral ya sea ferromagnético, paramagnético o diamagnético, mismos que generan anomalías ya sea positivas o negativas, monopolares o dipolares las cuales evidencias para este caso en partículas estructuras geológicas. Para lograr lo antes mencionado se utilizó la Deconvulación Euler, la cual consta de utilizar un índice estructural dependiendo el objetivo y resultado deseado, para este caso se utilizó el índice 1 para dipolos magnéticos, fallas y fracturas y 1.5 el cual se utiliza para líneas de dipolos finitos, contactos y fallas, estos según la *Northwest Geophysical Associates* (Tabla 4).

Geológicamente la zona como se ha hecho hincapié en textos anteriores tiene una complejidad y variación de materiales los cuales vuelven el tema complicado, estructuralmente se observan deformaciones frágiles las cuales constan de fallas normales y fracturación bien definida y que se observan a simple vista. Los materiales geológicos son variados, y se resaltan que la zona es un distrito minero del cual se explotaba cobre. En la zona se observan los trabajos mineros para la extracción del mineral, teniendo óxidos como malaquita, cuprita y crisocola, sulfuros como calcopirita, esto observado sobre los patios de material en el caso de Cu, se observan óxidos de fierro como hematita, limonita y especularita y sulfuros de fierro. Esto se hace mención ya que es información que nos afecta en los valores magnéticos ya que genera anomalías en la zona, que son de importancia para la minería, pero para la finalidad del presente estudio hacen ruido en la zona. En el caso de los sondeos eléctricos al ser materiales metálicos, estos tienen la propiedad de ser conductores y afectar las lecturas el aparato.

Para la realizar la comparación de los métodos en mención se describirán algunos aspectos que resaltan de cada uno. Se generó la figura 86 el cual contiene las secciones geoeléctricas sobre el mapa magnético con reducción al polo. Esto con la finalidad se visualizar con precisión la distribución de los materiales.

Para la sección geoeléctrica 1 (ver figura 51) se observan hacia los límites en los cuales se tienen los sondeos SEV6, SEV2 y SEV5 se tienen mayores espesores de materiales arcillosos, para el SEV6 se encuentran a 60 metros de profundidad y para los sondeos 2 y 5 los materiales están casi superficialmente. Los materiales que sobreyacen a estas arcillas son



materiales arenosos y gravas los cuales tiene mayores espesores observables en el SEV 4. Ahora teniendo en cuenta estos aspectos generales para esta sección, y observando la localización de la misma sobre el plano magnético se tiene una anomalía positiva que comienza en el SEV 2 y finaliza metros antes del SEV 4, esta anomalía positiva que en su mayor valor magnético alcanza los 89,000 gammas puede estar sujeta al contenido mineral existente en la zona, a estos se hace referencia al distrito minero dentro de la zona, mismo que al estar cercano a esta puede que los materiales producto de la erosión tengan contenidos de minerales metálicos los cuales afecten el campo magnético en ese punto, otro aspecto a resaltar es que en esa zona precisamente se tiene materiales que son utilizados como Balasto, estos se conforman por escoria de fundición, según lo observado y descrito por el Ingeniero que maneja el material, mismo que se abandonó en la zona por no cumplir con los estándares que pide FERROMEX.



Figura 85. Balasto presente en la zona de estudio.

Para el SEV 5 donde se tiene los mayores espesores de material arcilloso se tiene anomalías negativas que en su punto más bajo alcanza las 15,000 gammas. Cabe mencionar que para definir a una anomalía positiva se toma en cuenta el campo magnético natural el cual se explica en apartados anteriores como verificar en la página web NOAA, o en el mismo software te da un valor para este campo, el cual se tomó como 45,450 gammas.

La sección geoelectrica 2 (SG-2) que tienes materiales gravosos en superficie a los cuales le subyace una capa de arenas de 100 metros de espesor aproximadamente. Hacia los sondeos 7 y 3 a una profundidad de 150 metros topamos con roca la cual se observa aflorando



en superficie en zonas aledañas a los SEV's. Verificando la información en comparación con el mapa magnético se observa que los sondeos 3 y 7 está en el límite de un borde magnético positivo, de la cual podemos decir que es generado por la roca aflorante y sepultada sobre los sedimentos. Enteros los sondeos 7 y 8 vemos una tonalidad verde el cual nos da como resultado de 47,000 gammas, esto por darle un valor absoluto mismo al checar el campo natural de la zona es bastante normal, unificando los resultados y viendo la sección geoelectrica este valor corresponde a los materiales gravoso y arenoso presentes.

Por último, la sección geoelectrica 3 (SG-3) se tiene materiales arenosos en su mayoría con potentes espesores, para el SEV 14 se observan materiales un poco más finos. En los sondeos 12 y 13 aflora una roca que según el marco geológico son Riolitas del Terciario, observando en campo una gran zona de alteración ya que la coloración de las mismas se tornaba blanquizca-amarillenta, datos que es relevante ya que las resistividades nos evidenciaron aún más esta zona y podemos dar un tentativo de hasta donde se extiende esta alteración en cuestión de profundidad. En el sondeo 12 es donde se tiene mayores espesores de esta zona de alteración y decrece hacia el sondeo 13. Continuando con hacia el sondeo 15 tenemos materiales arenosos que sobreyacen sobre roca que probablemente sean las misma riolitas mencionadas, pero sin presencia de alteración, ya para el sonden 16 en su totalidad se interpreta como roca.

Esto resulta interesante al empatar los resultados magnéticos de la zona, ya que del mapa que se da mención se observan 2 dos anomalías positivas bien delimitadas que coinciden con la zona de alteración descrita con anterioridad.

También se tiene mapas a profundidad 50m, 100m, 200, y 350m, sobre estos mapas podemos observar cómo la zona de alteración va desapareciendo, así como se observa en los sondeos eléctricos (Figura 87).

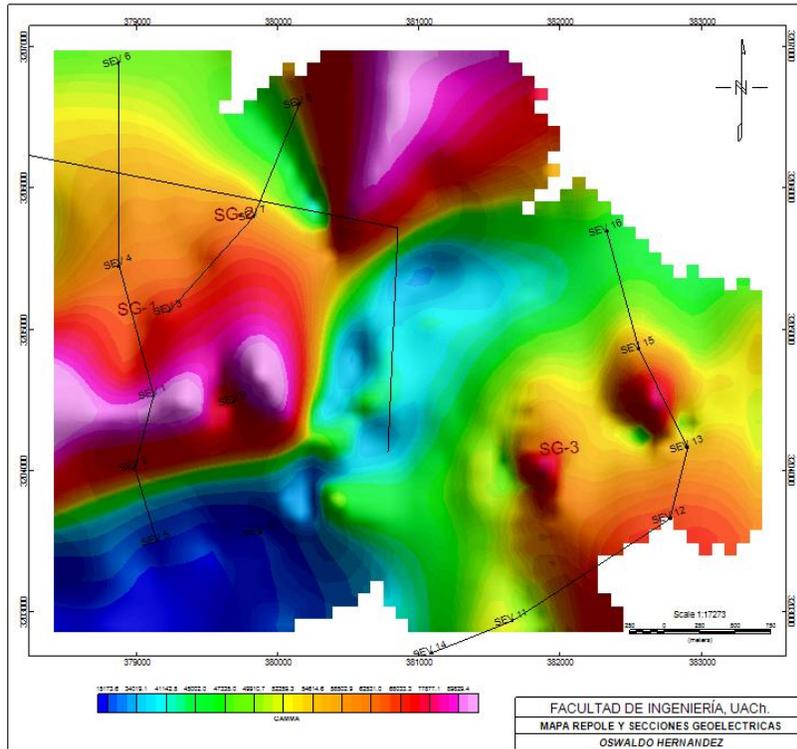


Figura 86. Secciones geoelectricas sobre el mapa magnetico con reduccion al polo.

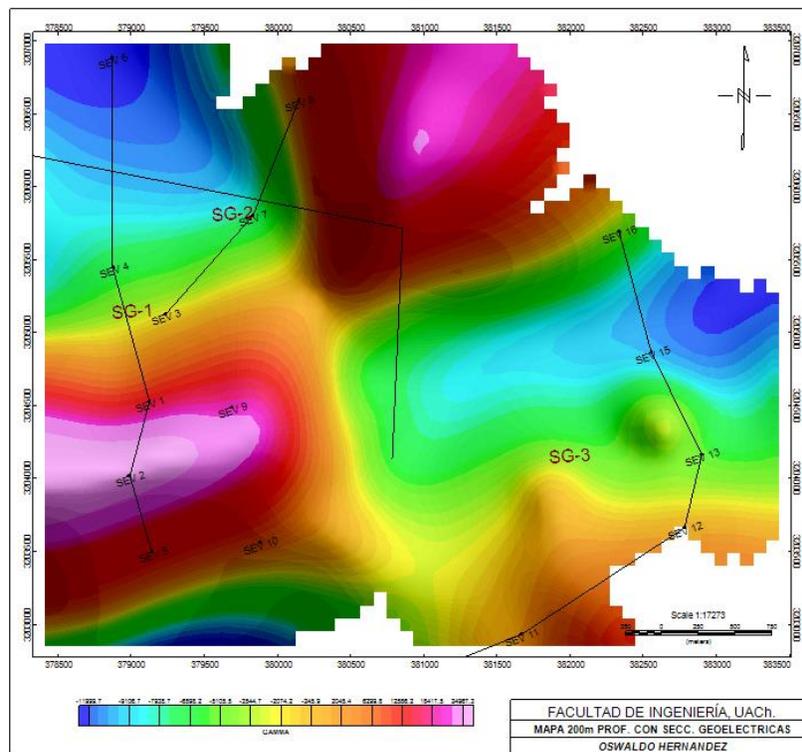


Figura 87. Mapa de continuacion ascendente 200m con secciones geoelectricas.



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta todos los aspectos interpretados para la zona específica en Estación Terrazas, nos damos una idea de las condiciones generales y específicas del subsuelo. El análisis geológico es de suma importancia para lograr una buena interpretación de los datos obtenidos. La geológica en la zona es interesante ya que se tiene los tres tipos de rocas, esto porque la zona es un complejo metamórfico de contacto del cual destaca un Skarn con granates el cual se generó por la intrusión granodiorítica sobre Calizas Cretácicas de la formación Aurora según el SGM. Estructuralmente la zona presenta deformaciones frágiles expresadas como fallas normales las cuales a nivel regional se tiene mapeada e identificada como falla La Gloria, en su contexto local se observaron más fallas posible producto de este misma estructura ya que se observaron paralelas a dicha estructura, los alcances de esta tesis se limitan solo al conocimiento geológico necesario para poder aplicar la comparación e identificaciones de unidades hidrogeológicas de interés, a esto se hacer referencia y amplia en rango de investigación ya que la zona presenta demasiada variedad en contexto geológico implicando geología estructural, geomorfología y cartografía geológica.

Con la información previa de la zona, y con los reconocimientos que se mencionan en el texto anterior, aplicado para este caso en el contexto geoelectricos se identificaron 4 unidades geoelectricas de las cuales 3, tienen interés hidrogeológico, las cuales coinciden con la información magnética levantada e interpretada en la zona, los bajos magnéticos interpretados en la mayoría de los mapas generados nos realzan las unidades potencialmente de interés como lo es la porción este, noroeste y sureste zonas donde predominan materiales permeables como arenas, gravas y materiales más finos como limo-arenas o arenas finas, sobre la porción noroeste y basado en los pozos de extracción de la JMÁS, se tiene como referencia los materiales antes mencionados, adicionalmente sobre esta zona de tiene una combinación de unidades hidrogeológicas, las cuales van de materiales aluviales y coluviales hasta roca con fracturación, la cual es conductora de agua, y sobre estas estructuras se tiene una batería de pozos de extracción.

Sobre las comparación de métodos sísmicos y eléctricos en arreglo Wenner las condiciones son parecidas ya que al interpretar los materiales se presentan similitudes en estos, siendo como único limitante la profundidad de exploración de estos métodos, teniendo



la capacidad para el presente estudio de 20 metros, hasta 40 metros máximo de profundidad, esto dependiendo de la apertura del arreglo utilizado, siendo estos métodos aplicables a la prospección somera para la caracterización de materiales subsuperficiales, los cuales puedan tener interés hidrogeológicos en zonas donde los niveles de agua subterránea sean muy someros. Estos métodos tienen una resolución horizontal considerable que se puede aplicar en otras ramas de la ingeniería como los son estudios geotécnicos.

En la conjunción de los métodos eléctricos en arreglo Schlumberger y método magnético la información de interés hidrogeológico se apoyan y los resultados en comparación ayudan a la mejor comprensión del medio ya que se observan y complementan el uno con el otro, coincidiendo en los materiales y los bajos magnéticos como zonas positivas para el almacenamiento de agua subterránea, evidenciando lineamientos que con el apoyo de la información geológica recabada y observada en campo se obtiene, al igual sitios positivos para el almacenamiento de agua subterránea, siendo la fracturación por donde se traslada el agua.

Para el presente estudio se hace hincapié en el apoyo de varios métodos para la prospección geofísica con fines hidrogeológicos, teniendo en cuenta la magnitud del proyecto y escalas a manejar. Esto traerá un manejo de información más amplio o por tanto resultados de mayor calidad, ya que se analizan diferentes parámetros que son de amplio apoyo en la comprensión del medio.

La figura 88 muestra el mapa general geofísico de los trabajos de campo en la porción noreste de Estación Terrazas, Chihuahua, el cual tiene la intención de resumir el trabajo y visualizan desde el contexto geológico-geofísico general el presente estudio.

Se recomienda lo siguiente

- Continuar con el levantamiento de información geológico-geofísica en la zona, esta presenta un interés hidrogeológico, ya que se cuenta con pozos de gran caudal en la zona que proveen del vital líquido a una parte de la población de Chihuahua.
- Estudio de cartografía geológica a detalle de las unidades litológicas en conjunto del análisis estructural ya que en la zona se presentan lineamientos bien definidos en 2 direcciones preferenciales, mismos que son conductores de agua.



- Ampliar la zona de estudio para caracterizar la parte sureste del acuífero El Sauz-Encinillas y su conexión con el acuífero Tabalaopa-Aldama y Chihuahua-Sacramento, mismos que colindan a la zona de estudio, siendo un tema interesante de investigación.

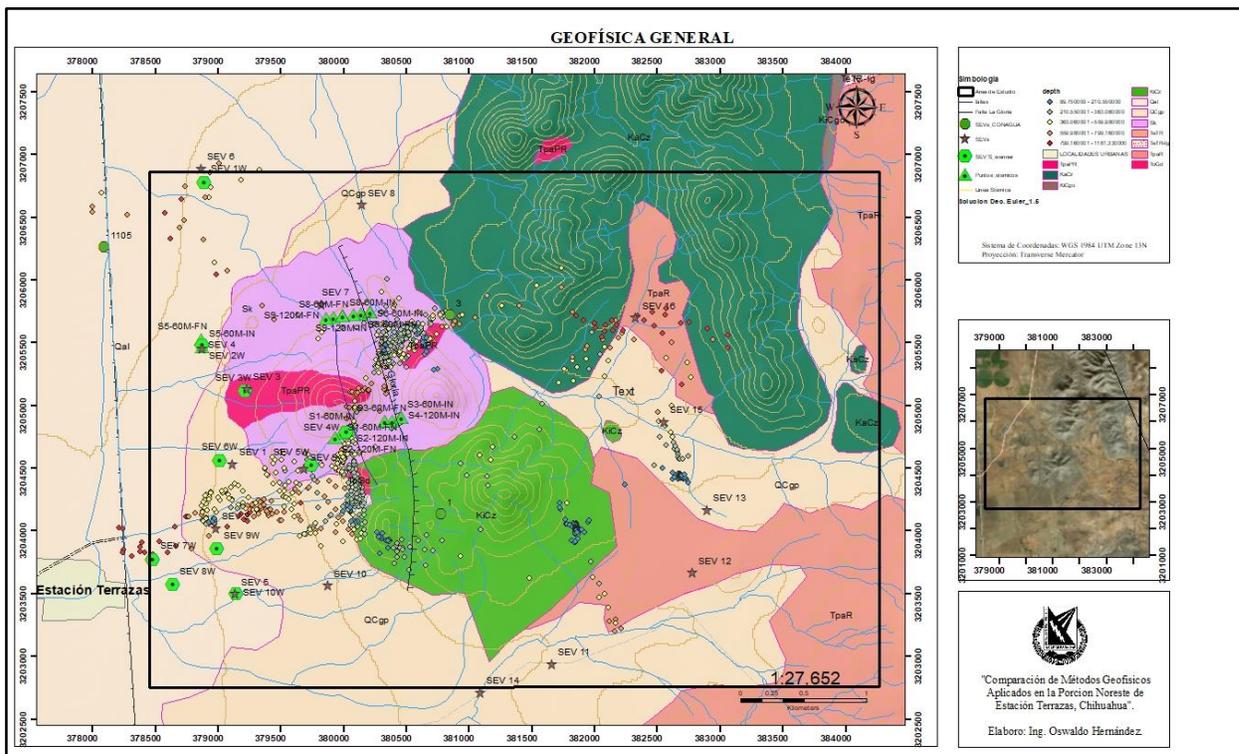


Figura 88. Mapa general geofísico de la porción noreste de Estación Terrazas, Chihuahua.



