



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

**ESTUDIO INTEGRAL DE LA PRESA
DE RESIDUOS MINEROS DE “LA
AQUISGRANA”,
DISTRITO MINERO DE LA
CAROLINA (JAÉN).**

Alumno: Gloria María González Díaz

Tutor 1: Prof. D. Julián Martínez López
Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Tutor 2: Prof. D. Francisco Javier Rey Arrans
Depto.: Geología

Junio, 2023

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	2
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	10
ÍNDICE DE ANEXOS	12
RESUMEN.....	13
INTRODUCCIÓN	14
OBJETIVOS.....	17
Objetivos generales	17
Objetivos específicos	17
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES.....	19
1.1.- Contexto geológico del Distrito Minero de La Carolina	19
1.1.1.- Cuarcitas Armoricanas.....	20
1.1.2.- Alternancia Inferior	21
1.1.3.- Pizarras de Correderas	21
1.1.4.- Alternancia Superior	21
1.1.5.- Cuarcitas de Castellar	22
1.2.- Tipología de los yacimientos en el distrito minero de La Carolina. Sistema de explotación.....	22
1.3.-Descripción de las técnicas de concentración de mineral utilizadas en el distrito minero de La Carolina. Tipología de residuos	24
1.4.- Características geológicas y mineras del área estudiada.	25
1.5.- Técnicas de investigación directas: sondeo mecánico. Descripción de la técnica de perforación utilizada (batería triple) y testificación realizada.....	26
1.6.- Estudios geoquímicos realizados.	28
1.7.- Hidrogeoquímica de la presa.	28
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS: TÉCNICAS INDIRECTAS DE INVESTIGACIÓN EN ESTE ESTUDIO	31

2.1.-Tomografía eléctrica (ERI)	31
2.1.1.- <i>Fundamentos y descripción del método:</i>	31
2.1.2.- <i>Descripción del equipo</i>	34
2.1.3.- <i>Metodología de adquisición de datos en campo.....</i>	36
2.1.4.- <i>Tratamiento e inversión de datos.....</i>	40
2.2.- Método Electromagnético en el Dominio de los Tiempos (TDEM).....	45
2.2.1.- <i>Fundamentos y descripción del método</i>	45
2.2.2.- <i>Conceptos relacionados con el TDEM</i>	46
2.2.3.- <i>Bucles: distintos dispositivos</i>	47
2.2.4.- <i>Descripción del equipo</i>	50
2.2.5.- <i>Metodología de adquisición de datos en campo.....</i>	55
2.2.6.- <i>Tratamiento e inversión de datos.....</i>	60
2.3.- Representación cartográfica mediante QGIS.	65
2.3.1.- <i>QGIS y los Sistemas de Información Geográfica (SIG)</i>	65
2.3.2.- <i>Metodología del software</i>	65
CAPÍTULO 3: TRABAJO DE CAMPO.....	69
3.1. Campaña de Tomografía Eléctrica (ERI).....	69
3.2. Campaña de TDEM	74
3.2.1.- <i>Dispositivos, estaciones y medidas.</i>	74
3.2.2.- <i>Descripción del desarrollo de la jornada.....</i>	76
3.3. Toma de coordenadas y generación de la cartografía	79
3.3.1.- <i>Desarrollo cartográfico</i>	79
3.3.2.- <i>Fuentes de datos</i>	81
3.3.3.- <i>Aplicaciones de QGIS en este proyecto.....</i>	83
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	84
4.1. Tomografía Eléctrica: Discusión e interpretación de los resultados	84
4.1.1.- <i>Valores de Resistividad.....</i>	84
4.1.2.- <i>Valores de Polarización Inducida</i>	87
4.2. TDEM: Discusión e interpretación de los resultados.....	88

4.2.1.- Estación 1	91
4.2.2.- Estación 2	93
4.2.3.- Estación 3	95
4.2.4.- Estación 4	97
4.2.5.- Estación 5	99
4.2.6.- Estación 6	101
4.2.7.- Estación 7	103
4.2.8.- Estación 8	105
4.2.9.- Estación 9	107
4.2.10.- Estación 10	109
4.2.11.- Estación 11	111
4.2.12.- Estación 12	113
4.2.13.- Estación 13	115
4.2.14.- Estación 14	117
4.3. Correlación de las diferentes técnicas.	123
CONCLUSIONES.....	125
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126
ANEXOS.....	130
I. Tablas de parámetros de medida empleados en el análisis TDEM.....	131
II. Planos.....	136
ÍNDICE.....	142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Plano de situación de la zona de estudio.	14
Figura 2. Plano de las antiguas concesiones mineras respecto a los emplazamientos actuales.	15
Figura 3. Detalle del Cortijo de Lara, La Carolina (IBERPIX)	16
Figura 1. 1. Esquema geológico del distrito minero de La Carolina (Mendoza et al., 2022).	19
Figura 1. 2. Columna estratigráfica del Ordovícico en la zona de estudio (Mendoza et al., 2022).	19
Figura 1. 3. Macizos Variscos de Europa (Fuente: Geodiversidad, sf).	20
Figura 1. 4. Esquema del método de realce por relleno usado en La Carolina (Colectivo Proyecto Arrayanes, 2010).	23
Figura 1. 5. Flow-sheet del antiguo lavadero de La Aquisgrana (Gracia, 2019).	24
Figura 1. 6. Sección geológica NW-SE coincidiendo con el filón de El Sinapismo (Mendoza et al., 2022).	25
Figura 1. 7. Sección geológica perpendicular a la anterior y pasante por las galerías de La Paloma (Mendoza et al., 2022).	26
Figura 1. 8. Plano de ubicación del piezómetro perforado con batería triple (P1: Piezómetro / P2: Registro).	27
Figura 1. 9. A) Vista de la presa de lodos de La Aquisgrana. B) Operaciones de perforación (Martínez J. et al., 2016)	27
Figura 1. 10. C) Testigos extraídos de la perforación. D) Muestras de laboratorio. (Martínez J. et al., 2016).	28
Figura 1. 11. Lectura in situ de pH, temperatura y conductividad eléctrica de una muestra de agua del piezómetro. En esta imagen se muestra a la autora del presente estudio en la toma de datos del día 17/02/2022.	29
Figura 2. 1. Configuración Wenner (Serrano, 2003).	32
Figura 2. 2. Configuración Schlumberger (Serrano, 2003).	32
Figura 2. 3. Configuración Wenner-Schlumberger (Serrano, 2003).	33
Figura 2. 4. Electrodo Impolarizable ("potito")	35
Figura 2. 5. Cable multinúcleo tipo sísmico	35
Figura 2. 6. Electrodo enchufado al conector	35

Figura 2. 7. Convertidor (rojo) y batería (negro)	35
Figura 2. 8. Unidad de control	35
Figura 2. 9. Vista de la traza de electrodos	35
Figura 2. 10. Plano de ubicación de los electrodos empleados para Tomografía Eléctrica (ERI)	36
Figura 2. 11. Excavación e implantación del electrodo.	37
Figura 2. 12. Regado del electrodo.	37
Figura 2. 13. Extensión del cable.	37
Figura 2. 14. Conexión entre familias de cables.	37
Figura 2. 15. Conexión del electrodo con el cable.	37
Figura 2. 16. Tomógrafo.	38
Figura 2. 17. Baterías y convertidor.	38
Figura 2. 18. Lectura inicial de resistividad aparente.	39
Figura 2. 19. Definición de parámetros en Polarización inducida.	39
Figura 2. 20. Importar datos en RES2DINV	40
Figura 2. 21. Listado de la altimetría en los diferentes puntos de medida.	40
Figura 2. 22. Resumen de datos definidos en el programa.	40
Figura 2. 23. Lectura sin tratar	41
Figura 2. 24. Eliminación de puntos extremos en la lectura	41
Figura 2. 25. Definición de parámetros para la Inversión.	42
Figura 2. 26. Factores de humedad	42
Figura 2. 27. Tipo de modelado.	42
Figura 2. 28. Restricción de suavidad.	42
Figura 2. 29. Número de nodos entre electrodos.	42
Figura 2. 30. Número de iteraciones.	42
Figura 2. 31. Gráficas de resistividades durante la 4 ^o iteración del tratamiento de datos (sin topografía).	43
Figura 2. 32. Introducción de la topografía en Prosys II.	44
Figura 2. 33. Eliminación de valores erráticos.	44
Figura 2. 34. Filtrado de los datos.	44
Figura 2. 35. Esquema bucle único.	48
Figura 2. 36. Esquema bucle coincidente.	48
Figura 2. 37. Esquema bucle centrado.	49
Figura 2. 38. Esquema bobinas separadas.	49

Figura 2. 39. Esquema bucles no coincidentes	50
Figura 2. 40. Equipo Transmisor	51
Figura 2. 41. Equipo Receptor	51
Figura 2. 42. Conexión de batería	51
Figura 2. 43. Cierre del bucle emisor	52
Figura 2. 44. Bucle de 0'8m x 0'8m	52
Figura 2. 45. GPS conectado a la antena y al receptor.	53
Figura 2. 46. PDA y parámetros de medida.	53
Figura 2. 47. Conexión de equipos para bucle único	54
Figura 2. 48. Conexión GPS al Transmisor	55
Figura 2. 49. Controles del equipo transmisor	56
Figura 2. 50. Sintonización del Transmisor/Receptor	57
Figura 2. 51. Menú principal del software.	58
Figura 2. 52. Measuring parameters.	59
Figura 2. 53. TEM configuration.	59
Figura 2. 54. Entorno del programa TEMBIN	60
Figura 2. 55. Coordenadas Receiver (ZONDTEM)	61
Figura 2. 56. Editing style (ZONDTEM)	62
Figura 2. 57. Interpretation style (ZONDTEM)	63
Figura 2. 58. Pestaña "Inversion" (ZONDTEM)	64
Figura 2. 59. Pestaña "Start model" (ZONDTEM)	64
Figura 2. 60. Entorno menú principal de QGIS	66
Figura 2. 61. Importar archivo .shp	67
Figura 2. 62. Consulta WFS o WMS	67
Figura 2. 63. Administrador de composiciones	68
Figura 2. 64. Composición del plano	68
Figura 3. 1. Plano de ubicación de los electrodos empleados para Tomografía Eléctrica (ERI)	70
Figura 3. 2. Implantación del electrodo.	70
Figura 3. 3. Extensión del cable.	70
Figura 3. 4. Regado del electrodo.	70
Figura 3. 5. Conexión del electrodo a la caja y con el cable.....	70
Figura 3. 6. Tomógrafo.	71

Figura 3. 7. Baterías y convertidor.....	71
Figura 3. 8. Field geometry	72
Figura 3. 9. Export options.....	72
Figura 3. 10. Injection voltage	72
Figura 3. 11. Familias de cables.....	72
Figura 3. 12. Electrode configuration	72
Figura 3. 13. Injection timing.....	72
Figura 3. 14. Valid data range	72
Figura 3. 15. Recogida de muestras de agua en el sondeo mecánico.....	73
Figura 3. 16. Salida del desagüe de la presa	73
Figura 3. 17. Encuentro de agua limpia y contaminada.....	73
Figura 3. 18. Ubicación de las estaciones para la campaña de TDEM	74
Figura 3. 19. Detalle de la ubicación de los bucles receptores de las estaciones 13 y 14.	76
Figura 3. 20. Operario (observador) haciendo la función de pivote.	77
Figura 3. 21. Tres operarios haciendo la función de pivotes.	77
Figura 3. 22. Configuración y toma de medidas para bucle centrado.....	78
Figura 3. 23. Área de trabajo de QGIS (panel de capas a la izquierda).	79
Figura 3. 24. Menú de edición de composiciones. Diseño para informe.	80
Figura 3. 25. Menú de edición de composiciones. Diseño para planos.	80
Figura 3. 26. Menú principal de GvSIG Mobile	82
Figura 3. 27. Menú de registro de coordenadas de GvSIG Mobile.....	82
Figura 4. 1. Ubicación de los electrodos en 3D (punto de vista de la gráfica obtenida por Tomografía Eléctrica).	86
Figura 4. 2. Pizarra graptolítica.....	87
Figura 4. 3. Perfil de pizarra graptolítica	87
Figura 4. 4. Ubicación de estaciones 1 a 11 con centroides (plano cenital)	89
Figura 4. 5. Ubicación de estaciones 12, 13 y 14 con centroides (plano cenital)	90
Figura 4. 6. Posición relativa de los centroides de las diferentes estaciones.	90
Figura 4. 7. Comparación de resultados de Tomografía y TDEM (bucles 20x20)..	123
Figura 4. 8. Comparación de resultados de Tomografía y TDEM (bucles 50x50)..	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. 1. Parámetros de medida Estación 1 TDEM.....	132
Tabla I. 2. Parámetros de medida Estación 2 TDEM.....	132
Tabla I. 3. Parámetros de medida Estación 3 TDEM.....	132
Tabla I. 4. Parámetros de medida Estación 4 TDEM.....	132
Tabla I. 5. Parámetros de medida Estación 5 TDEM.....	133
Tabla I. 6. Parámetros de medida Estación 6 TDEM.....	133
Tabla I. 7. Parámetros de medida Estación 7 TDEM.....	133
Tabla I. 8. Parámetros de medida Estación 8 TDEM.....	133
Tabla I. 9. Parámetros de medida Estación 9 TDEM.....	134
Tabla I. 10. Parámetros de medida Estación 10 TDEM.....	134
Tabla I. 11. Parámetros de medida Estación 11 TDEM.....	134
Tabla I. 12. Parámetros de medida Estación 13 TDEM.....	134
Tabla I. 13. Parámetros de medida Estación 14 TDEM.....	135

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4. 1. Resistividad del terreno (Iteración 3).....	84
Gráfico 4. 2. Resistividad del terreno (Iteración 4).....	84
Gráfico 4. 3. Resistividad del terreno (Iteración 6).....	84
Gráfico 4. 4. Gráfico de la conductividad aparente (superior) y real (inferior) del modelo obtenido a partir del tratamiento de datos de la Tomografía eléctrica.	85
Gráfico 4. 5. Cargabilidad del terreno.....	88
Gráfico 4. 6. Curva procesada con tabla de valores (E1_único).....	91
Gráfico 4. 7. Curva procesada con tabla de valores (E1_centrado).....	92
Gráfico 4. 8. Curva procesada con tabla de valores (E2_único).....	93
Gráfico 4. 9. Curva procesada con tabla de valores (E2_centrado).....	94
Gráfico 4. 10. Curva procesada con tabla de valores (E3_único).....	95
Gráfico 4. 11. Curva procesada con tabla de valores (E3_centrado).....	96
Gráfico 4. 12. Curva procesada con tabla de valores (E4_único).....	97
Gráfico 4. 13. Curva procesada con tabla de valores (E4_centrado).....	98
Gráfico 4. 14. Curva procesada con tabla de valores (E5_único).....	99
Gráfico 4. 15. Curva procesada con tabla de valores (E5_centrado).....	100
Gráfico 4. 16. Curva procesada con tabla de valores (E6_único).....	101
Gráfico 4. 17. Curva procesada con tabla de valores (E6_centrado).....	102
Gráfico 4. 18. Curva procesada con tabla de valores (E7_único).....	103
Gráfico 4. 19. Curva procesada con tabla de valores (E7_centrado).....	104
Gráfico 4. 20. Curva procesada con tabla de valores (E8_único).....	105
Gráfico 4. 21. Curva procesada con tabla de valores (E8_centrado).....	106
Gráfico 4. 22. Curva procesada con tabla de valores (E9_único).....	107
Gráfico 4. 23. Curva procesada con tabla de valores (E9_centrado).....	108
Gráfico 4. 24. Curva procesada con tabla de valores (E10_único).....	109
Gráfico 4. 25. Curva procesada con tabla de valores (E10_centrado).....	110
Gráfico 4. 26. Curva procesada con tabla de valores (E11_único).....	111
Gráfico 4. 27. Curva procesada con tabla de valores (E11_centrado).....	112
Gráfico 4. 28. Curva procesada con tabla de valores (E12_único).....	113
Gráfico 4. 29. Curva procesada con tabla de valores (E12_centrado).....	114
Gráfico 4. 30. Curva procesada con tabla de valores (E13_único).....	115
Gráfico 4. 31. Curva procesada con tabla de valores (E13_centrado).....	116

Gráfico 4. 32. Curva procesada con tabla de valores (E14_único).....	117
Gráfico 4. 33. Curva procesada con tabla de valores (E14_A).....	118
Gráfico 4. 34. Curva procesada con tabla de valores (E14_B).....	119
Gráfico 4. 35. Curva procesada con tabla de valores (E14_C).....	120
Gráfico 4. 36. Curva procesada con tabla de valores (E14_D).....	121
Gráfico 4. 37. Curva procesada con tabla de valores (E14_E)	122

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXOS.....	130
-------------	-----

I. Tablas de parámetros de medida empleados en el análisis TDEM.....131

Tabla I. 1. Parámetros de medida Estación 1 TDEM.....	132
Tabla I. 2. Parámetros de medida Estación 2 TDEM.....	132
Tabla I. 3. Parámetros de medida Estación 3 TDEM.....	132
Tabla I. 4. Parámetros de medida Estación 4 TDEM.....	132
Tabla I. 5. Parámetros de medida Estación 5 TDEM.....	133
Tabla I. 6. Parámetros de medida Estación 6 TDEM.....	133
Tabla I. 7. Parámetros de medida Estación 7 TDEM.....	133
Tabla I. 8. Parámetros de medida Estación 8 TDEM.....	133
Tabla I. 9. Parámetros de medida Estación 9 TDEM.....	134
Tabla I. 10. Parámetros de medida Estación 10 TDEM.....	134
Tabla I. 11. Parámetros de medida Estación 11 TDEM.....	134
Tabla I. 12. Parámetros de medida Estación 13 TDEM.....	134
Tabla I. 13. Parámetros de medida Estación 14 TDEM.....	135

II. Planos.....136

Plano 1/5: Plano de situación de la zona de estudio.....	137
Plano 2/5: Plano de las antiguas concesiones mineras respecto a los emplazamientos actuales.....	138
Plano 3/5: Plano de ubicación del piezómetro perforado con batería triple.....	139
Plano 4/5: Plano de ubicación de los electrodos empleados para tomografía eléctrica (ERI).....	140
Plano 5/5: Plano de ubicación de las estaciones de medida para el método TDEM.....	141

RESUMEN

En el presente Trabajo Fin de Grado se estudia la geología y los antecedentes mineros de La Aquisgrana, así como las propiedades geofísicas de la presa de lodos de esta explotación minera con el objetivo de obtener información sobre el material depositado y conocer dónde se encuentra el contacto entre este y el sustrato donde se apoya.

Al inicio de este estudio se desarrollarán los antecedentes de la zona de investigación y la teoría vinculada a los ensayos geofísicos realizados allí, dejando paso en los siguientes capítulos a una explicación más práctica de las labores realizadas en campo y los resultados obtenidos a raíz de estas.

INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo Fin de Grado se focaliza en el estudio y caracterización de la presa de residuos de flotación de la mina “La Aquisgrana”, la cual se ubica en el Distrito minero de Linares-La Carolina.

Más concretamente se sitúa en el noreste de la comarca de Sierra Morena en la provincia de Jaén, a escasos 2 kilómetros de la población de La Carolina, en la proximidad del cortijo Lara. En la siguiente figura se observa la posición tanto del pueblo (punto de mayor tamaño) como de la mina (punto de menor tamaño) dentro de la comarca (plano disponible en el Anexo II).

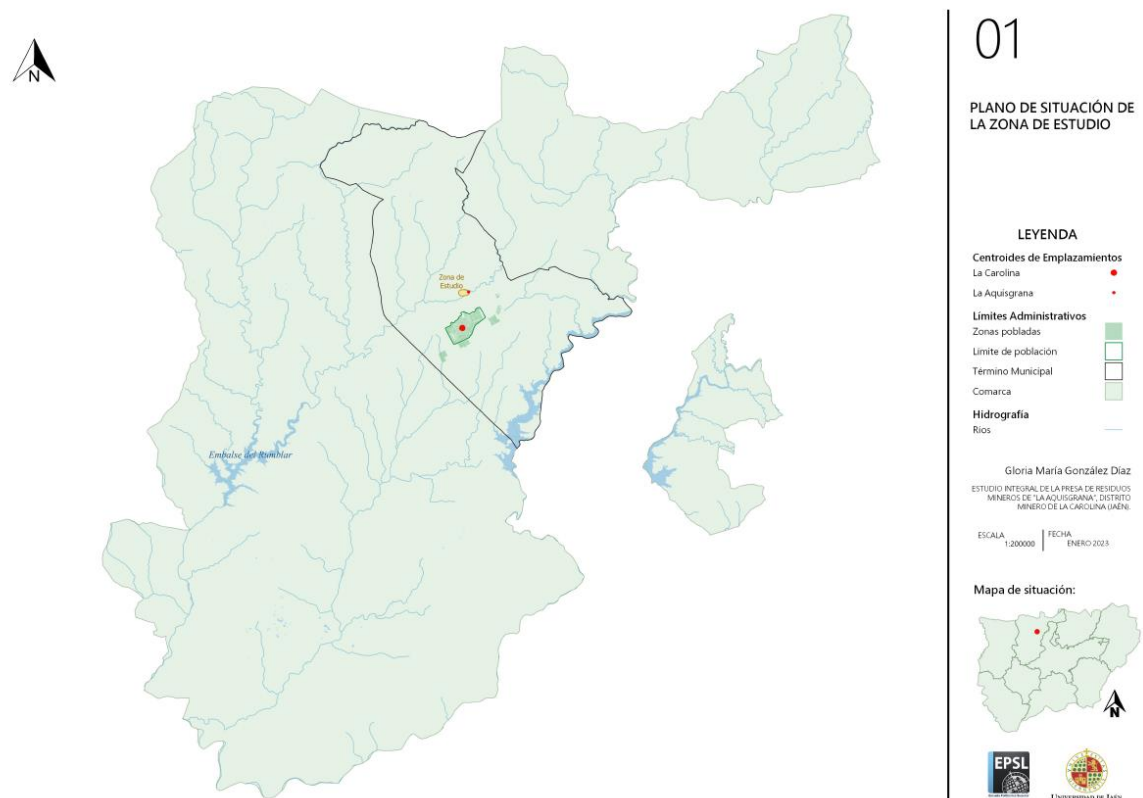
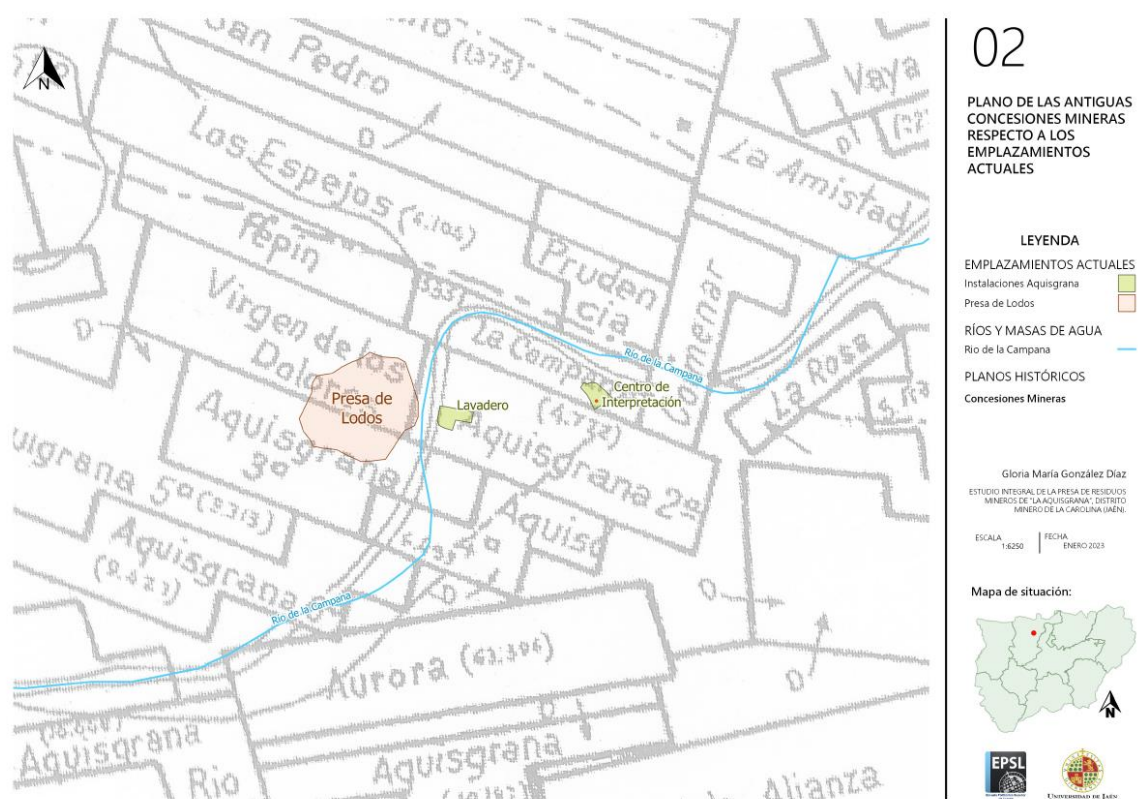


Figura 1. Plano de situación de la zona de estudio.

La mina de “La Aquisgrana” formó parte de un grupo con el mismo nombre, el cual llegó a estar compuesto por numerosas concesiones, entre las que destaca “La Aquisgrana 2ª” por albergar el pozo principal de extracción (pozo II) y un lavadero para el tratamiento del material extraído tanto del pozo II como del pozo III (Gutiérrez Guzmán, 2007).

En la figura que se muestra a continuación, se puede observar la ubicación de las diferentes concesiones que existieron en el entorno que estamos estudiando, donde se indica

la posición actual de la presa de lodos (objeto de estudio), el lavadero mencionado previamente y el actual centro de interpretación minera (plano disponible en el Anexo II).



tecnologías era viable obtener beneficio de ello. Así fue como en 1973 se puso en marcha un nuevo lavadero en La Aquisgrana, cuyos estériles de flotación se fueron depositando en el valle del arroyo del Boticario ubicado en las proximidades del Cortijo de la Lara, hasta formar la presa de residuos mineros, objeto de estudio de este proyecto. En los años sucesivos las pérdidas se acrecentaron y desembocó en el cese de la explotación de galena en 1982, y el cierre definitivo de las instalaciones de La Aquisgrana en 1985 (Gutiérrez Guzmán, 2007).

La presa de lodos analizada en este proyecto, al igual que muchas otras creadas en los antiguos distritos mineros abandonados, se generó mediante la acumulación de estériles sin tareas previas de impermeabilización del suelo, por lo que en la actualidad existe un importante riesgo de contaminación de los suelos y de las aguas del entorno. Para intentar paliar este problema, las antiguas presas mineras deben ser sometidas a un proceso de restauración y sellado, al cual se someterá la presa de lodos de La Aquisgrana según ha anunciado la Junta de Andalucía recientemente y cuya fecha de finalización está prevista para el año 2025 (Consejería de Política Industrial y Energía de la Junta de Andalucía, 2023).

En la siguiente figura se muestra un plano generado por IBERPIX que muestra la ubicación del Cortijo de la Lara (superposición de la cartografía del IGN con las ortofotos PNOA), donde se observa la coincidencia exacta con el área de estudio de este proyecto.

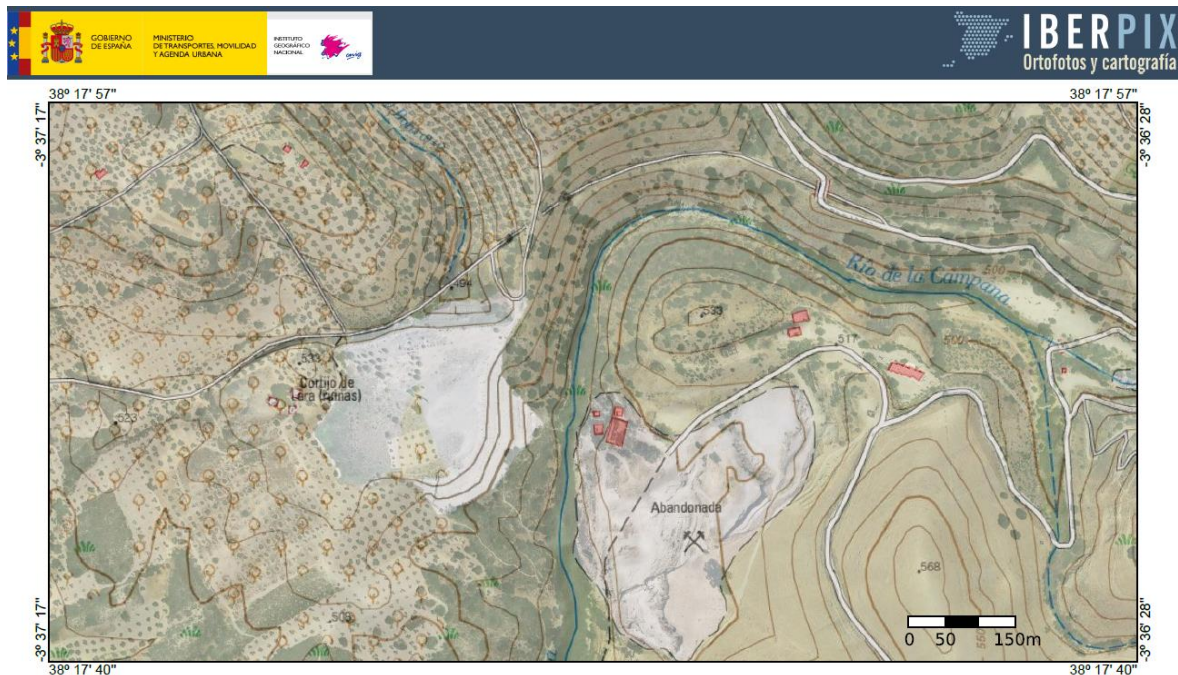


Figura 3. Detalle del Cortijo de Lara, La Carolina (IBERPIX)

OBJETIVOS

Objetivos generales

El objetivo general de este Trabajo Fin de Grado consiste en llevar a cabo un estudio no destructivo mediante dos técnicas de prospección geofísica (tomografía eléctrica y TDEM) para caracterizar la geometría de la presa minera de La Aquisgrana. Los resultados de los dos métodos empleados (TDEM y tomografía eléctrica) se compararán entre ellos y con los datos directos existentes: se dispone de la información de un sondeo mecánico realizado en la presa (litologías cortadas, datos geoquímicos, hidroquímicos). Todo ello va a permitir analizar la utilidad de estas herramientas geofísicas en minería y en medio ambiente.

Objetivos específicos

Como objetivos específicos cabe resaltar:

- Revisión de la bibliografía existente: se llevará a cabo un estudio bibliográfico de la geología y de la minería del sector. También se analizará aquella en relación con las técnicas geofísicas a emplear (fundamento teórico y aplicaciones).
- Diseño de la campaña de tomografía: para los objetivos de profundidad y resolución que se quieran conseguir, habrá que elegir el tipo de dispositivo a emplear, la distancia entre electrodos, la longitud del perfil, así como el resto de parámetros de la técnica. La decisión en cada caso dependerá de las circunstancias a investigar.
- Diseño de las campañas electromagnéticas: elección del tamaño y forma de los bucles receptor-transmisor, amperajes-tiempo-voltaje utilizados en cada una de las medidas, el espaciado entre las distintas estaciones...todo ello en función de las circunstancias a investigar.
- Estudio en campo de los afloramientos, prestando especial atención a la geología y a la minería. Esta inspección visual de la zona será de gran ayuda para la interpretación posterior de los datos geofísicos.
- Manejo del equipo de tomografía y metodologías de adquisición de datos. Empleo del software de adquisición de datos en el campo.

- Procesado 2D y de los datos de tomografía en gabinete mediante software específico e interpretación de imágenes, identificando las posibles estructuras en el subsuelo.
- Empleo de la técnica electromagnética y metodologías de adquisición de datos. Uso del software específico en el campo.
- Procesado de los datos electromagnéticos mediante software específico, así como la interpretación de los resultados en gabinete.
- Comparación de los resultados de las dos técnicas geofísicas empleadas junto a los datos directos existentes. Esto permitirá llegar a conocer la capacidad de los dos métodos indirectos de estudio para la caracterización de la geometría de la presa minera.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES

1.1.- Contexto geológico del Distrito Minero de La Carolina

El distrito minero de La Carolina se localiza en la vertiente sureste de Sierra Morena, en el límite suroriental del macizo Hespérico, en la Zona Centro-Ibérica (Gutiérrez-Marco, 1990). En la miniatura ubicada en la esquina superior izquierda de la figura 1.1. se puede apreciar la ubicación de la zona de estudio respecto a las formaciones mencionadas. Desde un punto de vista regional, cabe diferenciar dos grandes conjuntos de materiales: un zócalo paleozoico intensamente deformado, en el que encajan las mineralizaciones y una cobertera sedimentaria subhorizontal posthercínica que las fosiliza.

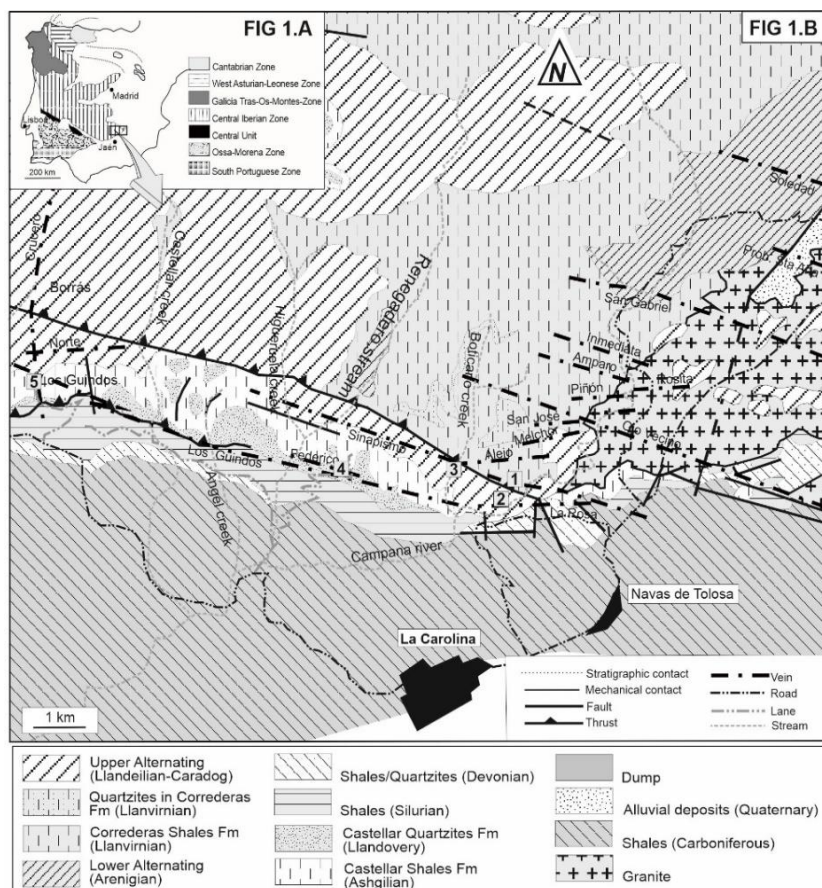


Figura 1. 1. Esquema geológico del distrito minero de La Carolina (Mendoza et al., 2022).