8. REFERENCIAS

- A. B. Reid (1990). Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution geophysics. vol. 55, no. I.
- Auge, M. (2008). Métodos Geo eléctricos para la Prospección de Agua Subterránea.
- Burger H.R., Sheehan A.F., Jones C.H., (2005). Introduction to Applied Geophysics, Exploring the Shallow Subsurface.
- Cavada J.M. (2000), Guía de Prospección Sísmica por Refracción, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Ingeniería Geofísica.
- CONAGUA, 2009. Actualización Geohidrológica de los Acuíferos: Chihuahua-Sacramento, Laguna El Diablo y El Sauz-Encinillas, Estado de Chihuahua. Tomo 1, Informe El Sauz-Encinillas.
- CONAGUA, 2015. Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero El Sauz-Encinillas (0807), Estado de Chihuahua.
- CONAGUA 2015, Actualización de la disponibilidad media de agua en el Acuífero Chihuahua-Sacramento (0830), estado de Chihuahua.
- Del Valle Toledo, E., 1986, Apuntes de introducción a los métodos geofísicos, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Escamilla, H. (1991), Mechanism of Subsidence of Ancient Cratonic rift basins. Tectonophysics.
- INEGI, (n.d.). Carta Fisiográfica, escala 1:1, 000,000, hoja Chihuahua.
- INEGI, 2004, Guía para la interpretación de cartografía edafológica, escala 1: 250,000.
- INEGI, 2015, Guía para la interpretación de uso de suelo y vegetación, escala 1:250, 000, Serie V.
- Junta Central de Agua Y Saneamiento del Estado de Chihuahua, 2006. Exploración Geohidrológica en la Zona de Ojo Laguna-Sierra El Nido Municipio de Chihuahua, Chihuahua, México. Dirección Técnica, Subdirección de Fuentes de Abastecimiento, Residencia de Prospección.
- Keary, Brooks & Hill (2002), An introduction to Geophysical Exploration.



- Kirsh, R., 2009, Groundwater Geophysics; a tool for hidrogeology, Ed. Springer, second edition.
- Milson, J., 2003, Field Geophysics: The geological field series, Ed. Wiley, third edition.
- Nettleton, L. (1976). Gravity and Magnetics in oil Prospecting. Mc Graw-Hill.
- Nava Flores, M. (2005). Análisis armónico en la detección de fenómenos geomagnéticos. México, D. F.: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería.
- Nava Flores, M. (2010). Modelado por métodos potenciales de estructuras salinas inferidas por sismología de reflexión. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado en Ciencias de la Tierra.
- Oruç, B., & Selim, H. H. (2011). Interpretation of magnetic data in the Sinop area of Mid Black Sea, Turkey, using tilt derivative, Euler deconvolution, and discrete wavelet transform. Journal of Applied Geophysics, 194–204.
- Pacheco Gómez, O. R. (2008). Aplicación del método de deconvolución de Euler sobre datos aeromagnéticos. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería.
- Ramírez J.P., 2013. Material Didáctico Para la Asignatura de Métodos Geofísicos, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Reséndiz, P. 2015. Identificación de Estructuras Hidrogeológicas con Apoyo de la Técnica Geofísica de Magnetometría Aérea.
- Reynolds J.M., 1997. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics.
- Servicio Geológico Mexicano, 1998. Texto guía de la carta magnética Chihuahua H13-10, estado de Chihuahua, con escala 1: 250,000.
- Servicio Geológico Mexicano, 1998, Carta Magnética de campo total Chihuahua H13-10, con escala 1: 250,000.
- Servicio Geológico Mexicano, 1998, Carta Magnética Sacramento H13-C56, estado de Chihuahua, con escala 1: 50,000.
- Servicio Geológico Mexicano, 1998, Carta Magnética Chihuahua H13-C66, estado de Chihuahua, con escala 1: 50,000
- Servicio Geológico Mexicano, 2002, Carta Magnética de Campo total con Reducción al polo Chihuahua H13-10, escala 1: 250,000.



Servicio Geológico Mexicano, 2006, Carta geológico-minera Sacramento H13-C56 Chihuahua, con escala 1: 50,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2018. Monografía Geológica Minera del Estado de Chihuahua.

Telford W.M., Geldart L.P., Sherif R.E. (1990), Applied Geophysics, Second Edition.

Villalobos, A. 2004. Sedimentología e Hidrogeología del Abanico Aluvial de la Laguna de Encinillas, Chihuahua, México.

Vera, P., 2009. Implicaciones técnicas del uso de diferentes métodos de procesamiento e interpretación en sísmica de refracción en punta colonet, Baja California.



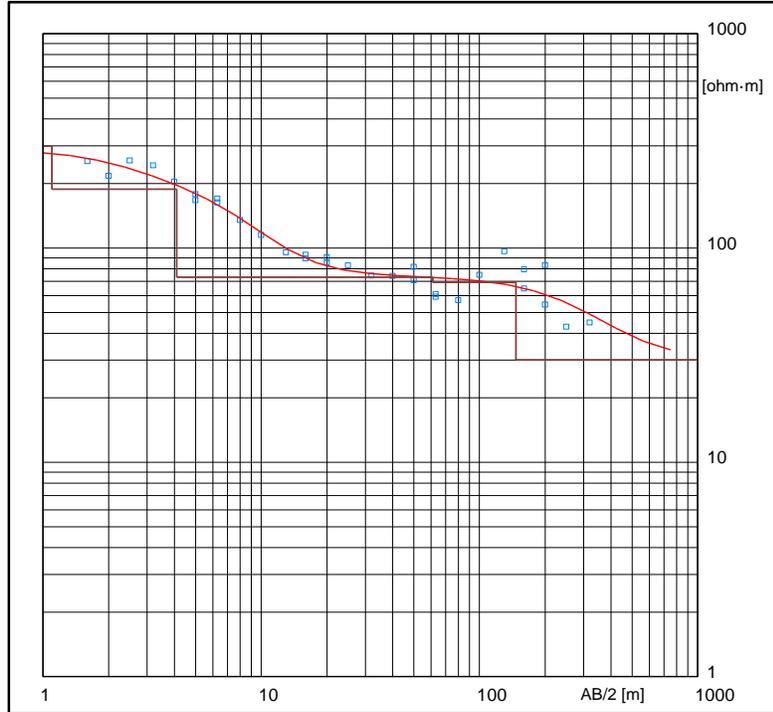
9. ANEXOS



ANEXO 1

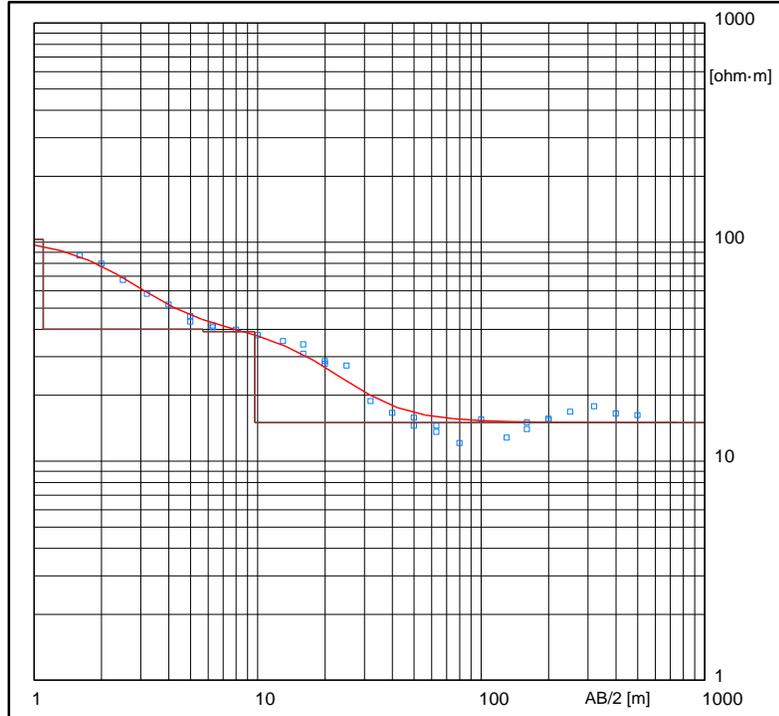
SONDEOS SCHLUMBERGUER

EST	AB/2	MN/2	SEV1
1	1.6	0.32	254.1
2	2	0.32	217.1
3	2.5	0.32	256.3
4	3.2	0.32	243
5	4	0.32	203.5
6.1	5	0.32	178.5
6.2	5	1	166.9
7.2	6.3	1	162.7
7.1	6.3	0.32	170.2
8	8	1	135.2
9	10	1	115.1
10	13	1	95.37
11.1	16	1	89.45
11.2	16	3.2	92.95
12.2	20	3.2	90.44
12.1	20	1	85.23
13	25	3.2	82.88
14	32	3.2	74.4
15	40	3.2	73.95
16.1	50	3.2	70.69
16.2	50	10	81.69
17.2	63	10	60.94
17.1	63	3.2	59.2
18	80	10	57.09
19	100	10	74.91
20	130	10	96.51
21.1	160	10	79.4
21.2	160	32	64.67
22.2	200	32	83.02
22.1	200	10	54.45
23	250	32	42.9
24	320	32	44.91



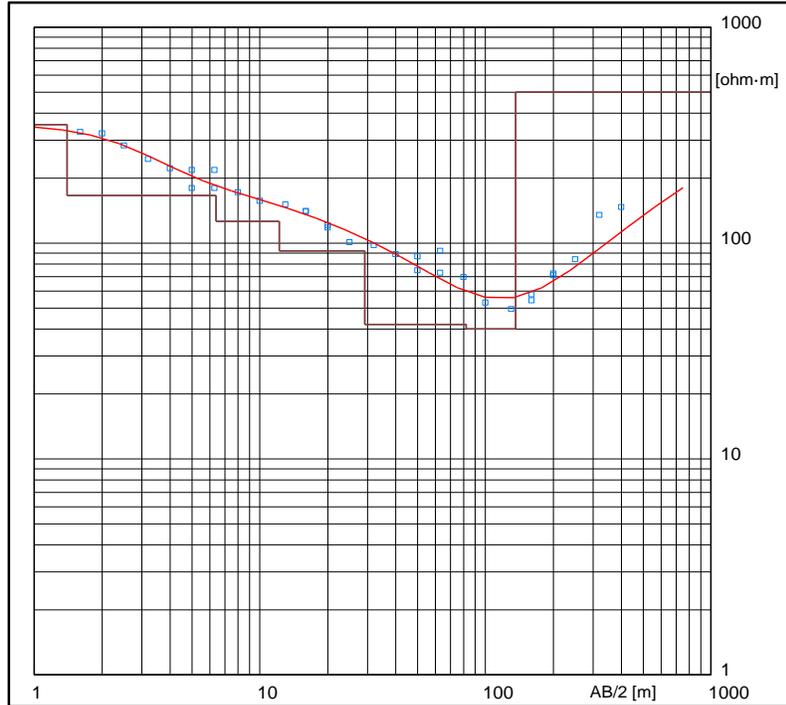


EST	AB/2	MN/2	SEV2
1	1.6	0.32	86.7
2	2	0.32	79.72
3	2.5	0.32	67.25
4	3.2	0.32	58.05
5	4	0.32	51.91
6.1	5	0.32	45.88
6.2	5	1	43.29
7.2	6.3	1	41.65
7.1	6.3	0.32	40.75
8	8	1	39.8
9	10	1	37.63
10	13	1	35.31
11.1	16	1	30.91
11.2	16	3.2	34.14
12.2	20	3.2	28.58
12.1	20	1	27.8
13	25	3.2	27.26
14	32	3.2	18.76
15	40	3.2	16.62
16.1	50	3.2	14.48
16.2	50	10	15.81
17.2	63	10	14.52
17.1	63	3.2	13.63
18	80	10	12.1
19	100	10	15.5
20	130	10	12.84
21.1	160	10	13.98
21.2	160	32	14.97
22.2	200	32	15.62
22.1	200	10	15.4
23	250	32	16.84
24	320	32	17.84
25	400	32	16.47
26	500	32	16.18



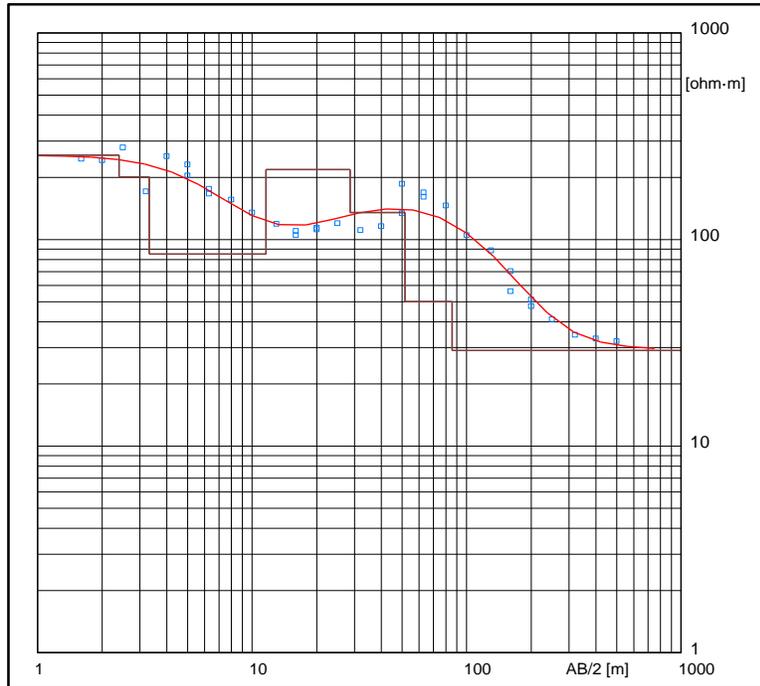


EST	AB/2	MN/2	SEV3
1	1.6	0.32	327.4
2	2	0.32	321.5
3	2.5	0.32	283
4	3.2	0.32	244.6
5	4	0.32	221.6
6.1	5	0.32	218.5
6.2	5	1	180.4
7.2	6.3	1	179.8
7.1	6.3	0.32	218.5
8	8	1	172.3
9	10	1	156.6
10	13	1	150.9
11.1	16	1	140.8
11.2	16	3.2	139.9
12.2	20	3.2	117.8
12.1	20	1	120.6
13	25	3.2	101.1
14	32	3.2	97.79
15	40	3.2	88.86
16.1	50	3.2	86.84
16.2	50	10	74.75
17.2	63	10	72.82
17.1	63	3.2	92.01
18	80	10	69.56
19	100	10	52.96
20	130	10	49.48
21.1	160	10	54.32
21.2	160	32	57.75
22.2	200	32	72.29
22.1	200	10	70.91
23	250	32	84.06
24	320	32	135
25	400	32	147.3



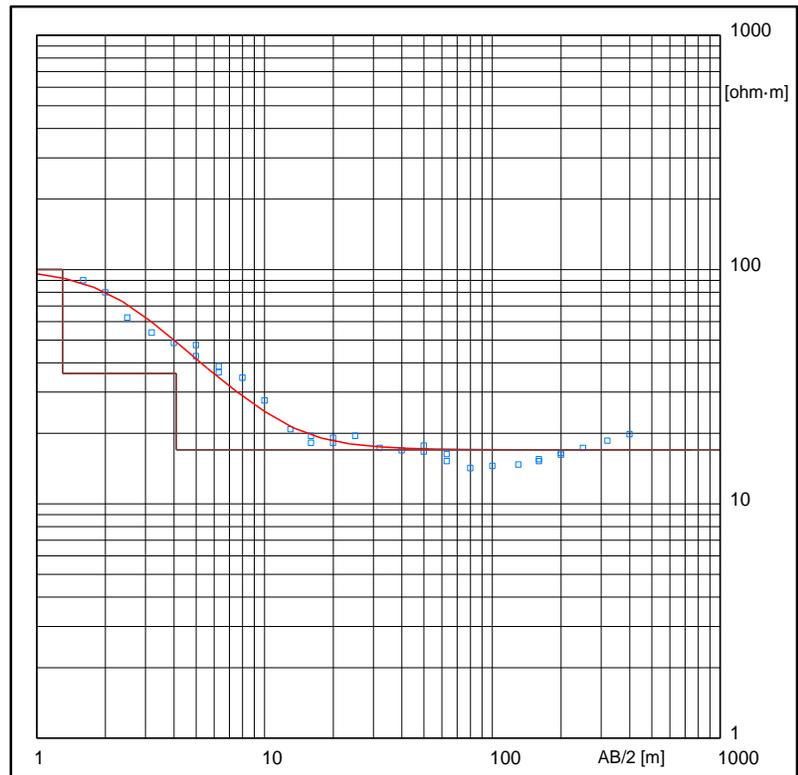


EST	AB/2	MN/2	SEV4
1	1.6	0.32	246.35
2	2	0.32	242.22
3	2.5	0.32	279.33
4	3.2	0.32	171.22
5	4	0.32	253.06
6.1	5	0.32	230.83
6.2	5	1	204.36
7.2	6.3	1	176.44
7.1	6.3	0.32	167.43
8	8	1	156.19
9	10	1	134.8
10	13	1	118.51
11.1	16	1	110.22
11.2	16	3.2	104.81
12.2	20	3.2	111.81
12.1	20	1	114.18
13	25	3.2	119.79
14	32	3.2	111.39
15	40	3.2	115.6
16.1	50	3.2	134.01
16.2	50	10	186.17
17.2	63	10	169.32
17.1	63	3.2	161.23
18	80	10	146.03
19	100	10	105.45
20	130	10	88.56
21.1	160	10	56.23
21.2	160	32	70.33
22.2	200	32	51.18
22.1	200	10	47.63
23	250	32	41.06
24	320	32	34.6
25	400	32	33.15
26	500	32	32.21