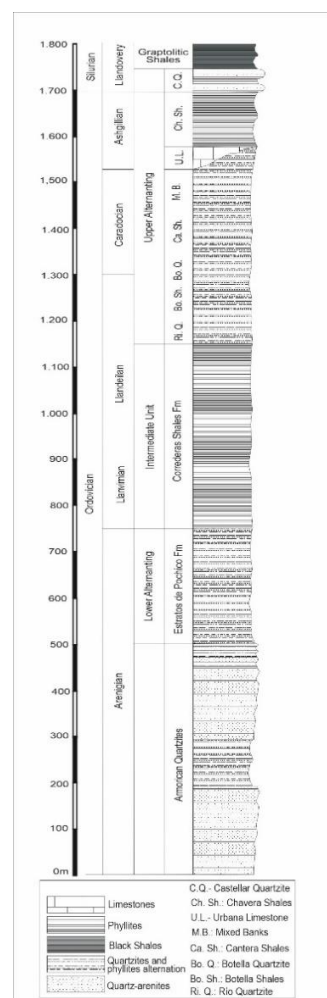


Figura 1. 2. Columna estratigráfica del Ordovícico en la zona de estudio (Mendoza et al., 2022).

El zócalo paleozoico está constituido por una sucesión de rocas metasedimentarias (filitas y cuarcitas, fundamentalmente) de edad Ordovícico a Carbonífero (figura 1.1). Una

característica de este distrito es la presencia de un macizo granítico emplazado al final de la orogenia hercínica (Castelló y Orviz, 1976; Lillo et al., 1998b).

Según el Glosario de Geología de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (RACEFN) de la UGR, se conoce como Orogénesis Hercínica o Varisca al conjunto de procesos geológicos, sucedidos principalmente durante el Paleozoico superior, que dieron lugar a la generación de montañas formadas a partir de plegamientos y otras deformaciones de los materiales subyacentes. Como se puede observar en la figura 1.3, la orogenia Varisca aflora en diversas zonas de Europa, y encuentra su fin en el sur de la península ibérica, donde actualmente se encuentra el distrito minero de Linares-La Carolina.



Figura 1. 3. Macizos Variscos de Europa (Fuente: Geodiversidad, sf)

En el sector estudiado en este TFG, la serie ordovícica es la roca de caja de la mineralización. En ella se ha definido un conjunto de unidades en función de la proporción cuarcítica existente (Ríos, 1977), distinguiéndose, de más antiguo a más joven, Cuarcitas Armoricanas, la Alternancia Inferior, pizarras de Correderas, la Alternancia Superior y pizarras de Castellar (figuras 1.1 y 1.2).

1.1.1.- Cuarcitas Armoricanas

La Cuarcitas Armoricanas constituyen una unidad de unos 450-500 m de espesor de ortocuarcitas blancas, a veces algo rosadas, con algún nivel de limolitas o lutitas. En estas facies existen icnofósiles de Skolitos y de Cruzianas atribuidas a la parte media del Arenigiano (Ríos, 1977; Lillo et al., 1998a). Tal como se observa en la figura 1.2, la

presencia de un tramo intermedio de alternancias de ortocuarcitas y pelitas limolíticas permitiría definir tres miembros (Rey e Hidalgo, 2004; Ríos, 1977).

1.1.2.- Alternancia Inferior

Sobre las Cuarcitas Armoricanas aparecen los “Estratos de Pochico”, con unos espesores del orden de los 250 m (Rey e Hidalgo, 2004). Se trata de una alternancia de cuarcitas, areniscas cuarcíticas y pelitas más o menos arenosas. A partir de la posición estratigráfica, así como de las icnofacies presentes, esta unidad litoestratigráfica ha sido atribuida al Arenigiano (Lillo et al., 1998b). Los estudios geológicos de las compañías mineras del sector han utilizado el término de “Alternancia Inferior” para esta unidad.

1.1.3.- Pizarras de Correderas

La Pizarras de Correderas, directamente sobre la Alternancia Inferior, ofrecen espesores de unos 400-600 m. Se trata de una unidad netamente pizarrosa, de colores oscuros. La abundante fauna de trilobites y braquiópodos permite datar el Llanvirnian-Llandeilan (Lillo et al., 1998a; Lillo et al., 1998b). Se ha utilizado el término de “Intermediate Unit” en los estudios mineros locales para referirse a esta unidad. Estas litologías tienen equivalentes para la misma edad en toda la Zona Centro-Ibérica (Gutiérrez-Marco, 1990), donde recibe distintos nombres (Pizarras de Río, Capas de Tristani...).

1.1.4.- Alternancia Superior

Sobre la Pizarras de Correderas se deposita la Alternancia Superior. Básicamente se trata de una alternancia de pelitas y cuarcitas. En esta unidad se suele emplazar gran parte de la minería del distrito de La Carolina, lo que hace que se haya estudiado con gran detalle. El mayor o menor predominio de facies cuarcíticas permite diferenciar distintas unidades litoestratigráficas (Rey, Hidalgo y Martínez, 2005): Cuarcitas de Río, Pizarras de Botella, Cuarcitas de Botella, Pizarras de Cantera, Bancos de Mixtos, Calizas Urbana (de carácter discontinuo) y Pizarras Chavera (Figura 1.2). Las asociaciones de braquiópodos, trilobites o conodontos han permitido datar el Llandeillense, el Caradoc y el Ashgil (Lillo et al., 1998a; Lillo et al., 1998b; Henke, 1926).

Las mineralizaciones se concentran, dentro de la unidad filoniana, en ámbitos enriquecidos de forma lenticular. El control litológico es fundamental en la mineralización:

los filones se metalizan cuando arman en cuarcitas, esterilizándose rápidamente cuando lo hacen en filitas. Los factores mecánicos son los responsables de este hecho, ya que los materiales competentes (cuarcitas, areniscas y granito) admiten una fracturación franca y neta, mientras que los materiales incompetentes (filitas) reaccionan ante el esfuerzo deformándose, por lo que la creación de espacios abiertos se ve dificultada.

El campo filoniano en La Carolina está asociado a las condiciones extensionales y al gradiente geotérmico anómalo originados al final de la Orogenia Hercínica. Estas mineralizaciones tienen un origen hidrotermal, donde la fase fluida y los metales se inyectaron a través de las fracturas y discontinuidades de la masa granítica y el encajante paleozoico (Azcárate, J.E; Argüelles, A., 1971; Castelló, R.; Orviz, F., 1976). Estos filones están constituidos principalmente por galena, esfalerita, calcopirita, pirita, cuarzo, ankerita y calcita, y encajan en el zócalo paleozoico y en el cuerpo granítico (Lillo, F. J., 1992). En el sector nororiental del distrito, presentan una dirección predominante N110E/E-W (como se puede observar en la figura 1.1. B), con fuertes buzamientos y recorridos de la traza de varios kilómetros.

1.1.5.- Cuarcitas de Castellar

Sobre el Ordovícico aparece una unidad constituida por bancos cuarcíticos masivos que ofrece espesores que varían entre los 40-70 m, que fue definida como Cuarcitas de Castellar (Henke, 1926). En la parte alta de esta unidad, se señala una asociación de graptolites que data el Silúrico (Llandeilliense medio) que se compone de facies pelíticas muy oscuras de unos 100 m de espesor que se definieron como las “Pizarras Graptolíticas” (Henke, 1926).

1.2.- Tipología de los yacimientos en el distrito minero de La Carolina. Sistema de explotación.

Los yacimientos metálicos presentes en el distrito minero de La Carolina son de tipo filoniano con buzamiento subvertical, cuyas rocas encajantes son principalmente una alternancia de pizarras y cuarcitas, con mejor desarrollo de la mineralización en las facies cuarcíticas. Dada la consabida debilidad de las pizarras y la geometría de la mineralización, lo ideal sería emplear un método de explotación con soporte artificial, como fue el caso del método de cámaras almacén (concretamente por corte y relleno), siendo este el más

extendido en el distrito de Linares – La Carolina desde mediados del siglo XIX hasta el cese de la minería (Gutiérrez Guzmán, 2007).

La técnica consistía en arrancar el mineral mediante perforación y voladura por franjas horizontales ascendentes desde abajo hacia arriba. El mineral volado se iba desalojando por unos coladeros a la galería inferior. El espacio generado era rellenado con estériles procedentes de otra parte de la explotación o incluso traídos desde el exterior sirviendo de plataforma de trabajo y como soporte de los hastiales (Hoek, Kaiser y Bawden, 1995).

Este método se tuvo que adaptar utilizando estructuras de sostenimiento mediante entibación de madera dado que la roca de caja de las mineralizaciones en La Carolina (pizarra) no presentaban las propiedades mecánicas suficientes para que las hicieran estables. En la figura 1.4. (Gracia, 2019), se aprecia el sistema de explotación por realces, así como las entibaciones y las tolvas en la base de la cámara conformando los cargaderos.

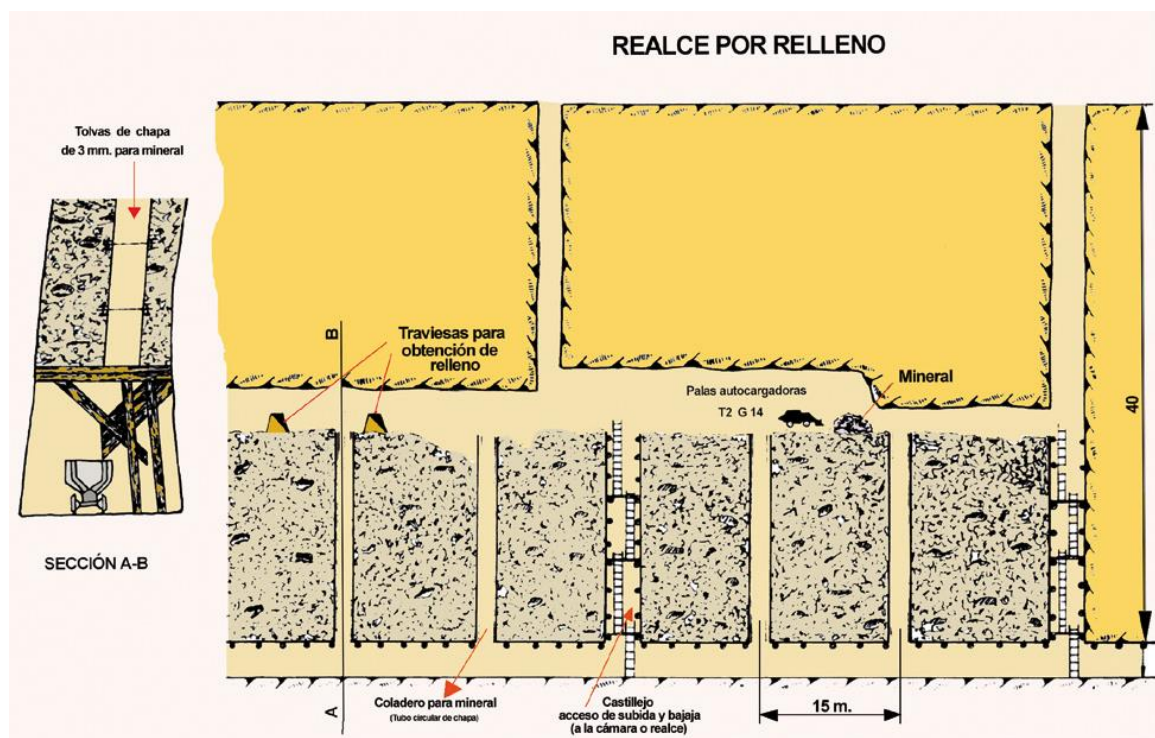


Figura 1. 4. Esquema del método de realce por relleno usado en La Carolina (Colectivo Proyecto Arrayanes, 2010).

1.3.-Descripción de las técnicas de concentración de mineral utilizadas en el distrito minero de La Carolina. Tipología de residuos

Previo al proceso de concentración de mineral, se llevaba a cabo un tratamiento manual del todo uno de mina llamado “estrío” en el interior de mina, del cual se obtenían unas leyes entre 18 y 20% en galena. Posteriormente, la concentración mineral se llevaba a cabo en el lavadero.

La palabra “estrío” es muy utilizada popularmente en la región y es producto de una deformación del término minero "trío", el cual hace referencia a la acción de clasificar manualmente los estériles en la tolva de todo-uno en el transcurso del lavado del mineral (del Olmo, 2009).

Posteriormente, el material se sometía a un proceso de trituración primaria, tras la cual se realizaba una clasificación granulométrica seguida de otra etapa de trituración, en este caso secundaria, para finalizar con su concentración gravimétrica (Gracia, 2019).

En la siguiente figura se muestra el flow-sheet del antiguo lavadero de La Aquisgrana, donde se puede observar la maquinaria empleada en el tratamiento del todo-uno así como las operaciones necesarias para realizar el proceso gravimétrico.

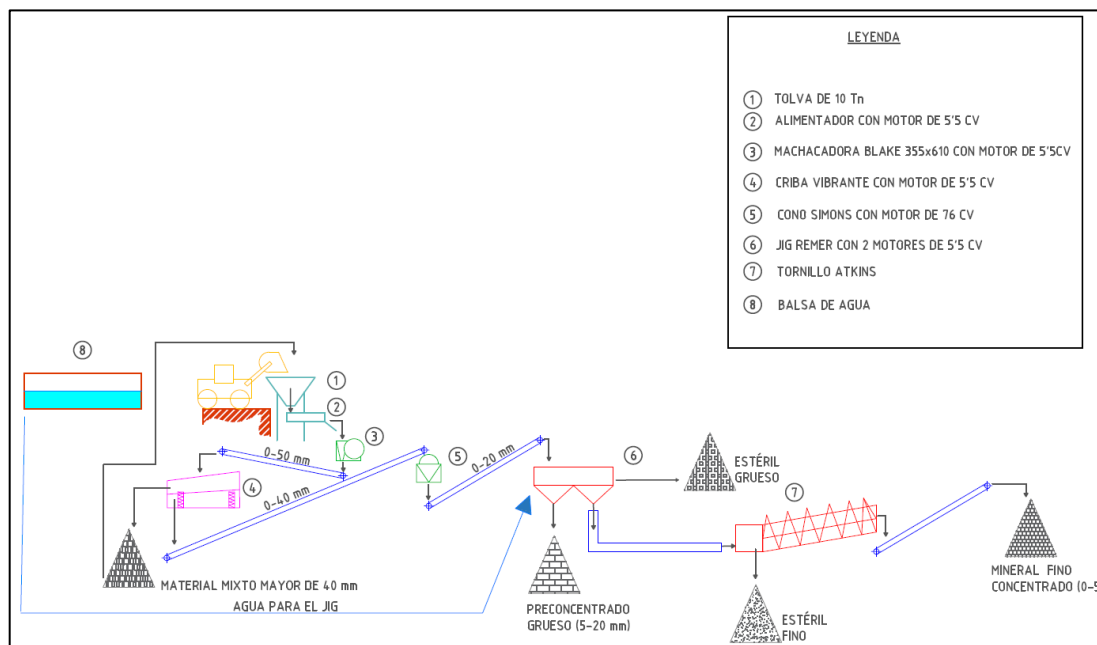


Figura 1. 5. Flow-sheet del antiguo lavadero de La Aquisgrana (Gracia, 2019).

La concentración del mineral se estructuraba en dos etapas. Primero, el material se sometía a un proceso gravimétrico del que se obtenía, por un lado, un primer concentrado de

galena, y por otro, unos mixtos y estériles con alta ley. Los mixtos y estériles eran seguidamente tratados en un proceso de flotación (no representado en el flow-sheet). Para la liberación del mineral, la flotación requería una molienda para que el diámetro de las partículas estuviese por debajo de 1 mm (entorno 50 – 70 μm), obteniéndose en este proceso un segundo concentrado de galena y unos estériles finos.

Los estériles del proceso eran bombeados y depositados en presas mineras, lo que requería disponer una estructura de dique para la contención de los lodos. Los diques se construían con materiales procedentes de la excavación de galerías de mina (bloques y gravas) en forma de anillos cerrados cuando la estructura estaba en llanura, o como presa de contención cuando se ocupaba una vaguada (como el caso que nos ocupa). El recrecimiento del dique con los residuos de flotación era habitualmente aguas arriba y se realizaba por canaleta (gravedad). Hay que resaltar que la presa minera no tiene el vaso impermeabilizado, depositándose los residuos directamente sobre el suelo, lo que supone un gran riesgo medioambiental (Martínez et al., 2012; Martínez et al., 2014; Martínez et al., 2016).

1.4.- Características geológicas y mineras del área estudiada.

En el apartado 1.1 se ha descrito la geología propia de todo el distrito minero de La Carolina, mientras que el presente apartado se centrará en las características mineras de la zona de estudio (La Aquisgrana) en relación con la geología desarrollada previamente.

La figura 1.6 y 1.7 está tomada de los planes de labores del filón del Sinapismo. En ella aparecen los principales pozos, galerías y los huecos asociados a la explotación en relación con las unidades geológicas cortadas.

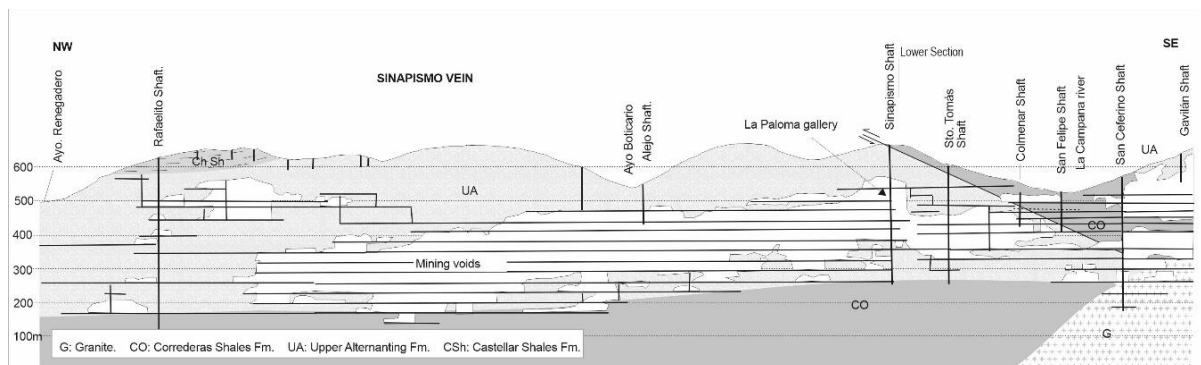


Figura 1. 6. Sección geológica NW-SE coincidiendo con el filón de El Sinapismo (Mendoza et al., 2022).

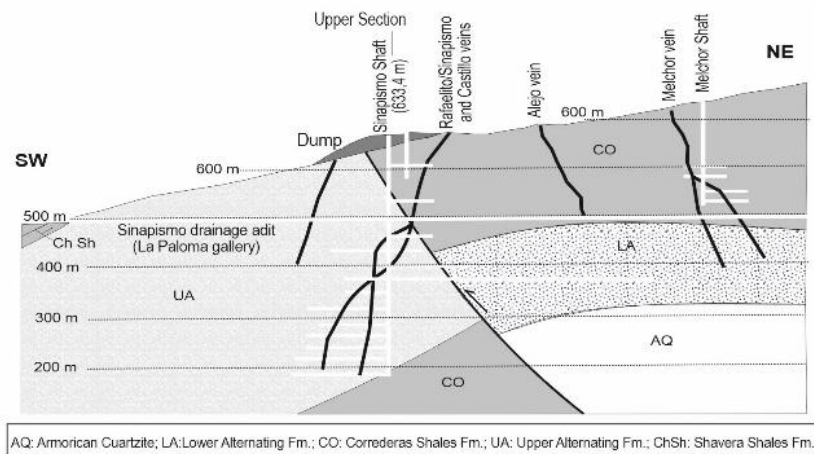


Figura 1. 7. Sección geológica perpendicular a la anterior y pasante por las galerías de La Paloma (Mendoza et al., 2022).

La observación de las figuras 1.6 y 1.7 nos permite confirmar que en el sector estudiado la explotación se centró en la alternancia superior, donde se detecta los principales huecos asociados a la explotación. Al llegar a la Pizarra de Correderas, la mineralización se empobrece y la explotación no continuaba en profundidad.

1.5.- Técnicas de investigación directas: sondeo mecánico. Descripción de la técnica de perforación utilizada (batería triple) y testificación realizada.

Tal como se ha detallado previamente en el capítulo “Objetivos”, para la obtención de datos de la presa no sólo se emplearon técnicas geofísicas no destructivas, sino que también se hizo uso de un recurso preexistente, un sondeo mecánico perforado en la presa de lodos de La Aquisgrana en el año 2012 y cuya ubicación se muestra en la figura 1.8. Este plano se podrá visualizar de forma más ampliada en el Anexo II.

Durante la campaña realizada en ese año se llevaron a cabo 3 sondeos, dos con perforadora de batería simple (1 tubo) y uno mediante perforadora de batería triple con extracción de testigo (figura 1.9 B). Este último sondeo fue proyectado con los objetivos de obtener un testigo inalterado del residuo minero y continuar la toma de datos a lo largo de los años, por lo que se instaló una tubería piezométrica para extraer muestras del agua en la zona saturada de la presa (Martínez J. et al., 2016).



Figura 1. 8. Plano de ubicación del piezómetro perforado con batería triple (P1: Piezómetro / P2: Registro).

Los sondeos se perforaron en el punto de mayor espesor de la presa de lodos, alcanzando una profundidad de 40,3 m con un diámetro de 86 mm. Se realizó un muestreo continuo mediante extracción de testigo (figura 1.10 C), encontrando el nivel de filitas a 39,8 m de profundidad.

Posteriormente se analizaron en el laboratorio 21 muestras tomadas a distintas profundidades de la columna de material extraído (Martínez J. et al., 2016). En la figura 1.10 D se puede observar la preparación de muestras para analizar en laboratorio.



Figura 1. 9. A) Vista de la presa de lodos de La Aquisgrana. B) Operaciones de perforación (Martínez J. et al., 2016)

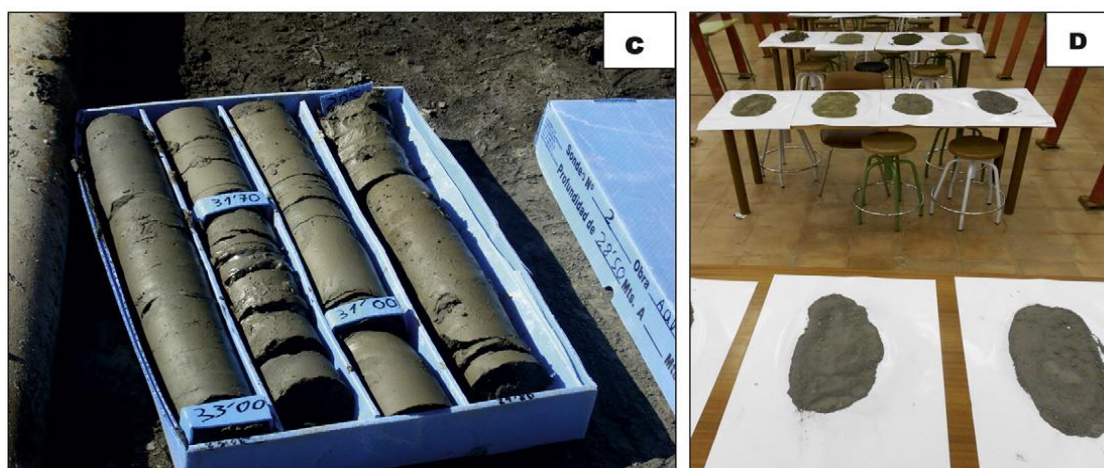


Figura 1. 10. C) Testigos extraídos de la perforación. D) Muestras de laboratorio. (Martínez J. et al., 2016)

1.6.- Estudios geoquímicos realizados.

Las 21 muestras tomadas del testigo extraído en la presa de lodos fueron analizadas en laboratorio para obtener datos de la geoquímica de los residuos depositados, así como del nivel de filitas en contacto con estos.

Estos valores resultan especialmente interesantes dada la ausencia de impermeabilización en la presa, lo cual ha propiciado la alteración no solo de los estratos subyacentes, sino también del agua.

Se realizaron diversos ensayos para obtener una caracterización del material lo más completa posible. De este modo, se empleó el método gravimétrico para conocer la humedad de la muestra, el tamizado y la sedimentación para hallar la fracción arena-limo-arcilla, el contenido de metal se obtuvo mediante un analizador de rayos X y se realizaron análisis del contenido de carbonato cálcico y sulfitos, así como del nivel de pH (Martínez J. et al., 2016).

1.7.- Hidrogeoquímica de la presa.

Una vez realizado el sondeo se tomaron muestras de agua del piezómetro a una profundidad de 37 m para analizar los elementos mayoritarios y los elementos traza disueltos en el agua (Martínez J. et al., 2016).

Al igual que en el estudio previo, durante las jornadas de trabajo de campo de este proyecto (17 de febrero de 2022) también se tomaron varias muestras de agua con intención de complementar los datos que se obtendrían por medio de los ensayos geofísicos. Estas

muestras fueron realizadas en diversas ubicaciones: el piezómetro preexistente sobre la presa de lodos, en la salida del desagüe de la presa y unos metros aguas arriba de esta salida.

Para todas las muestras de agua recogidas se registraron medidas in situ del pH, temperatura y conductividad eléctrica (tal como se observa en la figura 1.11), mediante equipos portátiles que antes de ir al campo fueron calibrados y testados como indica el fabricante.

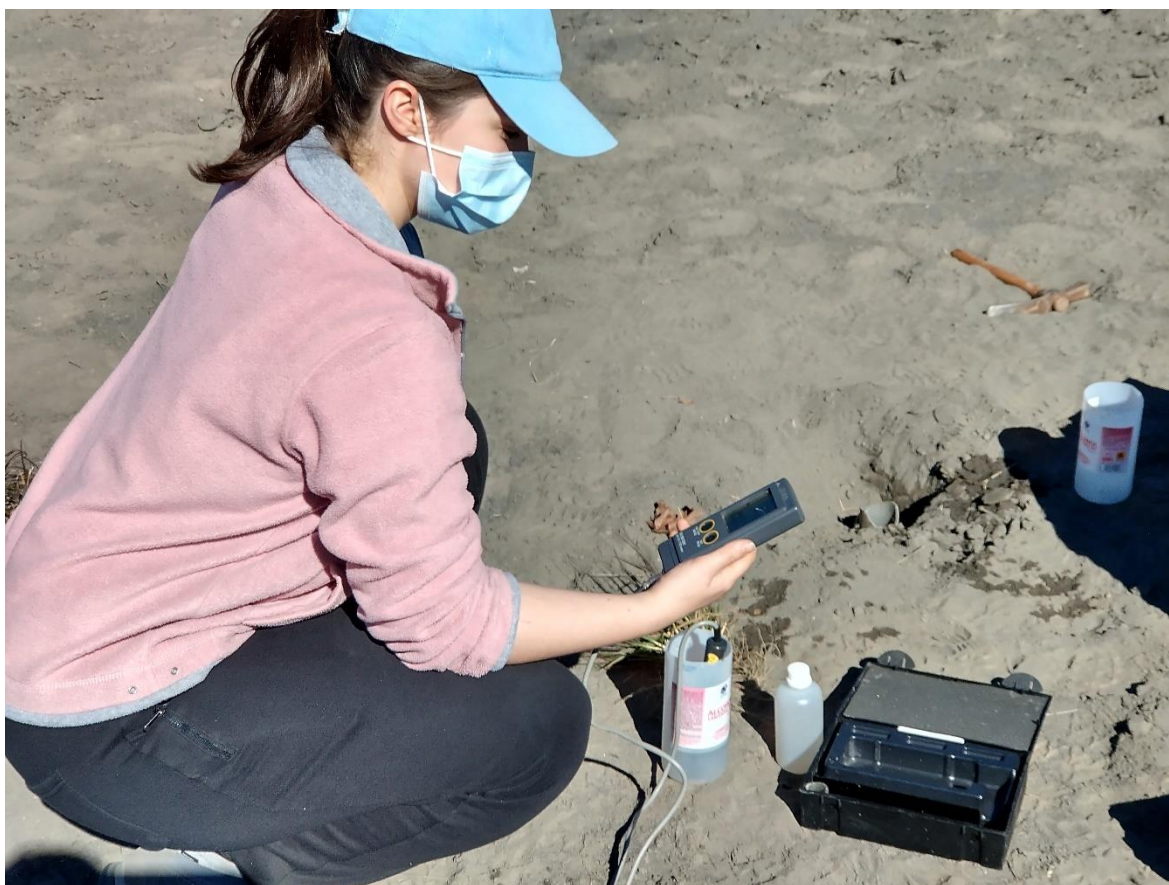


Figura 1. 11. Lectura in situ de pH, temperatura y conductividad eléctrica de una muestra de agua del piezómetro. En esta imagen se muestra a la autora del presente estudio en la toma de datos del día 17/02/2022.

El protocolo de muestreo de aguas para análisis en laboratorio requiere la toma de tres partes alícuotas, dos para determinación de constituyentes mayoritarios y una para determinación de metal(oid)es disueltos. En el caso de esta última, el agua se filtra en campo a $0,45\ \mu\text{m}$ y la submuestra ha de acidificarse con nítrico ultrapuro hasta pH inferior a 2,5 con objeto de evitar la precipitación de los metales.

Estas muestras se envían al laboratorio para ser analizadas y se genera una tabla de datos de las muestras donde se refleja la cantidad equivalente de los elementos solicitados generalmente en mg/l. Dada la geología y las mineralizaciones del entorno, así como la

pasada actividad minera, en estos análisis se busca principalmente la presencia de metales, como es el caso de Fe, Mn y Pb los cuales se encuentran presentes como elementos mayoritarios (Hidalgo et al., 2009).

A lo largo de numerosos estudios donde se han analizado las aguas del distrito de La Carolina (Hidalgo et al., 2009; Martínez J. et al., 2016; Rojas et al., 2019; Rojas, 2019) se llega a una misma conclusión en la que los residuos de la minería han generado una elevada deposición de metales y sulfatos en las aguas del distrito, acidificándolas y contaminándolas hasta superar los niveles máximos permitidos de concentración de metales y presencia de sulfatos establecidos en Andalucía.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS: TÉCNICAS INDIRECTAS DE INVESTIGACIÓN EN ESTE ESTUDIO

2.1.-Tomografía eléctrica (ERI)

2.1.1.- Fundamentos y descripción del método:

La Tomografía eléctrica es un método multielectrónico no destructivo empleado en prospección geofísica, por el cual se obtiene una modelización 2D o 3D de la resistividad del terreno empleando técnicas numéricas.

Dentro de este método difieren dos nomenclaturas dependiendo de la disposición de los electrodos:

- Electrical tomography (ERT): Disposición vertical de electrodos en el interior de sondeos mecánicos.
- Electrical imaging (ERI): Disposición longitudinal de los electrodos en la superficie del terreno.

En el caso del presente estudio se empleó ERI por resultar mucho más rápido y económico que ERT, ya que resulta innecesaria la realización de sondeos mecánicos para poder realizar el ensayo.

Este sistema está basado en los métodos de resistividad convencionales, los cuales emplean una fuente de energía y 4 electrodos (2 emisores y 2 receptores) que irán modificando su posición a lo largo del perfil. Según el dispositivo electrónico escogido, se introducirá una determinada intensidad de corriente (ΔI) por los electrodos emisores midiéndose la diferencia de potencial (ΔV), con lo que se obtendrá un valor de resistividad aparente ($\text{ohm} \times \text{m}$), que en función de la distancia AB se asigna al vértice de un triángulo invertido.

Lo destacable de este método es que en lugar de emplear 4 electrodos que se deberían desplazar manualmente (Sondeos Eléctricos Verticales), se emplea un elevado número de los mismos (usualmente alrededor de 50 electrodos) conectados todos entre sí y a su vez a la fuente de energía y a un resistivímetro. De este modo, una vez seleccionado el dispositivo y el protocolo de medidas, se realizará de forma automatizada todas las combinaciones

posibles de 4 electrodos según el dispositivo electródico escogido y las propiedades definidas, obteniendo en menos tiempo un perfil de resistividad del terreno (Serrano, 2003).

Los dispositivos electródicos indican diversas configuraciones en cuanto a la disposición y desplazamiento de los electrodos. A continuación, se muestran los 3 dispositivos más comunes:

- WENNER:

Este dispositivo se caracteriza por presentar un espaciamiento constante entre electrodos, tal y como se muestra en la siguiente figura:

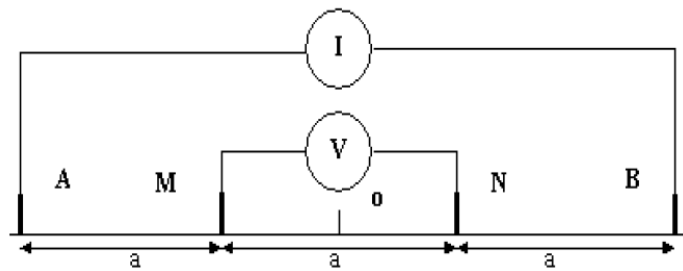


Figura 2. 1. Configuración Wenner (Serrano, 2003).

La configuración Wenner permite una mejor detección de las variaciones de resistividad en la vertical, presentando una pobre cobertura horizontal (Rey y Martínez, 2012).

- SCHLUMBERGER:

Este dispositivo se caracteriza por presentar un espaciamiento mayor entre A-M y N-B que entre M-N, tal y como se observa en la figura 2.2.

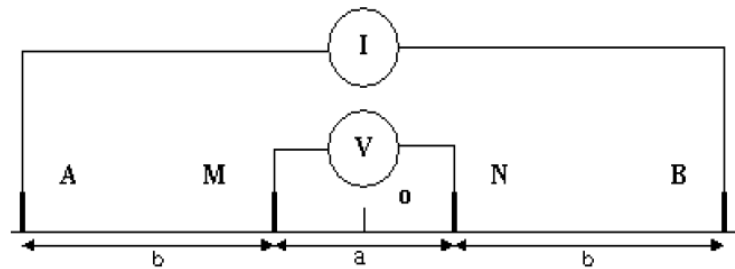


Figura 2. 2. Configuración Schlumberger (Serrano, 2003).

La configuración Schlumberger permite una mejor detección de las variaciones de resistividad en la horizontal, presentando una pobre cobertura vertical (Rey y Martínez, 2012).

- WENNER-SCHLUMBERGER:

Este dispositivo es un híbrido de los dos anteriores, con lo cual observando la figura 2.3, dependiendo el valor que adquiera “n” presentará una disposición u otra:

$$n = 1 \Rightarrow \text{Wenner} \quad // \quad n \geq 2 \Rightarrow \text{Schlumberger}$$

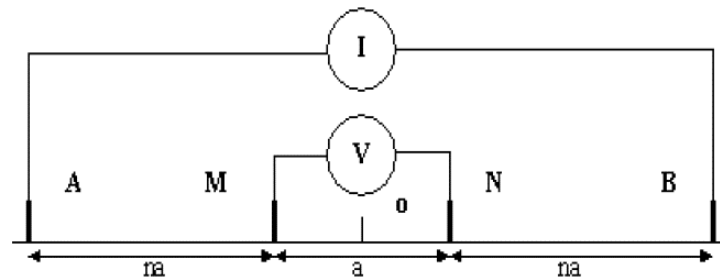


Figura 2. 3. Configuración Wenner-Schlumberger (Serrano, 2003).

La configuración Wenner-Schlumberger es moderadamente sensible tanto a las variaciones de resistividad en la horizontal como en la vertical (Rey y Martínez, 2012).

2.1.1.1.- *Métodos de Resistividad Convencionales*

Existen varios métodos de resistividad en tomografía eléctrica que se utilizan para obtener un amplio espectro de información sobre las propiedades del subsuelo. Entre ellos cabe destacar los Métodos de Resistividad Convencionales y los de Polarización Inducida, los cuales se desarrollarán en los siguientes apartados.

Los métodos convencionales, tal como se ha ido introduciendo previamente, se basan en la medición de la resistividad eléctrica del subsuelo empleando 4 electrodos colocados en la superficie (2 de inyección de corriente y 2 receptores para medir el voltaje).