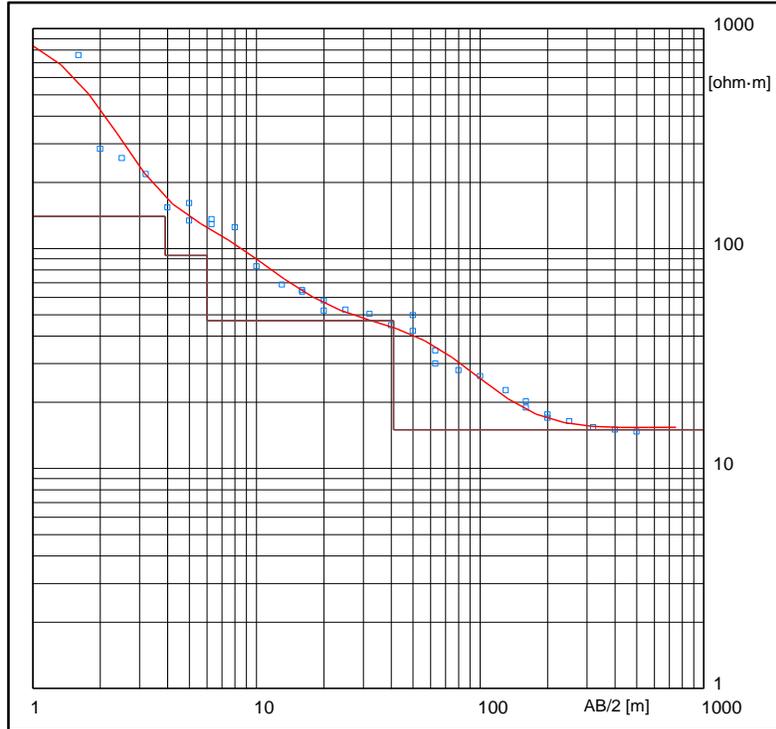


EST	AB/2	MN/2	SEV5
1	1.6	0.32	89.93
2	2	0.32	79.88
3	2.5	0.32	62.33
4	3.2	0.32	53.82
5	4	0.32	48.61
6.1	5	0.32	47.61
6.2	5	1	42.66
7.2	6.3	1	38.56
7.1	6.3	0.32	36.45
8	8	1	34.5
9	10	1	27.59
10	13	1	20.85
11.1	16	1	18.2
11.2	16	3.2	19.5
12.2	20	3.2	18.15
12.1	20	1	19.1
13	25	3.2	19.47
14	32	3.2	17.32
15	40	3.2	16.93
16.1	50	3.2	16.66
16.2	50	10	17.69
17.2	63	10	16.3
17.1	63	3.2	15.25
18	80	10	14.19
19	100	10	14.5
20	130	10	14.74
21.1	160	10	15.5
21.2	160	32	15.25
22.2	200	32	16.24
22.1	200	10	16.5
23	250	32	17.27
24	320	32	18.64
25	400	32	19.78



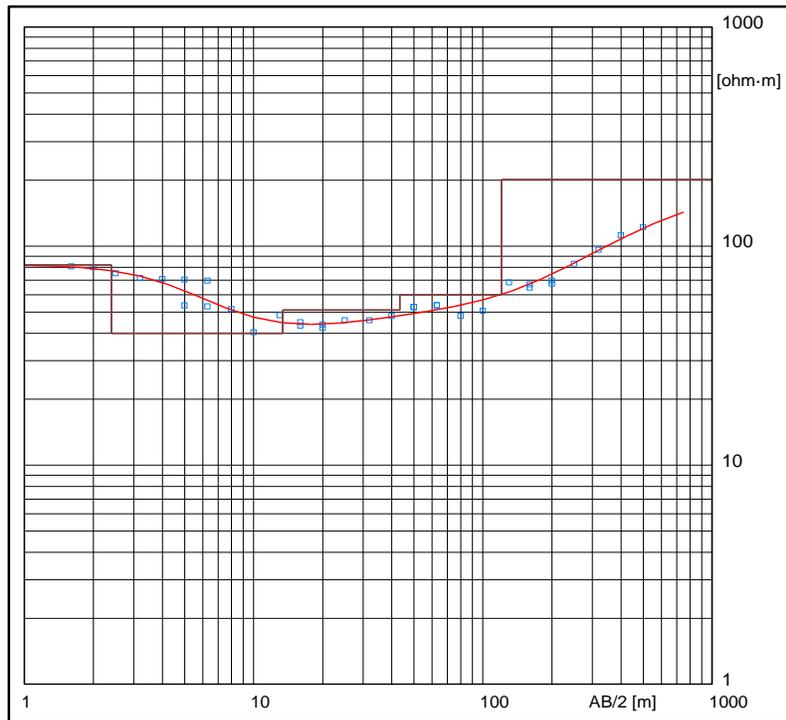


EST	AB/2	MN/2	SEV6
1	1.6	0.32	758.08
2	2	0.32	284.2
3	2.5	0.32	257.55
4	3.2	0.32	218.22
5	4	0.32	153.92
6.1	5	0.32	160.87
6.2	5	1	133.84
7.2	6.3	1	136.44
7.1	6.3	0.32	129.28
8	8	1	125.46
9	10	1	83.01
10	13	1	68.64
11.1	16	1	64.67
11.2	16	3.2	63.65
12.2	20	3.2	57.96
12.1	20	1	52.17
13	25	3.2	52.74
14	32	3.2	50.44
15	40	3.2	44.76
16.1	50	3.2	49.78
16.2	50	10	42.17
17.2	63	10	34.45
17.1	63	3.2	30.01
18	80	10	28.02
19	100	10	26.27
20	130	10	22.66
21.1	160	10	18.93
21.2	160	32	20.18
22.2	200	32	17.56
22.1	200	10	16.95
23	250	32	16.43
24	320	32	15.44
25	400	32	15.03
26	500	32	14.71



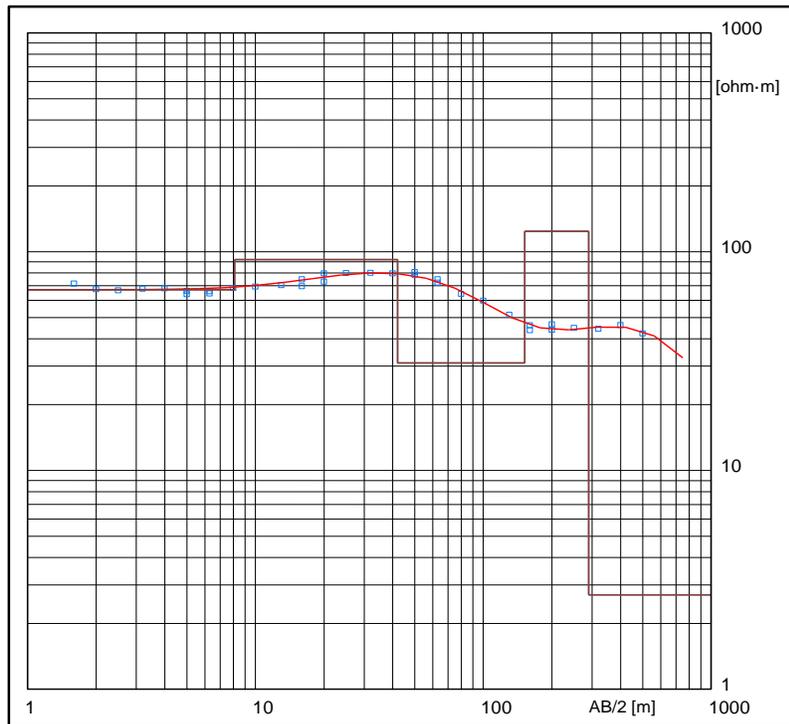


EST	AB/2	MN/2	SEV7
1	1.6	0.32	80.84
2	2	0.32	79.95
3	2.5	0.32	75.1
4	3.2	0.32	71.35
5	4	0.32	70.62
6.1	5	0.32	70.3
6.2	5	1	53.92
7.2	6.3	1	53.05
7.1	6.3	0.32	70.01
8	8	1	51.91
9	10	1	40.73
10	13	1	48.63
11.1	16	1	45.21
11.2	16	3.2	45.16
12.2	20	3.2	42.58
12.1	20	1	45.66
13	25	3.2	47.76
14	32	3.2	47.85
15	40	3.2	49.93
16.1	50	3.2	54.87
16.2	50	10	57.37
17.2	63	10	55.88
17.1	63	3.2	58.51
18	80	10	52.28
19	100	10	55.14
20	130	10	74.28
21.1	160	10	72.85
21.2	160	32	65.68
22.2	200	32	73.31
22.1	200	10	70.84
23	250	32	84.58
24	320	32	97.77
25	400	32	114.2
26	500	32	124.1



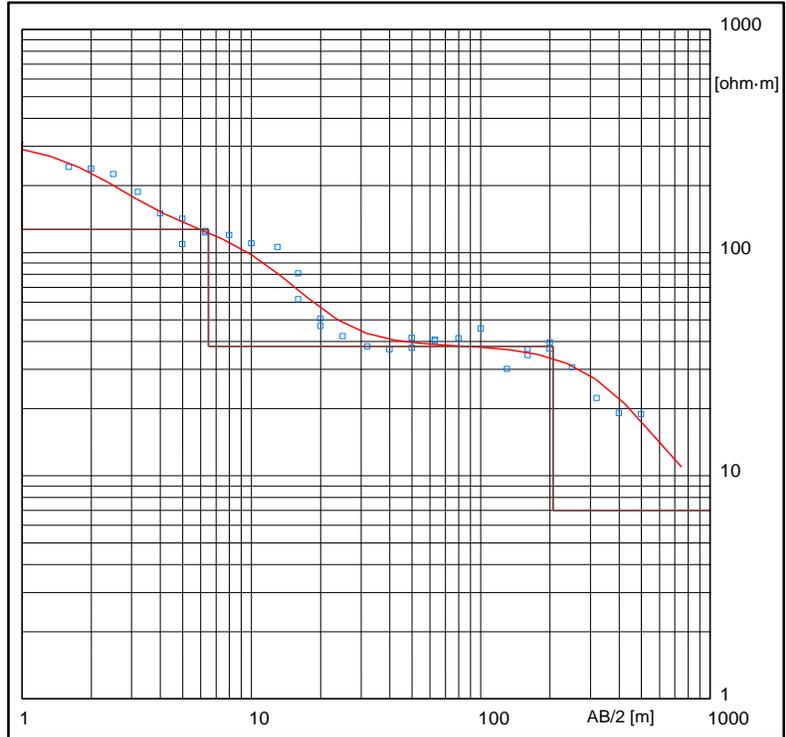


EST	AB/2	MN/2	SEV8
1	1.6	0.32	71.36
2	2	0.32	67.32
3	2.5	0.32	66.59
4	3.2	0.32	67.73
5	4	0.32	67.98
6.1	5	0.32	66.13
6.2	5	1	63.91
7.2	6.3	1	65.9
7.1	6.3	0.32	64.45
8	8	1	68.22
9	10	1	69.15
10	13	1	70.29
11.1	16	1	69.49
11.2	16	3.2	74.66
12.2	20	3.2	79.6
12.1	20	1	72.89
13	25	3.2	79.84
14	32	3.2	80.04
15	40	3.2	79.51
16.1	50	3.2	80.57
16.2	50	10	78.38
17.2	63	10	74.79
17.1	63	3.2	72.15
18	80	10	64.13
19	100	10	59.68
20	130	10	51.49
21.1	160	10	46.08
21.2	160	32	43.72
22.2	200	32	46.48
22.1	200	10	43.95
23	250	32	44.75
24	320	32	44.42
25	400	32	46.17
26	500	32	42.27



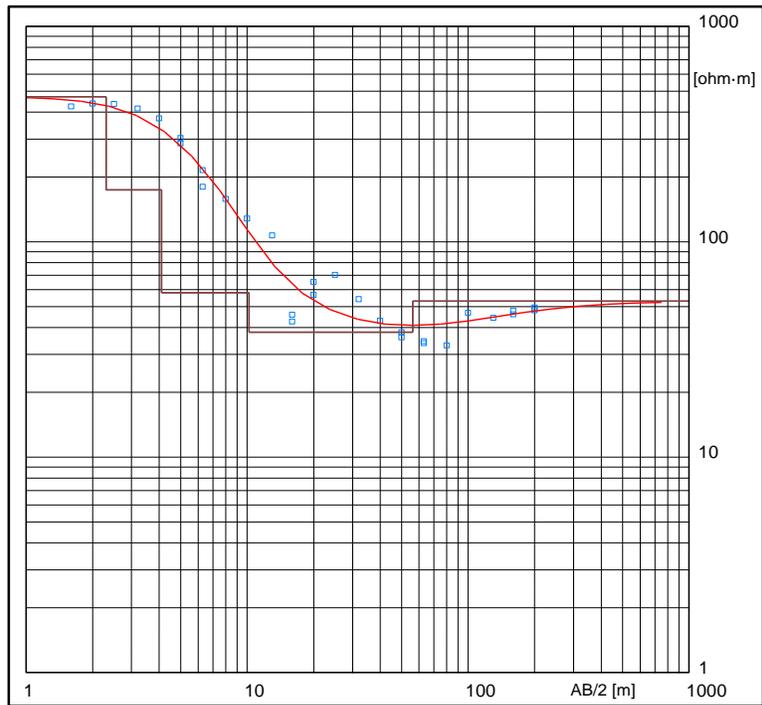


EST	AB/2	MN/2	SEV 9
1	1.6	0.32	242.1
2	2	0.32	238.1
3	2.5	0.32	294.8
4	3.2	0.32	186.7
5	4	0.32	150.1
6.1	5	0.32	142.5
6.2	5	1	108.8
7.2	6.3	1	124.8
7.1	6.3	0.32	122.56
8	8	1	120.4
9	10	1	110
10	13	1	105.5
11.1	16	1	80.79
11.2	16	3.2	61.78
12.2	20	3.2	50.7
12.1	20	1	46.89
13	25	3.2	42.17
14	32	3.2	37.95
15	40	3.2	36.88
16.1	50	3.2	37.45
16.2	50	10	41.46
17.2	63	10	40.76
17.1	63	3.2	40.2
18	80	10	41.3
19	100	10	45.66
20	130	10	30.07
21.1	160	10	34.71
21.2	160	32	36.97
22.2	200	32	39.56
22.1	200	10	37.12
23	250	32	30.58
24	320	32	22.27
25	400	32	11.89
26	500	32	18.92



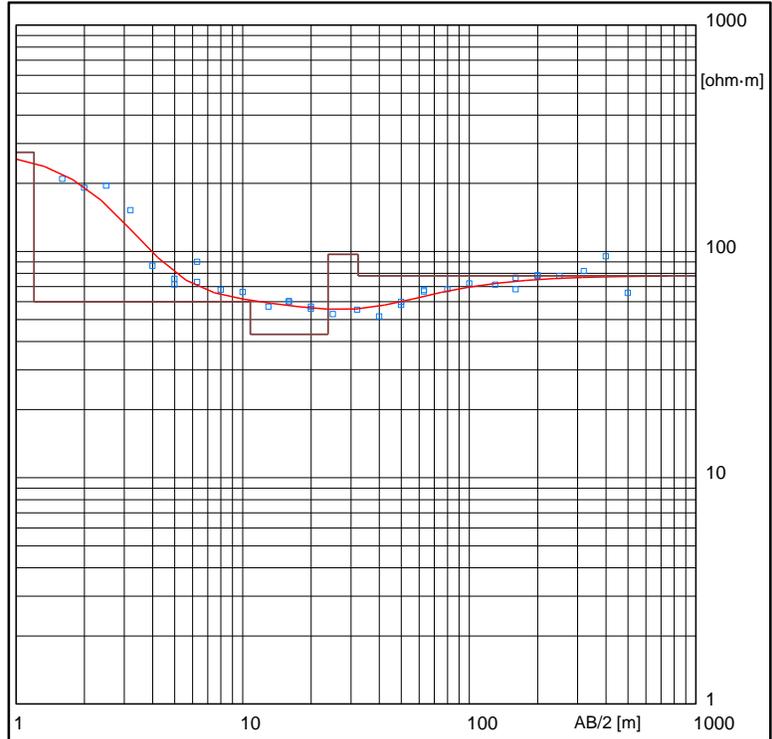


EST	AB/2	MN/2	SEV 10
1	1.6	0.32	425.17
2	2	0.32	438.48
3	2.5	0.32	436.18
4	3.2	0.32	415.16
5	4	0.32	373.72
6.1	5	0.32	303.17
6.2	5	1	286.2
7.2	6.3	1	215.44
7.1	6.3	0.32	180.23
8	8	1	158.47
9	10	1	128.26
10	13	1	107.23
11.1	16	1	42.56
11.2	16	3.2	12.97
12.2	20	3.2	56.74
12.1	20	1	65.1
13	25	3.2	70.14
14	32	3.2	54.08
15	40	3.2	43.01
16.1	50	3.2	36.02
16.2	50	10	37.99
17.2	63	10	34.48
17.1	63	3.2	33.8
18	80	10	33.03
19	100	10	46.83
20	130	10	44.27
21.1	160	10	46.04
21.2	160	32	47.85
22.2	200	32	48.01
22.1	200	10	49.52