Como ya se ha explicado, la tomografía eléctrica es capaz de obtener los valores de la resistividad de una traza predefinida tanto en longitud como en profundidad, y esto es fruto de la combinación de los 2 siguientes métodos convencionales:

- Sondeo Eléctrico Vertical “SEV”. Este método permite conocer la variación de la resistividad en función de la profundidad respecto a un mismo centro, lo cual se

logra expandiendo 2 o 4 electrodos (según el dispositivo electródico escogido) respecto al centro “o” (Serrano, 2003).

- Calicata Eléctrica. Este método permite medir la variación lateral de la resistividad a una profundidad constante, y se consigue desplazando los 4 electrodos solidariamente a lo largo de toda la traza (Serrano, 2003).

2.1.1.2.- Método de Polarización Inducida

Este método se emplea para detectar materiales con alta polarización, como es el caso de los sulfuros metálicos; y consiste en inyectar una corriente eléctrica en el subsuelo cuyo suministro se interrumpe posteriormente, entrando así en fase de descarga.

Durante este proceso, se miden los voltajes por medio de electrodos impolarizables en los momentos antes y después de la interrupción de la corriente, y estos datos se utilizan para generar una imagen de la polarización del subsuelo (Carrasco, 2013).

2.1.2.- Descripción del equipo

Para la realización de la tomografía eléctrica se requieren los siguientes componentes:

- Electrodos: en este caso se emplearon 64 electrodos impolarizables (“potitos” en el argot). Los propios cilindros incluían un cable terminado en una clavija que sirve de conector con el circuito de corriente (fig. 2.4 y 2.6).
- Cable multinúcleo tipo sísmico: se trata de un cable de gran longitud que está dotado de conexiones para los electrodos (fig. 2.5 y 2.9), ubicadas en intervalos constantes a lo largo del cable.
- Batería: fuente de energía externa para alimentar todo el sistema (fig. 2.7).
- Convertidor: Transmisor y receptor de corriente (fig. 2.7) que permite controlar la potencia de inyección de la electricidad.
- Resistivímetro: Cuenta a su vez con un ordenador y software de campo (fig. 2.8), lo que permite realizar las funciones de la unidad de control (ejecución automática de las medidas, verificación de conexiones y almacenamiento de resultados), de selector de electrodos y a su vez visualizar en tiempo real las lecturas, así como realizar parte del tratamiento de los datos (Serrano, 2003; Rey y Martínez, 2012).

El equipo empleado en la realización del ensayo (RESECS) pertenece a la marca alemana DMT. A continuación, se muestran las imágenes de este:



Figura 2. 4. Electrodo Impolarizable ("potito")



Figura 2. 5. Cable multinúcleo tipo sísmico



Figura 2. 6. Electrodo enchufado al conector



Figura 2. 7. Convertidor (rojo) y batería (negro)



Figura 2. 8. Unidad de control



Figura 2. 9. Vista de la traza de electrodos

2.1.3.- Metodología de adquisición de datos en campo

Tras realizar las labores de investigación y planificación en gabinete, se procede al desarrollo del ensayo en campo. Mediante estos pasos previos se obtiene la información relacionada con la geología y la orografía del emplazamiento a estudiar, pudiendo así diseñar una traza lo más recta posible para realizar la Tomografía eléctrica.



Figura 2. 10. Plano de ubicación de los electrodos empleados para Tomografía Eléctrica (ERI)

De este modo, al igual que se determina la ubicación y longitud de la traza que seguirán los electrodos durante el ensayo, se definen también los parámetros del estudio, los cuales serán introducidos en la Tomógrafo como último paso antes de iniciar las mediciones. En la figura 2.10 se muestra un ejemplo de la disposición de electrodos diseñada en gabinete, que además fue la empleada para el presente estudio. Este plano se puede visualizar de forma más ampliada en el Anexo II.

Una vez situados en el emplazamiento de estudio, se marca el inicio de la traza donde se estipuló previamente, colocando el primer electrodo (esquina superior derecha de la figura 2.10). En este caso, al tratarse de electrodos impolarizables se debe excavar unos pocillos de unos 7 cm como se muestra en la figura 2.11, para poder enterrar el “potito”, cubriéndolo de

tierra y regando posteriormente para mejorar la conductividad (figura 2.12). En el caso de las picas (electrodos de acero) simplemente se clavan en el suelo y posteriormente se riegan.



Figura 2. 11. Excavación e implantación del electrodo.



Figura 2. 12. Regado del electrodo.

Para proseguir con la disposición de los electrodos, es necesario emplear la cinta métrica para marcar la ubicación de los mismos, respetando el paso calculado en gabinete.

Tras colocar todos los electrodos, se extiende el cable a lo largo de toda la traza (figura 2.13) y se procede a enchufar uno a uno todos los electrodos a las cajas de conexión (figura 2.15). En caso de emplear una elevada cantidad de electrodos es necesario empalmar varias familias de cables de la forma que se muestra en la figura 2.14.



Figura 2. 13. Extensión del cable.



Figura 2. 14. Conexión entre familias de cables.



Figura 2. 15. Conexión del electrodo con el cable.

Por último, se conecta el final de este cable al Tomógrafo (figura 2.16) y este al convertidor, el cual se enchufa a una batería externa (figura 2.17). Tras esto, se configuran todos los equipos, tanto el convertidor como el Tomógrafo, con los parámetros que se definieron durante la fase de gabinete para pasar a tomar las mediciones de resistividad aparente y polaridad inducida. Las medidas se prolongan durante horas dado el elevado número de medidas que hay que realizar.



Figura 2. 16. Tomógrafo.



Figura 2. 17. Baterías y convertidor.

Con el equipo mencionado es posible realizar varios tipos de ensayos, por lo que se aprovechó la disposición de los electrodos impolarizables para llevar a cabo lecturas de la resistividad aparente del terreno y de la polarización inducida (de forma independiente).

De este modo, ambos ensayos comparten los siguientes datos:

- Número de electrodos: 64
- Espaciado entre electrodos (paso): 6 m
- Longitud total de la traza: 384 m
- Dispositivo electródico: Wenner-Schlumberger
- Software empleado: RESECS

Sin embargo, más allá de estos parámetros en común, cada uno de los ensayos requieren unas especificaciones diferentes además de realizar los ensayos de forma independiente, puesto que el objeto de análisis de cada uno es diferente.

Por un lado, el ensayo de resistividad llevado a cabo mediante el dispositivo Wenner-Schlumberger, inyecta corriente al suelo desde los electrodos extremos (C1 y C2) y mide los

voltajes con los electrodos interiores (P1 y P2), obteniendo así los valores de resistividad aparente (posteriormente tratados para transformarlos en resistividad real) en todos los puntos de la traza y a distintas profundidades, dando lugar a un triángulo invertido donde se muestran las variaciones de resistividad del terreno (figura 2.18).

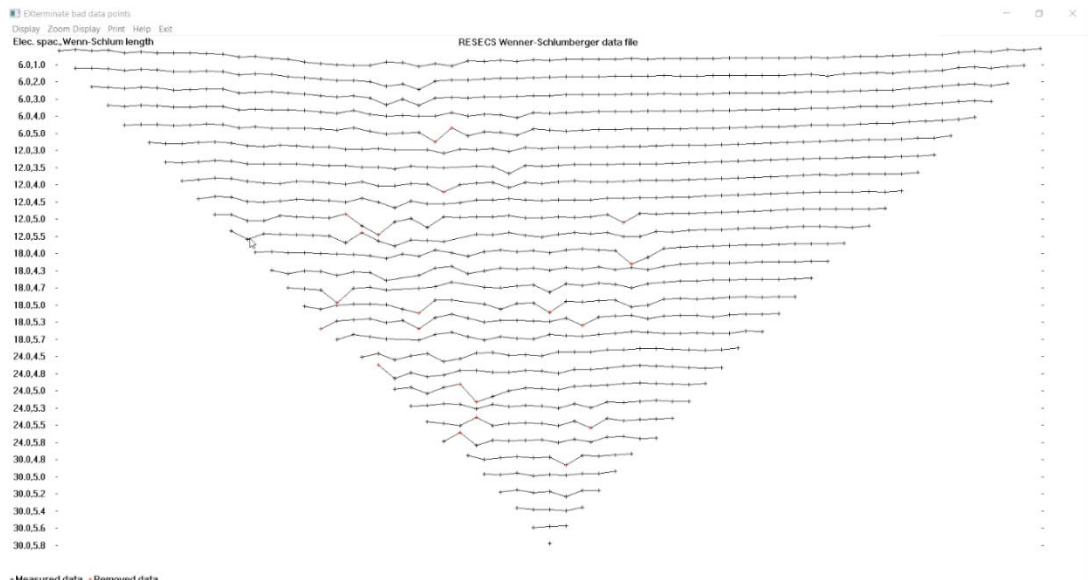


Figura 2. 18. Lectura inicial de resistividad aparente.

Por otro lado, la polarización inducida realiza inyecciones de corriente a máximo voltaje (800 V, con el conmutador del convertidor en el 3) durante 1 segundo, deja un tiempo de reposo (10 ms) y posteriormente se mide la cargabilidad durante 1000 ms (figura 2.19).

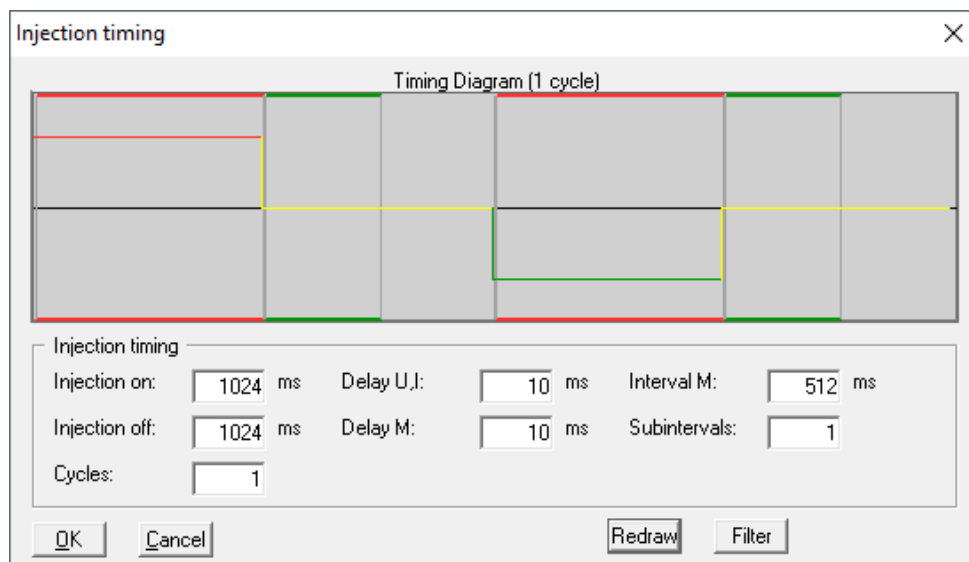


Figura 2. 19. Definición de parámetros en Polarización inducida.

2.1.4.- Tratamiento e inversión de datos

La información de campo tomada con el software RESECS, es exportada en tres archivos con extensión SEM, REM y UAI, para ser tratados en el gabinete con el software de interpretación RES2INV.

2.1.4.1.- Métodos de Resistividad

Al abrir el programa RES2DINV, se selecciona el dispositivo electródico empleado, en nuestro caso Wenner-Schlumberger. Seguidamente se importan los datos de los tres archivos en formato RESECS (figura 2.20). En el archivo con extensión REM se introducen los datos de altimetría de la sección estudiada (figura 2.21). En la figura 2.22 se muestra un resumen de la información aportada.

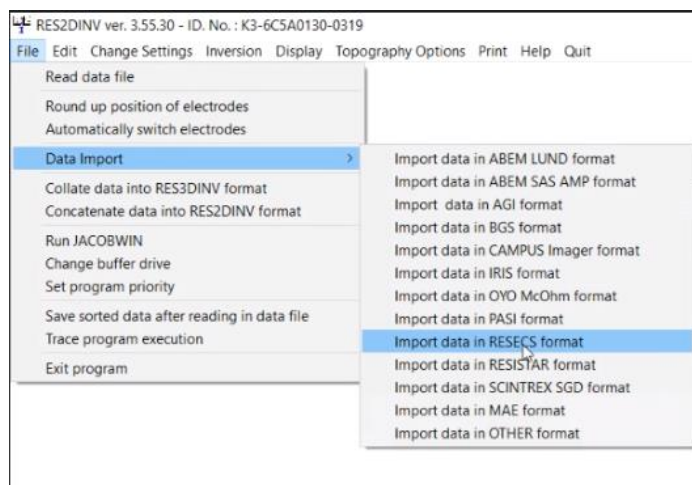


Figura 2. 20. Importar datos en RES2DINV

The screenshot shows a text file named '*AQUISGRANA SCHLUMBERGER000: Bloc de notas'. It contains a table with 21 rows of elevation data.

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
1	0.00	0.00	518.00	
2	6.00	0.00	519.00	
3	12.00	0.00	520.00	
4	18.00	0.00	521.00	
5	24.00	0.00	522.00	
6	30.00	0.00	523.00	
7	36.00	0.00	524.00	
8	42.00	0.00	523.80	
9	48.00	0.00	523.00	
10	54.00	0.00	0.00	
11	60.00	0.00	0.00	
12	66.00	0.00	0.00	
13	72.00	0.00	0.00	
14	78.00	0.00	0.00	
15	84.00	0.00	0.00	
16	90.00	0.00	0.00	
17	96.00	0.00	0.00	
18	102.00	0.00	0.00	
19	108.00	0.00	0.00	
20	114.00	0.00	0.00	
21	120.00	0.00	0.00	

Figura 2. 21. Listado de la altimetría en los diferentes puntos de medida.

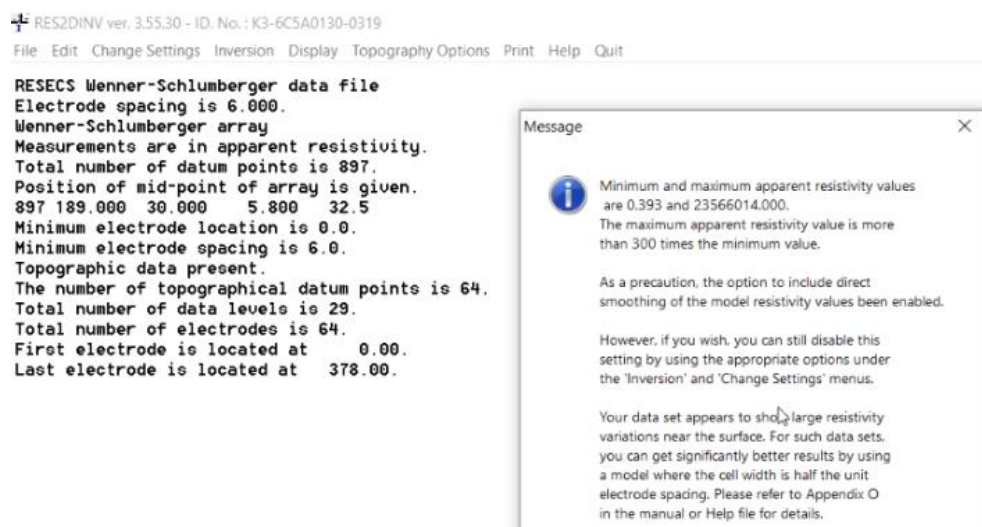


Figura 2. 22. Resumen de datos definidos en el programa.

Con el aporte de esta información se puede iniciar el tratamiento de datos, el cual consistirá en transformar los valores negativos a positivos y suprimir los valores extremos de las lecturas (figuras 2.23 y 2.24)

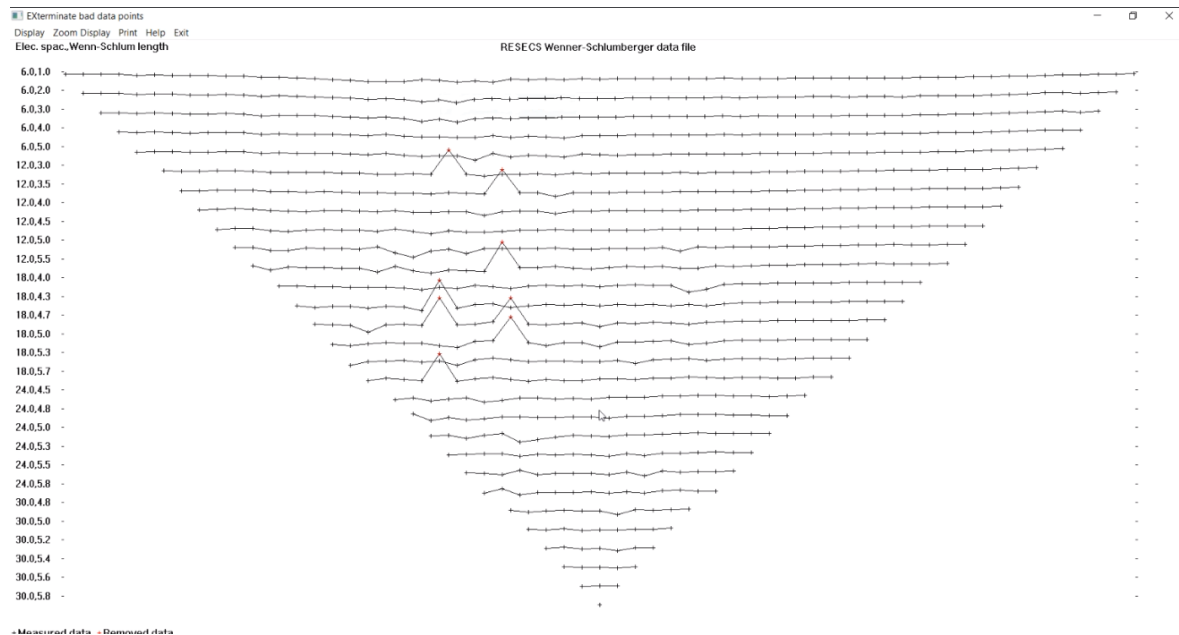


Figura 2. 23. Lectura sin tratar

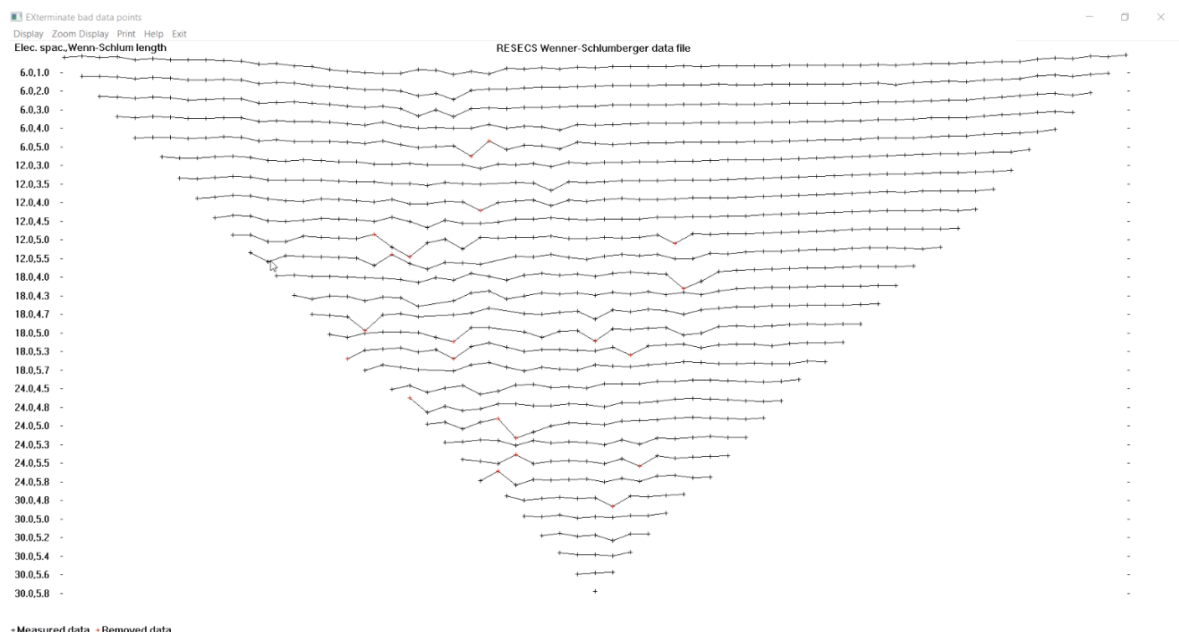


Figura 2. 24. Eliminación de puntos extremos en la lectura

Después se deben definir los parámetros de inversión que se emplearán más adelante (figura 2.25 a figura 2.30). Durante el proceso de inversión se aplican filtros que ayudarán a depurar los datos para obtener unos resultados representativos a la vez que más homogéneos.

Los datos se tratarán mediante mínimos cuadrados realizando una serie de iteraciones hasta alcanzar el mejor ajuste para un error por debajo del 5% (figura 2.30).

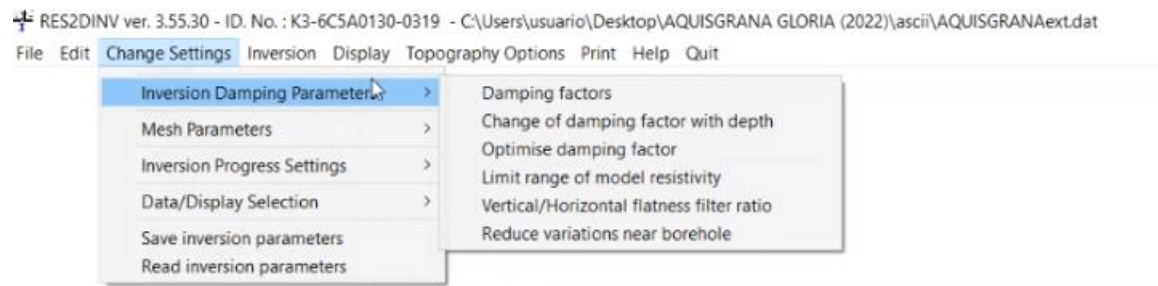


Figura 2. 25. Definición de parámetros para la Inversión.

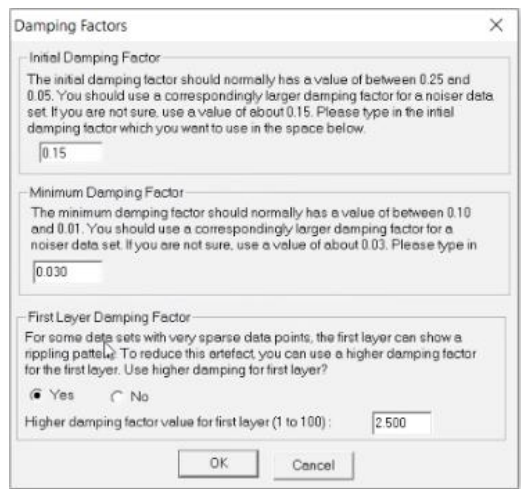


Figura 2. 26. Factores de humedad

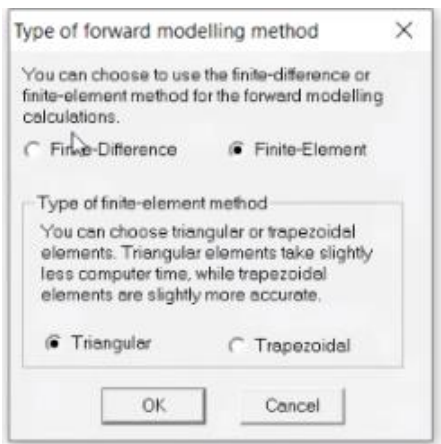


Figura 2. 27. Tipo de modelado.

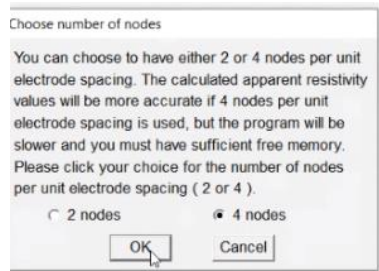


Figura 2. 29. Número de nodos entre electrodos.

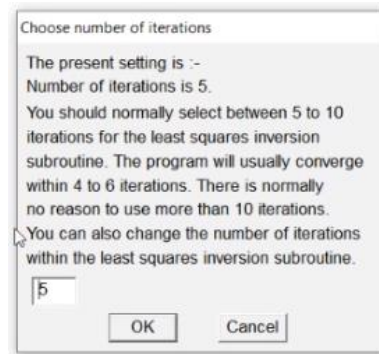


Figura 2. 30. Número de iteraciones.

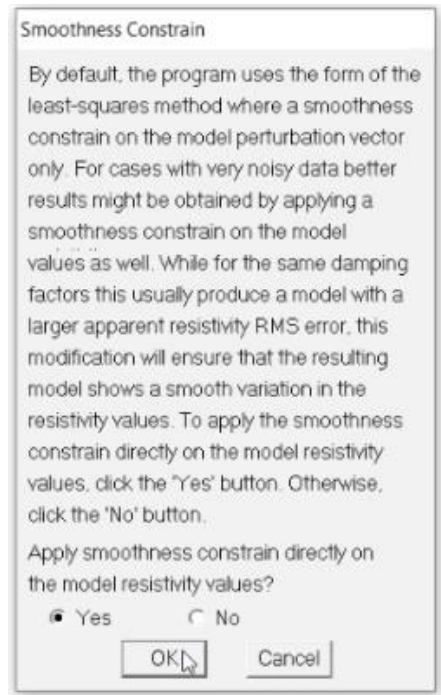


Figura 2. 28. Restricción de suavidad.

Después de este preámbulo, se procede a la inversión de los datos y la transformación de resistividad aparente en resistividad real, obteniendo gráficas que podrán ser exportadas en formato PNG. En la figura 2.31 se observan las gráficas de resistividad aparente medida, resistividad aparente calculada y resistividad real durante el proceso de transformación, concretamente durante la 4ª iteración.

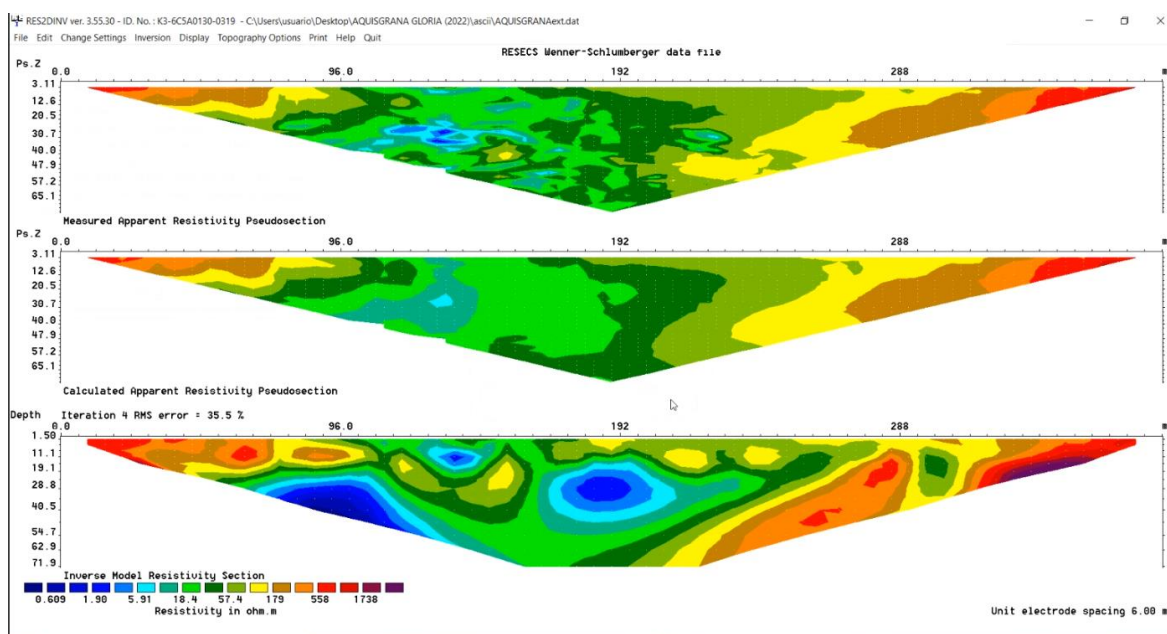


Figura 2. 31. Gráficas de resistividades durante la 4ª iteración del tratamiento de datos (sin topografía).

2.1.4.2.- Métodos de Polarización Inducida

Para el tratamiento de los datos en Polarización inducida se requerirá el empleo de otro software adicional: Prosys II.

En primer lugar, se abre el archivo en RESECS, se seleccionan los datos a exportar y se exporta en formato CSV para que el archivo sea compatible con Prosys II.

Una vez en el nuevo programa, se importa el archivo CSV, se introduce la topografía (figura 2.32) y se realiza un procesado previo de los datos, eliminando los valores erráticos (Processing → Exterminate bad data) y aplicando un filtro (Processing → Filtering data → Value), como se muestra en las figuras 2.33 y 2.34 respectivamente.

A continuación, se exporta el archivo de nuevo y se abre en el software RES2DINV, donde se realizará el mismo procesado que el que se aplica para las lecturas de resistividad aparente y finalmente se obtiene un gráfico de características similares al de resistividad, pero en este caso mostrando la cargabilidad (mV/V).

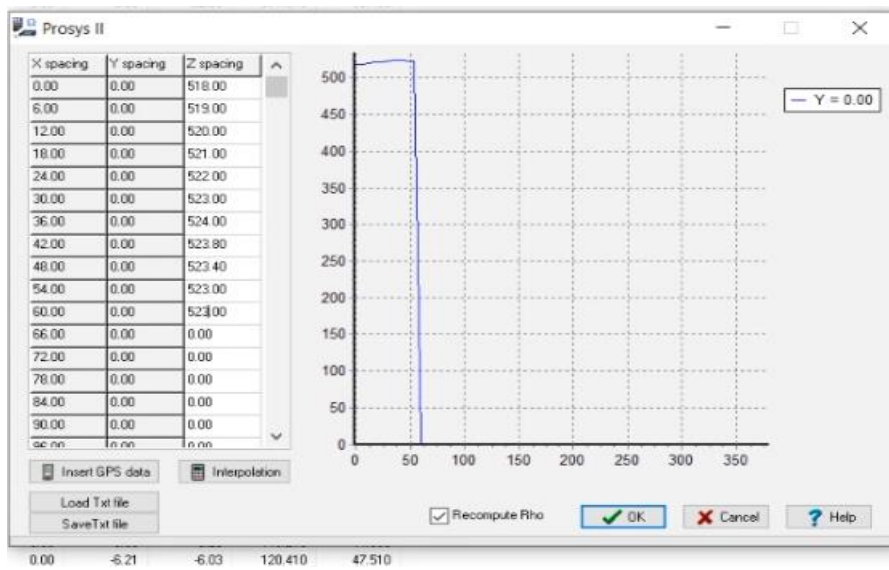


Figura 2. 32. Introducción de la topografía en Prosys II.

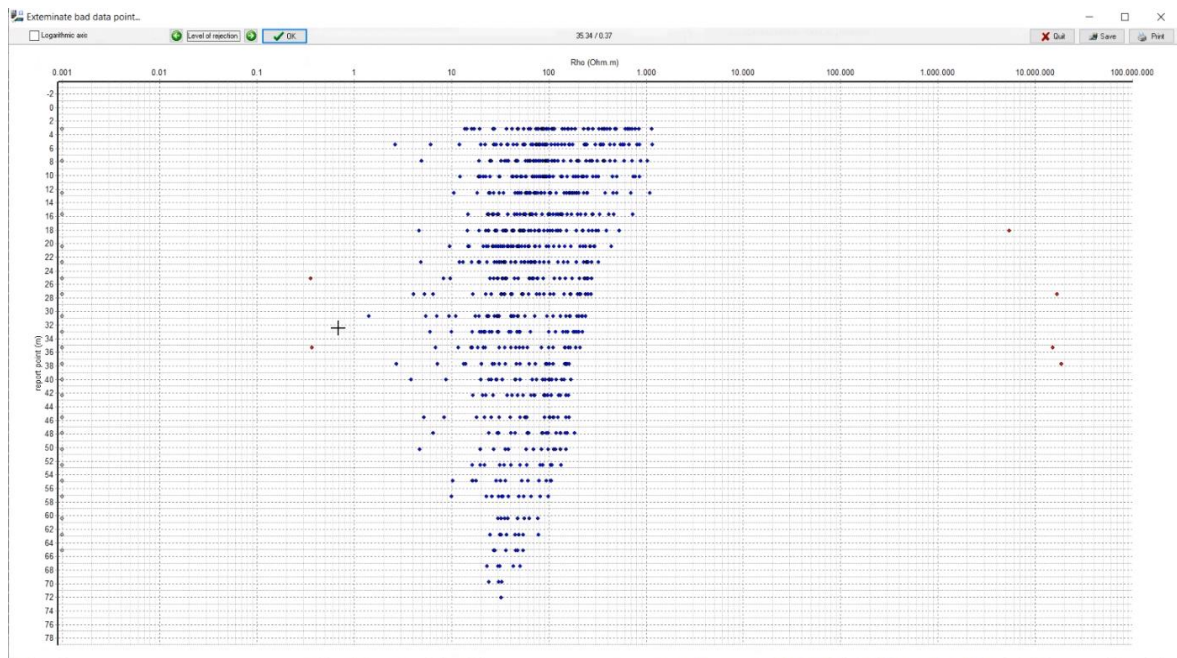


Figura 2. 33. Eliminación de valores erráticos.



Figura 2. 34. Filtrado de los datos.

2.2.- Método Electromagnético en el Dominio de los Tiempos (TDEM)

2.2.1.- Fundamentos y descripción del método

La prospección electromagnética estudia la respuesta del terreno subyacente a un campo electromagnético inducido durante el ensayo. Dentro de los Sondeos Electromagnéticos se pueden diferenciar dos métodos dependiendo del dominio empleado:

- Sondeo Electromagnético en el Dominio de Frecuencias (en castellano SEDE, en inglés FDEM).

Se emiten impulsos electromagnéticos desde una bobina emisora y estas señales son interceptadas por la bobina receptora, estando ambas en contacto directo con el terreno. Dependiendo de la frecuencia empleada (entre 100 Hz y 10 kHz) y la distancia entre bobinas, variará la profundidad de penetración del ensayo (Telford, 1990).

- Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo (en castellano SEDT, en inglés TDEM).

Se genera un campo electromagnético primario que se transmite por un corto periodo de tiempo (1'') desde el bucle emisor, y posteriormente, el bucle receptor captará las variaciones del campo magnético secundario una vez haya cesado la emisión de corriente primaria (Telford, 1990).

Se ha escogido este método frente al anterior puesto que ofrece una mayor resolución vertical y un mayor poder de penetración

Para llevar a cabo el método de prospección escogido (TDEM), se debe crear un bucle emisor y otro receptor, funciones que, dependiendo del dispositivo empleado, podrían ser asumidas por un mismo bucle o por varios.

Los bucles son cables conductores de electricidad dispuestos de forma continua creando un circuito cerrado de X vueltas y con unas dimensiones específicas. Al transmitir electricidad por estos bucles se genera un campo electromagnético primario, que profundizará más o menos metros en función del amperaje, las dimensiones del bucle y el número de vueltas del mismo.

Al cortar la transmisión de corriente de forma abrupta, el campo magnético generado no desaparece súbitamente, sino que reduce poco a poco y se genera un campo magnético secundario que va variando en función del tiempo, induciendo un voltaje en la bobina

receptora conocido como transitorio. La forma del decaimiento de este voltaje contiene información sobre la distribución de la conductividad del subsuelo debido a que la magnitud y la distribución de la corriente inducida dependen de él.

La señal recibida será de mayor o menor intensidad dependiendo de la resistividad del terreno subyacente, y la profundidad del ensayo radicarán en parámetros como la intensidad de respuesta del terreno y el tiempo transcurrido entre el corte y la medición (Reynolds, 2011; Telford, 1990).

De este modo, se pueden generar gráficas que indican esas variaciones del campo magnético, permitiendo apreciar de forma visual las zonas donde hay una resistividad parecida, lo que se traduce en estratos de un mismo material.

Como bien indica el nombre del ensayo, se trata de un sondeo, es decir, que aportará información de los materiales en profundidad respecto a un mismo centro. Para conocer la evolución de los materiales de forma horizontal será necesario realizar varios sondeos en diferentes ubicaciones como si de una calicata se tratara.

2.2.2.- Conceptos relacionados con el TDEM

Para la correcta toma de datos con técnicas electromagnéticas, así como para la interpretación de los mismos, es preciso recordar algunos conceptos (Reynolds, 2011; Telford, 1990):

- Ramps time (rampa delantera): Intervalo de tiempo en el que, después de cortar la corriente, sigue circulando corriente, decreciendo su amperaje hasta llegar a 0. Hay que calcular su valor para eliminar ese tiempo de medida (no es válida). El valor es proporcional al Amperaje y a la Superficie del bucle. Esto influye en la capacidad de caracterizar una zona somera del subsuelo (el efecto puede reducirse disminuyendo el momento del transmisor con una corriente de amperaje menor).
- Rampa trasera: es el tiempo que se tarda, después del inicio de la inyección de corriente, en alcanzarse al amperaje marcado.
- Tiempo de medida: Oscila generalmente entre 1s y 10 μ s. A mayor intervalo de tiempo, mayor profundidad se alcanza. Pero, si es > 100 ms, llega mucho ruido y la señal recibida pierde valor.
- Ventanas de Tiempo: Para el intervalo de tiempo de medida, el equipo realiza una serie de ventanas de tiempo (el número de ventanas será proporcional al intervalo

total de medida y el número lo proporciona el equipo automáticamente) lo que permite hallar la curva de decaimiento.

- Amperaje: Para zonas superficiales mejor trabajar con bajo Amperaje (para tener ramps times pequeñas) para mayor profundidad, hay que usar mayores amperajes.
- Amperaje efectivo: Todo el amperaje que se emite no llega al terreno, ya que dependerá de la resistencia que ofrezca del cable. En nuestro caso, utilizamos un cable de 6 mm, por lo que la resistencia será pequeña.
- Área Efectiva receptor: Superficie x Núm. de vueltas x Cte. Amplificación.
- Stacking: indica el número de ciclos on/off, es decir las repeticiones en cada sondeo. En función del ruido presente en cada localización de muestreo, es necesario aumentar el número de stacks. Lo normal es utilizar entre 200 y 400 ciclos.
- Momento Magnético: En el caso que se necesite aumentar la profundidad de exploración se debe incrementar el momento magnético ($M=I \cdot A \cdot N$), donde I es la Intensidad de la corriente que circula por el loop, A es el área del loop y N es el número de vueltas de la bobina o espira. Lo anterior se puede realizar de tres formas; La primera es aumentando el amperaje de la corriente, la segunda es aumentando el tamaño del loop transmisor y la tercera es aumentando el número de vueltas de la bobina.

2.2.3.- Bucles: distintos dispositivos

El TDEM se puede ejecutar de diversas formas variando el número de bucles que se emplea (1 o más), el número de loops de cada bucle y la posición relativa de los mismos. Atendiendo específicamente a la posición de los bucles, cada una de estas posibles configuraciones es lo que se llama “dispositivo”.

A continuación, se muestran los dispositivos más comunes en el TDEM:

2.2.3.1.- Bucle único (figura 2.35)

Un mismo bucle ejerce el papel tanto de emisor como de receptor (Yáñez, 2017; Cimadevilla, 2017).

- Ventajas

Es una configuración simple y fácil de utilizar. Permite explorar grandes áreas en un corto período de tiempo.

- Desventajas:

Puede haber señales indeseadas en las mediciones, lo que puede afectar la precisión de los resultados.

- Aplicaciones habituales:

Se utiliza para la exploración de grandes áreas para identificar la presencia de objetos metálicos, minerales o estructuras geológicas.

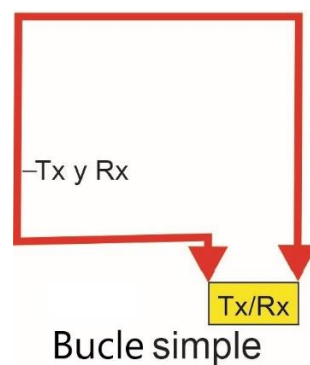


Figura 2. 35. Esquema bucle único.

2.2.3.2.- Bucles coincidentes (figura 2.36)

Se emplean dos bucles de iguales dimensiones (con una separación de 1m entre ellos) que comparten el mismo centro. De este modo el bucle “exterior” será el emisor y el “interior” el receptor. Se utilizan para eliminar señales indeseadas y mejorar la precisión de las mediciones (Yáñez, 2017; Cimadevilla, 2017).

- Ventajas

Elimina señales indeseadas y mejora la precisión de las mediciones.

- Desventajas:

Es más costoso y requiere más equipo que la configuración de bucle único.

- Aplicaciones habituales:

Se utiliza en áreas con alta interferencia electromagnética o en exploraciones en áreas urbanas o industriales.

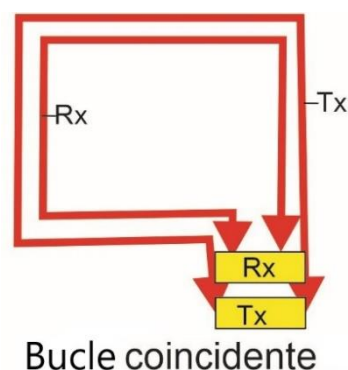


Figura 2. 36. Esquema bucle coincidente.

2.2.3.3.- Bucle centrado (figura 2.37)

Se emplean dos bucles con palpables diferencias en sus dimensiones, funcionando de igual manera que el bucle coincidente: el bucle exterior será emisor y el interior será receptor (Yáñez, 2017; Cimadevilla, 2017).

- Ventajas

Permite obtener mediciones precisas de la conductividad y la profundidad del subsuelo.

- Desventajas:

Puede haber interferencias de otras fuentes electromagnéticas en las mediciones.

- Aplicaciones habituales:

Se utiliza para la exploración de estructuras geológicas horizontales o para detectar la presencia de cuerpos conductivos.

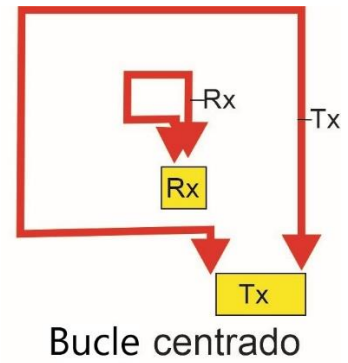


Figura 2. 37. Esquema bucle centrado.

2.2.3.4.- Bobinas separadas (figura 2.38):

El bucle emisor y el receptor están separados por una distancia fija, por lo que en caso de realizar varias medidas desplazando los bucles, estos siempre deberán mantener ese parámetro constante (Yáñez, 2017; Cimadevilla, 2017).

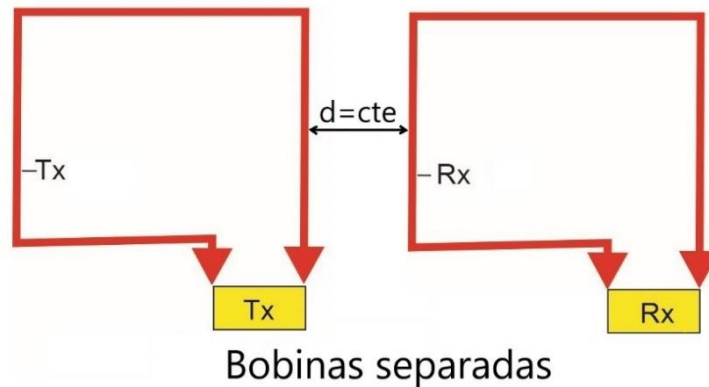


Figura 2. 38. Esquema bobinas separadas.

- Ventajas

Permite generar señales electromagnéticas más potentes y obtener mediciones precisas en profundidades más grandes.

- Desventajas:

Es más costoso y requiere más equipo que la configuración de bucle único.

- Aplicaciones habituales:

Se utiliza en la exploración de grandes áreas para identificar la presencia de objetos metálicos o estructuras geológicas.

2.2.3.5.- Transmisor fijo grande y receptor móvil (figura 2.39):

Se establece un bucle transmisor fijo de grandes dimensiones, y se realizan diversas medidas variando sólo la posición del bucle receptor (sensiblemente de menor tamaño para facilitar el desplazamiento). Las posiciones que podrá tomar el bucle receptor se ajustarán a lo largo de líneas imaginarias perpendiculares al bucle emisor (Yáñez, 2017; Cimadevilla, 2017).

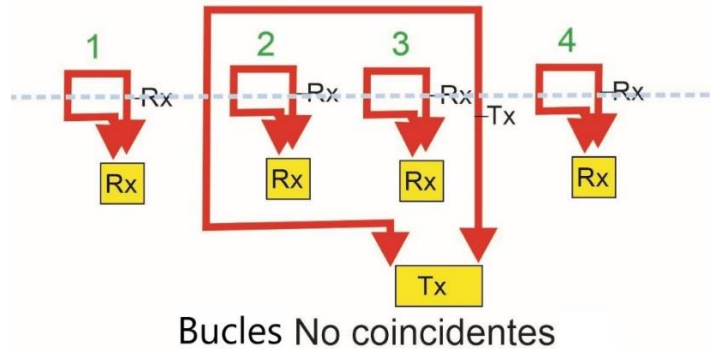


Figura 2. 39. Esquema bucles no coincidentes

- Ventajas
Permite explorar grandes áreas en un corto período de tiempo y obtener mediciones precisas en diferentes profundidades.
- Desventajas:
Puede haber interferencias de otras fuentes electromagnéticas en las mediciones.
- Aplicaciones habituales:
Se utiliza para la exploración de grandes áreas para identificar la presencia de objetos metálicos o estructuras geológicas y para la investigación de acuíferos.

2.2.4.- Descripción del equipo

Para llevar a cabo el método TDEM con los dispositivos designados previo estudio en cabina (Bucle único, Bucle centrado y Transmisor fijo/Receptor móvil), se requiere el siguiente equipo:

- Equipo Transmisor (figura 2.40):
Es el equipo que se encarga de monitorizar el amperaje, la intensidad y el tiempo de circulación de la corriente por el bucle emisor. Tiene una potencia máxima de salida de 200 W y una intensidad de corriente de hasta 10 A.



Figura 2. 40. Equipo Transmisor

- Equipo Receptor (figura 2.41):
Este equipo se encarga de registrar las señales del campo magnético secundario generado durante el ensayo. Tiene un voltaje máximo de entrada de 10 V y ofrece unos rangos de medida de entre 5 μ s-10s (modalidad TDEM).



Figura 2. 41. Equipo Receptor



Figura 2. 42. Conexión de batería

- Batería:
Se utiliza una fuente externa de 12 V para alimentar el equipo transmisor como se muestra en la figura 2.42.

- Bucles:

Los bucles son circuitos cerrados de cable que generan un campo electromagnético al circular la corriente por estos. Durante los ensayos se emplearon los siguientes bucles:

- 50m x 50m (1 vuelta)

Bobina de cable de 200m de longitud que se dispone en el terreno formando un cuadrado de 50m x 50m que se cierra empalmando el cable como se muestra en la figura 2.43.

- 20,m x 20m (1 vuelta)

Bobina de cable de 80m de longitud que se dispone de manera similar al anterior, pero con dimensiones menores.

- 0'8m x 0'8m (63 vueltas)

Este bucle viene ya cerrado y con sus dimensiones exactas al ser más pequeño y manejable (figura 2.44). A diferencia de los bucles anteriores, este cuenta con un cable que da 63 vueltas, de tal forma que al calcular el área de este bucle se realiza de la siguiente forma:

$$A = 0'8m \times 0'8m \times 63 = 40m^2$$

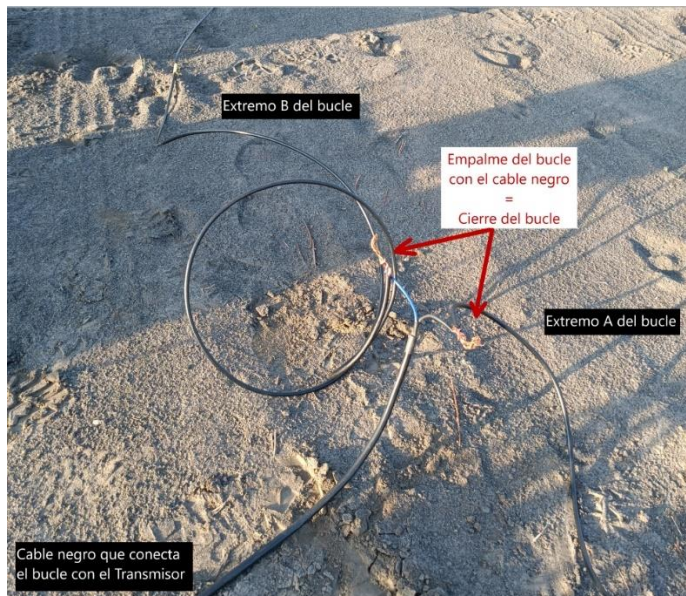


Figura 2. 43. Cierre del bucle emisor



Figura 2. 44. Bucle de 0'8m x 0'8m

- GPS emisor y receptor:

Para dispositivos diferentes al bucle único no será posible tener cerca los equipos transmisor y receptor, por lo que para poder realizar la conexión entre ambos hay dos opciones, emplear un cable de conexión muy largo, o emplear

antenas GPS o sintonizadores, conectando un dispositivo a cada equipo como se muestra en la figura 2.45.



Figura 2. 45. GPS conectado a la antena y al receptor.

- PDA (figura 2.46):

Es un dispositivo portátil que tiene instalado un software compatible con el equipo y permite definir los parámetros de cada medida: voltaje, tiempo, amperaje y el tipo de conexión (cable o GPS). Se emplea con todos los dispositivos.



Figura 2. 46. PDA y parámetros de medida.

Existen otros equipos que en este estudio no han sido utilizados pero que resulta interesante mencionar, como es el caso del sensor y el amplificador:

- Sensor:

Este dispositivo se emplea en el caso de bucle centrado cuando este es de 20x20 y el emisor es de 50x50, y sirve para cerrar el circuito del bucle pequeño y conectarlo al equipo receptor.

- Amplificador:

Este dispositivo que es capaz de amplificar por 10 la señal que recibe el bucle receptor. Esto se hace porque la señal que llega al receptor es muy débil.

Una vez presentados los equipos empleados, se explicará brevemente el método de conexión de los equipos según el dispositivo empleado:

2.2.4.1.- Conexión para bucle único

Como se puede observar en la figura 2.47, el transmisor tiene tres puertos de entrada a los que se conectan los siguientes cables:

- Cable negro + cable gris

El cable conecta directamente con el bucle. Puesto que el mismo bucle hará el papel de emisor y receptor, deberá estar conectado tanto al equipo transmisor (negro) como al receptor (gris).

- Cable azul

Se emplea para conectar el transmisor a la fuente de alimentación (batería).

- Cable blanco

Sirve para conectar al equipo transmisor con el receptor.



Figura 2. 47. Conexión de equipos para bucle único

2.2.4.2.- Conexión para bucle centrado / Transmisor grande fijo y receptor móvil.

Al igual que en el caso anterior, al transmisor le llegan tres cables (figura 2.48): el negro que conecta con el bucle (el gris no se conectará, ya que, en este caso, el bucle solo es emisor), el cable azul que conecta con la batería, y el cable blanco, que para poder conectar con el receptor, lo hará mediante un sintonizador GPS.

Por su parte, el receptor se conectará de igual forma a otro sintonizador GPS, de tal forma que se puedan vincular ambos equipos.

Además, sendos sintonizadores deberán tener conectada una antena para captar los satélites, con lo cual ambos tendrán conectados 2 cables: un cable negro para la antena, y el cable blanco que los une respectivamente al equipo transmisor o al receptor como se muestra en las figuras 2.45 y 2.48.



Figura 2. 48. Conexión GPS al Transmisor

2.2.5.- Metodología de adquisición de datos en campo

2.2.5.1.- Disposición y conexión de los equipos

Puesto que, dependiendo del dispositivo empleado, la forma de conectar el equipo emisor y el receptor puede variar, se describirá el paso a paso de la recogida de datos tanto de los métodos que emplean cable como los que emplean GPS:

Medidas realizadas con bucle único:

1. Conectar los cables conectan el transmisor y receptor al bucle de corriente, según el apartado “2.2.4.1.- Conexión para bucle único”.
2. Encender el transmisor, pulsar “START” y esperar a que reciba la señal apareciendo en la pantalla “WORK ON”.
3. Para comprobar que el circuito está cerrado, pulsar en el transmisor “STOP”, con lo que se mostrará “WORK OFF” en la pantalla. Después, pulsar “TEST” y de nuevo se pulsa “START”. Cuando aparezca “TEST ON” se encenderán los dos leds (+/-), verificando que el circuito está cerrado (no es necesario que el receptor esté encendido).
4. En el lector también podemos ver el voltaje disponible de la batería (12 V). Conviene cambiar la batería cuando esté por debajo de 11 V aunque en condiciones normales debe durar todo el día.
5. El amperaje que vamos a utilizar se cambia pulsando las dos flechas del transmisor.

En la siguiente figura se muestran los botones, la pantalla y los leds mencionados previamente:

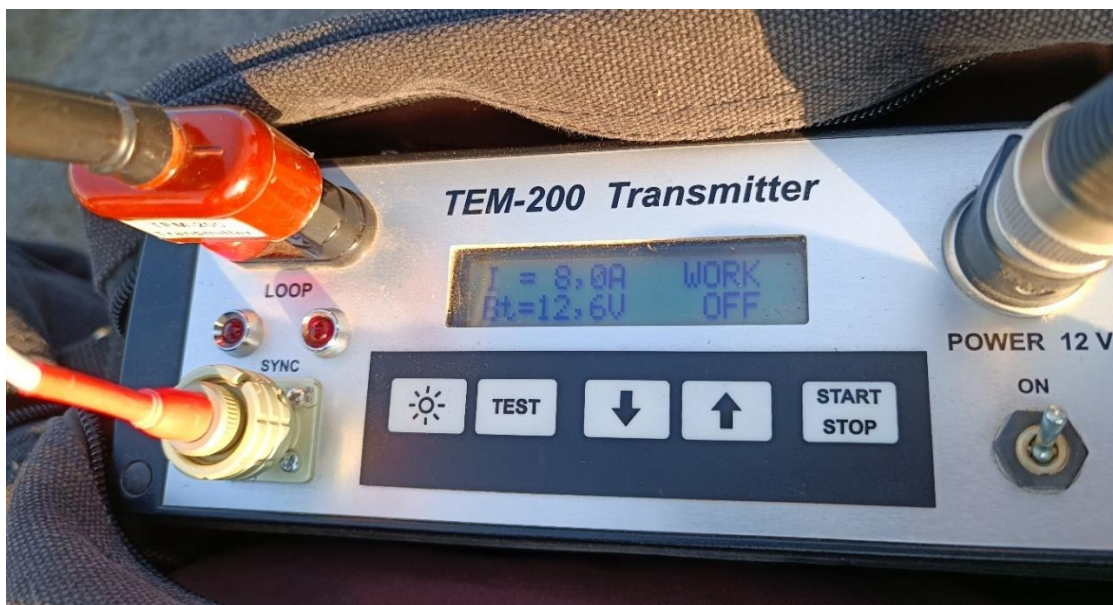


Figura 2. 49. Controles del equipo transmisor

Medidas realizadas con bucle no coincidente (bucle centrado o receptor móvil):

1. Sintonizar Transmisor/Receptor (figura 2.50):
 - a. Para sintonizar son necesarios, como mínimo, tres satélites. Si trabajando se pierde la conexión con los satélites, el equipo emite una señal de alarma

indicando la pérdida de sincronización entre receptor y emisor, no siendo posible continuar con la medición.

- b. Dentro del menú de cada uno de los sintonizadores, poner el tiempo (por ejemplo 20 ms) con las flechas y presionar “START”. Si todo está correcto, aparecerá en la pantalla un “+”.
- c. Realizar la misma operación tanto en el receptor como el transmisor.
- d. Señalar el amperaje en el transmisor (por ejemplo 10 A).



Figura 2. 50. Sintonización del Transmisor/Receptor

2. Poner el transmisor en Off mientras se monta el receptor para evitar los recalentamientos.
3. Definir parámetros en el receptor.
 - a. Verificar el mismo tiempo en los dos GPS (por ejemplo 20 ms).
 - b. Poner en la PDA la misma configuración que en el transmisor: el amperaje (10 A), el tiempo (20 ms), la posición del receptor (por ejemplo 50 m del bucle inicial), el nombre de la estación y calcular el área efectiva del receptor y el transmisor.
4. Encender el emisor.
5. Realizar la medición.

2.2.5.2.- Software de campo

En todos los dispositivos desarrollados previamente se emplea la PDA para definir los parámetros de las medidas mediante el software que tiene instalado. Por tanto, a continuación, se explicará el proceso de definición de parámetros:

1. Encender PDA y conectar Bluetooth.
2. Seguidamente se abrirá el menú principal (figura 2.51).

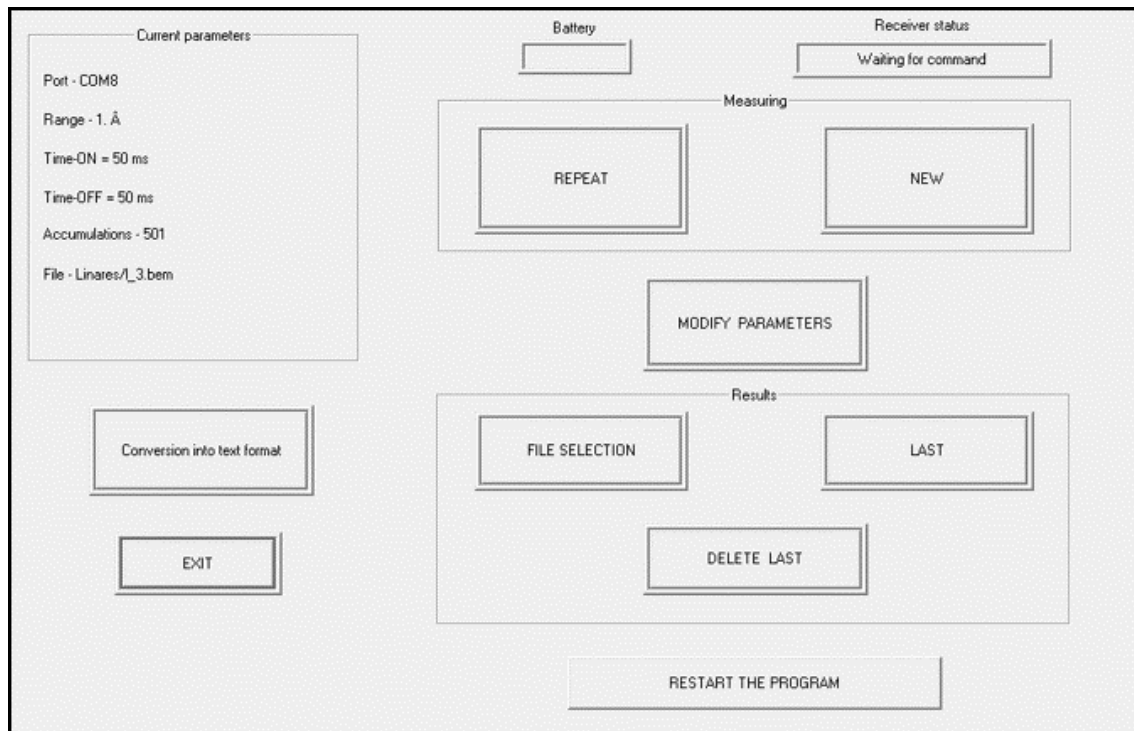


Figura 2. 51.Menú principal del software.

3. Al seleccionar “Modify Parameters” dentro del menú principal, se abrirá una ventana con las siguientes pestañas:
 - a. Pestaña “Measuring parameters” (figura 2.52):
 - i. Time-ON: Probar con varios tiempos en la misma estación, de tal manera que a más Time-On más penetración (no más de 100 ms).
 - ii. Range: la señal puede mejorar con voltajes bajos en la parte profunda, pero la parte alta no tiene medidas. Aumentar el voltaje para ver la parte más superficial.
 - iii. Accumulations: Apilamientos y/o repeticiones del pulso. Aumentar para mejorar la señal hasta un límite de 500.
 - iv. Data file: se rellena el nombre del archivo con extensión .bem y el nombre del directorio (carpeta). Al cambiar los parámetros y medir

varias veces (repeticiones) no se cambia la estación, pero se genera otro fichero.

The screenshot shows the 'Parameters setting' window with the 'Measuring parameters' tab selected. It contains the following controls:

- Range:** Radio buttons for 0.1 V, 1 V (selected), and 10 V.
- Time-ON, ms:** A text input field containing the value 50.
- Accumulations:** A text input field containing the value 501.
- Sync:** Radio buttons for Cable (selected) and GPS.
- COM-port:** A dropdown menu showing the value 8.
- Data file:** A sub-panel with a 'Name' text input field and a '.bem' extension, and a 'DIR' text input field containing the value 'Linares'.

Figura 2. 52. Measuring parameters.

- b. Pestaña “Graph parameters”:
- i. Indicar la escala de tiempos que debemos usar. Marcar escala logarítmica (Log).
- c. Pestaña “TEM configuration” (figura 2.53):
- i. Transmitter/Receiver loop square: Indicar la superficie del bucle transmisor y del bucle receptor. En el bucle único es igual en ambos.
 - ii. Starting station: valor de la primera estación.
 - iii. Station step: paso automático entre estaciones (si va a variar, mejor poner 0 y lo ponemos manual en cada medida).

The screenshot shows the 'Parameters setting' window with the 'TEM configuration' tab selected. It contains the following controls:

- Line:** A text input field containing the value 8.
- Starting station:** A text input field containing the value 750.
- Station step:** A text input field containing the value 100.
- Transmitter loop square:** A text input field containing the value 10000, followed by the unit 'sq. m'.
- Transmitter loop turns:** A text input field containing the value 1.
- Receiver loop square:** A text input field containing the value 10000, followed by the unit 'sq. m'.
- Receiver loop turns:** A text input field containing the value 1.

Figura 2. 53. TEM configuration.

4. Una vez configurados los parámetros de la estación, volver a la pantalla principal y pulsar “NEW”, y a continuación pulsar “START” para hacer la medida. Observaremos la curva de resistividad aparente/tiempo para ver la calidad de la medida.

Como resultado de la medida de campo obtenemos una curva de decaimiento de potencial. En el campo no vamos a procesarla, pero sí podemos ver su pendiente, si tiene calidad, si tiene mucho ruido...

Cuando los bucles son de grandes dimensiones, a la instalación de cada estación se le suele dedicar un tiempo importante (a veces horas). Sin embargo, la toma de la medida es rápida (minutos). Por eso, es aconsejable en cada estación tomar varias medidas, modificando las variables de Tiempo, acumulaciones, A y V.

2.2.6.- Tratamiento e inversión de datos

2.2.6.1.- Programa TEMBIN

En primer lugar, se analizarán las curvas obtenidas, seleccionando aquellas que serán procesadas en cada una de las estaciones. Para ello se emplea el programa TEMBIN puesto que permite visualizar todos los parámetros de las medidas tomadas, así como comparar varias curvas.

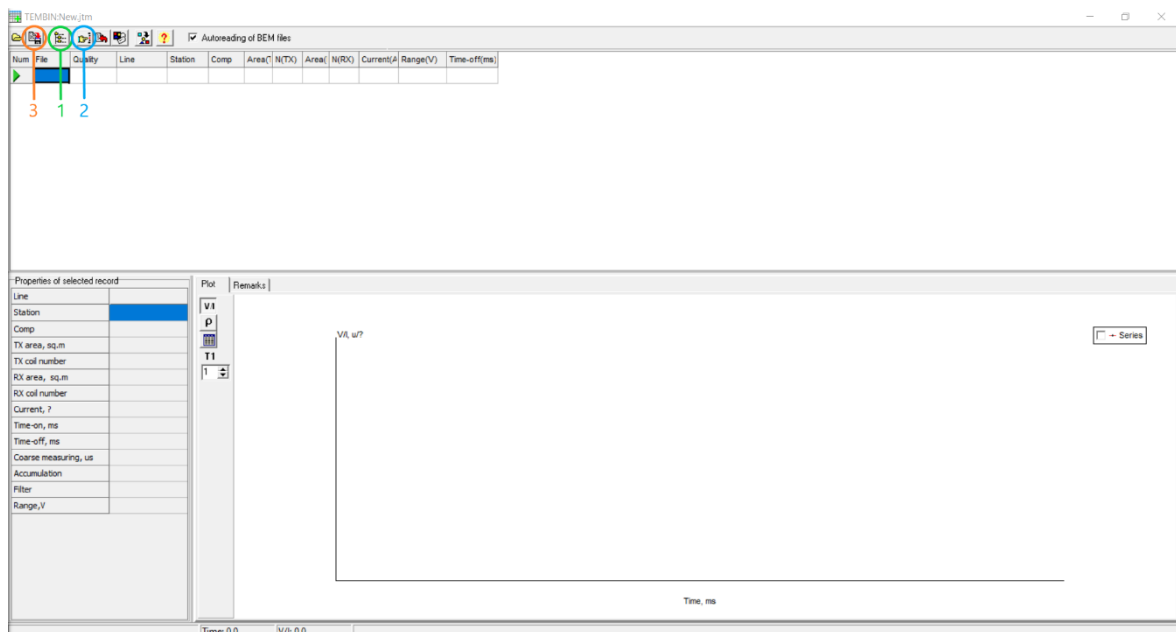


Figura 2. 54. Entorno del programa TEMBIN

De este modo, para iniciar el proceso, se deben pasar los ficheros de datos desde la PDA al ordenador, y seleccionar en el programa la ubicación de la carpeta donde se han descargado esos datos clicando en “Location of BEM files” (figura 2.54).

Seguidamente, al pinchar en “Automatic table filling” (figura 2.54), el programa lee los archivos bem que se encuentran en la carpeta y rellena la tabla (extensión bem) con los datos de la configuración/parámetros de medida.

Una vez la tabla está rellena, se procede a la corrección y selección de los datos, para finalmente ser guardados en formato texto (.jtm) pinchando en “Save Project” (figura 2.54).

2.2.6.2.- Programa ZONDTEM

Tras esa selección previa de datos, se realizará el tratamiento e inversión de los datos en ZONDTEM.

En primer lugar, se abren los archivos en formato bem (conviene tener abierto a la vez el TEMBIN para ver y seleccionar las curvas que se van a trabajar) y se marcan las coordenadas del centro del bucle (000). En lo sucesivo, las coordenadas estarán referidas a ese punto.

A continuación, pinchando en “Station settings” se definen los parámetros de la estación en las distintas pestañas que aparecen:

- Survey: Coordenadas del centro del bucle receptor y nombre de la estación
- Transmitter/ Receiver: Coordenadas de cada vértice del bucle tanto emisor como receptor (figura 2.55). En el caso de bucle centrado los parámetros serán iguales en ambas pestañas.

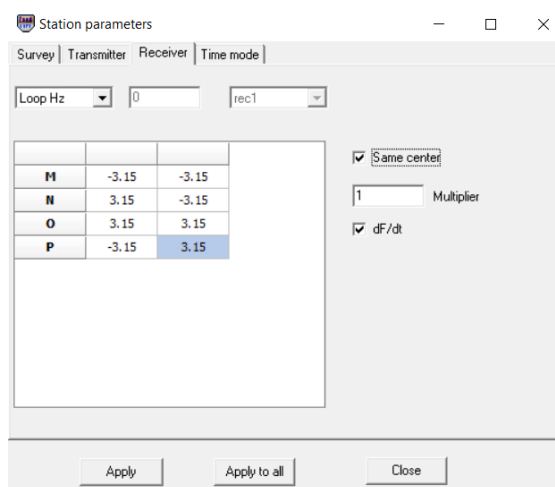


Figura 2.55. Coordenadas Receiver (ZONDTEM)

Para calcular las coordenadas de los vértices de los bucles se emplea la siguiente fórmula:

$$Coord = \frac{\sqrt{\text{Área bucle}}}{2} = \frac{\sqrt{\text{lado} \cdot \text{lado} \cdot n^{\circ} \text{ de vueltas}}}{2}$$

- Time mode: Marcar el modo “Finite pulse”, definir los Ramps times e indicar el número de pulsos (10).

Una vez terminada la definición de parámetros, se puede iniciar la edición de la curva clicando en Window > Editing style. En esta ventana se muestran las curvas de campo (figura 2.56) y podremos definir si los puntos son buenos o malos e incluso eliminarlos, para que al realizar la modelización tengan menos relevancia.

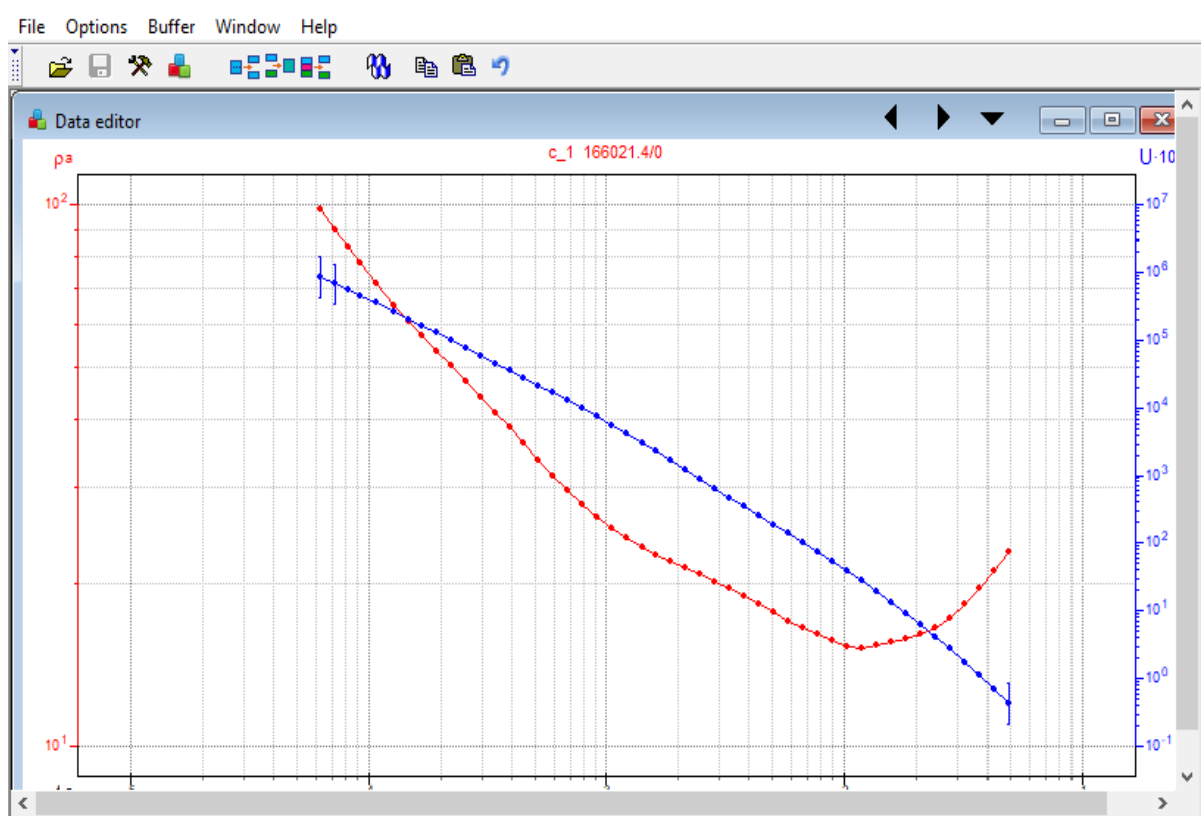


Figura 2. 56. Editing style (ZONDTEM)

Tras este primer tratamiento se puede aplicar el filtro “Smooth data” (Options > Data operations > Smooth data) que suaviza la curva, aunque hay que tener cuidado para que no varíe mucho con respecto a la realidad para no falsear datos.