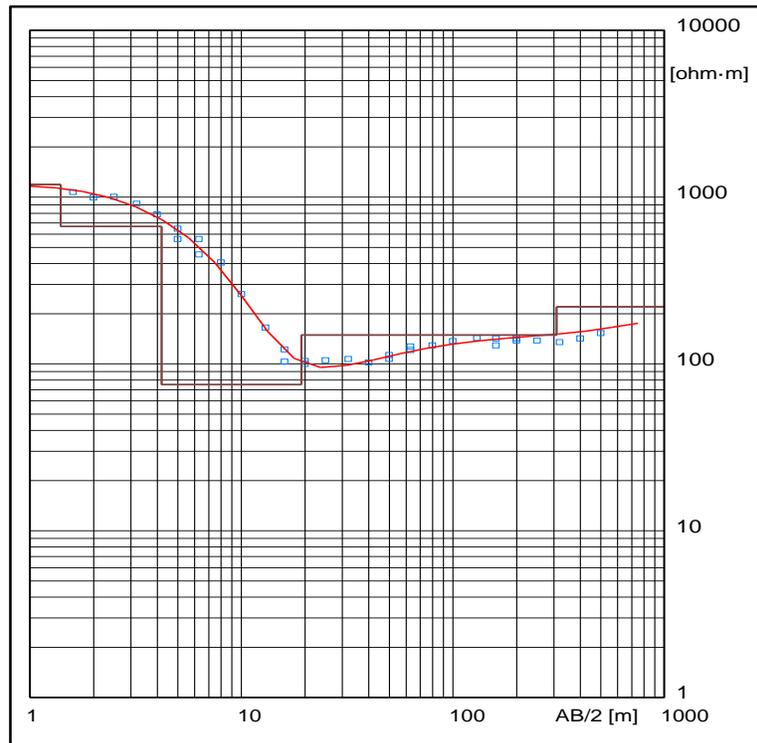


EST	AB/2	MN/2	SEV 11
1	1.6	0.32	209.12
2	2	0.32	190.76
3	2.5	0.32	125.05
4	3.2	0.32	206.14
5	4	0.32	86.27
6.1	5	0.32	71.39
6.2	5	1	75.56
7.2	6.3	1	89.77
7.1	6.3	0.32	73.25
8	8	1	67.74
9	10	1	66.11
10	13	1	57.03
11.1	16	1	60.22
11.2	16	3.2	59.59
12.2	20	3.2	57.04
12.1	20	1	55.68
13	25	3.2	52.82
14	32	3.2	55.19
15	40	3.2	51.61
16.1	50	3.2	57.88
16.2	50	10	59.76
17.2	63	10	66.48
17.1	63	3.2	67.54
18	80	10	68.1
19	100	10	72.12
20	130	10	71.2
21.1	160	10	68.03
21.2	160	32	76.41
22.2	200	32	78.41
22.1	200	10	77.9
23	250	32	77.81
24	320	32	81.78
25	400	32	95.06
26	500	32	65.53



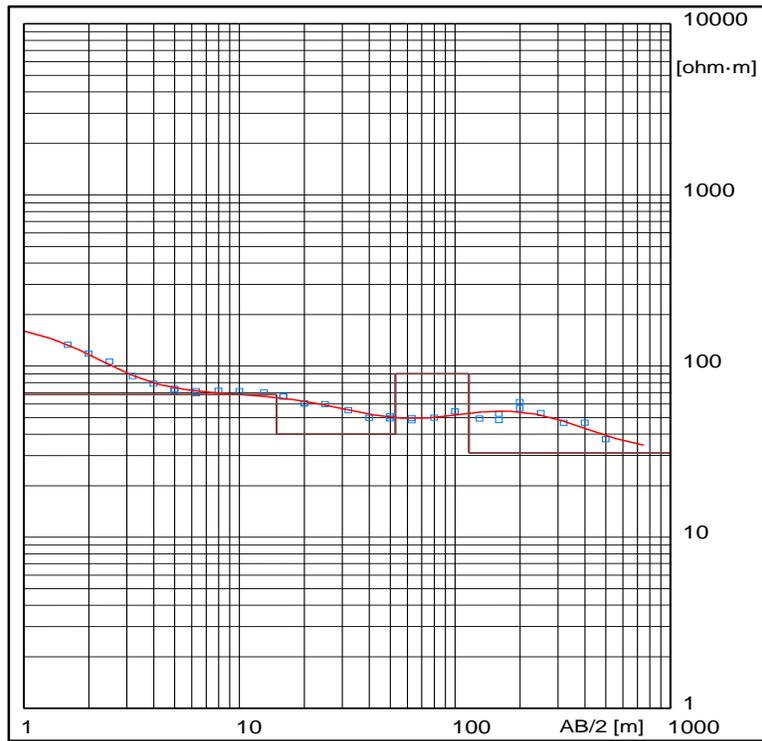


EST	AB/2	MN/2	SEV 12
1	1.6	0.32	1068.95
2	2	0.32	992.51
3	2.5	0.32	1003.07
4	3.2	0.32	912.47
5	4	0.32	787.06
6.1	5	0.32	559.69
6.2	5	1	646.01
7.2	6.3	1	560.33
7.1	6.3	0.32	452.69
8	8	1	405.2
9	10	1	262.16
10	13	1	165.4
11.1	16	1	122.31
11.2	16	3.2	103.21
12.2	20	3.2	100.07
12.1	20	1	103.87
13	25	3.2	105.2
14	32	3.2	107.35
15	40	3.2	102.02
16.1	50	3.2	107.29
16.2	50	10	113.17
17.2	63	10	121.13
17.1	63	3.2	126.74
18	80	10	129.07
19	100	10	136.99
20	130	10	143.48
21.1	160	10	141.94
21.2	160	32	129.09
22.2	200	32	142.43
22.1	200	10	138.23
23	250	32	137.59
24	320	32	134.89
25	400	32	141.57
26	500	32	152.96



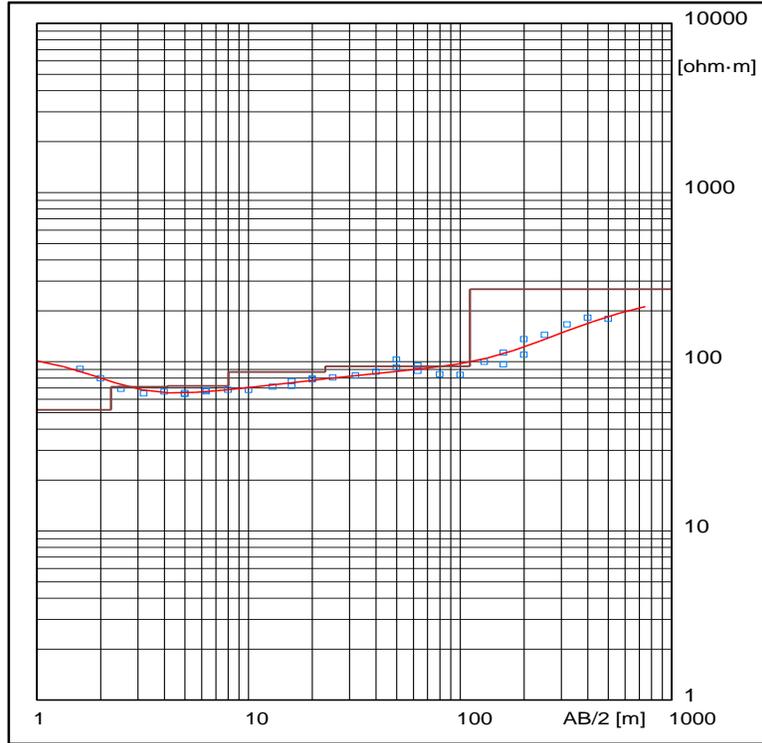


EST	AB/2	MN/2	SEV 14
1	1.6	0.32	132.9
2	2	0.32	118.26
3	2.5	0.32	105.86
4	3.2	0.32	87.36
5	4	0.32	78.93
6.1	5	0.32	73.36
6.2	5	1	70.26
7.2	6.3	1	69.19
7.1	6.3	0.32	70.2
8	8	1	70.64
9	10	1	70.24
10	13	1	68.88
11.1	16	1	65.54
11.2	16	3.2	62.46
12.2	20	3.2	59.49
12.1	20	1	57.15
13	25	3.2	56.44
14	32	3.2	51.99
15	40	3.2	46.86
16.1	50	3.2	47.89
16.2	50	10	46.1
17.2	63	10	45.47
17.1	63	3.2	46.25
18	80	10	46.55
19	100	10	50.65
20	130	10	45.94
21.1	160	10	45.07
21.2	160	32	49.91
22.2	200	32	57.38
22.1	200	10	53.58
23	250	32	50.37
24	320	32	44.15
25	400	32	60.66
26	500	32	35.37



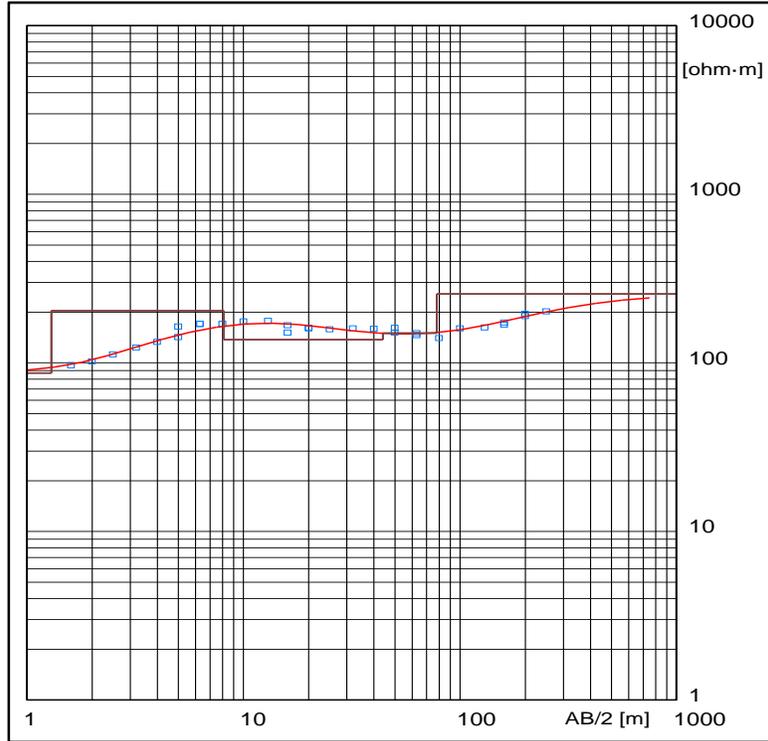


EST	AB/2	MN/2	SEV 13
1	1.6	0.32	90.59
2	2	0.32	79.85
3	2.5	0.32	69.04
4	3.2	0.32	64.93
5	4	0.32	66.46
6.1	5	0.32	64.3
6.2	5	1	65.27
7.2	6.3	1	66.57
7.1	6.3	0.32	67.58
8	8	1	68.16
9	10	1	67.99
10	13	1	71.14
11.1	16	1	71.77
11.2	16	3.2	76.58
12.2	20	3.2	78.62
12.1	20	1	79.58
13	25	3.2	80.71
14	32	3.2	82.82
15	40	3.2	86.97
16.1	50	3.2	102.93
16.2	50	10	92.48
17.2	63	10	94.8
17.1	63	3.2	88.14
18	80	10	84.25
19	100	10	83.69
20	130	10	99.72
21.1	160	10	96.28
21.2	160	32	113.49
22.2	200	32	110.49
22.1	200	10	135.69
23	250	32	143.76
24	320	32	166.1
25	400	32	181.88
26	500	32	178.89





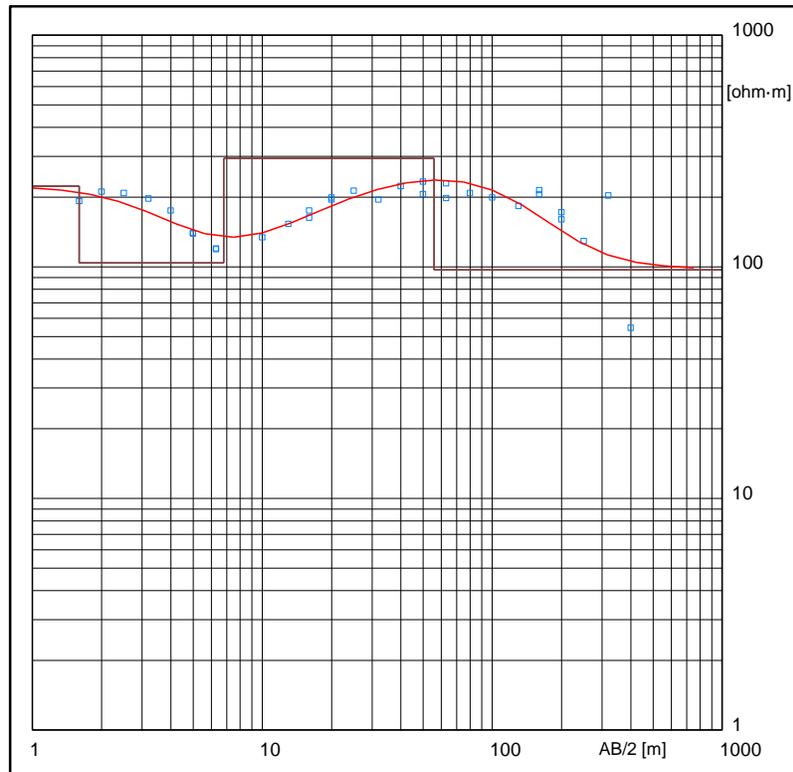
EST	AB/2	MN/2	SEV 16
1	1.6	0.32	96.65
2	2	0.32	102.1
3	2.5	0.32	112.07
4	3.2	0.32	122.68
5	4	0.32	133.13
6.1	5	0.32	141.54
6.2	5	1	164.06
7.2	6.3	1	170.16
7.1	6.3	0.32	170.14
8	8	1	170.16
9	10	1	175.54
10	13	1	176.83
11.1	16	1	166.79
11.2	16	3.2	151.24
12.2	20	3.2	160.97
12.1	20	1	159.87
13	25	3.2	158.3
14	32	3.2	159.62
15	40	3.2	159.36
16.1	50	3.2	161.15
16.2	50	10	150.51
17.2	63	10	149.95
17.1	63	3.2	145.78
18	80	10	139.92
19	100	10	159.69
20	130	10	161.8
21.1	160	10	167.69
21.2	160	32	172.8
22.2	200	32	189.12
22.1	200	10	195.36
23	250	32	201.76





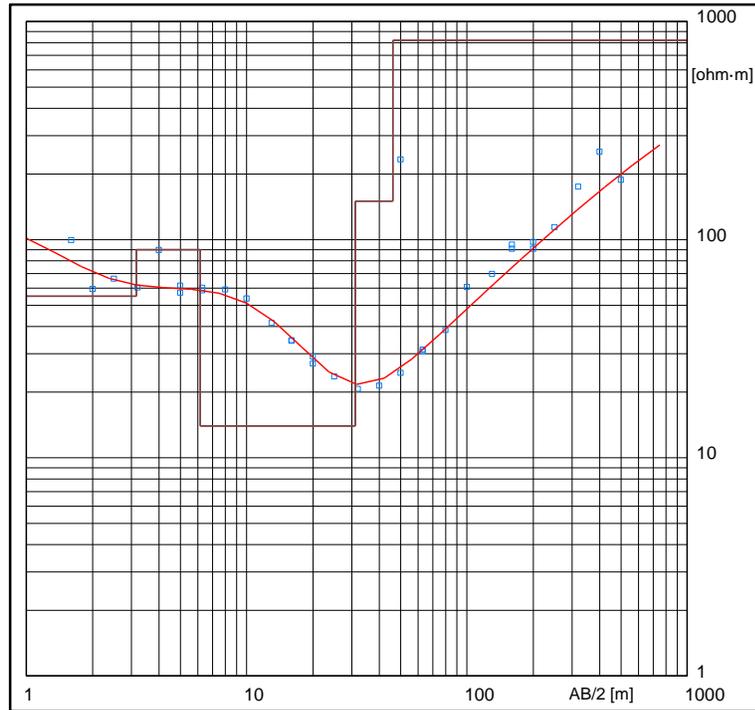
SONDEOS REINTERPRETADOS REALIZADOS POR LA CONAGUA

EST	AB/2	MN/2	1
1	1.6	0.32	191.8
2	2	0.32	211.4
3	2.5	0.32	207.8
4	3.2	0.32	197.1
5	4	0.32	174.7
6.1	5	0.32	140.5
6.2	5	1	139
7.2	6.3	1	119
7.4	6.3	0.32	120.5
9	10	1	134.4
10	13	1	153.3
11.1	16	1	175
11.2	16	3.2	162.9
12.2	20	3.2	199
12.4	20	1	194.6
13	25	3.2	213.2
14	32	3.2	194.6
15	40	3.2	223.3
16.1	50	3.2	233.2
16.2	50	10	205.7
17.2	63	10	197.8
17.4	63	3.2	228.7
18	80	10	207.9
19	100	10	198.7
20	130	10	182.6
21.1	160	10	206
21.2	160	32	214.4
22.2	200	32	159.7
22.4	200	10	171.5
23	250	32	128.6
24	320	32	203.3
25	400	32	54.48