Al finalizar este proceso se guarda el archivo con un nuevo nombre para no perder ni los datos originales ni las modificaciones.

Seguidamente, pulsamos Window > Interpretation style para volver a la pantalla inicial (figura 2.57) y se podrán observar tres ventanas:

- Pseudo&cross-section: Ventana de capas (modelo geológico).
- Model editor: Ventana con las curvas (curva de campo potencial y curva modelizada resistividad).
- Model table: Tabla con valores.

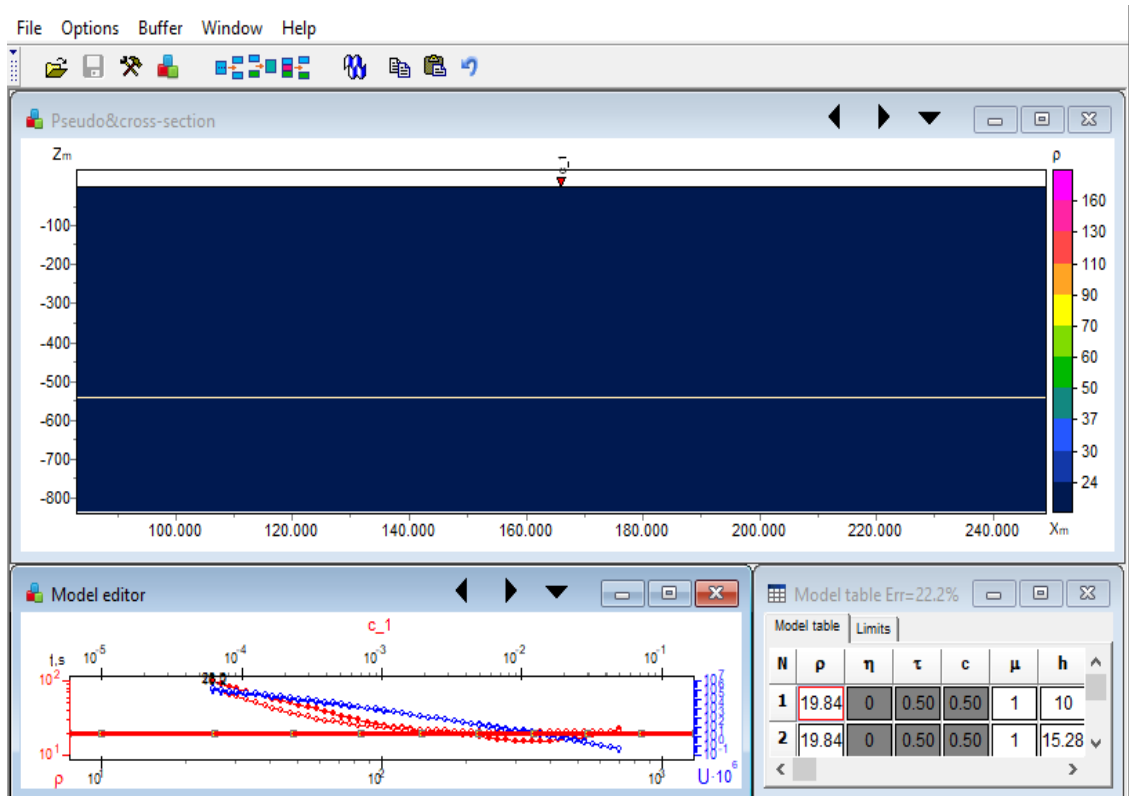


Figura 2. 57. Interpretation style (ZONDTEM)

Posteriormente se definirán los parámetros del programa pinchando en “Program setup”, y aparece una ventana donde se muestran 4 pestañas: Options, Defaults, Start model e Inversion.

- **Inversion** (figura 2.58):
 - Smoothing factor: es un dumping (grande cuando los datos sean ruidosos). Se le aplicará un valor entre 0,005 (datos buenos) y 10 (datos malos).
 - Depth smoothing: Para contactos netos aplicar un valor pequeño (p.e.:1), y para contactos graduales emplear valores altos (p.e.:10).

- Style: ajustes del programa (al principio, mejor emplear Smooth). Después, si se conoce la geología, emplear “Smooth” para varias unidades bien definidas, y si se trata de facies alternantes, emplear “NO Smooth”.
- Stop conditions: Se define el máximo de iteraciones (20) hasta alcanzar el 0,1 de RMS entre la curva real y la curva teórica.
- Threshold: relación entre dos iteraciones seguidas. Si el valor no mejora, se detienen las iteraciones.
- M0: Modelo (probar con “Start Model”).
- 1.5D: se usa para tratar varias curvas con variaciones superficiales y zona profunda uniforme.

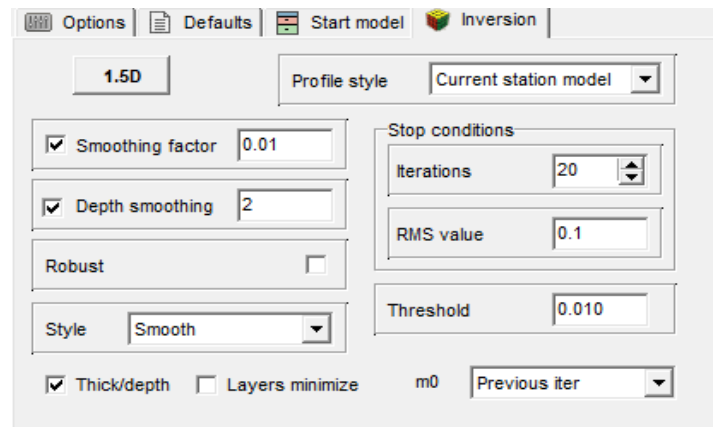


Figura 2. 58. Pestaña "Inversion" (ZONDTEM)

- **Start Model** (figura 2.59):
 - Layer number: Número de capas. Poner 10-20 capas, mejor muchas.
 - Thickness incremental factor: incremento de espesor con la profundidad.
 - Maximal Depth: La máxima profundidad (se calcula automáticamente en función de los otros dos datos) debe ser superior a la esperada para que ajuste bien.

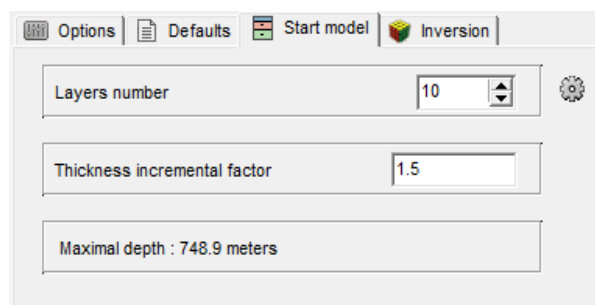


Figura 2. 59. Pestaña "Start model" (ZONDTEM)

Por último, se pincha en “Inversion run” y el programa empieza a iterar, bajando así el error. Cuando sale el modelo, los valores de resistividad no deben considerarse como datos absolutos (ver solo las tendencias, la forma de la curva).

El resultado final del procesado son tres curvas: una de voltaje residual, una de resistividades aparentes y la tercera la de resistividades tras el proceso de inversión.

2.3.- Representación cartográfica mediante QGIS.

Con el objetivo de realizar una planificación más certera a nivel gráfico además de obtener información visual con un mayor nivel de detalle y especificación para este proyecto, se ha empleado el software QGIS para generar la cartografía de este proyecto.

2.3.1.- QGIS y los Sistemas de Información Geográfica (SIG)

QGIS es una herramienta de software libre que forma parte de los conocidos Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permite la creación y edición de archivos tanto vectoriales como ráster, así como la colaboración y transformación de ambos formatos, permitiendo siempre la vinculación de estos a puntos reales del espacio (georreferenciación).

Los Sistemas de Información Geográfica son las herramientas informáticas de análisis que permiten la gestión de los datos espaciales, identificando las relaciones espaciales de los elementos que se estudian (Alonso, 2006).

Así, estos sistemas permiten que a un punto se le pueda atribuir, no sólo una ubicación (coordenadas) sino también otro tipo de información que se almacena en tablas dentro del elemento funcionando como una base de datos.

2.3.2.- Metodología del software

Para generar una cartografía se parte de un nuevo archivo de QGIS, que se crea al abrir el programa. En el menú principal se diferencian 4 zonas relevantes (figura 2.60):

- 1) Barra de herramientas: Permite gestionar propiedades de las capas y elementos de la composición, así como definir atributos de los elementos y aplicar filtros a las capas.
- 2) Visor: Permite visualizar la composición y trabajar directamente sobre los elementos creados.

- 3) Panel de capas: Permite gestionar y ordenar las capas y su visibilidad.
- 4) Barra de información: Muestra las coordenadas del cursor y el sistema de referencia empleado (en España se usa EPSG:25830).

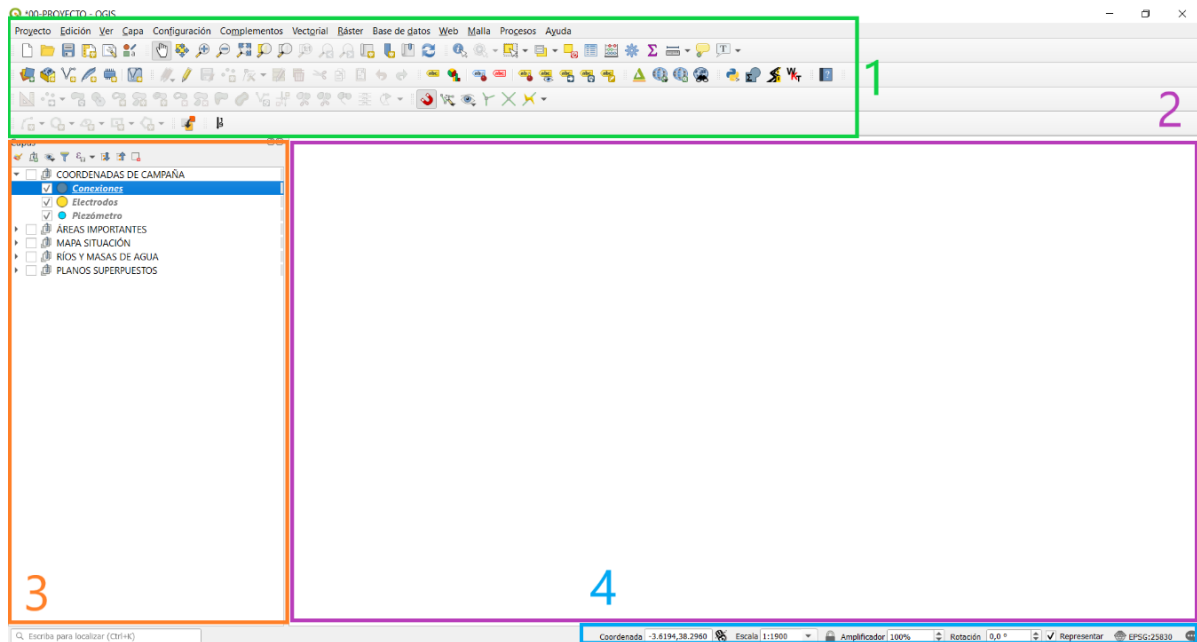


Figura 2. 60. Entorno menú principal de QGIS

Para añadir elementos, ya sean capas en formato shape que se encuentren en el ordenador como consultas de fuentes de datos públicas online (WFS o WMS), se pulsa en el primer icono de abajo a la izquierda de la barra de herramientas (“Administrador de fuentes de datos”). En el caso de los archivos que se encuentran en el ordenador, pinchamos en “Vectorial” y se busca la carpeta donde se ubican los datos en formato .shp como se muestra en la figura 2.61. Mientras que, para el caso de consultas online, dependiendo del formato se pulsará WCS o WFS (figura 2.62), se crea una consulta nueva y se debe pegar el enlace correspondiente para cada formato. Tras generar este canal de consulta, se le da a “Conectar” y saldrá un listado de todas las capas que se pueden añadir al GIS que se está editando.

La diferencia entre añadir un archivo shape y hacer una consulta en WFS o WMS es que en el primer caso se puede editar directamente la capa y los datos, pero para las consultas se debe de seleccionar e importar un fragmento de la información guardándolo como archivo shape para que estos puedan ser editados, ya que la información disponible en línea no puede ser modificada por los usuarios.

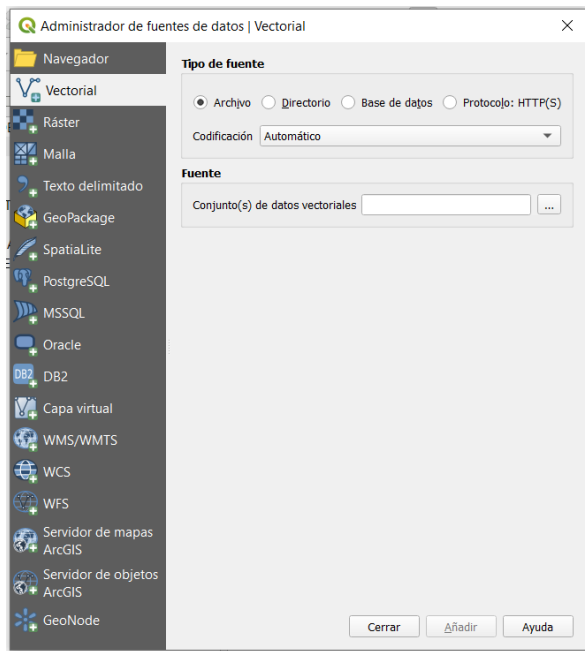


Figura 2. 61. Importar archivo .shp

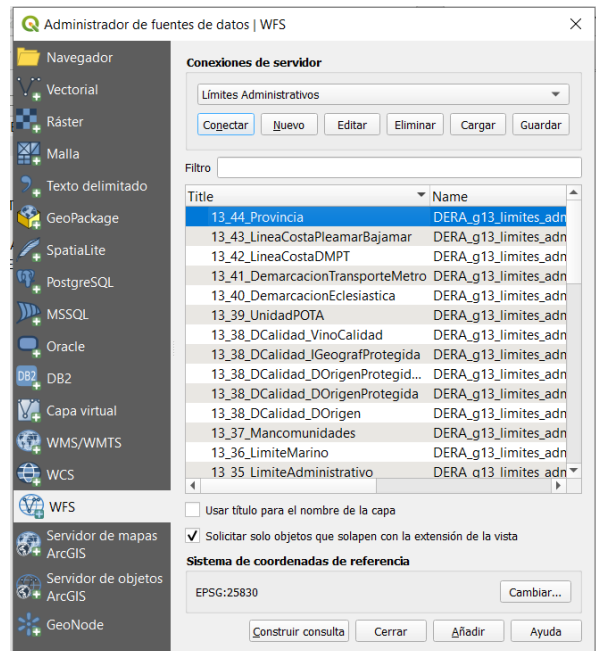


Figura 2. 62. Consulta WFS o WMS

Para crear una capa shape se pulsa el tercer icono desde la izquierda en la barra de herramientas, donde te dará la opción de elegir el tipo de información que va a contener (puntos, líneas o polígonos cerrados) y se genera una nueva capa que no contiene ningún elemento ni dato. Para añadir la información puede dibujarse o ubicarse manualmente pulsando el lápiz amarillo, o se puede cargar información como puede ser un listado de coordenadas.

Este último caso es muy útil para los trabajos de campo, puesto que, recurriendo a otra aplicación llamada gvSIG, se pueden recoger con el móvil las coordenadas en tiempo real y posteriormente exportarlas a un archivo que se cargará en la capa creada en QGIS como puntos georreferenciados.

Una vez añadidas las capas y consultas deseadas se pueden ordenar dentro del panel de capas simplemente arrastrándolas a la posición deseada, y también se pueden agrupar por carpetas para facilitar el trabajo con ellas.

Por otra parte, haciendo doble click a las capas se abre un menú de edición que te permite modificar la apariencia de las capas (colores, formas, opacidad, etiquetas...).

Otra parte muy importante es la generación de atributos y la edición de estos, que se lleva a cabo con el séptimo icono desde la derecha en la parte superior de la barra de herramientas (figura 2.60). Sin embargo, como en este caso no se requiere un tratamiento de datos muy profundo, no es necesario recurrir a su uso.

Una vez está generada la composición conforme a las necesidades de consulta que se tengan para el proyecto, se puede exportar como plano la vista actual. Para ello se debe acceder al menú de edición de planos pinchando en: Proyecto > Administrador de composiciones > Nuevo (figuras 2.63 y 2.64)

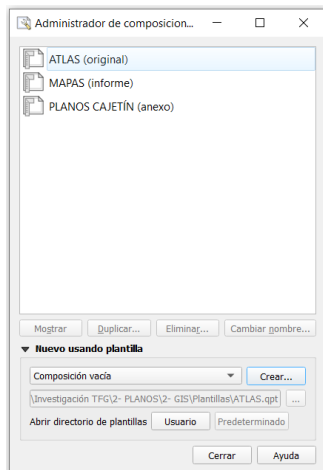


Figura 2. 63. Administrador de composiciones

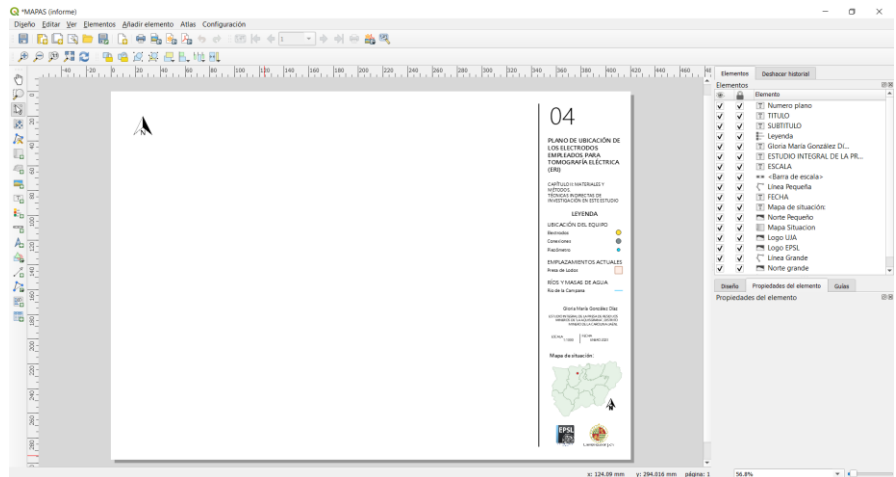


Figura 2. 64. Composición del plano

En este menú (figura 2.64) se puede generar una plantilla de plano para que todos los planos tengan el mismo formato. En este entorno se encuentra la barra de herramientas a la izquierda, el panel de capas a la derecha, y en el centro el visualizador.

Con el panel de herramientas se van añadiendo elementos (figuras, planos, etiquetas...) y se disponen para formar el diseño deseado, modificando las propiedades de cada elemento en el desplegable que se crea debajo del panel de capas.

Tras haber generado el diseño deseado, se exporta en formato PDF y se guarda tanto la composición como el archivo GIS.

CAPÍTULO 3: TRABAJO DE CAMPO

3.1. Campaña de Tomografía Eléctrica (ERI)

Durante la jornada del 17 de febrero de 2022, tras haber realizado el pertinente estudio y planificación en gabinete, se realizó la campaña de Tomografía Eléctrica en la presa de lodos de La Aquisgrana.

El objetivo de la campaña era, además de estudiar el residuo depositado, identificar el contacto entre el material depositado y el basamento natural para definir con mayor precisión dicha discontinuidad, no claramente definida en estudios previos (J. Martínez de los años 2012 y 2015).

En estos estudios, las dificultades encontradas fueron debidas, por una parte, a una elevada conductividad en ciertas zonas del zócalo, , que imposibilitaba un contraste de resistividades suficientemente claro entre el residuo y el terreno natural. Por otra parte, el rango de profundidad alcanzado en el ensayo fue insuficiente, ya que, por las características del método empleado, se llega al máximo de profundidad proyectada en el centro de la sección, pero en los laterales la profundidad de investigación decrece paulatinamente, creando zonas de “sombra” en las que no se recoge información, y por ello no se llegó con suficiencia a la profundidad del zócalo.

La forma de incrementar los datos en profundidad de los extremos es hacer la traza de estudio de una mayor longitud, aunque esta solución se puede ver limitada por la orografía del entorno, como es el caso del emplazamiento analizado.

Partiendo de esa información, para este estudio se tomó la máxima longitud posible, resultando una traza de 384 m. A lo largo de esta traza se dispusieron 64 electrodos impolarizables, dejando entre ellos un paso de 6 m. En la figura 3.1 se muestra la disposición de los electrodos en el terreno.

Al llegar al emplazamiento, consultando las cartografías diseñadas previamente, se marcó la ubicación del inicio de la traza con el primer electrodo. Para la colocación de todos los electrodos fue necesaria la colaboración de 4 operarios, de tal forma que una persona se encargaba de medir las distancias de paso entre electrodos, excavando un pequeño hoyo de

unos 7 cm de profundidad, donde la siguiente persona introducía los electrodos, los enterraba parcialmente y los regaba para mejorar la conductividad del electrodo (figuras 3.2 y 3.4).



Figura 3. 1. Plano de ubicación de los electrodos empleados para Tomografía Eléctrica (ERI)



Figura 3. 2. Implantación del electrodo.



Figura 3. 4. Regado del electrodo.



Figura 3. 5. Conexión del electrodo a la caja y con el cable.



Figura 3. 3. Extensión del cable.

Seguidamente otro operario cargaba con las perchas del cableado e iba colocando los conectores próximos a los electrodos ya implantados (figura 3.3), y por último, otro operario

se encargaba de conectar todos los electrodos a los conectores (figura 3.5), recoger las fundas de los electrodos y tomar las coordenadas de cada uno con el programa gvSIG.

Una vez colocados y conectados los electrodos, se conectó el tomógrafo al convertidor y la batería como se muestra en las figuras 3.6 y 3.7.



Figura 3. 6. Tomógrafo.



Figura 3. 7. Baterías y convertidor.

Seguidamente, se configuró el Tomógrafo rellenando los siguientes parámetros:

- Available electrode string (figura 3.11): Familia de cables de la 00 a la 03.
- Field geometry (figura 3.8):
 - Longitud de la traza = 384 m
 - Paso = 6 m
- Electrode configurations (figura 3.12):
 - Dispositivo Wenner-Schlumberger
 - Electrode spacing A

	Wenn -Sch (1)	Wenn -Sch (2)	Wenn -Sch (3)	Wenn -Sch (4)	Wenn -Sch (5)
min	1	6	12	18	24
max	5	11	17	23	29

- Injection voltaje (figura 3.10): External 800 Voltios
- Injection time (figura 3.13):

Inject. On	Inject. Off	Delay On	Delay Off	Internal M
1024 ms	1024 ms	10 ms	10 ms	1000 ms

- Valid data range (figura 3.14):

	min	max
Self Potential (mv)	-200	200

- Binary trace export options (figura 3.9): all cycles

Field geometry

Inline dimensions

Min. x: m

Max. x: m

Delta x: m

OK Cancel

Figura 3. 8. Field geometry

Binary Trace Export Options

Trace export

☐ no export

☐ stacked cycles

☒ all cycles

Average

Number of averaged points:

OK Cancel

Figura 3. 9. Export options

Injection voltage

Injection voltage

☐ No Injection

☐ Only grounding

☐ Internal (24 - 600 Vp-p) Vp-p

☒ External (max 880 Vp-p) Vp-p

OK Cancel

Figura 3. 10. Injection voltage

Available electrode strings

String	State
000	in field
010	in field
020	in field
030	in field
040	not in field
050	not in field
060	not in field
070	not in field
080	not in field
090	not in field
0A0	not in field
0B0	not in field
0C0	not in field

In field Not in field

OK Cancel

Figura 3. 11. Familias de cables

Select and configure electrode configurations

Select electrode configuration and activate layout

Activate layout: ☐ Normal ☐ Reverse

Select configuration:

Electrode spacing a

min: max: delta:

Electrode spacing b

min: max: delta:

External electrode C1/P1

x: m y: m

External electrode C2/P2

x: m y: m

normal P2/CP C1 no reverse

OK Cancel

Figura 3. 12. Electrode configuration

Injection timing

Timing Diagram (1 cycle)

Injection timing

Injection on: ms Delay U.I.: ms Interval M: ms

Injection off: ms Delay M: ms Subintervals:

Cycles:

OK Cancel Redraw Filter

Figura 3. 13. Injection timing

Valid data range

Current I [mA] ☒ Min: ☒ Max:

Voltage U [mV] ☒ Min: ☒ Max: ☒ Absolute value

App. resistivity ρ [Ω m] ☐ Min: ☐ Max: ☐ Absolute value

Self potential S [mV] ☒ Min: ☒ Max: ☐ Absolute value

Figura 3. 14. Valid data range

Tras completar la configuración, se debe poner el conmutador del convertidor en el 3, y ya puede comenzar la lectura.

Puesto que este ensayo dura varias horas dado el elevado número de medidas tomadas, en ese tiempo se aprovechó para ir a recoger muestras de agua tanto al sondeo mecánico (figura 3.15) ubicado en “1” en la figura 3.1 como al río Campana (figuras 3.16 y 3.17), mientras que el operador permanece en el equipo.



Figura 3. 15. Recogida de muestras de agua en el sondeo mecánico.



Figura 3. 16. Salida del desagüe de la presa



Figura 3. 17. Encuentro de agua limpia y contaminada

Junto con las muestras de agua se tomaron medidas in situ de temperatura y conductividad. Los datos obtenidos del análisis químico de las muestras se comentaron en apartados previos, pero no se desarrollarán en profundidad en el próximo capítulo puesto que no forma parte de los objetivos del estudio.

Al finalizar las lecturas se desconectaron y recogieron los equipos, y por último se lavaron uno a uno todos los electrodos para su correcto mantenimiento y almacenaje.

3.2. Campaña de TDEM

3.2.1.- Dispositivos, estaciones y medidas.

Durante la jornada del día 10 de marzo de 2022 se llevó a cabo la campaña de TDEM en el emplazamiento de estudio.

Previo al día de campo se diseñaron en gabinete los parámetros más interesantes para el estudio, incluyendo disposición, dimensiones, número de medidas, dispositivos y total de estaciones. En la figura que se muestra a continuación se puede observar la disposición de las 14 estaciones realizadas durante la campaña (plano disponible en el Anexo II).

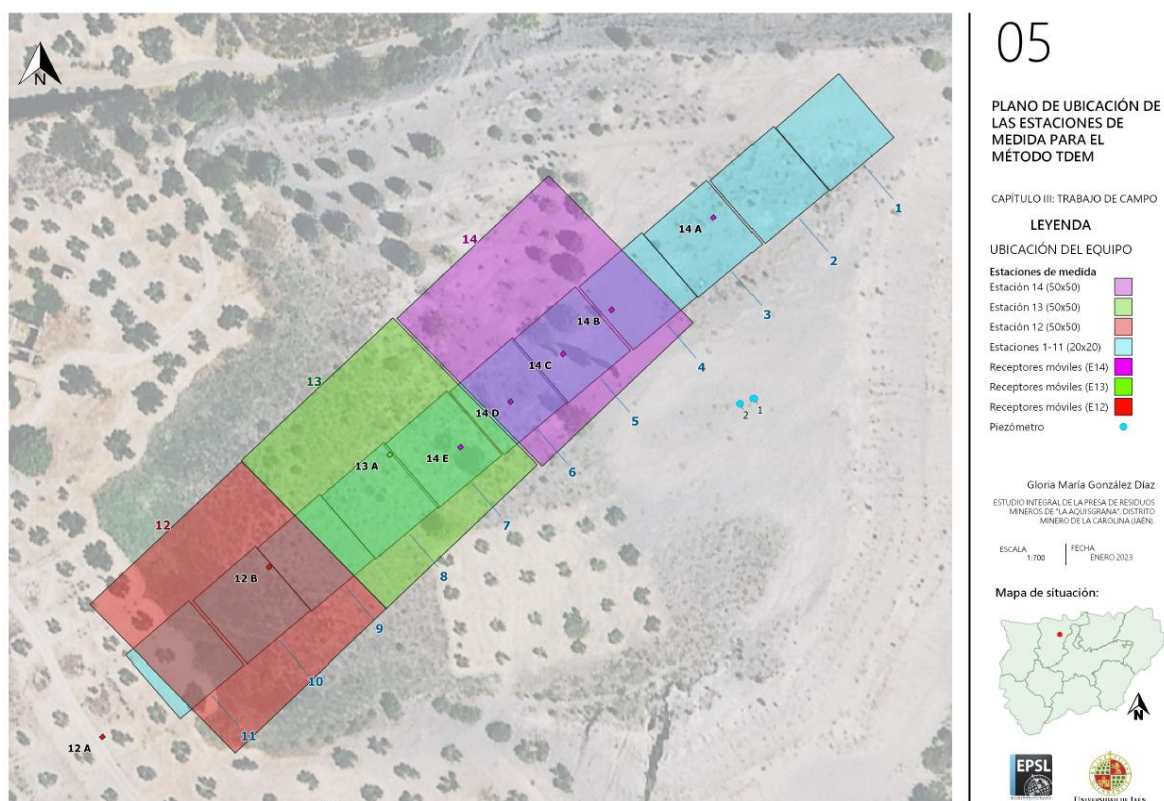


Figura 3. 18. Ubicación de las estaciones para la campaña de TDEM

En las estaciones de la 1 a la 11 (color azul en la figura 3.18) se empleó un bucle emisor de 20x20 m, y aprovechando la disposición de este, se realizaron 4 medidas para el dispositivo de bucle único y otras 4 para el de bucle centrado, siendo el receptor un bucle de 0'8x0'8 m.

Seguidamente se hicieron 3 estaciones con bucle emisor de 50x50 m, realizando en cada una de ellas 4 medidas para bucle único y para el bucle emisor fijo con receptor móvil, se tomarían 2 medidas para cada una de las diferentes ubicaciones de este.

Una vez realizadas las medidas de la 1 a la 11, que aseguran los valores estrictamente necesarios de la sección a estudiar, se decidió realizar las 3 últimas estaciones con un bucle mayor para intentar mejorar la calidad de los datos, así como investigar en profundidad ciertas zonas de interés como son: La zona de posible falla en la estación 12 (rojo), la zona de cañaveral en la estación 13 (verde) y la zona de máximo espesor de la presa en la estación 14 (rosa).

Para cada estación y dispositivo se realizaron varias medidas en las cuales se iban modificando los parámetros de las medidas, los cuales se pueden observar en el Anexo I. En él se muestran las tablas donde figuran los parámetros empleados en cada una de las medidas mencionadas de las 14 estaciones (tabla I.1 a I.13), dentro de las cuales se aprecia la siguiente información:

- File: Nombre de identificación de la medida.
 - Está compuesta de la siguiente forma: “Xaquisgrana_Y.bem”, siendo X el número de estación e Y el número de medida dentro de la estación.
- Area(TX): Área del bucle emisor.
 - Bucle 20x20 $\rightarrow A = 20\text{m} \cdot 20\text{m} \cdot 1 \text{ vuelta} = 400 \text{ m}^2$.
 - Bucle 50x50 $\rightarrow A = 50\text{m} \cdot 50\text{m} \cdot 1 \text{ vuelta} = 2500 \text{ m}^2$.
- Area(RX): Área del bucle receptor.
 - Bucle 0,8x0,8 $\rightarrow A = 0,8 \text{ m} \cdot 0,8 \text{ m} \cdot 63 \text{ vueltas} = 40 \text{ m}^2$.
 - Cuando se trata de bucle único TX y RX serán iguales.
- Current(A): Amperaje.
- Range(V): Voltaje.
- Time-off(ms): Tiempo de inyección.

Durante los ensayos de TDEM es común realizar numerosas medidas variando el amperaje y el voltaje con el mismo bucle, ya que la formación del bucle requiere mucho tiempo, mientras que la toma de medidas no. De este modo, al probar diferentes combinaciones de parámetros se están cubriendo mayores rangos de información, y resulta una visión más completa del estudio.

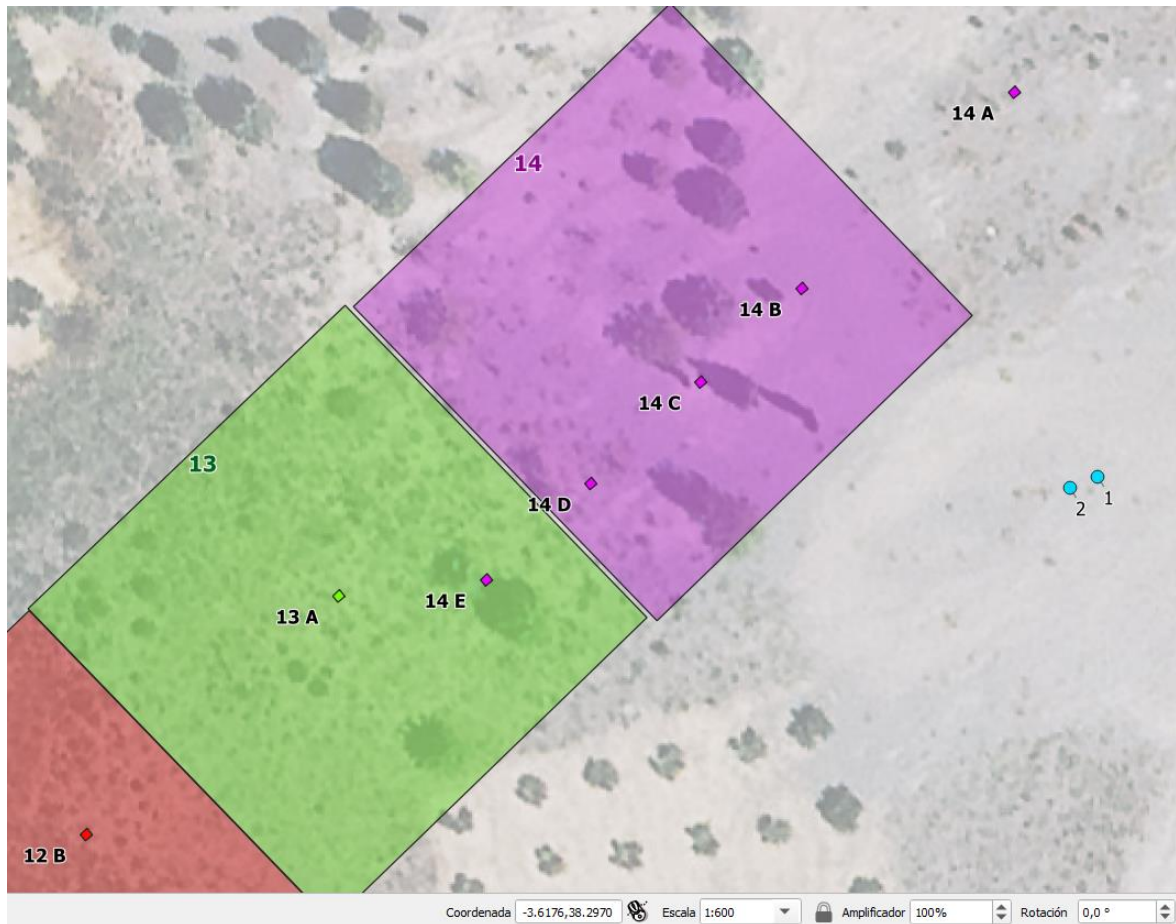


Figura 3. 19. Detalle de la ubicación de los bucles receptores de las estaciones 13 y 14.

3.2.2.- Descripción del desarrollo de la jornada

Al llegar al emplazamiento de estudio se cogió el equipo y se ubicó el primer bucle emisor de 20x20 m. Como ya se explicó en capítulos anteriores, el bucle es un cable de 80 m de longitud, que se dispone en forma de cuadrilátero con 20 m de lado. Dada la gran envergadura el bucle es necesaria la colaboración de 4 operarios en el proceso, haciendo 3 de ellos el papel de pivote para mantener fijas las esquinas del bucle, mientras el cuarto estira el cable hasta la siguiente posición (figuras 3.20 y 3.21).

También cabe la posibilidad de clavar estacas para que hagan el papel de pivote, sin embargo la mayoría de las veces se caen, además de suponer un incremento de tiempo el hecho de tener que clavarlas y desclavarlas para cada bucle creado.

Las bobinas empleadas para construir los bucles de 20x20 m y de 50x50 m tienen unas marcas realizadas con adhesivo donde se deben ubicar las esquinas del polígono, es decir, cada 20 y 50 m respectivamente, lo cual evita tener que emplear la cinta métrica cada vez que se forma un bucle nuevo.



Figura 3. 20. Operario (observador) haciendo la función de pivote.



Figura 3. 21. Tres operarios haciendo la función de pivotes.

Una vez se ha cerrado el cuadrado se deben conectar los equipos al bucle conforme se detalla en el apartado 2.2 de este estudio, empleando la configuración para bucle único, que será el primer dispositivo empleado en todas las estaciones.

Seguidamente, y sin mover el bucle emisor, se cambiará el equipo a la configuración con GPS, empleado para los dispositivos de bucle centrado, empleado para las estaciones de la 1 a la 11, y de receptor móvil, empleado en las estaciones 12, 13 y 14.

En estas últimas se emplea receptor móvil en vez de bucle centrado porque dada la gran superficie que ocupa el bucle emisor en estos casos, resulta más interesante poner el foco de análisis en diferentes puntos estratégicos, que aportarán una información mucho más interesante y esclarecedora que la que aportaría simplemente el centro del bucle.

Finalizadas todas las medidas previstas en la estación, en lugar de desplazar todo el bucle, se toman los dos vértices de los extremos y se desplazan en dirección hacia la siguiente estación, que dando fijos los dos vértices interiores, que actúan a modo de charnela y por tanto, comparten su posición con los vértices exteriores de la siguiente estación.

Este proceso se repitió hasta finalizar la estación número 11 empleando el bucle emisor de 20x20, y para las últimas tres estaciones con el bucle de 50x50.

La única diferencia de la forma de trabajo de las últimas 3 estaciones respecto a las anteriores es que se tomaron medidas en varias subestaciones, donde se iba modificando la posición del bucle receptor, pero se sigue el mismo proceso durante todas las medidas. En la siguiente figura se observa a la autora configurando los parámetros para las medidas de bucle centrado.



Figura 3. 22. Configuración y toma de medidas para bucle centrado.

Una vez finalizada la toma de datos de todas las estaciones, se recogió todo el equipo sin necesidad de realizar labores de mantenimiento del mismo en el proceso. Los datos fueron exportados en gabinete desde la PDA al ordenador.

3.3. Toma de coordenadas y generación de la cartografía

3.3.1.- Desarrollo cartográfico

La generación de cartografía para este proyecto ha estado principalmente dividida en dos partes, por un lado, la elaboración en sí de la cartografía, y por otro, el diseño y exportación de planos.

En la etapa de elaboración cartográfica se ha procedido a la recopilación e incorporación de información al GIS, caracterizándola y ordenándola de tal forma que se puedan observar todos los elementos necesarios a la escala adecuada y sin dificultades visuales (figura 3.23). En este punto se han importado datos de diversas fuentes, que se desarrollará en el siguiente subapartado, y se han generado muchas otras capas como producto del tratamiento de esas fuentes o a partir de información propia.

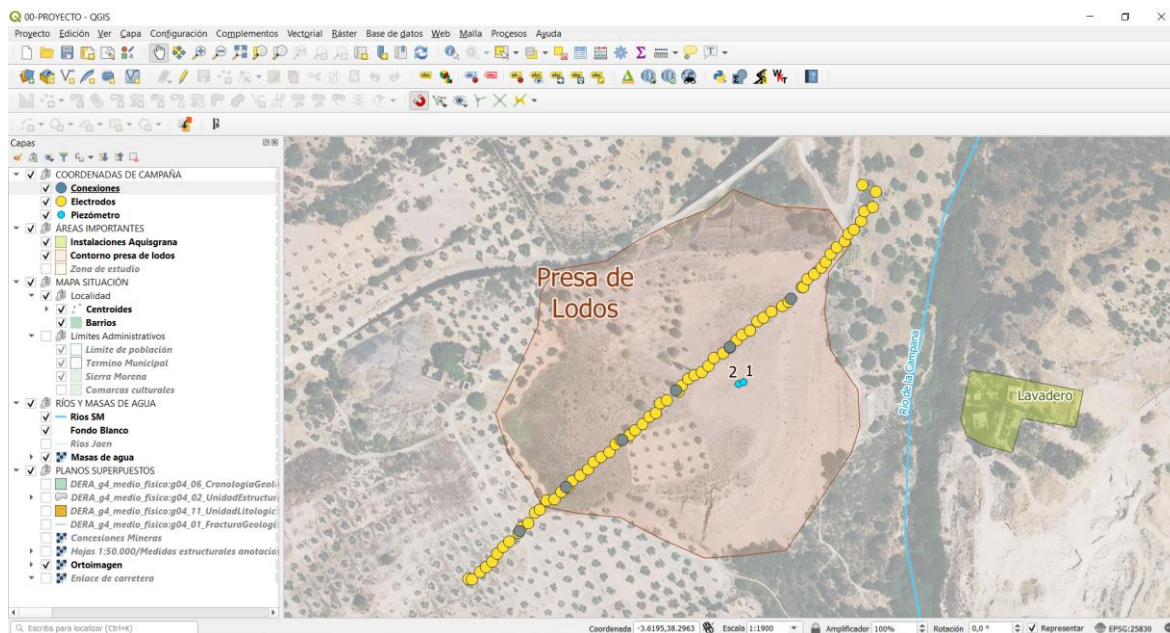


Figura 3. 23. Área de trabajo de QGIS (panel de capas a la izquierda).

Una vez generadas las capas, caracterizadas y ordenadas, se procedió al diseño de dos formatos diferentes para la exportación de la cartografía: uno para adjuntar imágenes en el desarrollo del texto (figura 3.24) y que estas se pudieran ver de forma ampliada, pero

disponiendo siempre de una leyenda para facilitar el entendimiento de lo que se muestra; y otro para la exportación del plano (figura 3.25) que será posteriormente adjuntado en los anexos, y que para el caso, sí cuenta con el cajetín oficial.

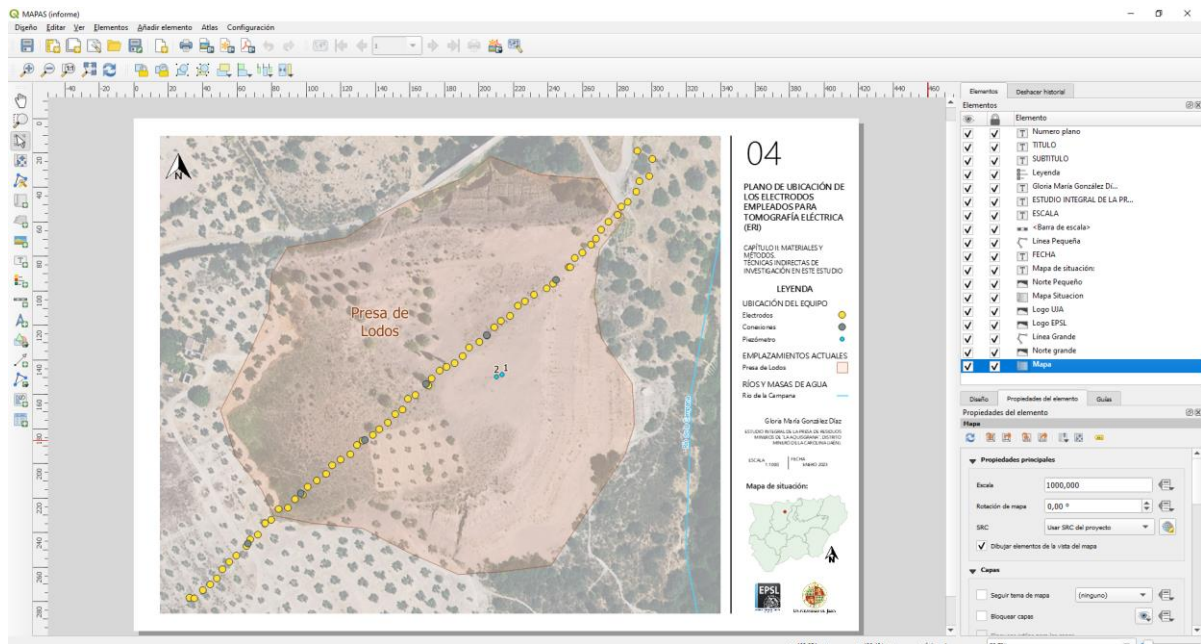


Figura 3. 24. Menú de edición de composiciones. Diseño para informe.

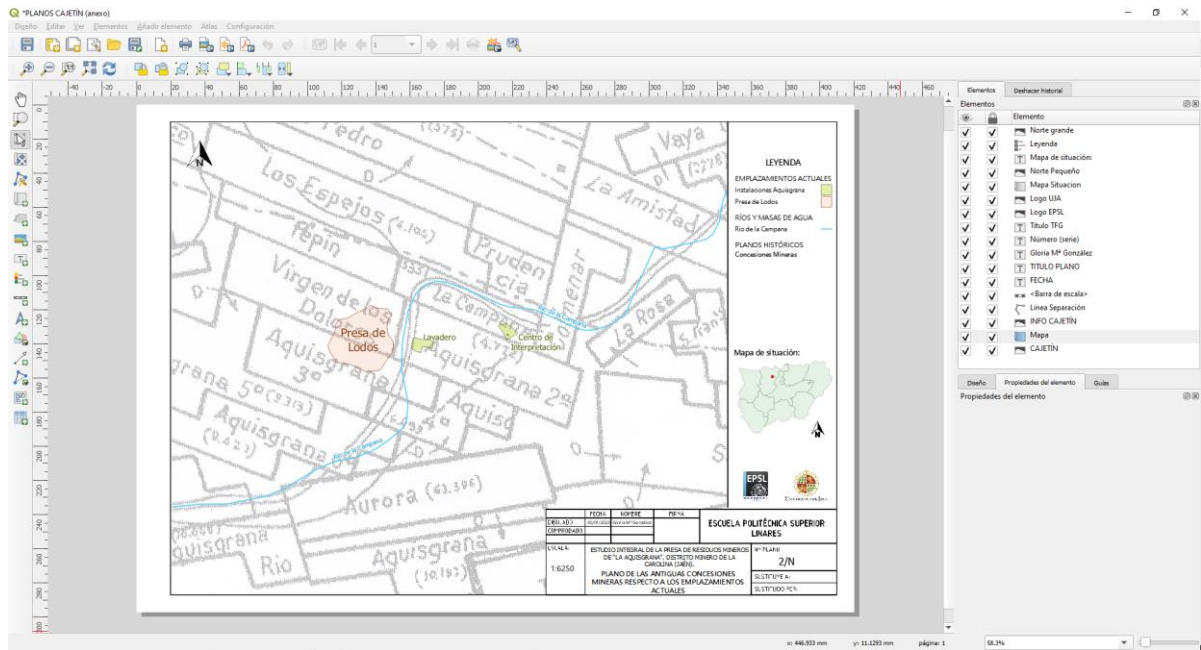


Figura 3. 25. Menú de edición de composiciones. Diseño para planos.

Cabe destacar que, aunque la generación de una cartografía propia requiere la inversión de muchas horas, se ha considerado necesaria debido a la calidad y cantidad de datos que ofrece.

3.3.2.- Fuentes de datos

Para generar las diversas capas de la cartografía empleada en este estudio, se ha utilizado información de diversas fuentes:

- Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (DERA):

Al encontrarse el emplazamiento de estudio dentro de Andalucía, se puede disponer de una amplia base de datos online de acceso público. Esta fuente ha sido empleada para la creación de capas de los límites administrativos de La Carolina, la hidrología de la zona, las carreteras y las comarcas de la provincia de Jaén mediante la generación de capas en formato shape a partir de información WFS (Web Feature Service).

- Infraestructura de Datos Espaciales de España (IDEE):

Es una fuente de datos en formato WMS (Web Map Service) que no permite ser recortada y tratada como es el caso de la información WFS, por tanto, no se han podido generar archivos de menor peso en formato shape, sino que se emplea la capa a modo de consulta. Este es el caso de las masas de agua (lagos y embalses) y los enlaces de las carreteras.

- Instituto Geográfico Nacional (IGN):

Al igual que en el caso anterior, la información proporcionada se encuentra en formato WMS, y es el caso de la Ortoimagen que ha servido de base para ubicar todas las labores del estudio de forma más visual.

- Instituto Geológico Minero de España (IGME):

Hoja del MAGNA 50 perteneciente a La Carolina en formato WMS.

- GV-SIG (generación propia de datos):

Se trata de una aplicación para móvil que permite tomar las coordenadas in situ de los puntos que se marcan. Para ello, se descarga en el móvil la app GvSIG Mobile, y pinchando en el primer icono de la izquierda (figura 3.26) y se abre un menú que permite definir los datos de la coordenada que se está tomando, así como cargar formularios previamente generados para rellenar diferentes tipos de información dependiendo del elemento que estés registrando (6 botones inferiores de la figura 3.27).

De este modo, se tomaron las coordenadas de cada uno de los equipos dispuestos para los ensayos, así como de los sondeos realizados en la presa años antes, y la aplicación permitía visualizar los puntos registrados sobre un mapa, aunque por fallos de compatibilidad de versiones en mi caso sólo se veía un fondo blanco.

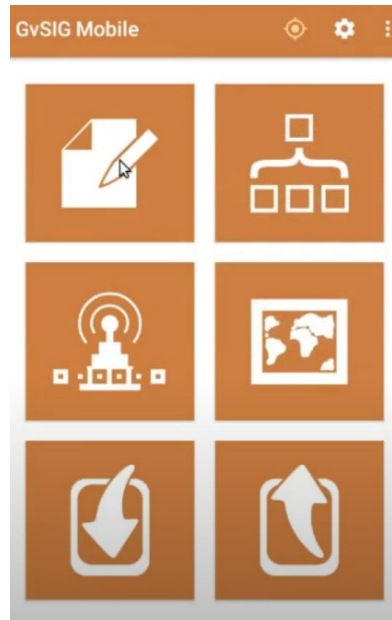


Figura 3. 26. Menú principal de GvSIG Mobile

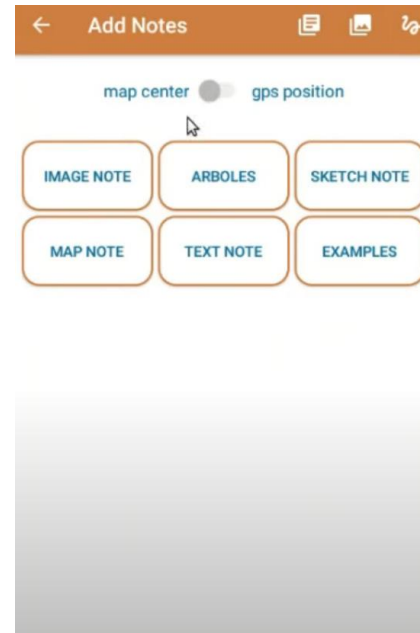


Figura 3. 27. Menú de registro de coordenadas de GvSIG Mobile

Tras la toma de datos, estas medidas se exportaron y posteriormente se importaron en QGIS generando una capa shape.

- Georreferenciación de imagen (generación propia):

Puesto que era muy difícil encontrar recursos online para consultar las concesiones mineras la La Carolina, se escaneó el plano de concesiones perteneciente al libro “Minería de Sierra Morena” de Gutiérrez Guzmán, se pasó a formato JPG y se georreferenció la imagen de tal forma que puntos destacables del río Campana del esquema coincidieran lo mejor posible con el curso real del río, generando así una capa ráster que permitió ubicar las instalaciones actuales de La Aquisgrana dentro del plano de concesiones de la época. Esto supuso una fuente de información muy interesante, puesto que en ningún libro se llega a especificar a qué concesión pertenece la actual ubicación de los restos del yacimiento.

- Generación propia de capas shape:

Durante el recorte y transformación de capas WFS se generan capas shape, pero no es la única forma. También se han generado dibujando directamente

polígonos en nuevas capas para marcar adecuadamente los contornos de la presa de lodos, las instalaciones de La Aquisgrana y la zona de estudio.

3.3.3.- Aplicaciones de QGIS en este proyecto

Como se dijo al inicio de este apartado, QGIS ha permitido la generación de una cartografía mucho más específica para el estudio y los temas que se han ido desarrollando a lo largo del mismo, dando lugar a figuras ilustrativas que facilitan la descripción y el desarrollo del texto, aportando un soporte visual para el lector y facilitar su comprensión, como es el caso de la Figura 1, entre otras. Estas figuras no tienen por qué aparecer en los anexos, puesto que carecen de detalle o información en exceso, y ya han cumplido su cometido ilustrando el texto. Sin embargo, hay otras figuras, que por su grado de detalle, cuantía de información y su relevancia, es necesario observarlas a mayor escala, y por tanto requiere la generación de un plano acorde con la normativa vigente.

Pero más allá de la mera representación gráfica, se ha empleado este programa como herramienta durante la investigación para discernir las concesiones mineras que ocupan las actuales instalaciones, así como para diseñar y visualizar las labores que se llevarían a cabo en las jornadas de trabajo de campo.

Cabe destacar que en colaboración con este software también se ha empleado la información aportada por Google Earth Pro, que permite visualizar la superficie en relieve, además de obtener secciones con la altimetría del trazado realizado.

A pesar de las posibilidades que ofrecía este último software, se decidió emplear QGIS dada su versatilidad, aplicabilidad y compatibilidad para dar soporte a todas las fuentes de información mencionadas.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Tomografía Eléctrica: Discusión e interpretación de los resultados

4.1.1.- Valores de Resistividad

4.1.1.1.- Procesado de datos

Durante el procesado de los datos se puede apreciar cómo va variando la distribución de áreas conductoras y resistivas con cada iteración hasta llegar a la interpretación del modelo. En los siguientes gráficos se muestra un ejemplo de los modelos obtenidos en la 3ª, 4ª y 6ª iteración, donde se pueden apreciar dichas variaciones.

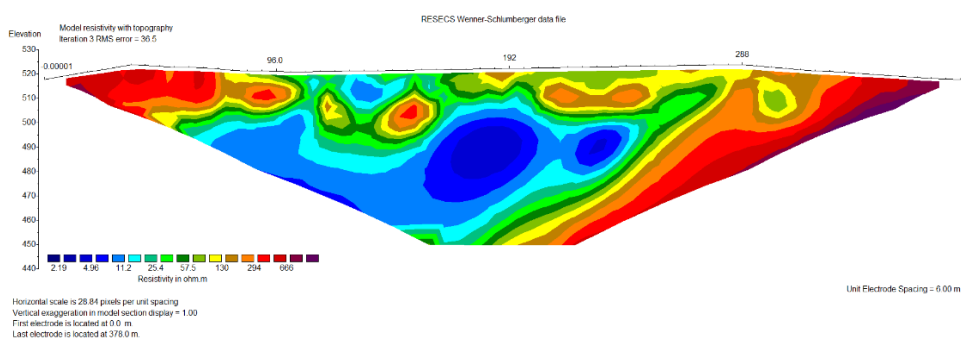


Gráfico 4. 1. Resistividad del terreno (Iteración 3)

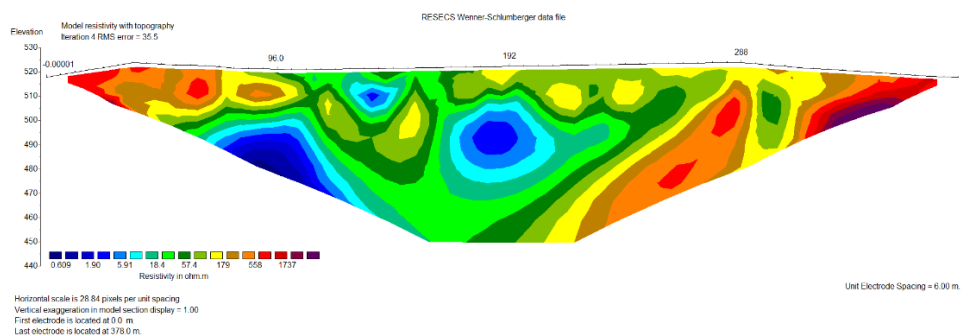


Gráfico 4. 2. Resistividad del terreno (Iteración 4)

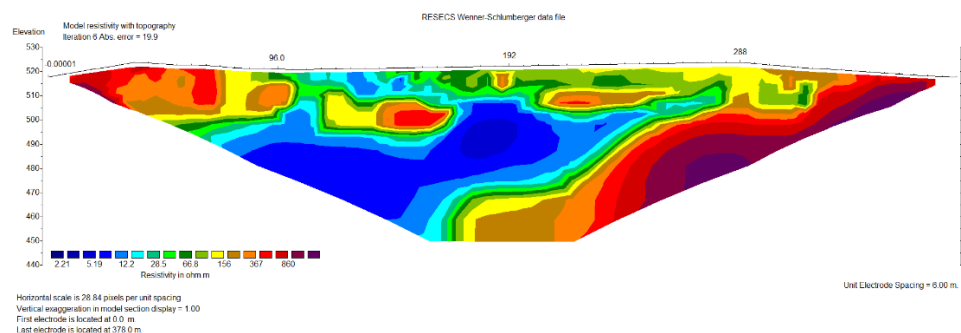


Gráfico 4. 3. Resistividad del terreno (Iteración 6)

Una vez terminado este proceso se escoge el modelo que se estima más próximo a la realidad teniendo en cuenta los antecedentes del emplazamiento, poniendo especial atención a la geología y la orografía conocidas.

De este modo, el modelo seleccionado como más representativo en este estudio es el que se muestra a continuación:

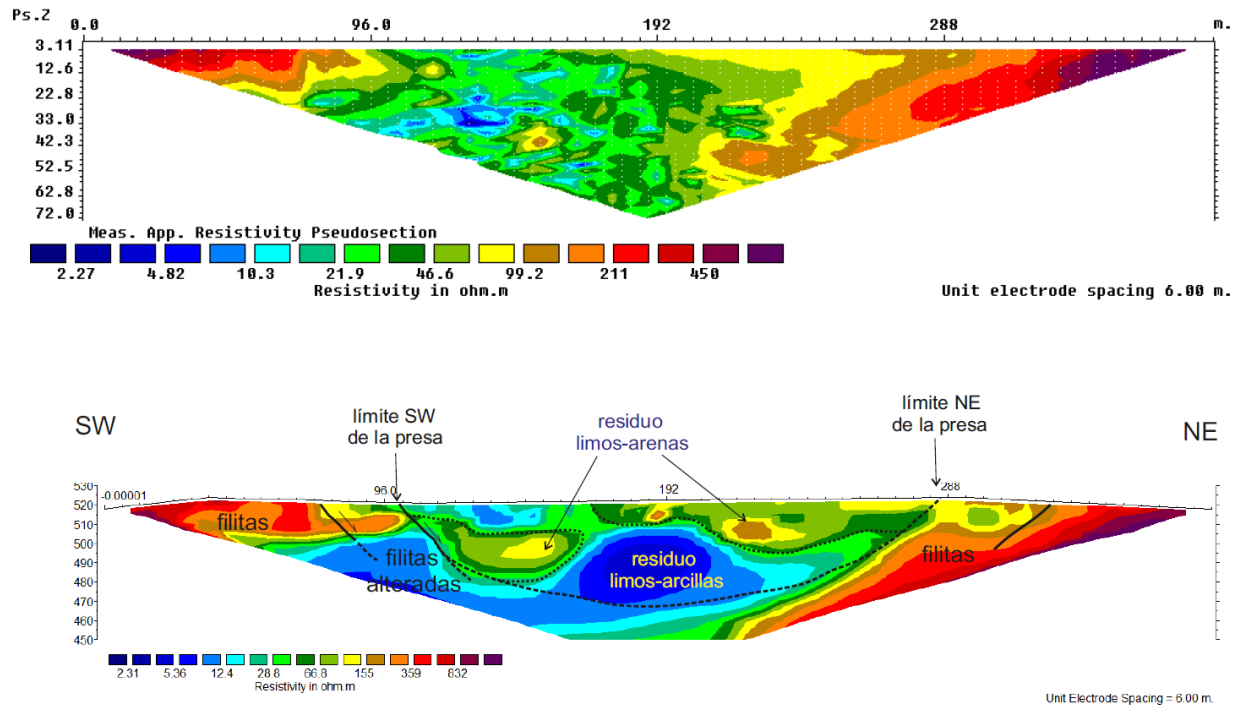


Gráfico 4. 4. Gráfico de la conductividad aparente (superior) y real (inferior) del modelo obtenido a partir del tratamiento de datos de la Tomografía eléctrica.

En esta figura se diferencian dos gráficos: el primero representa los valores de resistividad aparente medidas, mientras que en la segunda se muestra el modelo de resistividad real, la topografía del perfil y la interpretación geológica.

Para interpretar los resultados obtenidos es importante tener en cuenta:

- Código de color: Altas resistividades representadas con colores cálidos (máx. color granate) y bajas resistividades representadas con colores fríos (máx. azul marino).
- Disposición del corte: Como se puede apreciar en la parte superior de la gráfica hay una escala métrica que marca la longitud de la traza, es decir, que va desde 0 m a 384 m con un paso de 6 m entre cada línea. El 0 se ubica donde se encontraba la estación de medida, es decir en el electrodo número 64 (el último en colocar); con lo que el corte se muestra como si el observador mirase hacia

la traza desde el río Campana, dejando a la izquierda el olivar y la estación de medida, y a la derecha el camino de acceso a la presa (electrodo 1). En la siguiente figura se muestra la posición de los electrodos en un modelo 3D del relieve generado con Google Earth Pro.



Figura 4. 1. Ubicación de los electrodos en 3D (punto de vista de la gráfica obtenida por Tomografía Eléctrica).

4.1.1.2.- Interpretación de los resultados

En el margen derecho del gráfico 4.4 se aprecia una franja claramente resistiva, lo cual indica que se trata del terreno natural (filitas paleozoicas), y por tanto, el límite de la presa en el lado NE de la misma.

El residuo de flotación ocupa la parte central del perfil, donde las resistividades medidas oscilan entre 2 y 200 ohm x metro, lo cual indica que hay variaciones dentro del residuo en su comportamiento eléctrico. Así, en esta zona se pueden diferenciar áreas de mayor resistividad, como es el caso de unos nódulos con resistividades entre 30 y 200 ohm x m (de verde a amarillo), que interpretamos como limos y arenas secas; a la vez que se distinguen zonas con muy baja resistividad (entre 2 y 30 ohm x m), que se asocian a zonas donde predominan los limos y las arcillas con elevado grado de humedad.

Si se observa la zona más superficial, se puede apreciar un paulatino incremento de conductividad conforme se avanza hacia la izquierda del gráfico. Esto se debe tanto a la orografía superficial como al tamaño de grano del residuo. Por una parte, hay una zona de menor cota y por tanto, propensa a la acumulación de agua entre los 114 y 138 m en la escala horizontal que se muestra en la gráfica, donde se puede observar un nódulo de color azul indicando ese aumento de conductividad, coincidiendo además con una zona de cañaveral a causa de esa humedad. Por otra parte, a la hora de depositar el residuo, este circulaba en forma de lodos que se vertían desde el NE, con lo que, debido al efecto de la gravedad, los

granos de mayor tamaño se quedaban en ese margen, mientras que los de menor tamaño se desplazaban hacia el SO. Puesto que esta métrica favorece la concentración de humedad, muestra una menor resistividad en la zona próxima a ese lateral.

Cabe destacar, que en la parte central y hacia el SO del depósito no se ha podido determinar con nitidez el contacto con el basamento pizarroso, aunque sin duda la extensión del dispositivo cubre sobradamente la potencia del residuo estudiado, por lo que marcamos este límite gracias a la información aportada por los sondeos realizados y los resultados obtenidos con el electromagnético realizado. Esta indefinición puede ser propiciada por una conjunción de causas:

- La presencia de la falla favorece una mayor acumulación de humedad en esa zona.
- Las pizarras deben estar muy alteradas supergénicamente debido al contacto con las sustancias del depósito.
- El terreno natural que aflora en esta zona son pizarras Graptolíticas (figuras 4.2 y 4.3), que como se explicó en el apartado 1.1.5, son unas facies pelíticas muy oscuras. El elevado contenido orgánico de estas facies hace que estas sean muy conductivas, y por tanto, dificulta la identificación del contraste resistivo entre el zócalo natural y el residuo depositado.



Figura 4. 2. Pizarra graptolítica



Figura 4. 3. Perfil de pizarra graptolítica

Finalmente, el límite SO del depósito queda marcado por las filitas con resistividades elevadas, contacto que está asociado a un juego de fracturas.

4.1.2.- Valores de Polarización Inducida

En el gráfico obtenido mediante Polarización Inducida (gráfico 4.5) se representa la cargabilidad del terreno. Se indica el límite supuesto del residuo. Los valores de cargabilidad medidos oscilan en torno a 10 y 50 mV/V. No obstante, se aprecian unos máximos de cargabilidad (hasta 750 mV/V) en el interior del residuo que relacionamos con el nivel limo

arenoso detectado hacia el SW del depósito y que dados los valores elevados de cargabilidad medidos podríamos decir que tienen elevados contenidos en sulfuros.

Finalmente, podríamos suponer que los máximos de cargabilidad medidos en el límite SW del perfil, dentro de las filitas en contacto con el residuo se asociaría con las fracturas detectadas y posible proximidad a la traza del filón de La Aquisgrana.

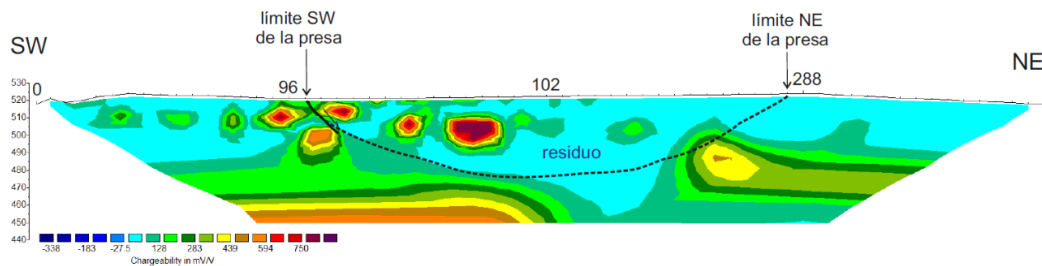


Gráfico 4. 5. Cargabilidad del terreno

4.2. TDEM: Discusión e interpretación de los resultados

Es importante tener en cuenta que, a diferencia del método anterior, el TDEM proporciona datos de un único punto en toda su vertical, y que por tanto, no genera unos resultados gráficos visualmente comparables con los de tomografía eléctrica.

A lo largo de este capítulo se analizarán las gráficas de resistividad respecto al tiempo. Puesto que se generó una curva por cada medida tomada, se ha seleccionado una gráfica (la más representativa y con menos ruido) por cada estación y dispositivo, por lo que como mínimo se dispone de 2 gráficas por estación, una realizada con bucle único (que aporta datos más fiables en superficie) y otra realizada con bucle móvil o centrado (que aportan datos más fiables en profundidad).

En estas gráficas se muestra la siguiente información:

- Gráfica de resistividad respecto a tiempo y profundidad:
 - En la gráfica se observan 3 líneas: Resistividad real (roja gruesa), Resistividad aparente (roja fina) y Voltaje (azul).
 - Los puntos verdes marcan los puntos de cambio de resistividad.
 - En la parte superior se muestra una escala logarítmica de tiempo medida en segundos, y en la inferior una escala logarítmica de profundidad medida en metros.
- Tabla que aporta datos de los puntos marcados en verde.

- La tabla muestra los valores de resistividad en cada punto (ρ) y la profundidad en metros a la que se ha tomado ese valor (z).

Para interpretar y posteriormente correlacionar los datos seleccionados, es necesario conocer la ubicación de la columna de material estudiada, ya que, aunque el bucle emisor sea de grandes dimensiones, la columna estudiada se ubica en el centroide del bucle receptor. De este modo, los datos obtenidos para bucle único y centrado se sitúan en el mismo lugar.

En el plano 5 (Anexo II) se puede observar la ubicación global de todas las estaciones realizadas sin sus centroides, los cuales se muestran a continuación:

- Centroides de las estaciones 1-11:

En la figura 4.4 se puede observar un plano cenital de la presa donde se ubican las estaciones de la 1 a la 11 junto con sus centroides.

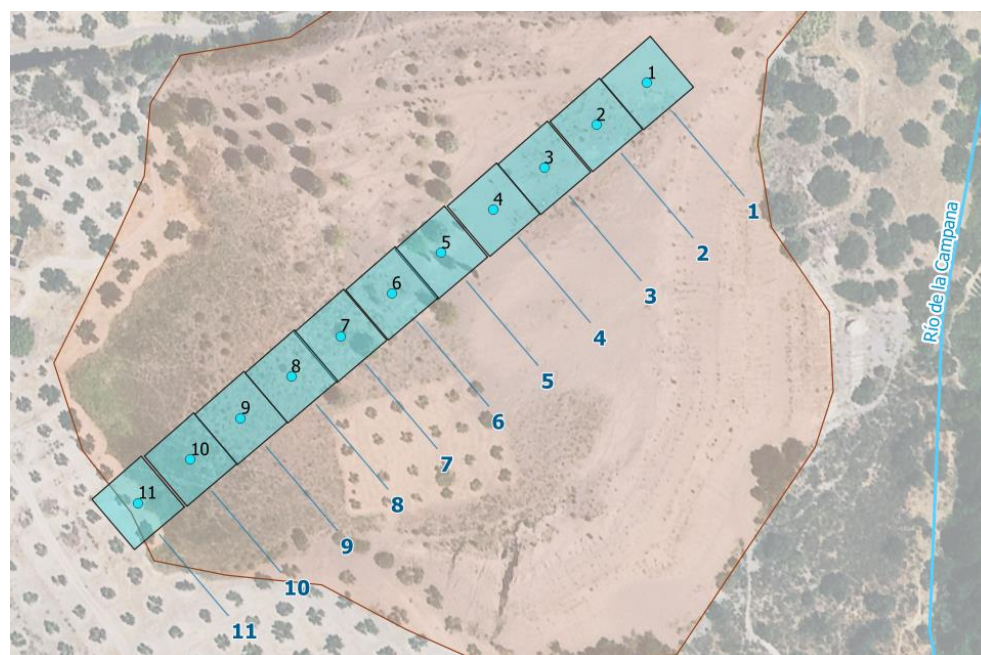


Figura 4. 4. Ubicación de estaciones 1 a 11 con centroides (plano cenital)

- Centroides de las estaciones 12, 13 y 14:

En la figura 4.5 se puede observar un plano cenital de la presa donde se ubican las estaciones 12, 13 y 14 junto con sus centroides.