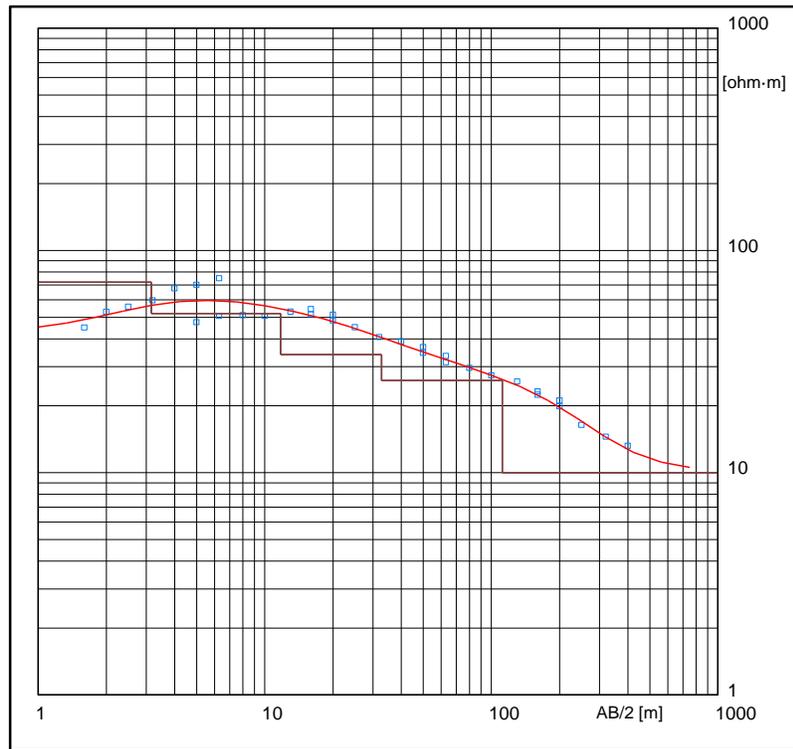


EST	AB/2	MN/2	3
1	1.6	0.32	99.45
2	2	0.32	59.35
3	2.5	0.32	66.21
4	3.2	0.32	60.33
5	4	0.32	89.63
6.1	5	0.32	57.07
6.2	5	1	61.52
7.2	6.3	1	60.09
7.4	6.3	0.32	58.52
8	8	1	58.95
9	10	1	53.68
10	13	1	41.49
11.1	16	1	34.55
11.2	16	3.2	34.3
12.2	20	3.2	27.02
12.4	20	1	29.07
13	25	3.2	23.62
14	32	3.2	20.74
15	40	3.2	21.39
16.1	50	3.2	233.2
16.2	50	10	24.5
17.2	63	10	30.72
17.4	63	3.2	31.27
18	80	10	38.48
19	100	10	60.58
20	130	10	69.62
21.1	160	10	90.84
21.2	160	32	94.93
22.2	200	32	97.65
22.4	200	10	90.8
23	250	32	113.6
24	320	32	174.7
25	400	32	253.3
26	500	32	187.7



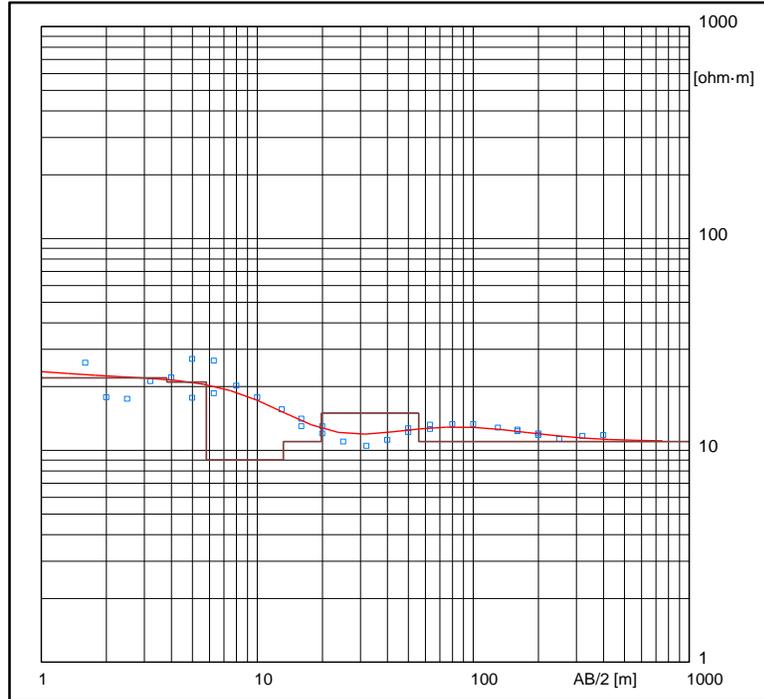


EST	AB/2	MN/2	1105
1	1.6	0.32	45.04
2	2	0.32	52.93
3	2.5	0.32	55.76
4	3.2	0.32	59.65
5	4	0.32	67.41
6.1	5	0.32	70.01
6.2	5	1	47.51
7.2	6.3	1	50.72
7.1	6.3	0.32	74.92
8	8	1	51.13
9	10	1	50.72
10	13	1	53.04
11.1	16	1	54.36
11.2	16	3.2	51.59
12.2	20	3.2	48.39
12.1	20	1	51.42
13	25	3.2	45.08
14	32	3.2	40.73
15	40	3.2	38.86
16.1	50	3.2	36.66
16.2	50	10	34.58
17.2	63	10	31.42
17.1	63	3.2	33.54
18	80	10	29.63
19	100	10	27.44
20	130	10	25.71
21.1	160	10	23.23
21.2	160	32	22.35
22.2	200	32	19.89
22.1	200	10	21.13
23	250	32	16.43
24	320	32	14.5
25	400	32	13.23



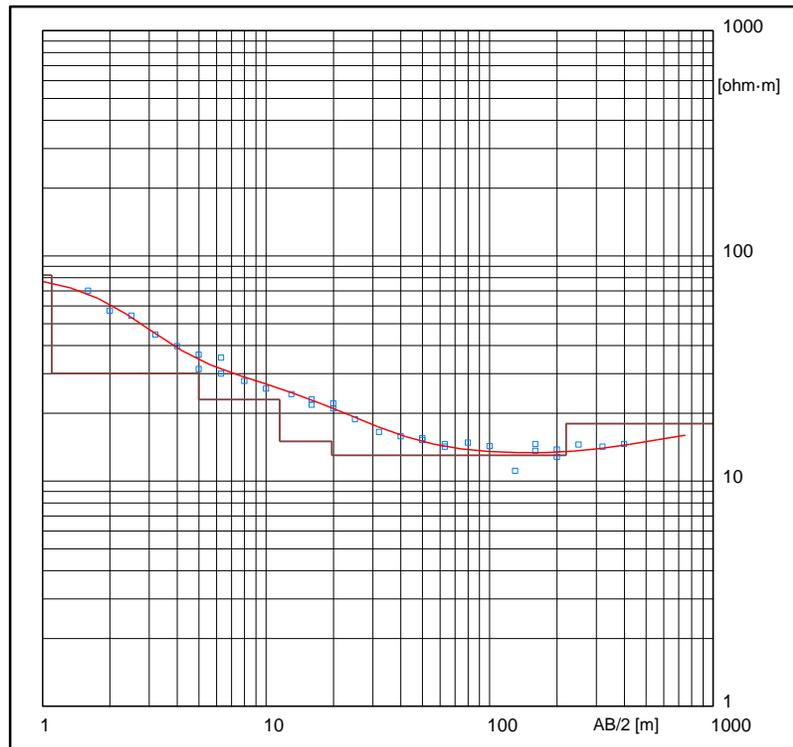


EST	AB/2	MN/2	1104
1	1.6	0.32	25.89
2	2	0.32	17.81
3	2.5	0.32	17.53
4	3.2	0.32	21.17
5	4	0.32	22.09
6.1	5	0.32	27.02
6.2	5	1	17.7
7.2	6.3	1	18.64
7.1	6.3	0.32	26.49
8	8	1	20.17
9	10	1	17.83
10	13	1	15.56
11.1	16	1	14.11
11.2	16	3.2	13.02
12.2	20	3.2	12
12.1	20	1	13.05
13	25	3.2	11
14	32	3.2	10.49
15	40	3.2	11.24
16.1	50	3.2	12.17
16.2	50	10	12.72
17.2	63	10	13.17
17.1	63	3.2	12.57
18	80	10	13.26
19	100	10	13.3
20	130	10	12.76
21.1	160	10	12.47
21.2	160	32	12.27
22.2	200	32	11.8
22.1	200	10	12.03
23	250	32	11.28
24	320	32	11.7
25	400	32	11.8





EST	AB/2	MN/2	1103
1	1.6	0.32	70.05
2	2	0.32	57.1
3	2.5	0.32	54.18
4	3.2	0.32	44.7
5	4	0.32	39.73
6.1	5	0.32	36.45
6.2	5	1	31.38
7.2	6.3	1	29.99
7.1	6.3	0.32	35.3
8	8	1	27.8
9	10	1	25.7
10	13	1	24.28
11.1	16	1	22.99
11.2	16	3.2	21.77
12.2	20	3.2	21.03
12.1	20	1	22.12
13	25	3.2	18.84
14	32	3.2	16.53
15	40	3.2	15.84
16.1	50	3.2	15.25
16.2	50	10	15.52
17.2	63	10	14.64
17.1	63	3.2	14.18
18	80	10	14.77
19	100	10	14.27
20	130	10	11.14
21.1	160	10	13.64
21.2	160	32	14.65
22.2	200	32	13.8
22.1	200	10	12.78
23	250	32	14.54
24	320	32	14.22
25	400	32	14.56

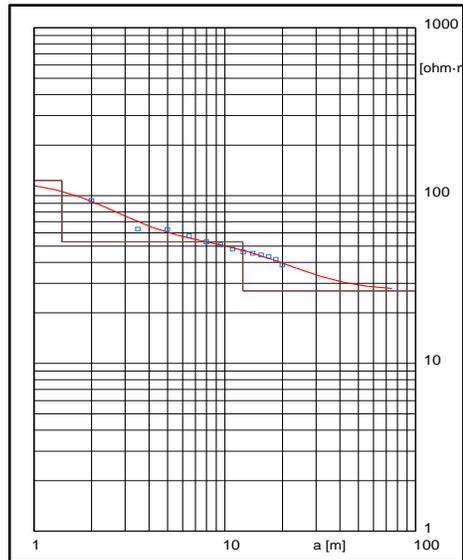




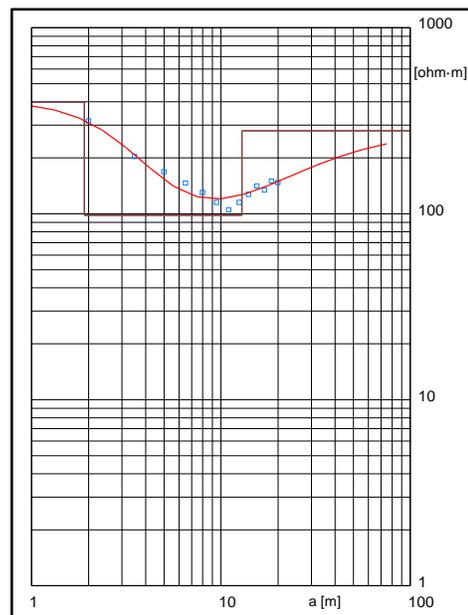
ANEXO 2

SONDEOS WENNER

MN	AB	a	SEV 1
1.00	3.00	2.00	93.32
1.75	5.25	3.50	63.01
2.50	7.50	5.00	62.72
3.25	9.75	6.50	57.53
4.00	12.00	8.00	52.86
4.75	14.25	9.50	50.69
5.50	16.50	11.00	47.94
6.25	18.75	12.50	46.09
7.00	21.00	14.00	45.21
7.75	23.25	15.50	44.23
8.50	25.50	17.00	43.33
9.25	27.75	18.50	41.63
10.00	30.00	20.00	38.65

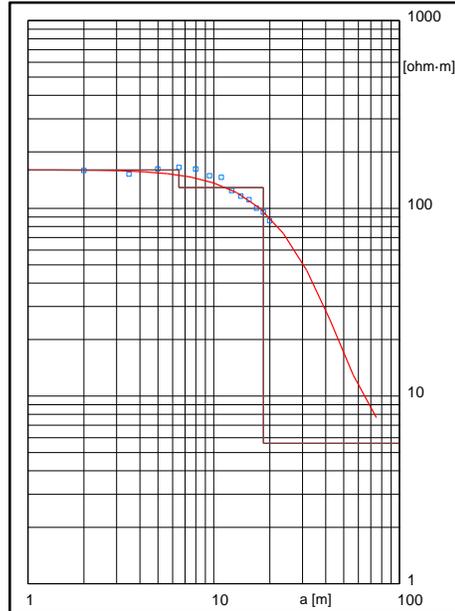


MN/2	AB/2	a	SEV 2
1.00	3.00	2.00	315
1.75	5.25	3.50	203.4
2.50	7.50	5.00	168.1
3.25	9.75	6.50	145.8
4.00	12.00	8.00	130.1
4.75	14.25	9.50	115.4
5.50	16.50	11.00	104.6
6.25	18.75	12.50	115
7.00	21.00	14.00	127.1
7.75	23.25	15.50	141.1
8.50	25.50	17.00	134.5
9.25	27.75	18.50	150.2
10.00	30.00	20.00	147

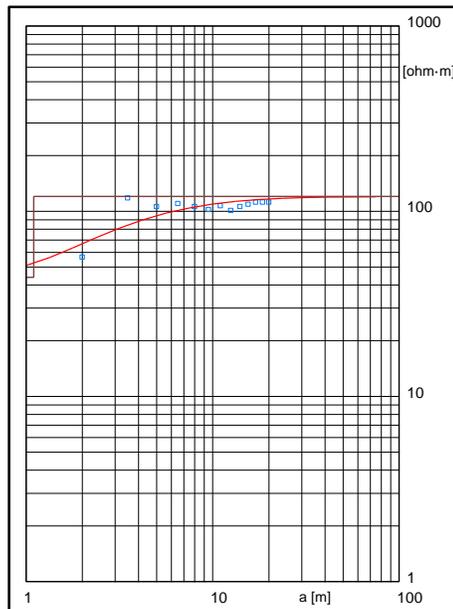




MN/2	AB/2	a	SEV 3
1.00	3.00	2.00	158.8
1.75	5.25	3.50	151.8
2.50	7.50	5.00	161.7
3.25	9.75	6.50	164.7
4.00	12.00	8.00	162.5
4.75	14.25	9.50	148.6
5.50	16.50	11.00	146.3
6.25	18.75	12.50	124.3
7.00	21.00	14.00	116.4
7.75	23.25	15.50	110.8
8.50	25.50	17.00	100.2
9.25	27.75	18.50	95.4
10.00	30.00	20.00	85.84

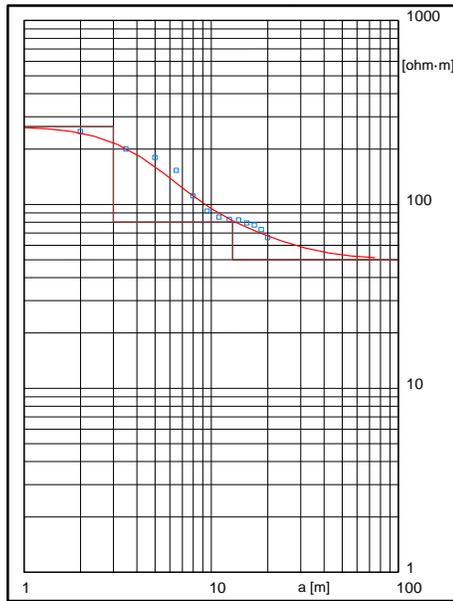


MN/2	AB/2	a	SEV 4
1.00	3.00	2.00	56.5
1.75	5.25	3.50	117.5
2.50	7.50	5.00	106
3.25	9.75	6.50	110.5
4.00	12.00	8.00	106
4.75	14.25	9.50	102.1
5.50	16.50	11.00	107.4
6.25	18.75	12.50	101.1
7.00	21.00	14.00	105.7
7.75	23.25	15.50	109.1
8.50	25.50	17.00	111.9
9.25	27.75	18.50	112.5
10.00	30.00	20.00	111.7