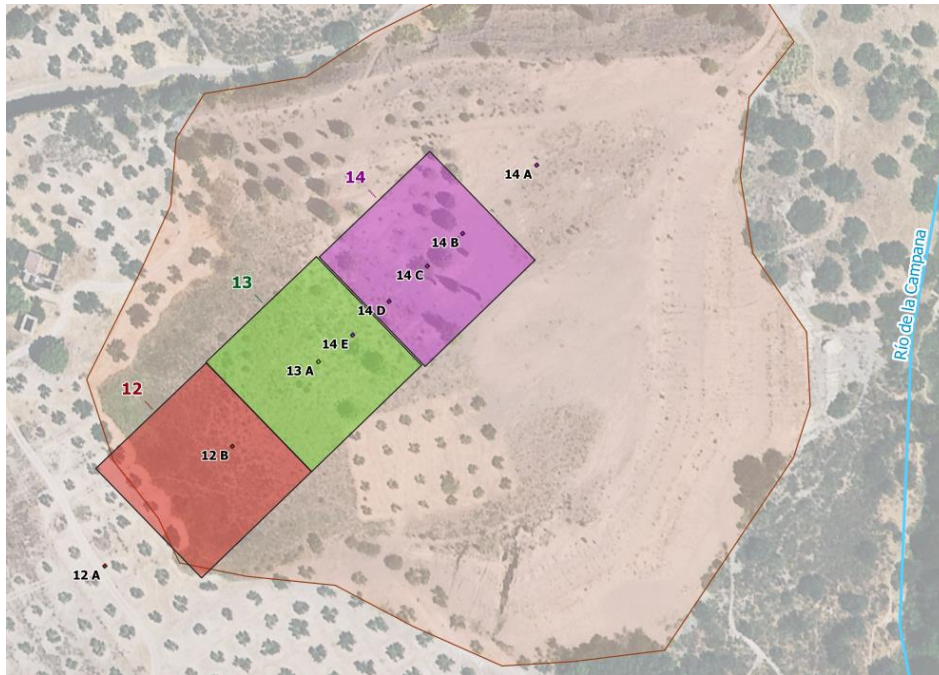


Figura 4. 5. Ubicación de estaciones 12, 13 y 14 con centroides (plano cenital)

A pesar de que se ha intentado ubicar los centroides lo más próximos posible a la traza marcada en Tomografía, son palpables ciertos desplazamientos, especialmente en la estación 14 como se puede observar en la siguiente figura:

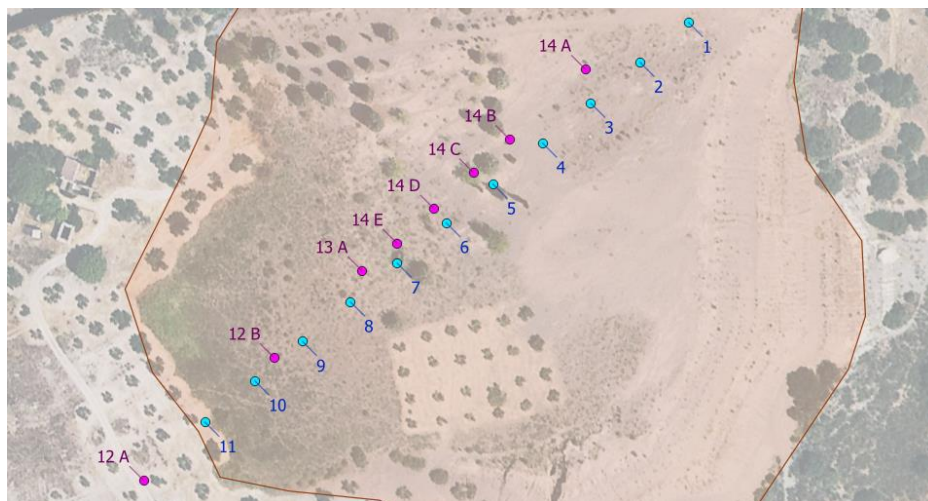


Figura 4. 6. Posición relativa de los centroides de las diferentes estaciones.

Una vez explicado el contenido y las ubicaciones de cada una de las medidas, procedo al análisis de los resultados (gráficos del 4.6 al 4.37):

4.2.1.- Estación 1

4.2.1.1.- Bucle único

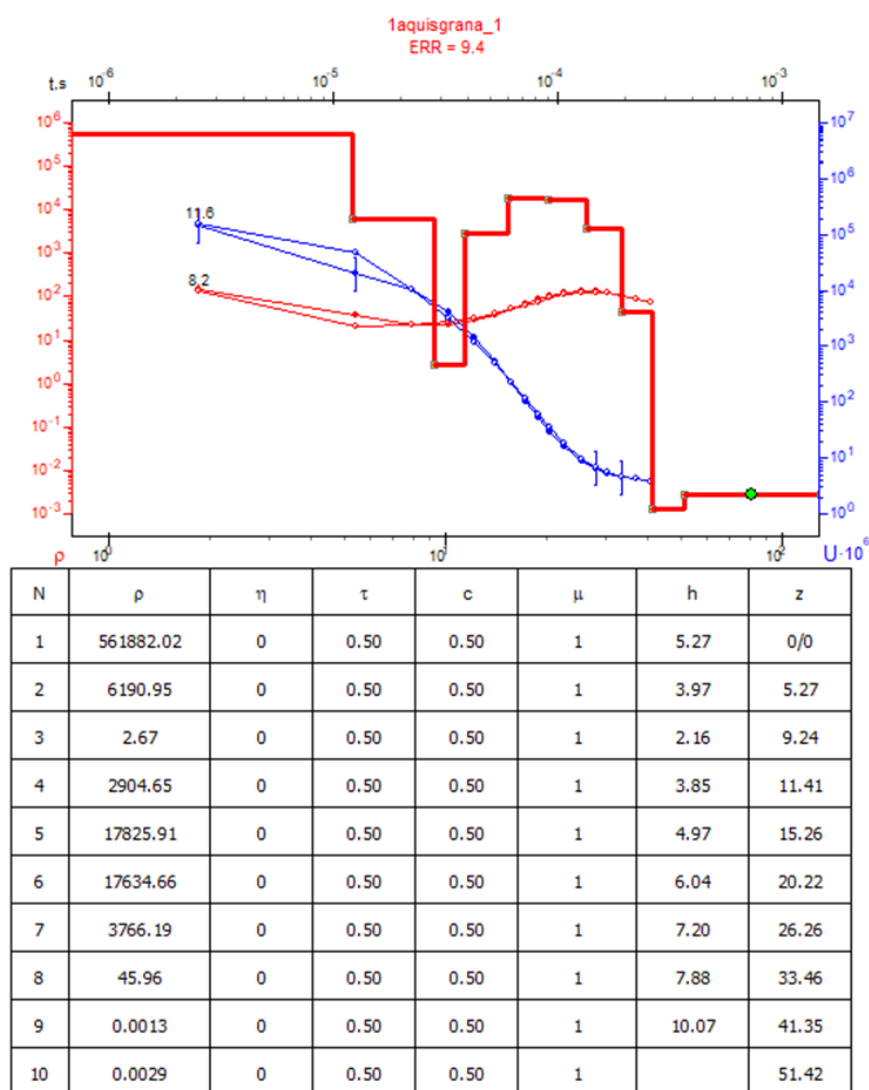


Gráfico 4. 6. Curva procesada con tabla de valores (E1_único)

En el gráfico 4.6 se observa un pico de conductividad entre los 9 y 11m de profundidad, en un medio que por lo general es muy resistivo.

Puesto que este dispositivo se emplea para ver en detalle los primeros metros, se desestiman los valores obtenidos a partir de los 20 m.

4.2.1.2.- Bucle centrado

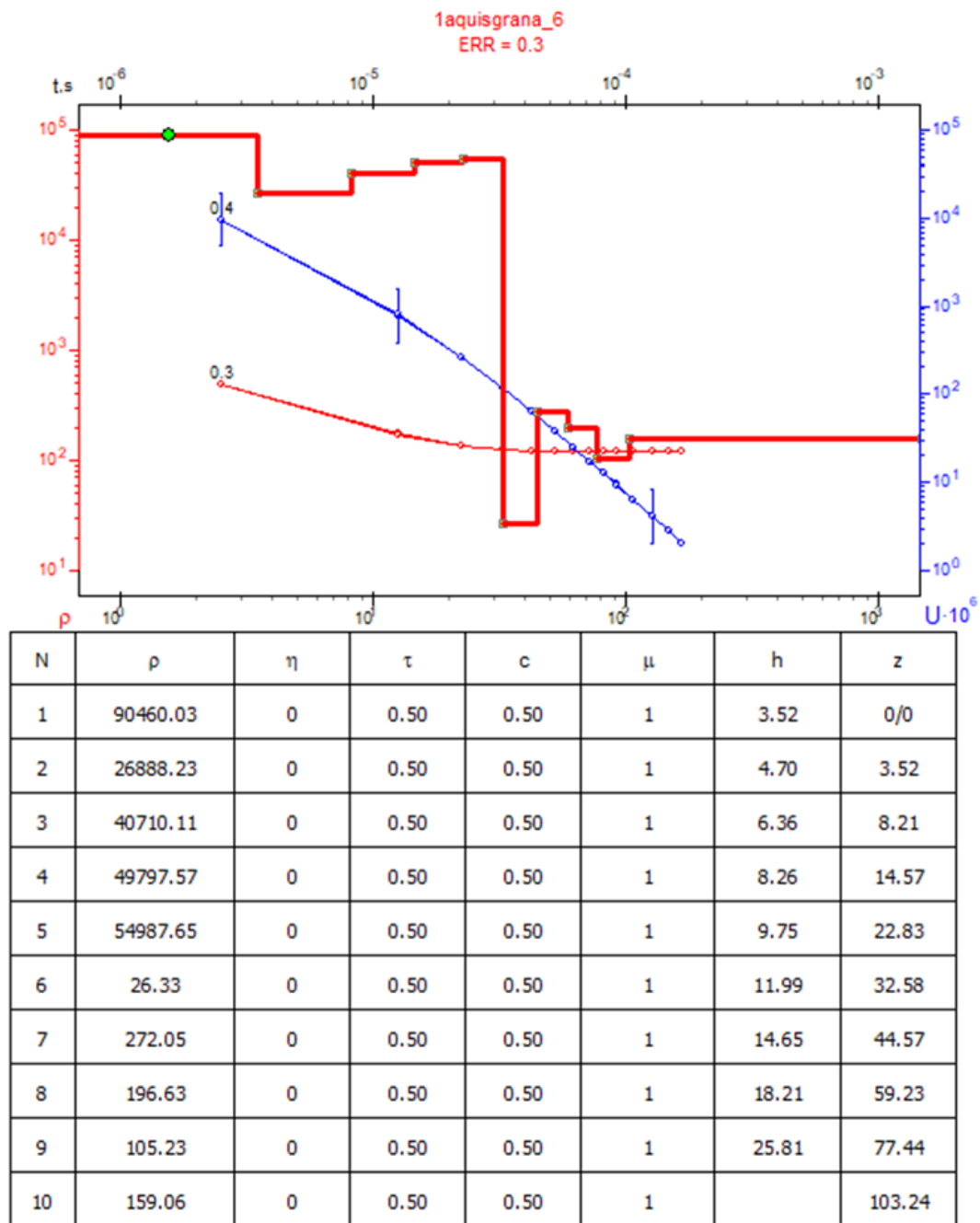


Gráfico 4. 7. Curva procesada con tabla de valores (E1_centrado)

En este gráfico se aprecia una distribución similar a la anterior, pero el pico de conductividad aparece entre 32 y 44m, sin embargo, este valor se desestima, puesto que las medidas de este dispositivo resultan más fiables a partir de los 40 m de profundidad aproximadamente, y dado el caso de la presencia de un nivel de mayor conductividad, es más lógico hallarlo entorno a los 9m dada la ubicación de esta estación.

4.2.2.- Estación 2

4.2.2.1.- Bucle único

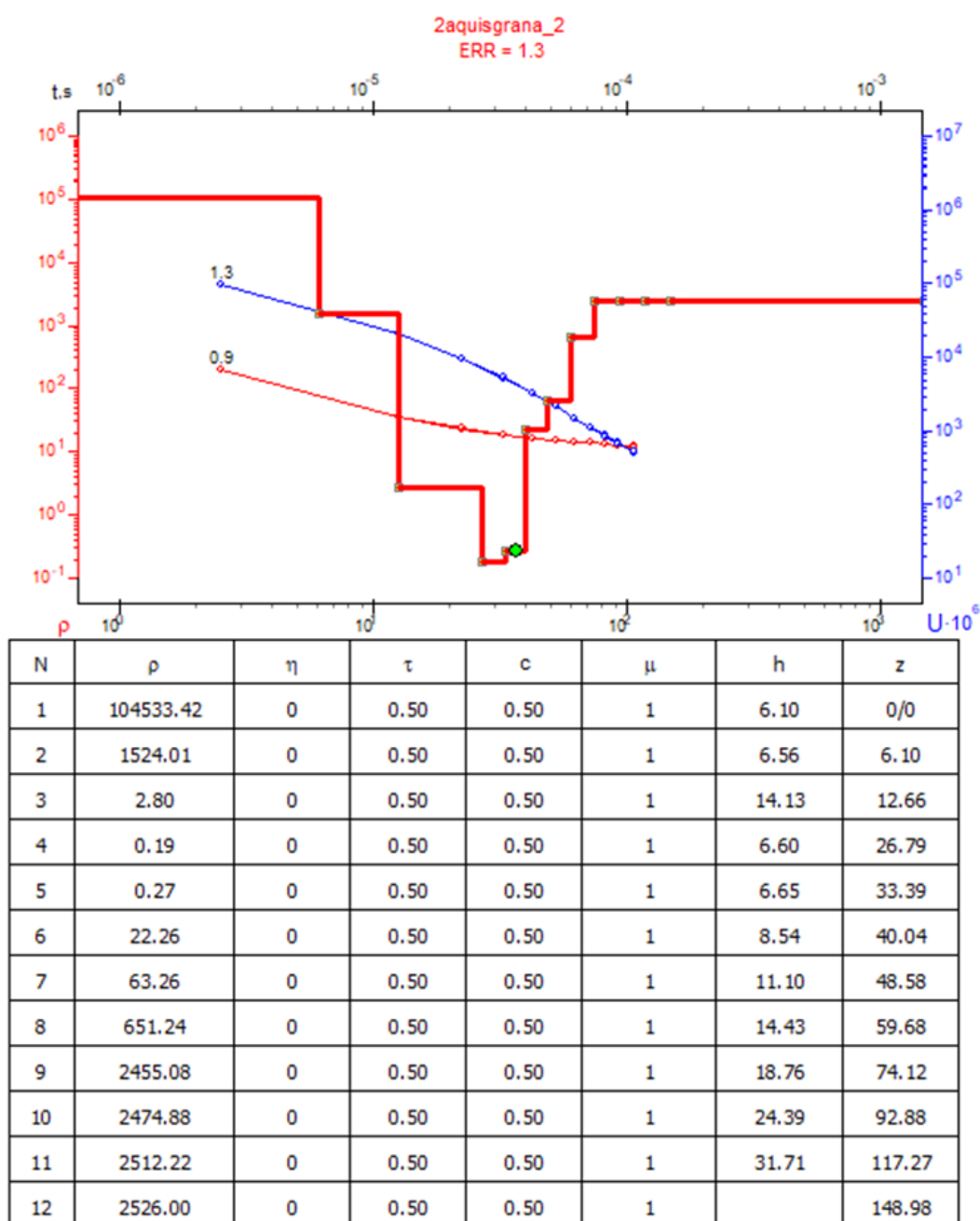


Gráfico 4. 8. Curva procesada con tabla de valores (E2_único)

Con bucle único (gráfico 4.8) se percibe una alta conductividad entre 12-40 m, especialmente acentuado entre 27-33 m. Posteriormente se observa un gran aumento de la resistividad, lo cual marca claramente el contacto con el zócalo cerca de los 60m. Puesto que ya se trata de una medida muy profunda, vamos a contrastar este dato con la gráfica obtenida para bucle centrado, que debería ser más fiable.

4.2.2.2.- Bucle centrado

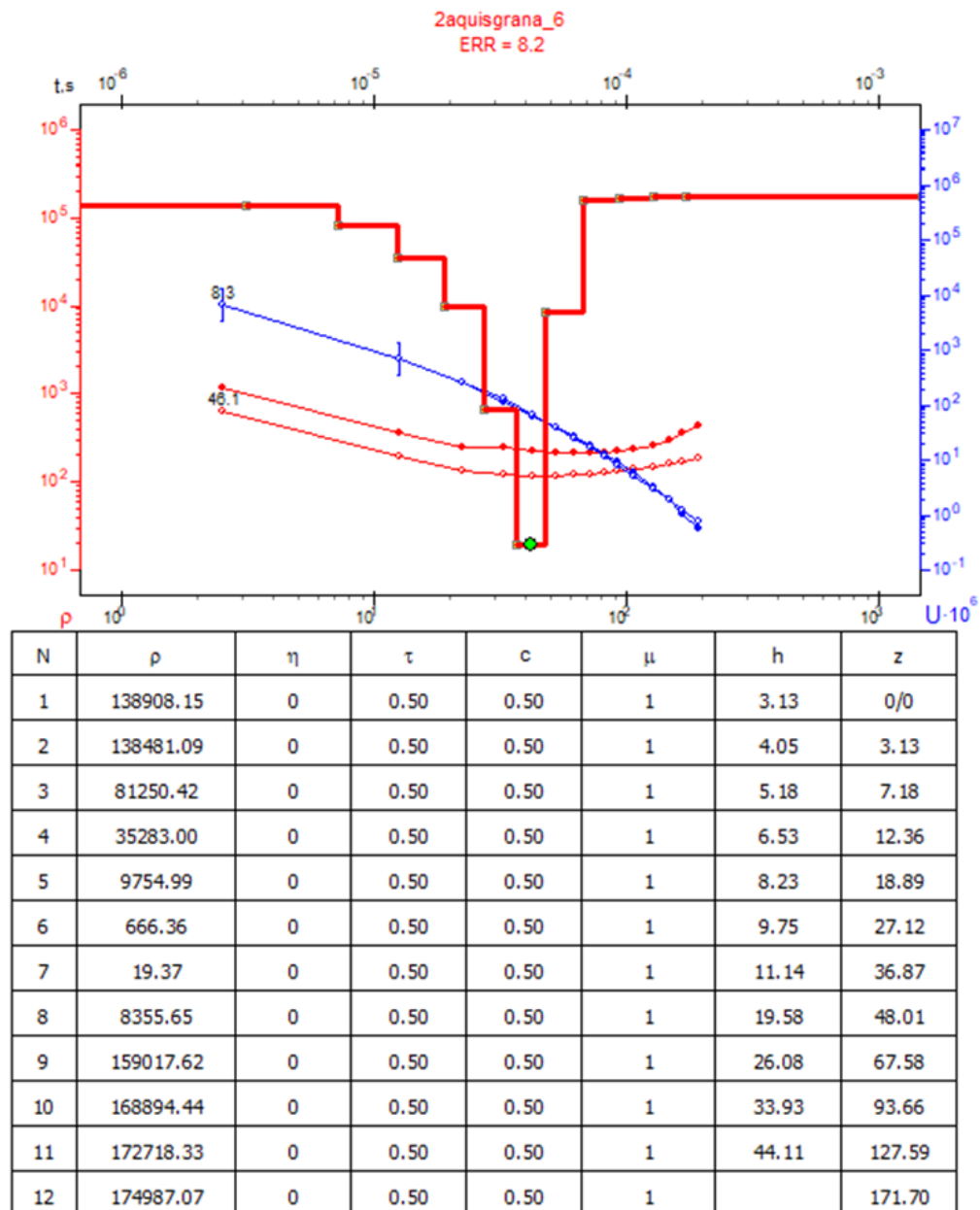


Gráfico 4. 9. Curva procesada con tabla de valores (E2_centrado)

Con bucle centrado (gráfico 4.9) se observa un resultado muy similar al anterior, encontrando ese contacto con el zócalo cerca de los 50 m de profundidad.

A pesar de que este contacto se encuentra varios metros por encima de lo que indicaba el bucle único, sigue sin cuadrar con la profundidad a la que debería encontrarse el contacto dada la ubicación de la estación.

4.2.3.- Estación 3

4.2.3.1.- Bucle único

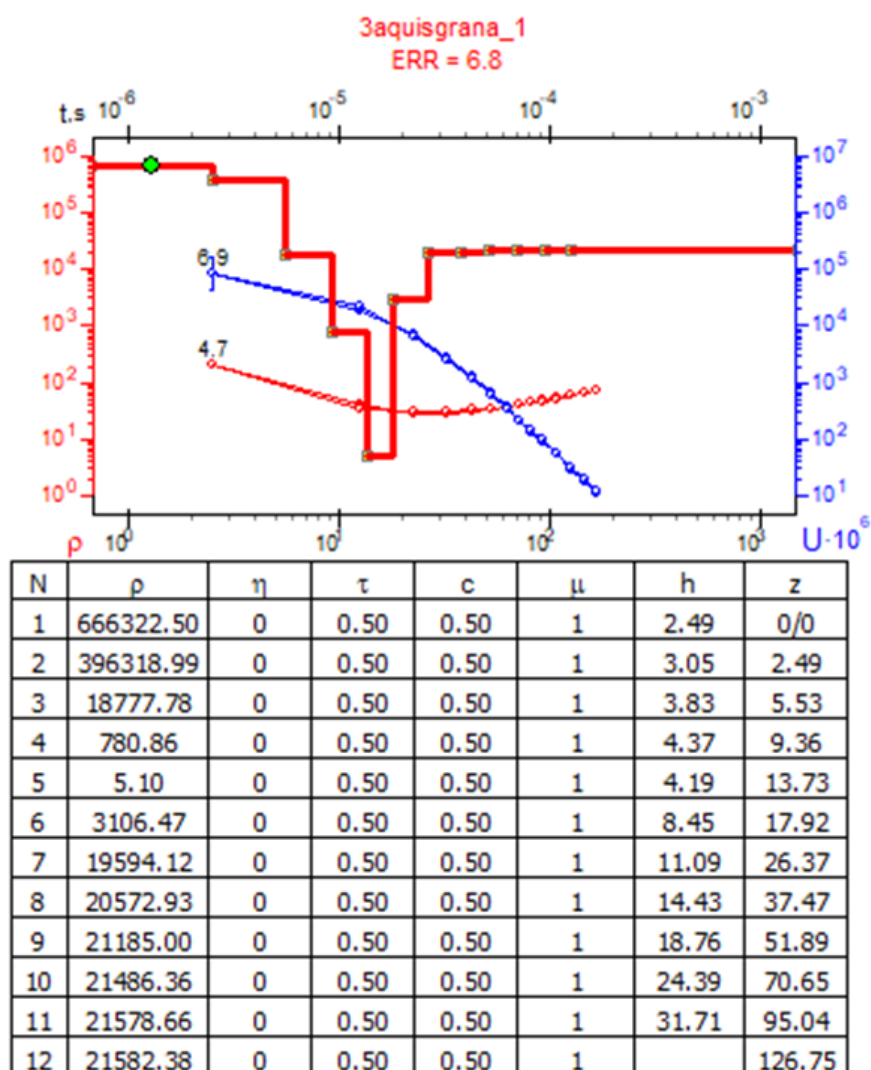


Gráfico 4. 10. Curva procesada con tabla de valores (E3_único)

Se encuentra un pico de conductividad a 14-18 m y a partir de esa profundidad un gran aumento de la resistividad, lo que se podría suponer como un contacto con el zócalo. Sin embargo, dada la ubicación de la estación no tiene sentido encontrar el contacto del zócalo tan superficial.

4.2.3.2.- Bucle centrado

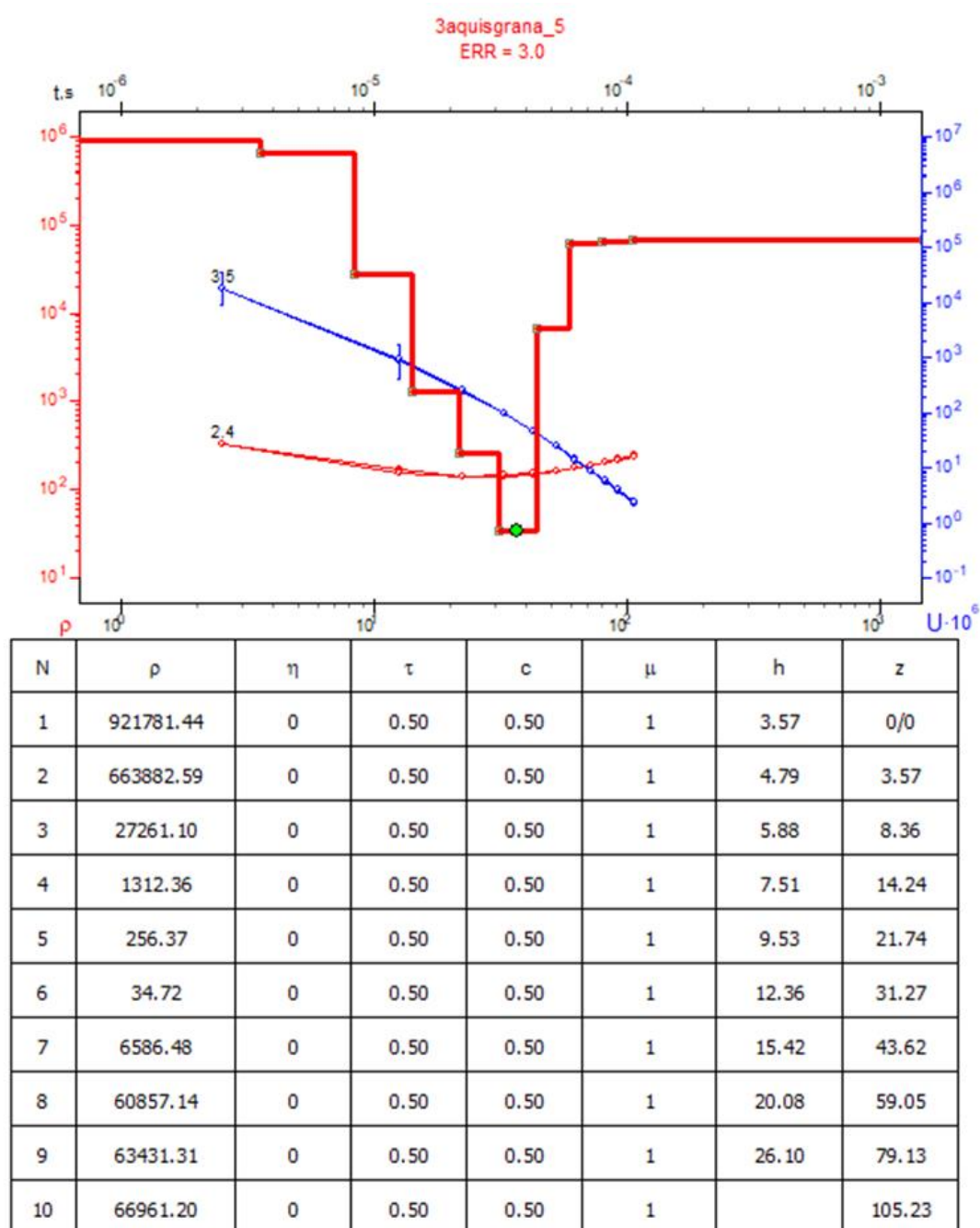


Gráfico 4. 11. Curva procesada con tabla de valores (E3_centrado)

El bucle centrado indica que el pico de conductividad se encuentra entre 31-43 m, y a partir de los 43 m el contacto con las filitas, lo cual encaja más con el modelo geológico previsto.

4.2.4.- Estación 4

4.2.4.1.- Bucle único

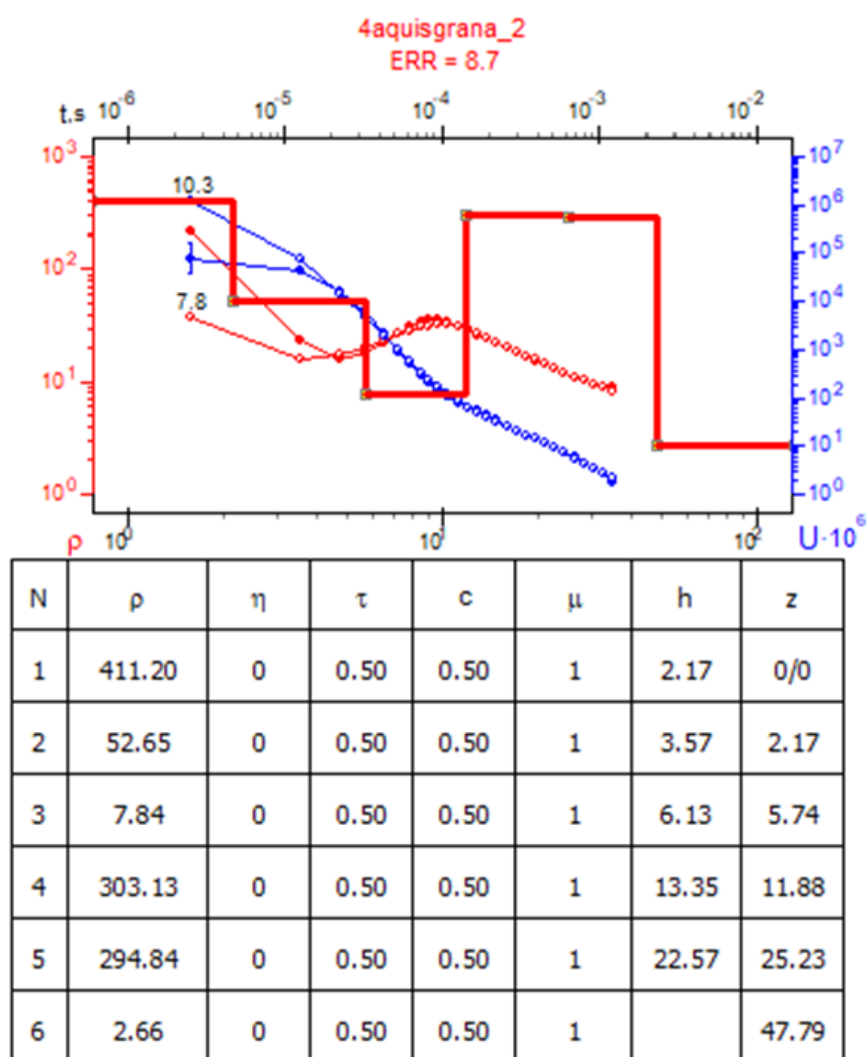


Gráfico 4. 12. Curva procesada con tabla de valores (E4_único)

Se muestra un nódulo resistivo entre 12 y 25 m, y además se percibe toda la columna mucho menos resistiva que en las estaciones anteriores (en las otras se observaban datos de resistividad entre 10^1 y $10^6 \Omega \cdot m$, y en este la escala máxima contemplada es 10^3), lo que indica que nos encontramos estrictamente sobre el residuo.

4.2.4.2.- Bucle centrado

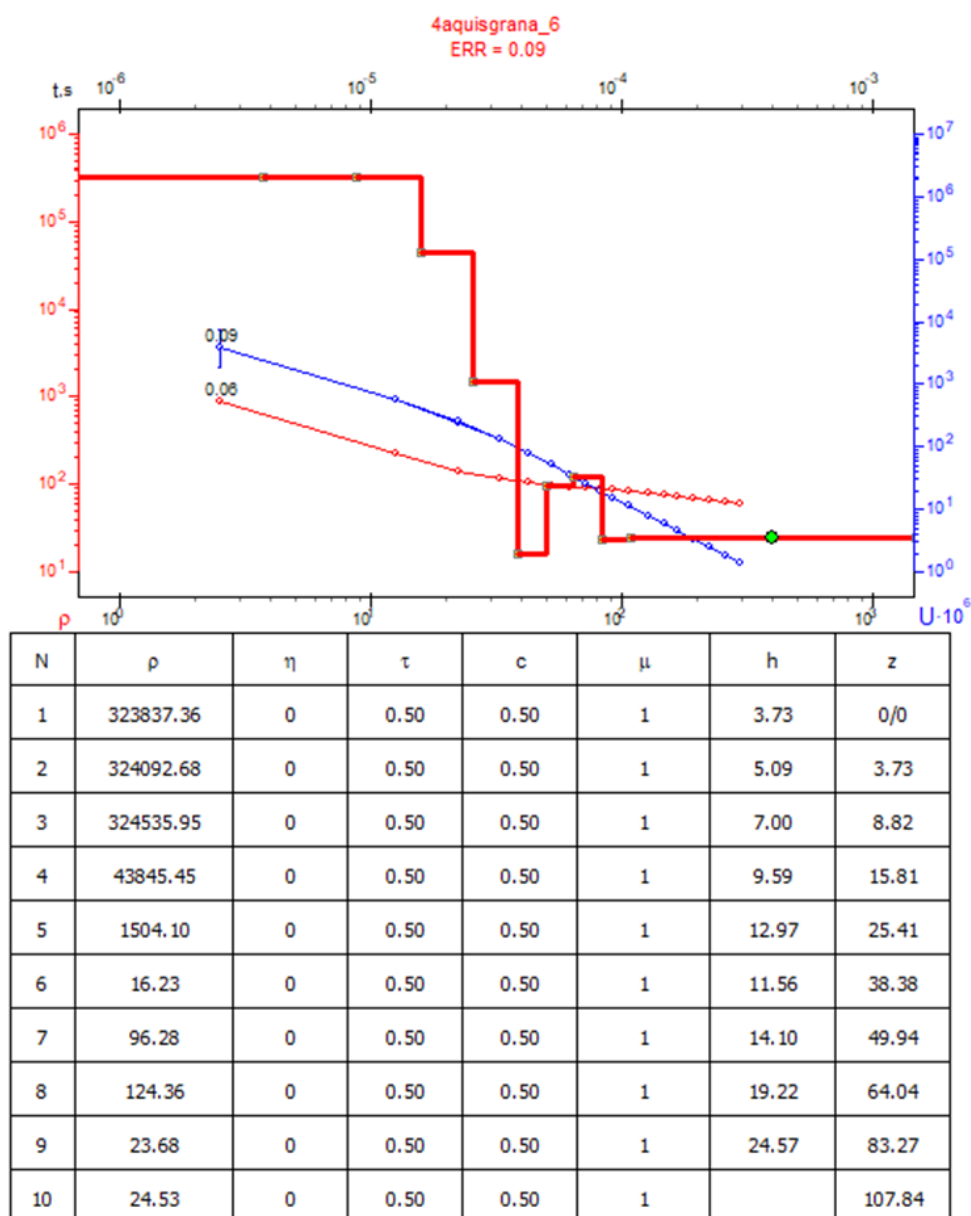


Gráfico 4. 13. Curva procesada con tabla de valores (E4_centrado)

Con el bucle centrado (gráfico 4.12) se observan los 25 primeros metros muy resistivos, y posteriormente un elevado incremento de conductividad.

También se puede apreciar un ligero aumento resistivo a los 50m, lo cual podría entenderse como el contacto con el zócalo, puesto que es el único indicio de resistividad a esas profundidades. Además, este dato cuadra con el modelo geológico, ya que en la posición de la estación 4, se debería encontrar el contacto cerca de los 40-50 m dada la potencia de la presa en ese punto.