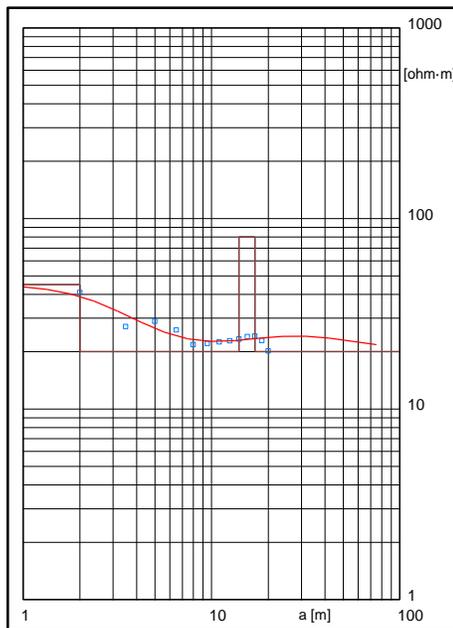




MN/2	AB/2	a	SEV 5
1.00	3.00	2.00	249
1.75	5.25	3.50	200.2
2.50	7.50	5.00	180.4
3.25	9.75	6.50	153.2
4.00	12.00	8.00	110.8
4.75	14.25	9.50	91.82
5.50	16.50	11.00	85.19
6.25	18.75	12.50	82.94
7.00	21.00	14.00	82.16
7.75	23.25	15.50	79.15
8.50	25.50	17.00	77.25
9.25	27.75	18.50	72.89
10.00	30.00	20.00	65.9

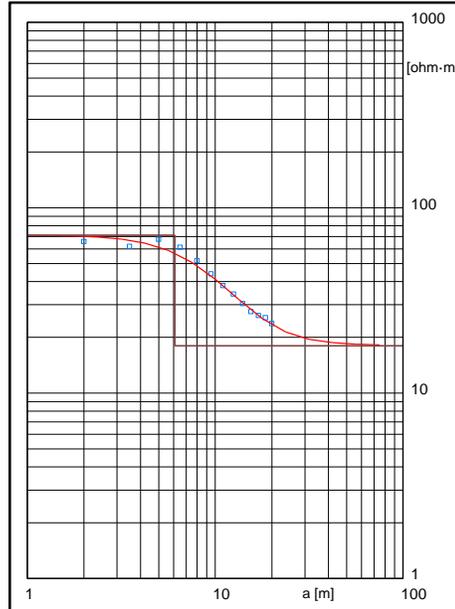


MN/2	AB/2	a	SEV 6
1.00	3.00	2.00	40.89
1.75	5.25	3.50	27.1
2.50	7.50	5.00	28.86
3.25	9.75	6.50	25.96
4.00	12.00	8.00	21.83
4.75	14.25	9.50	22.14
5.50	16.50	11.00	22.5
6.25	18.75	12.50	22.85
7.00	21.00	14.00	23.31
7.75	23.25	15.50	24.03
8.50	25.50	17.00	24.13
9.25	27.75	18.50	22.9
10.00	30.00	20.00	20.22

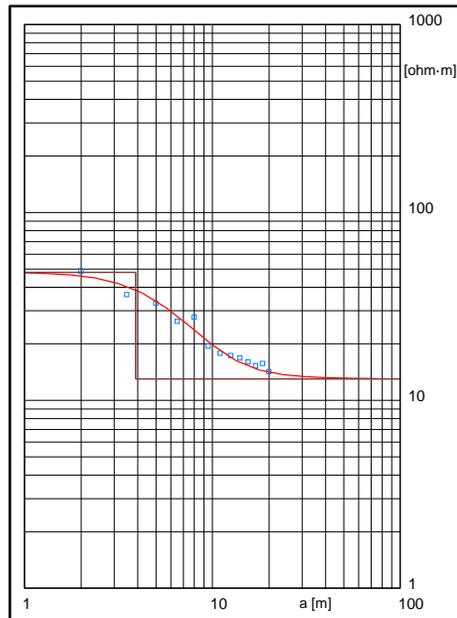




MN/2	AB/2	a	SEV 7
1.00	3.00	2.00	65.74
1.75	5.25	3.50	61.94
2.50	7.50	5.00	67.6
3.25	9.75	6.50	61.19
4.00	12.00	8.00	51.76
4.75	14.25	9.50	43.97
5.50	16.50	11.00	38
6.25	18.75	12.50	34.23
7.00	21.00	14.00	30.43
7.75	23.25	15.50	27.54
8.50	25.50	17.00	26.25
9.25	27.75	18.50	25.46
10.00	30.00	20.00	23.66

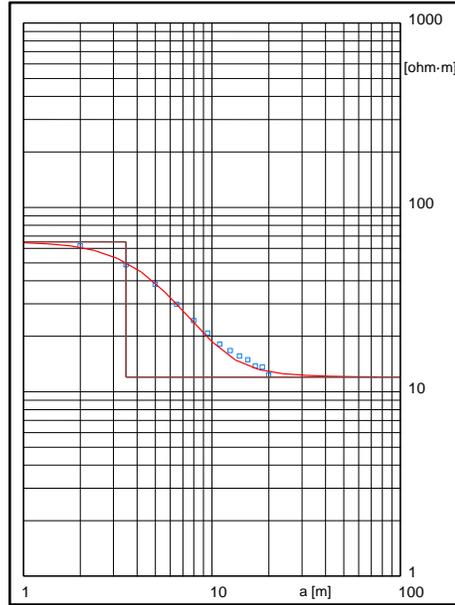


MN/2	AB/2	a	SEV 8
1.00	3.00	2.00	48.69
1.75	5.25	3.50	36.46
2.50	7.50	5.00	32.78
3.25	9.75	6.50	26.3
4.00	12.00	8.00	27.69
4.75	14.25	9.50	19.38
5.50	16.50	11.00	17.83
6.25	18.75	12.50	17.28
7.00	21.00	14.00	16.75
7.75	23.25	15.50	15.98
8.50	25.50	17.00	15.32
9.25	27.75	18.50	15.73
10.00	30.00	20.00	14.25

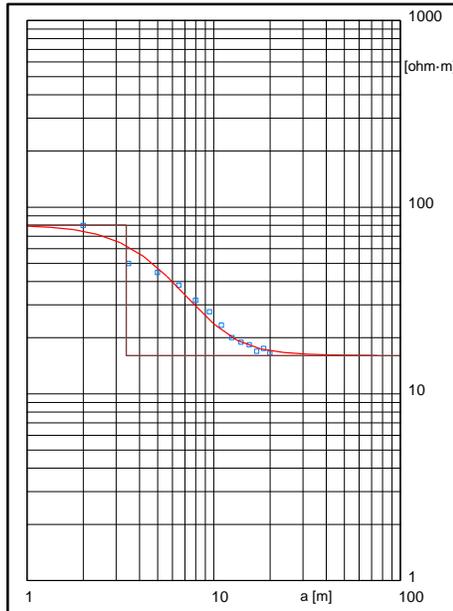




MN/2	AB/2	a	SEV 9
1.00	3.00	2.00	61.77
1.75	5.25	3.50	48.8
2.50	7.50	5.00	38.17
3.25	9.75	6.50	29.76
4.00	12.00	8.00	24.29
4.75	14.25	9.50	20.8
5.50	16.50	11.00	18.13
6.25	18.75	12.50	16.72
7.00	21.00	14.00	15.61
7.75	23.25	15.50	14.89
8.50	25.50	17.00	13.8
9.25	27.75	18.50	13.56
10.00	30.00	20.00	12.34

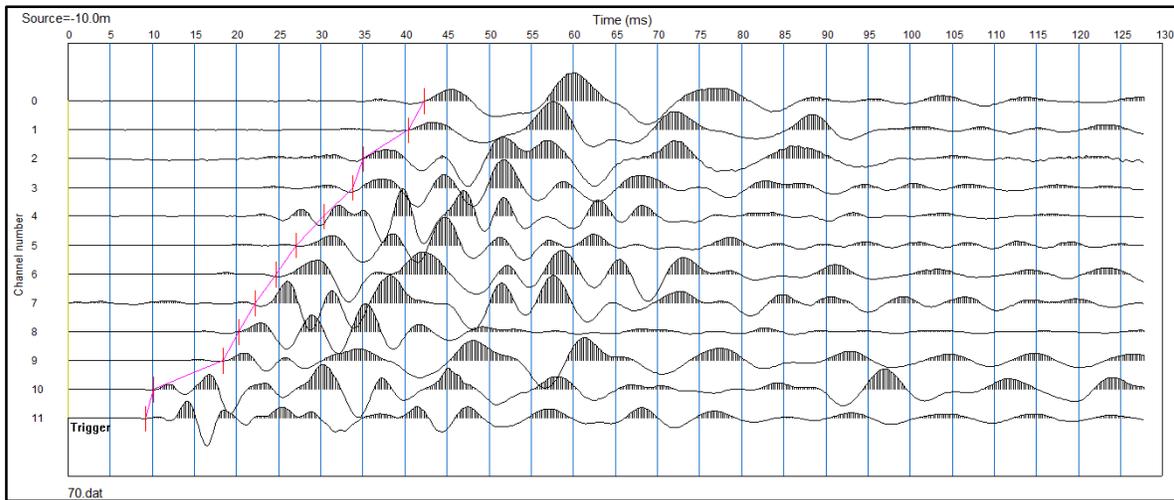


MN/2	AB/2	a	SEV 10
1.00	3.00	2.00	79.86
1.75	5.25	3.50	49.88
2.50	7.50	5.00	44.65
3.25	9.75	6.50	38.08
4.00	12.00	8.00	31.73
4.75	14.25	9.50	27.47
5.50	16.50	11.00	23.28
6.25	18.75	12.50	20.01
7.00	21.00	14.00	18.92
7.75	23.25	15.50	18.28
8.50	25.50	17.00	16.88
9.25	27.75	18.50	17.5
10.00	30.00	20.00	16.5

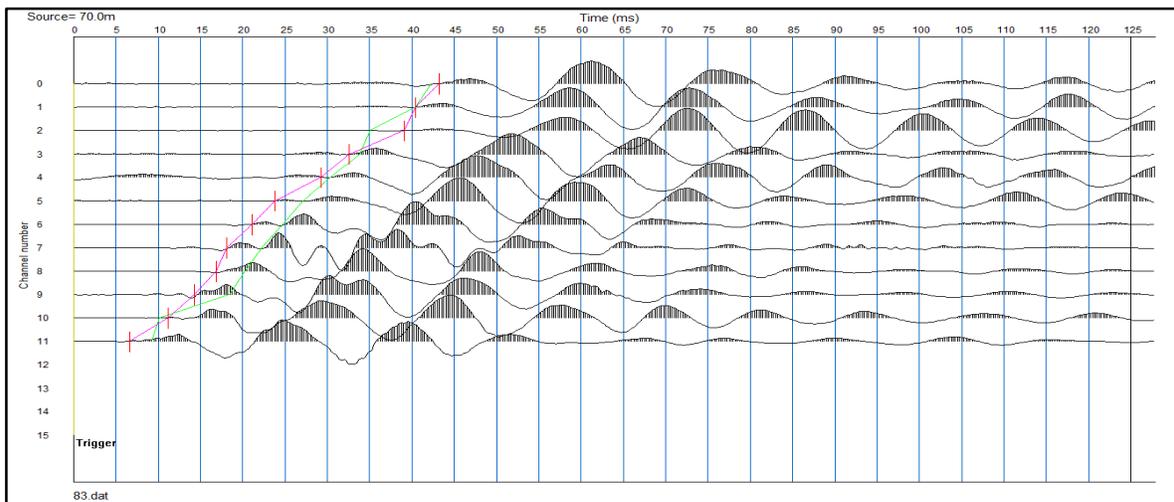




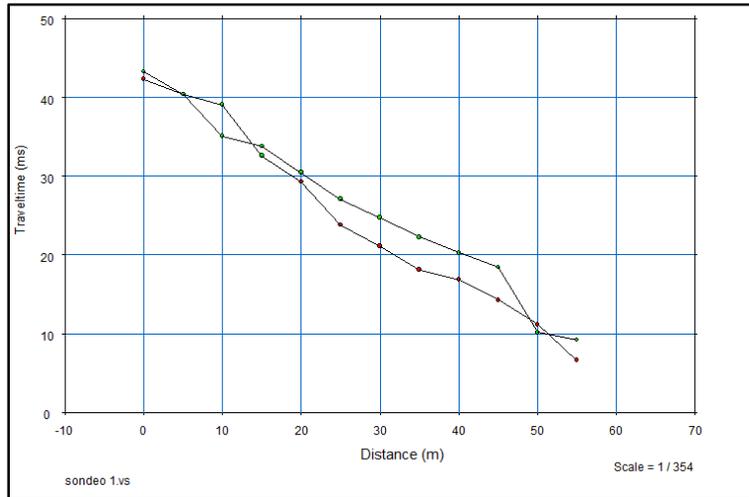
ANEXO 3 SISMICO



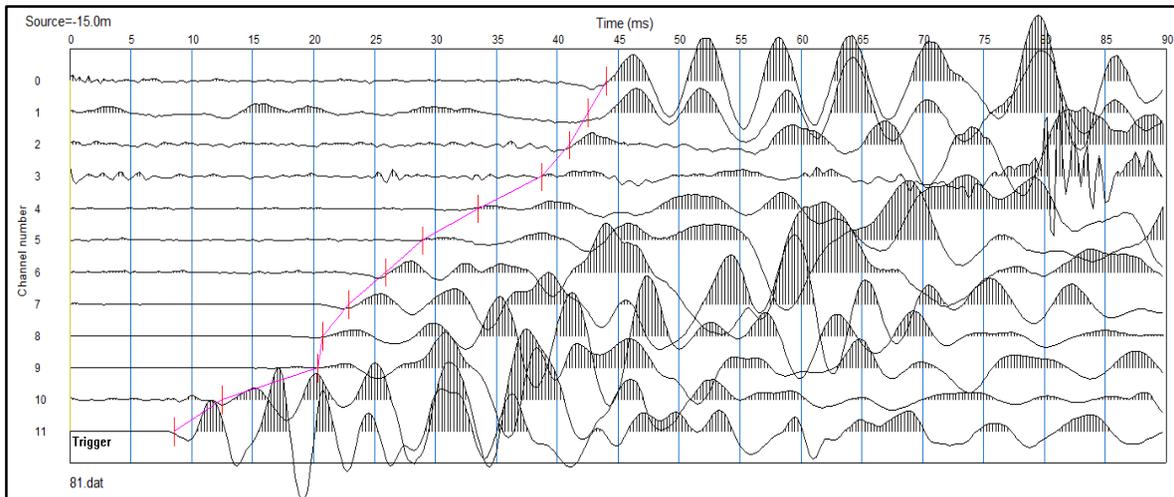
Tiro directo S1-60M. Pickwin.



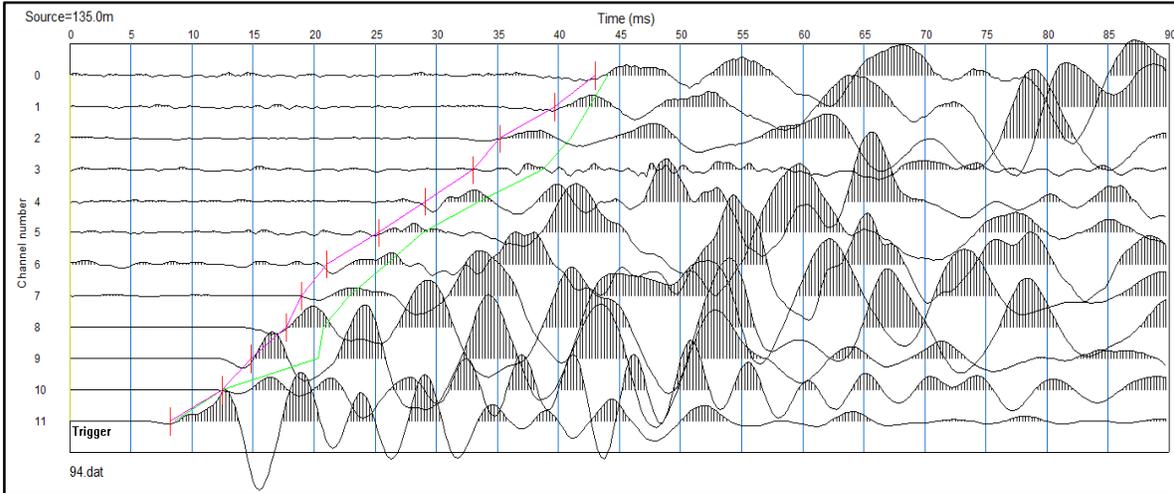
Tiro inverso S1-60M. Pickwin.



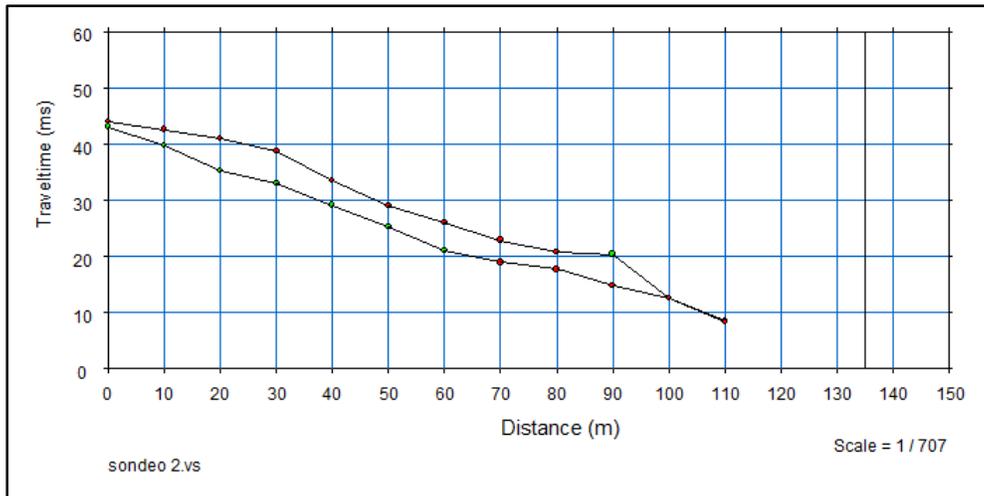
Dromocrónica del sondeo S1-60M



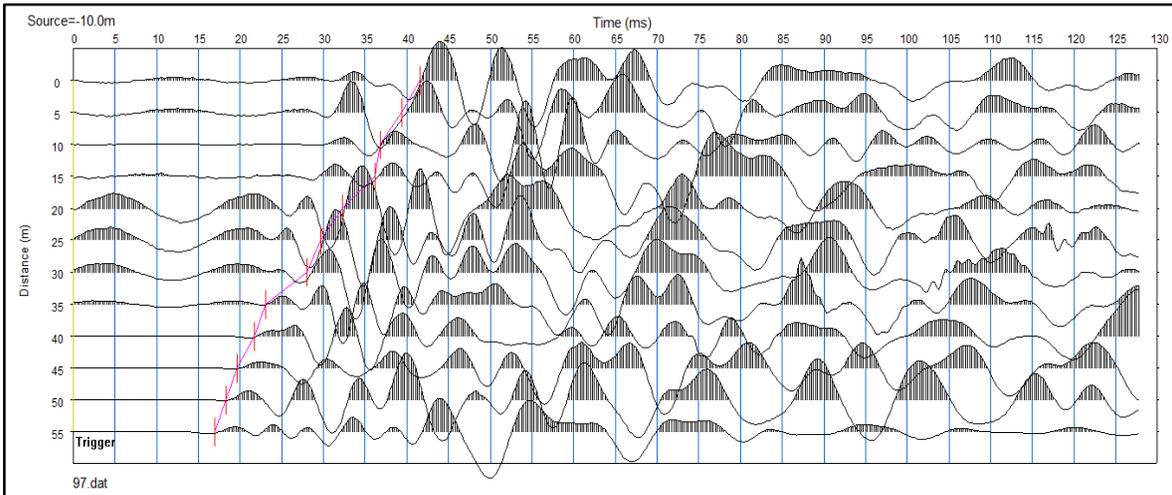
Tiro directo S2-120M. Pickwin.



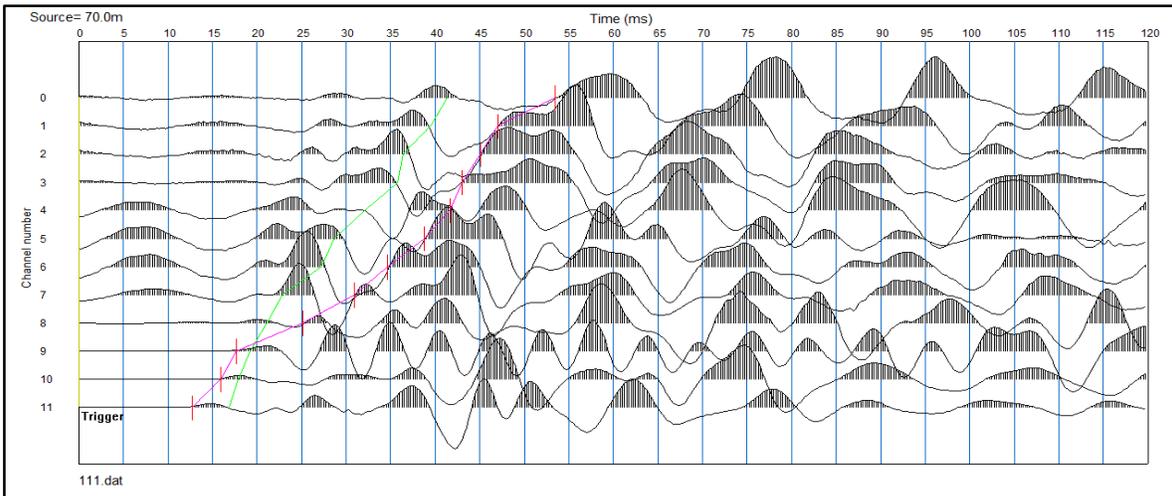
Tiro inverso S2-120M. Pickwin.



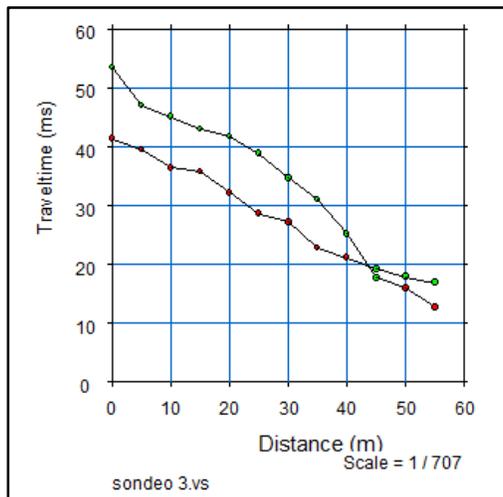
Dromocrónica del sondeo S2-120M



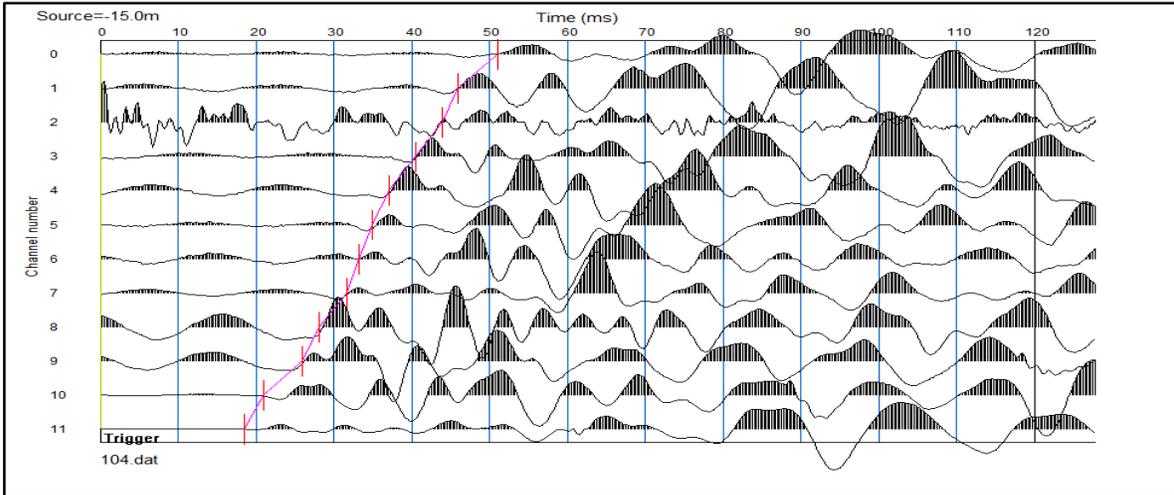
Tiro directo S3-60M. Pickwin.



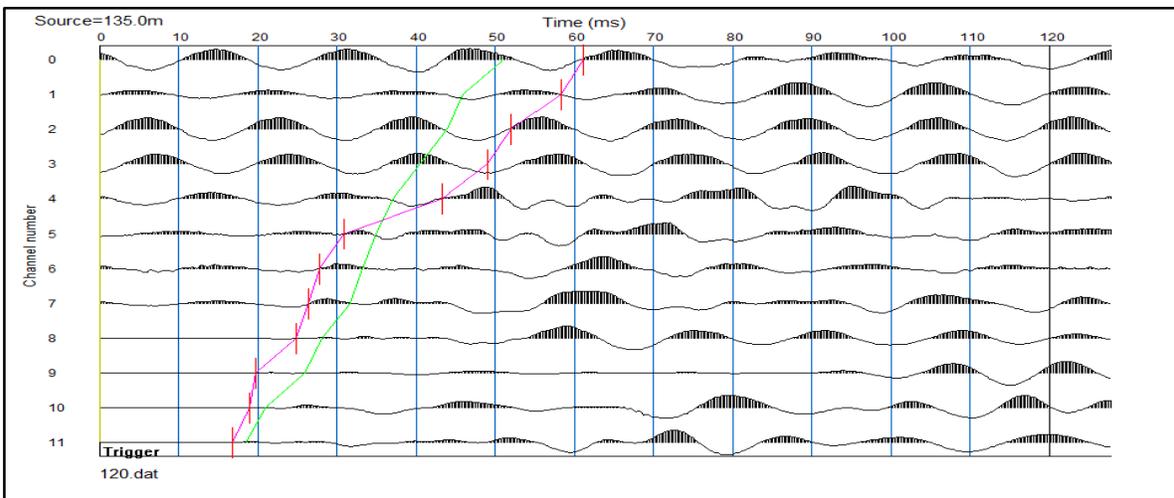
Tiro inverso S3-60M. Pickwin.



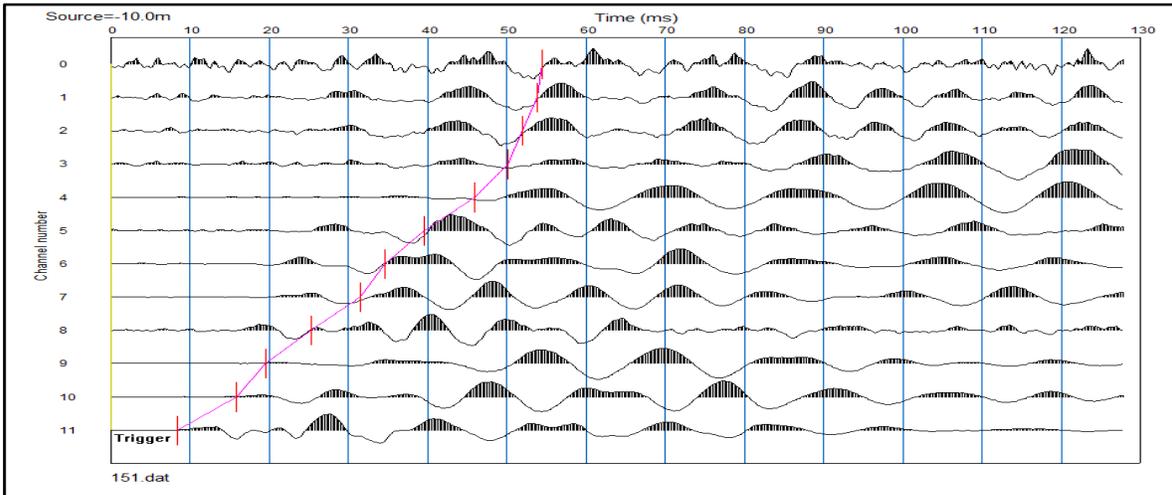
Dromocrónica del sondeo S3-60M



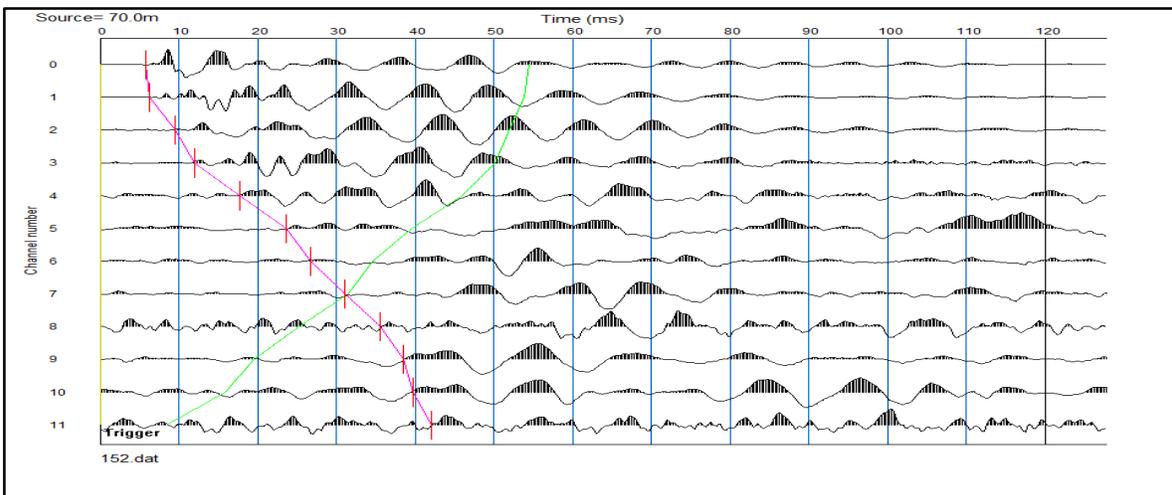
Tiro directo S4-120M. Pickwin.



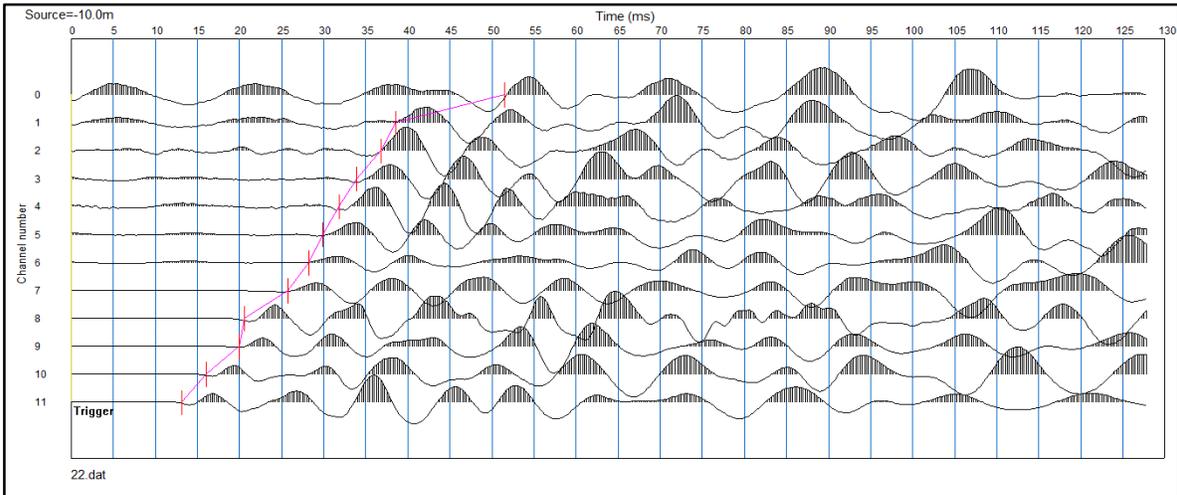
Tiro inverso S4-120M. Pickwin.



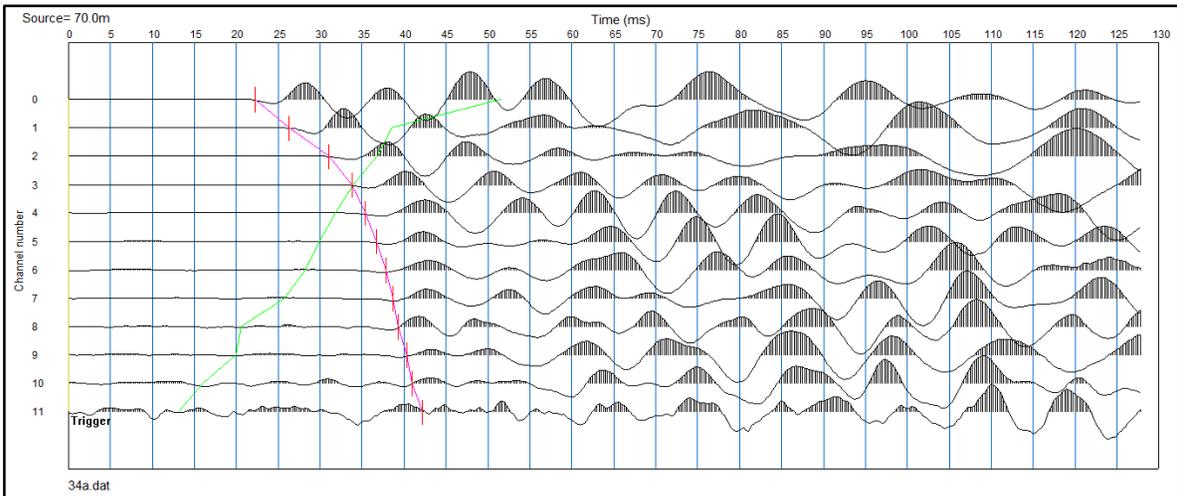
Tiro directo S5-60M. Pickwin.



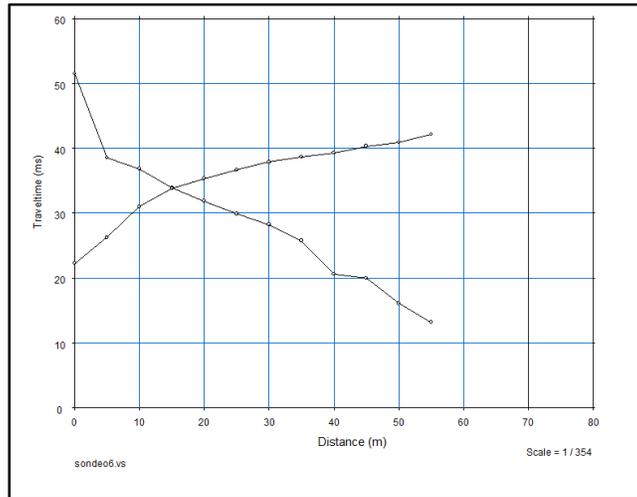
Tiro inverso S5-60M. Pickwin.



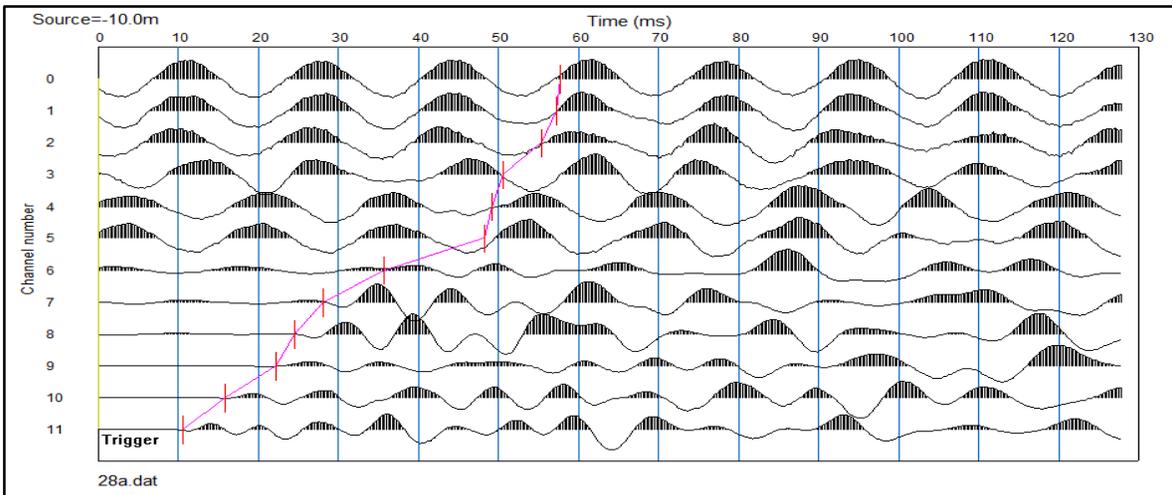
Tiro inverso S6-60M. Pickwin.



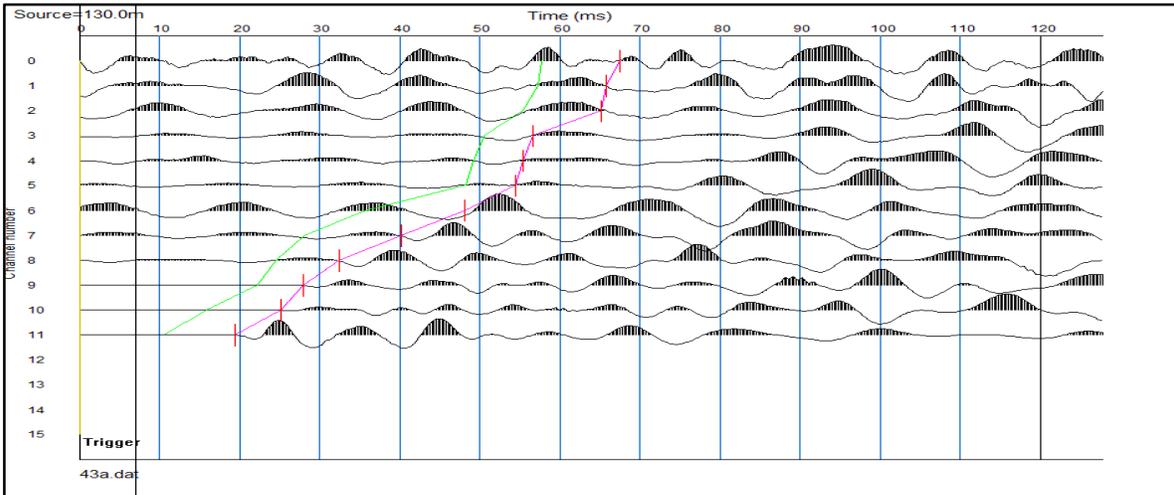
Tiro inverso S6-60M. Pickwin.



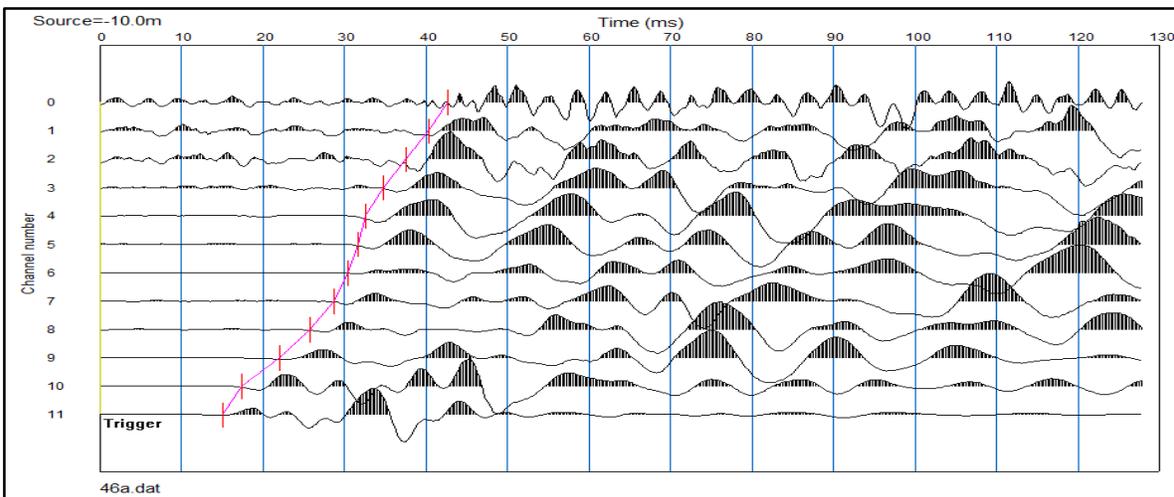
Dromocrónica del sondeo S6-60M



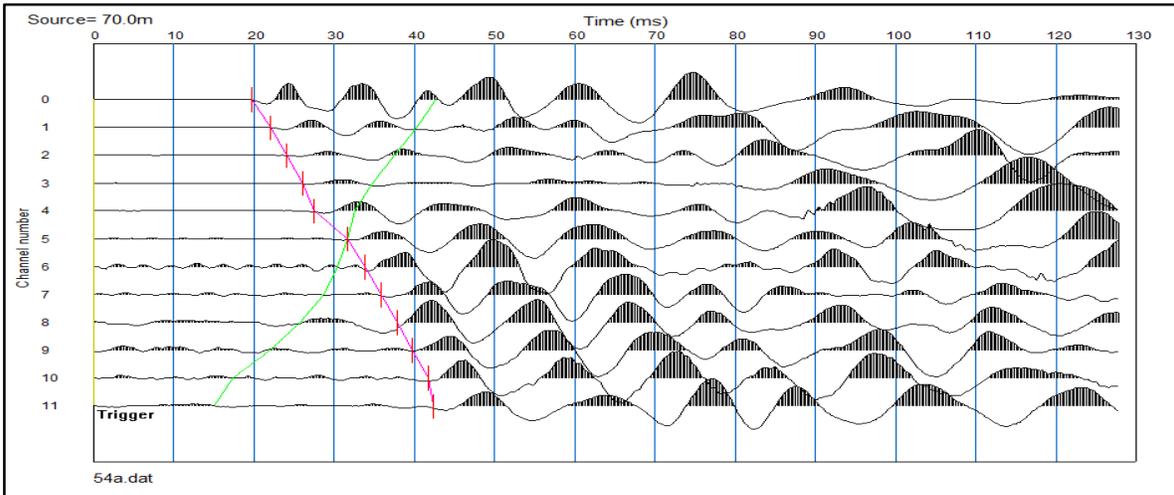
Tiro directo S7-120M. Pickwin.



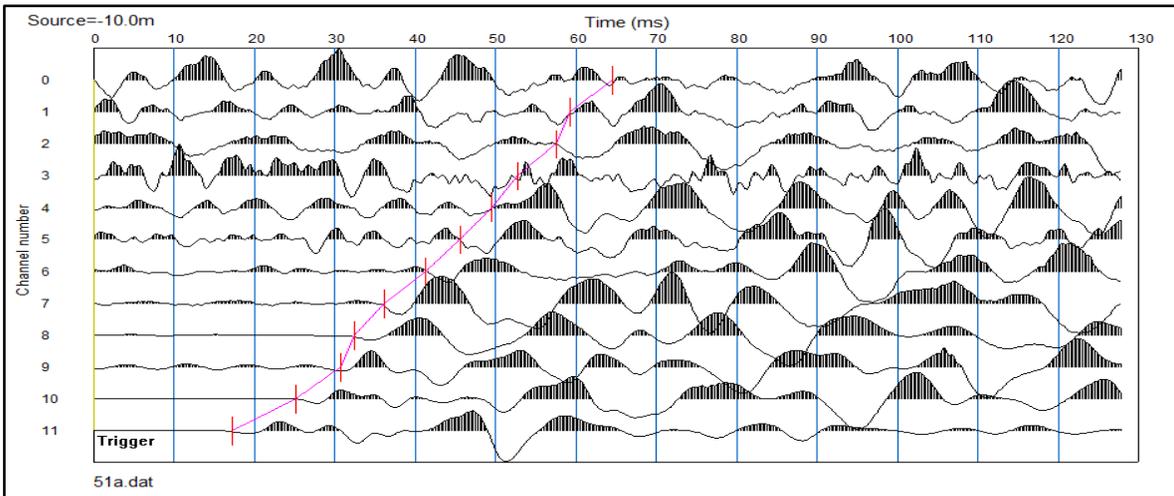
Tiro inverso S7-120M. Pickwin.



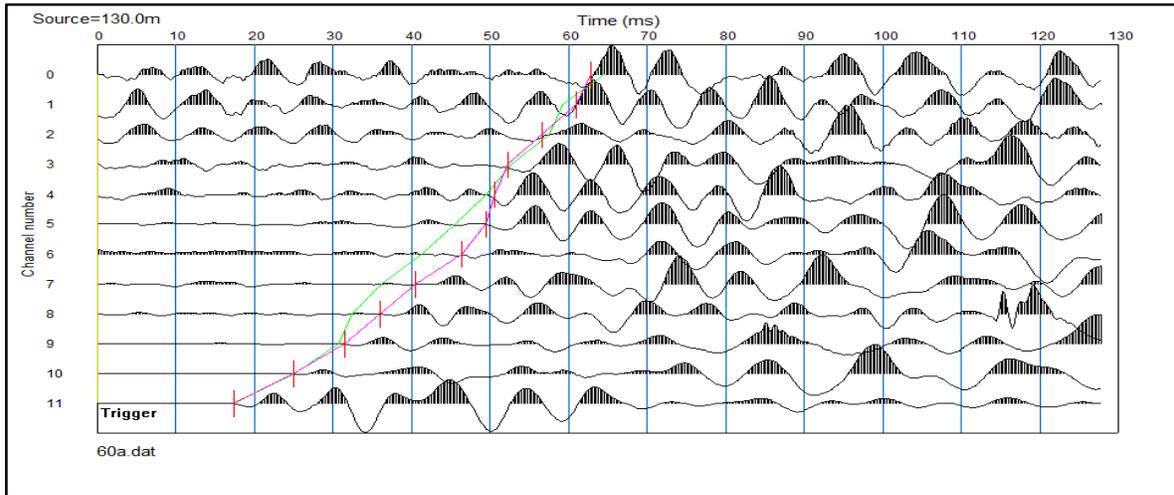
Tiro directo S8-60M. Pickwin.



Tiro inverso S8-60M. Pickwin.



Tiro directo S9-120M. Pickwin.



Tiro inverso S-120M. Pickwin.

ANEXO 4 PUNTOS MAGNETICOS

No. Punto	X	Y	Z	GAMMA
1	380207	3204305	1646	46961
2	380056	3204321	1640	91069
3	379873	3204467	1637	91092
4	379763	3204532	1632	91115
5	379674	3204471	1626	72989
6	379545	3204431	1619	71230
7	379436	3204391	1618	91191
8	379326	3204350	1613	91145
9	379108	3204279	1607	91273
10	378951	3204217	1602	91239
11	378692	3204111	1599	91165
12	378588	3204078	1599	91139
13	381668	3202939	1646	46012
14	381645	3202995	1639	45001
15	381580	3203031	1641	45798
16	381507	3203075	1640	45773
17	381467	3203184	1642	45782
18	381532	3203261	1641	45880
19	381508	3203319	1644	45879
20	381486	3203368	1653	45860
21	381494	3203437	1648	45900
22	381521	3203493	1654	45863
23	381499	3203568	1660	45910



24	381468	3203623	1663	45858
25	381443	3203689	1665	45844
26	381424	3203792	1678	45833
27	381399	3203869	1677	45082
28	381423	3203928	1684	45778
29	381477	3203943	1680	45785
30	381497	3203953	1683	44353
31	381538	3203964	1681	47208
32	381583	3203969	1679	42307
33	381627	3203953	1676	44484
34	381668	3203944	1672	43822
35	381728	3203934	1671	44292
36	381777	3203950	1667	91604
37	381795	3203980	1669	45831
38	381863	3203998	1667	76461
39	381893	3204026	1666	44156
40	381929	3204026	1665	77598
41	381969	3204043	1662	43468
42	382003	3204016	1664	44113
43	382062	3203974	1661	44057
44	382128	3203995	1660	44432
45	382189	3204048	1661	43931
46	383216	3204136	1657	45203
47	382373	3204197	1656	45793
48	382488	3204247	1661	46489
49	382605	3204278	1669	45711
50	382685	3204306	1654	80991
51	382812	3204329	1653	44170
52	382910	3204315	1660	45964
53	382955	3204292	1663	41656
54	383043	3204196	1667	45033
55	378461	3203127	1593	41454
56	378648	3203178	1596	48275
57	378830	3203235	1596	49430
58	378954	3203266	1601	44976
59	379085	3203310	1604	43799
60	379208	3203351	1600	45806
61	379350	3203388	1602	44740
62	379500	3203448	1605	43547
63	379650	3203467	1609	44479
64	379800	3203508	1613	45233



65	379950	3203558	1618	44698
66	380100	3203619	1630	51035
67	380251	3203713	1644	43555
68	380382	3203738	1657	60698
69	380371	3203803	1668	56788
70	380369	3203850	1672	47751
71	380255	3203896	1679	43514
72	380253	3204095	1682	58340
73	380325	3204095	1719	60750
74	380328	3204010	1714	46017
75	380395	3203893	1682	44029
76	380511	3203806	1650	46071
77	380525	3203900	1656	44286
78	380512	3204000	1656	42052
79	380515	3204151	1670	45513
80	380523	3204266	1673	44636
81	380301	3204284	1657	46117
82	380617	3204199	1682	36499
83	380586	3204400	1667	47694
84	380559	3204601	1658	36458
85	380534	3204753	1647	36462
86	380724	3204807	1655	45259
87	380909	3204787	1661	42320
88	381077	3205049	1634	46399
89	380946	3205069	1664	45730
90	381023	3205302	1630	46244
91	380903	3205275	1632	45473
92	381307	3205196	1635	47230
93	381499	3205105	1634	44479
94	381717	3205021	1637	44114
95	381901	3205142	1637	44758
96	382112	3205277	1639	47790
97	382301	3205057	1642	44721
98	382501	3204877	1646	44879
99	382701	3204797	1643	40536
100	382900	3204721	1654	39993
101	383101	3204645	1656	44922
102	383320	3204648	1660	47030
103	378925	3204610	1595	46669
104	378912	3204837	1599	45726
105	378912	3204837	1598	45759



106	378904	3204946	1593	45768
107	378899	3205046	1591	45759
108	378893	3205165	1588	45775
109	378887	3205295	1587	45843
110	378880	3205447	1588	45803
111	378870	3205581	1594	45833
112	378892	3205751	1591	46041
113	378873	3205891	1587	46002
114	378881	3206006	1581	45662
115	378923	3206171	1581	45432
116	378902	3206246	1580	45311
117	378878	3206341	1578	45289
118	378886	3206526	1580	45301
119	378888	3206672	1578	45200
120	378890	3206787	1578	45235
121	378892	3206819	1577	45240
122	378883	3206889	1579	45262
123	378884	3206891	1584	45226
124	379167	3204856	1605	50002
125	379158	3205013	1604	49223
126	379247	3205145	1606	47767
127	379352	3205268	1606	45887
128	379451	3205388	1612	46710
129	379554	3205514	1613	49200
130	379665	3205637	1619	47780
131	379782	3205745	1615	46004
132	379884	3205868	1613	45991
133	379964	3206015	1607	46644
134	380074	3206140	1616	49188
135	379824	3205794	1614	46030
136	379930	3205867	1617	40163
137	380192	3205738	1619	45792
138	380329	3205759	1622	46189
139	380439	3205778	1620	92191
140	380569	3205805	1616	93305
141	380759	3205842	1618	92109
142	380914	3205894	1623	91008
143	381084	3205990	1633	84636
144	381225	3206117	1641	90107
145	381253	3206279	1650	90128
146	381232	3206435	1643	90118



147	381186	3206649	1631	90168
148	381036	3206721	1620	90151
149	380885	3206683	1616	90185
150	380742	3206634	1616	90186