4.2.5.- Estación 5

4.2.5.1.- Bucle único

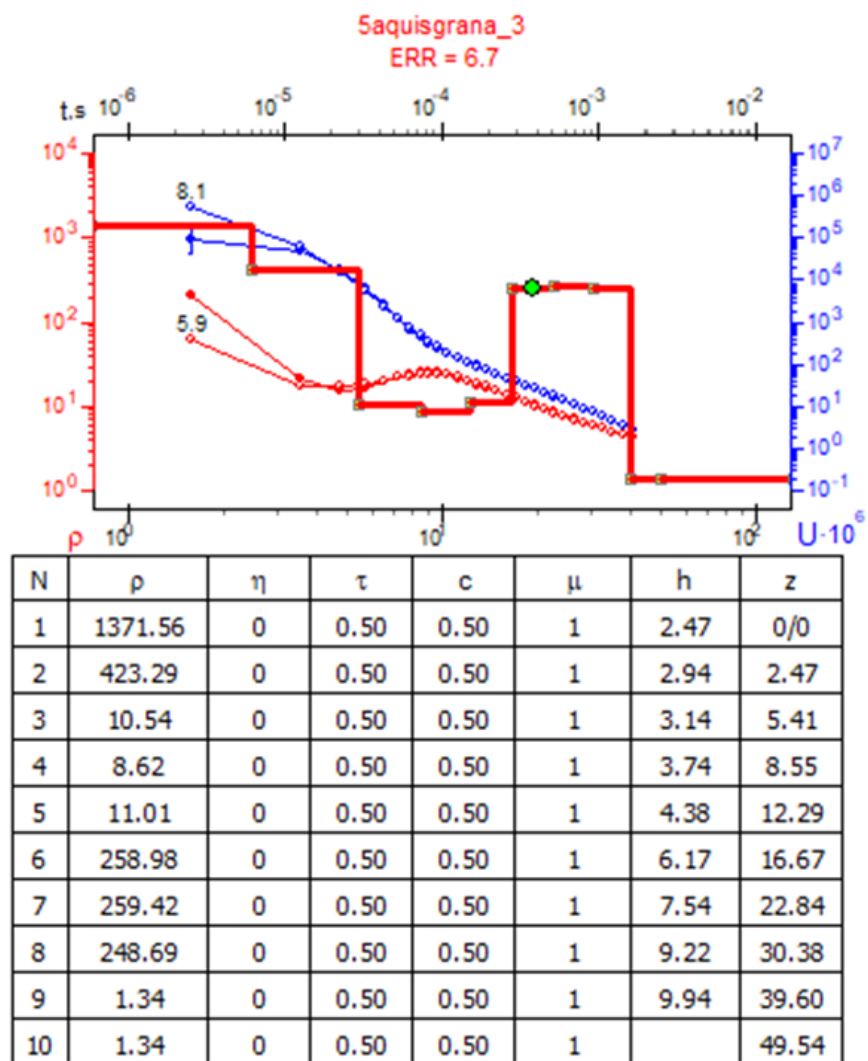


Gráfico 4. 14. Curva procesada con tabla de valores (E5_único)

Se visualiza una mayor resistividad en los primeros 5 metros, seguido de un gran aumento de conductividad.

4.2.5.2.- Bucle centrado

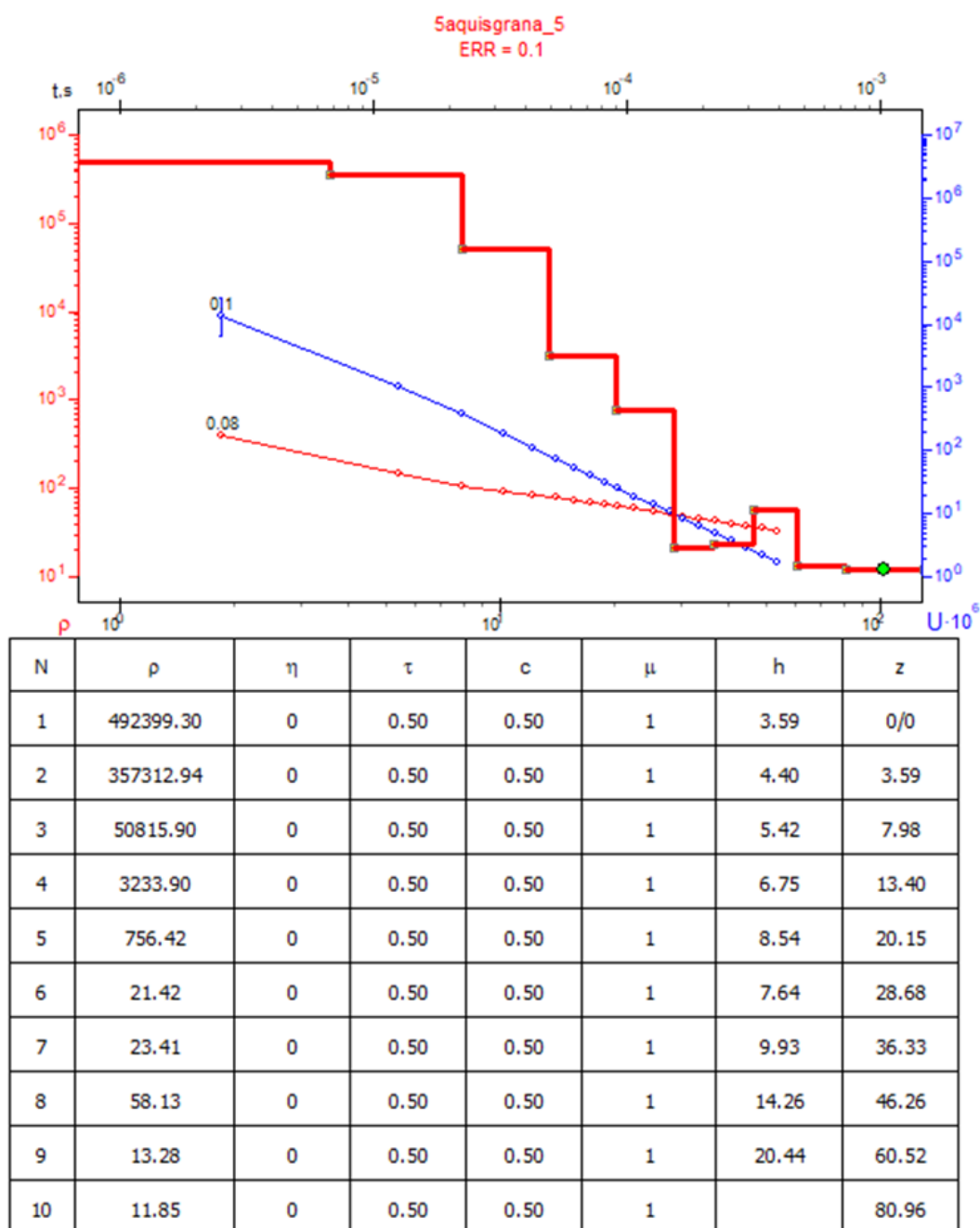


Gráfico 4. 15. Curva procesada con tabla de valores (E5_centrado)

En este caso se perciben los primeros metros como muy resistivos y una creciente conductividad a partir de los 13 m. No se capta un nivel muy resistivo en profundidad, pero sí un ligero aumento resistivo a los 46 m, lo cual podría considerarse contacto con el zócalo.

4.2.6.- Estación 6

4.2.6.1.- Bucle único

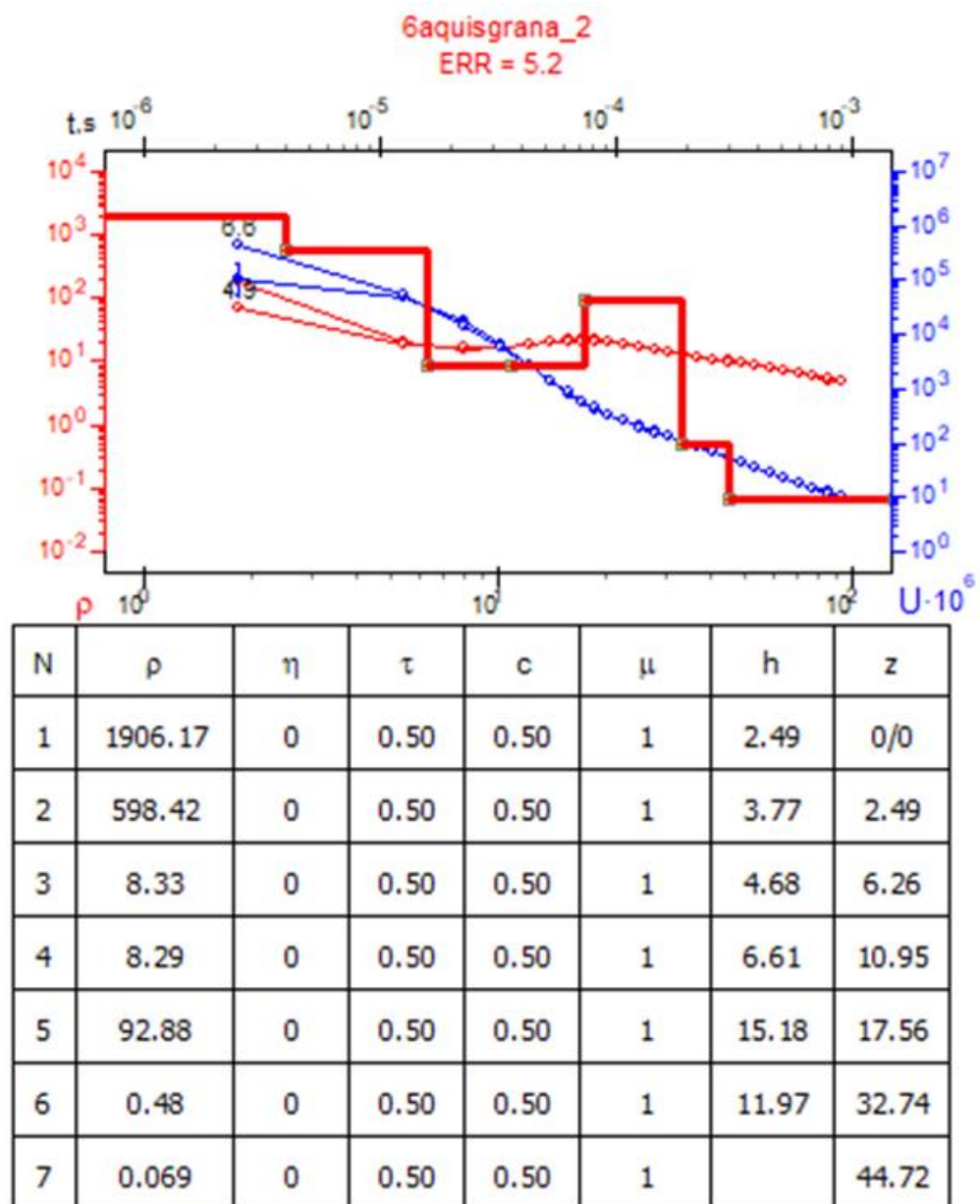


Gráfico 4. 16. Curva procesada con tabla de valores (E6_único)

Se muestran dos nódulos resistivos, uno en los primeros 2 m y el otro entre 17 y 32 m.

4.2.6.2.- Bucle centrado

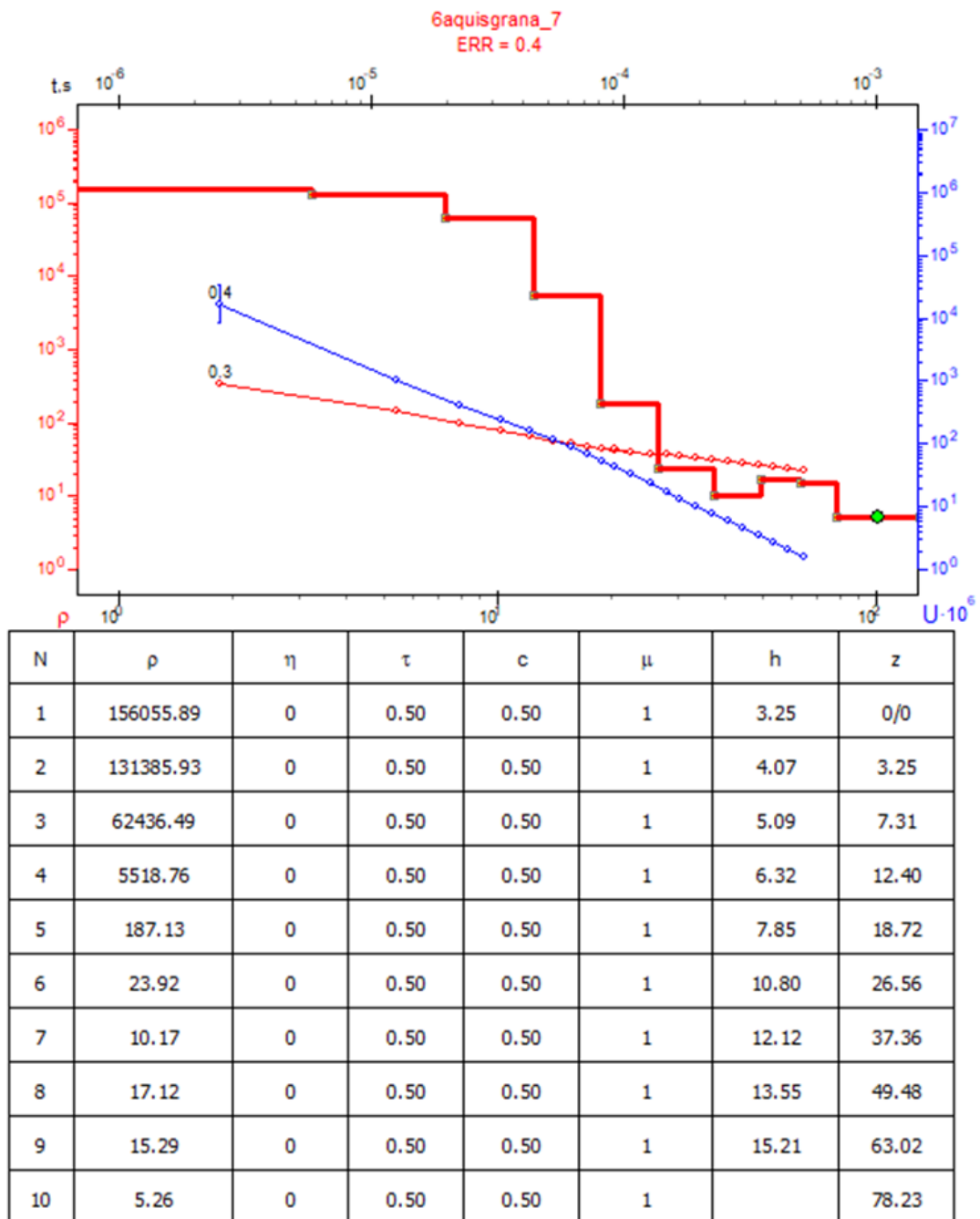


Gráfico 4. 17. Curva procesada con tabla de valores (E6_centrado)

En este caso se perciben los primeros metros como muy resistivos y una creciente conductividad a partir de los 12 m. No se capta un nivel muy resistivo en profundidad, pero sí un ligero aumento resistivo a los 50 m, lo cual podría considerarse contacto con el zócalo.

4.2.7.- Estación 7

4.2.7.1.- Bucle único

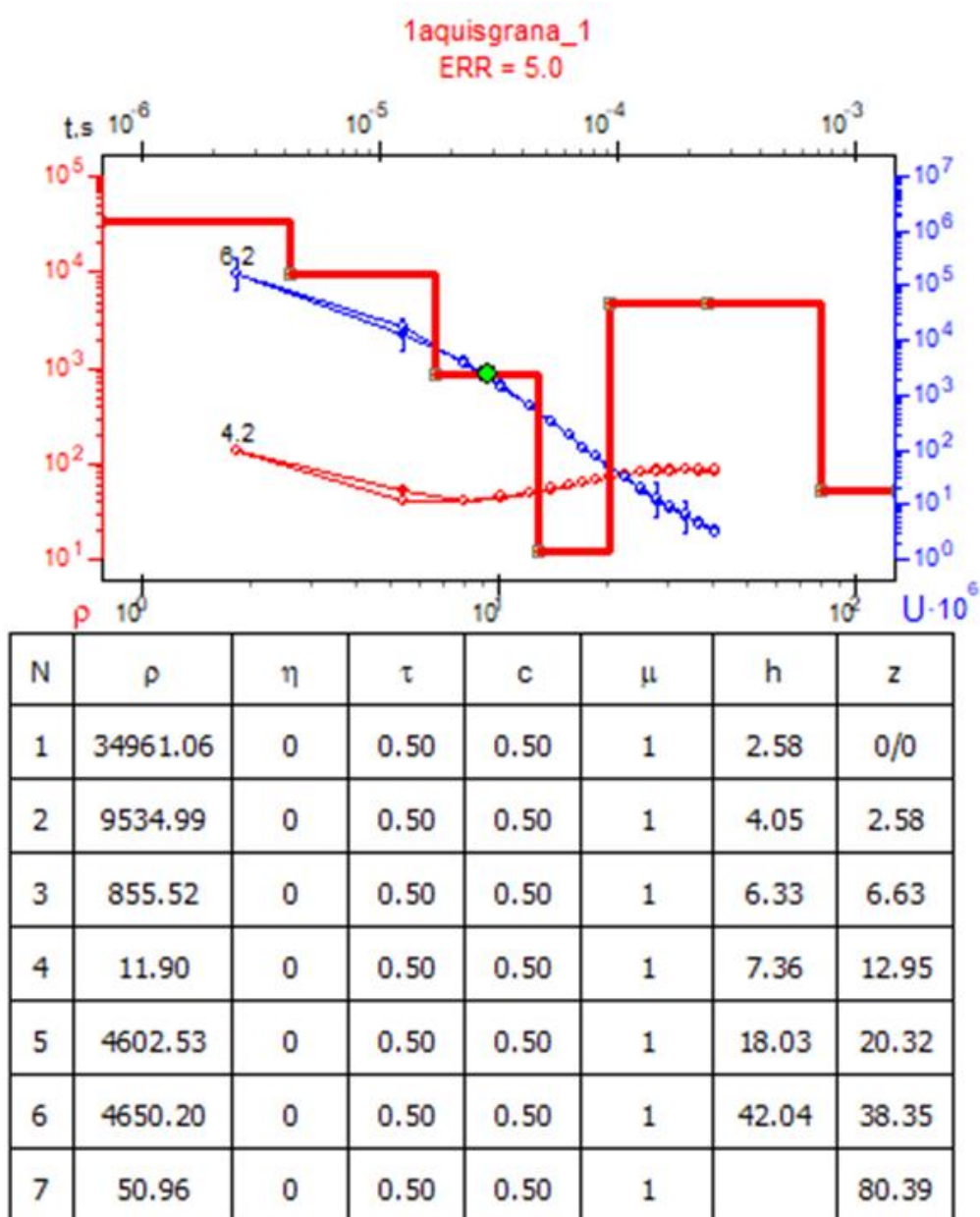


Gráfico 4. 18. Curva procesada con tabla de valores (E7_único)

Se muestran dos nódulos resistivos, uno en los primeros 6 m y el otro a partir de los 20 m. La prolongación en profundidad de esta resistividad no es fiable dada la ubicación de la estación, por lo que se contrastará con los datos del bucle centrado.

4.2.7.2.- Bucle centrado

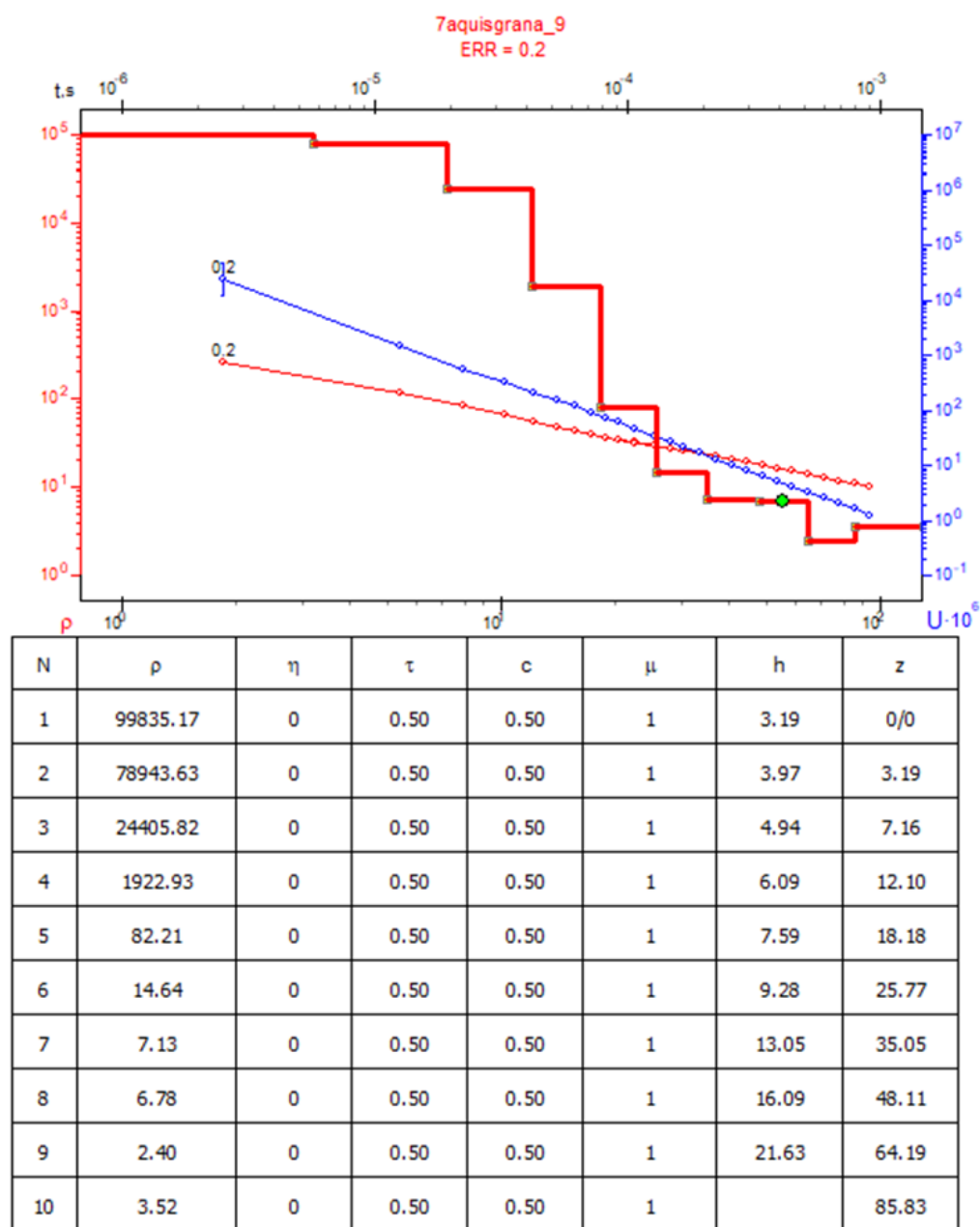


Gráfico 4. 19. Curva procesada con tabla de valores (E7_centrado)

En este caso se perciben los primeros metros como muy resistivos y una creciente conductividad a partir de los 12 m. No se capta un nivel muy resistivo en profundidad, pero sí un ligero aumento resistivo a los 85 m, lo cual podría considerarse contacto con el zócalo sano. Esto quiere decir que dada la ubicación de la estación se conoce que el zócalo se debe encontrar próximo a los 50 m, pero al no percibirse un contraste resistivo a esa profundidad, es muy probable que el zócalo se encuentre alterado y por eso no se observa un ligero aumento resistivo hasta llegar a una cota donde el material está sin alterar.

4.2.8.- Estación 8

4.2.8.1.- Bucle único

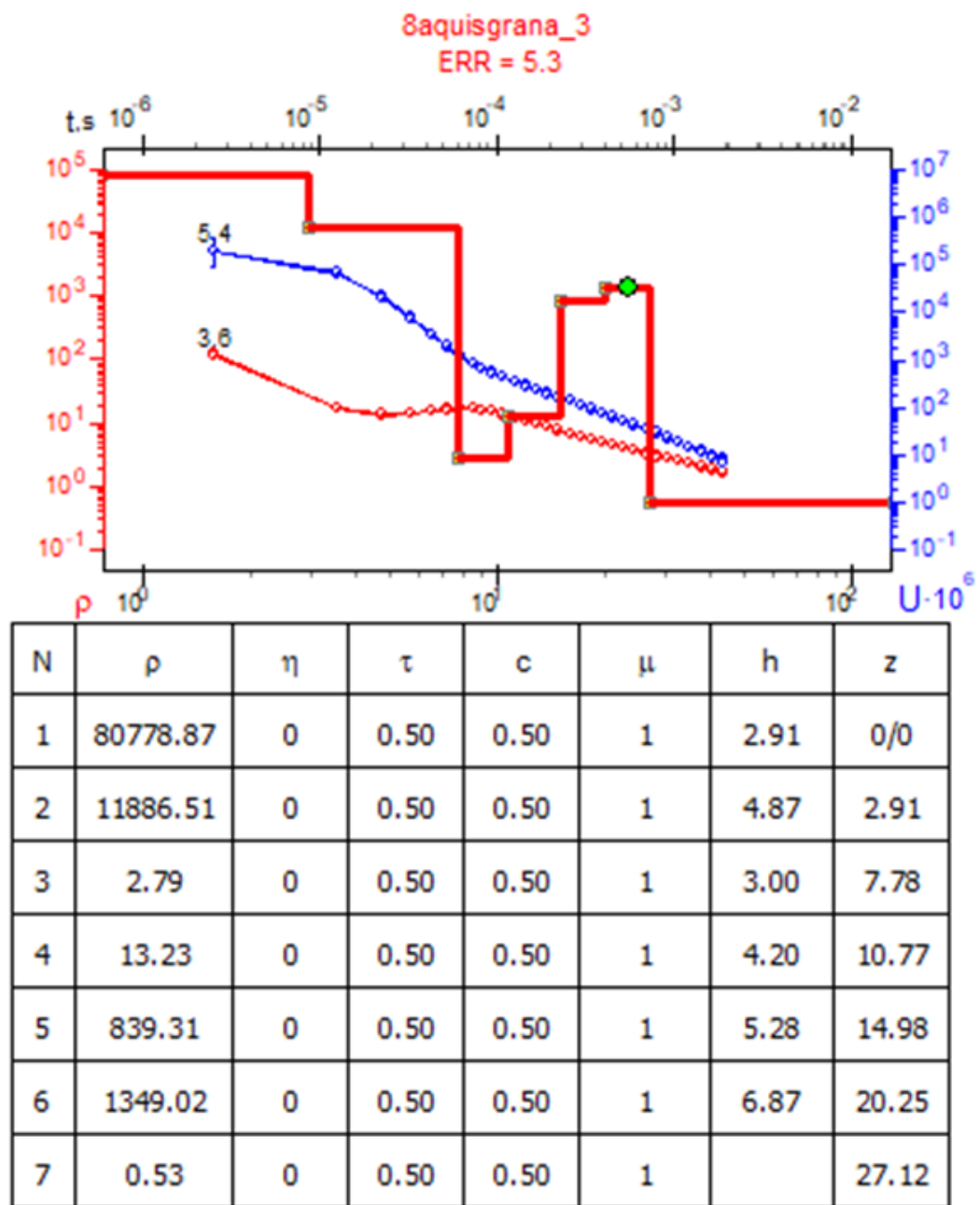


Gráfico 4. 20. Curva procesada con tabla de valores (E8_único)

Se muestran dos nódulos resistivos, uno en los primeros 2 m y el otro entre 15 y 20 m.

4.2.8.2.- Bucle centrado

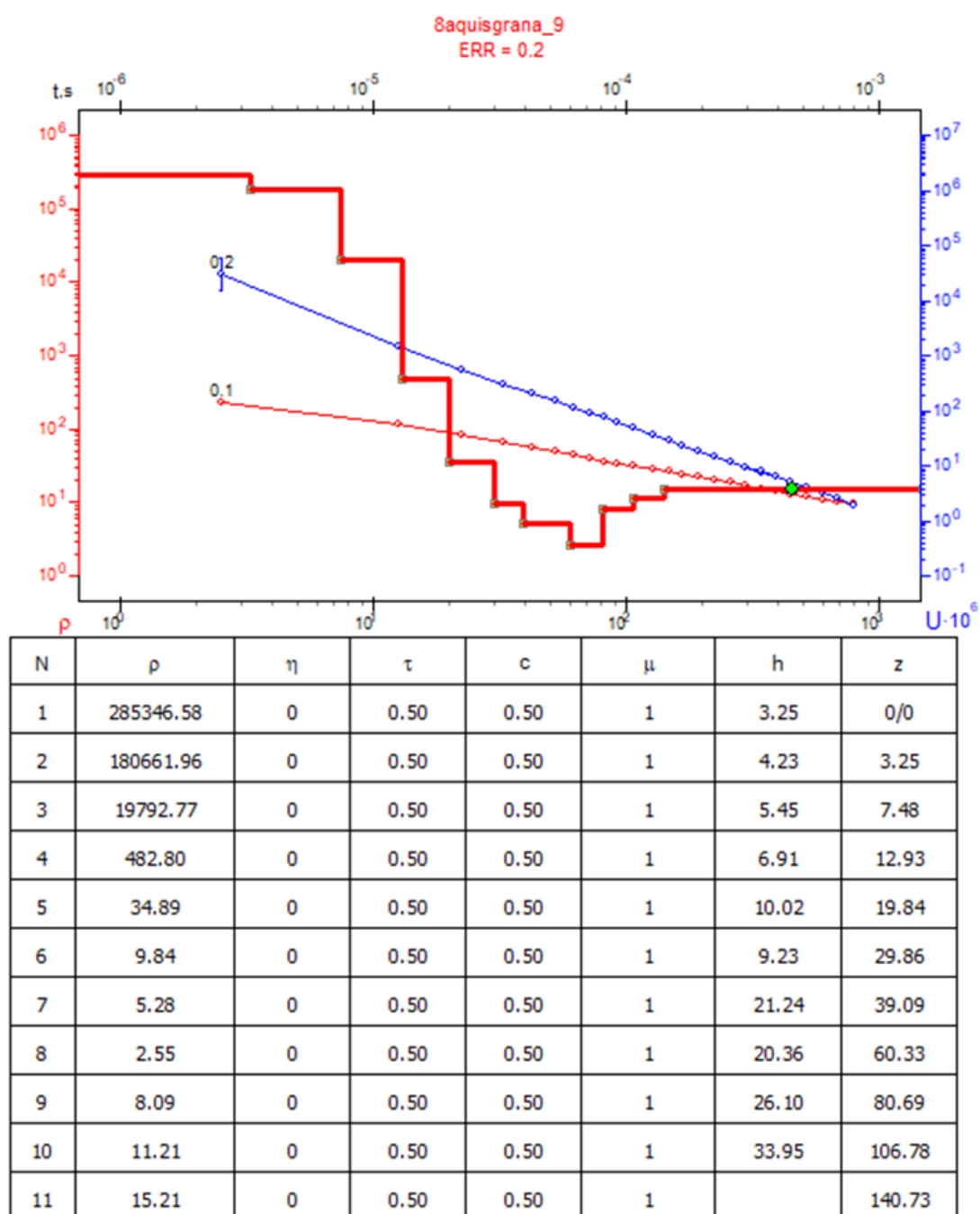


Gráfico 4. 21. Curva procesada con tabla de valores (E8_centrado)

En este caso se perciben los primeros metros como muy resistivos y una creciente conductividad a partir de los 7 m. No se capta un nivel muy resistivo en profundidad, pero sí un ligero aumento resistivo a los 80 m, lo cual podría considerarse contacto con el zócalo sano.

4.2.9.- Estación 9

4.2.9.1.- Bucle único

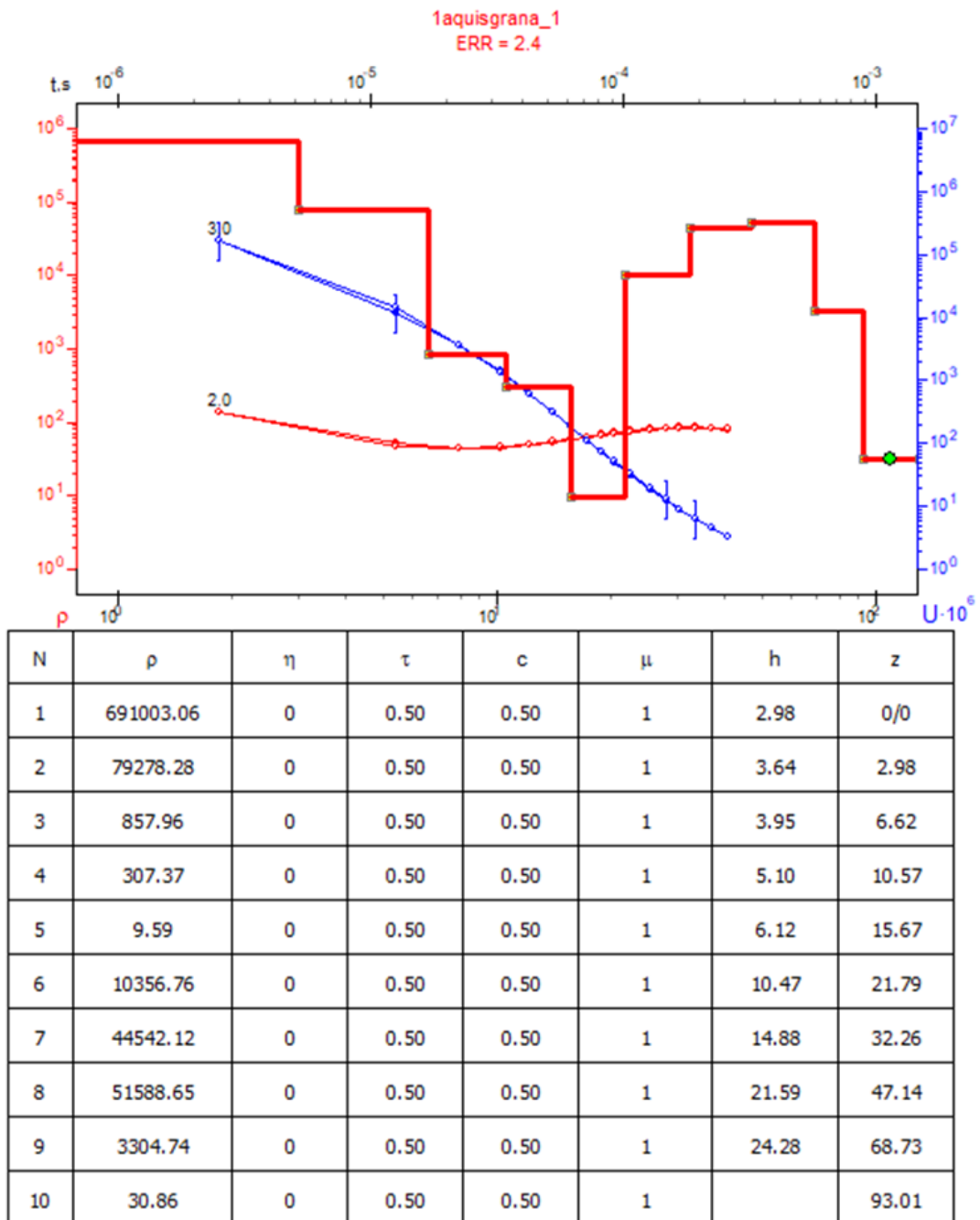


Gráfico 4. 22. Curva procesada con tabla de valores (E9_único)

Se muestran dos nódulos resistivos, uno en los primeros 3 m y el otro a partir de los 20 m. La prolongación en profundidad de esta resistividad no es fiable dada la ubicación de la estación, por lo que se contrastará con los datos del bucle centrado.

4.2.9.2.- Bucle centrado

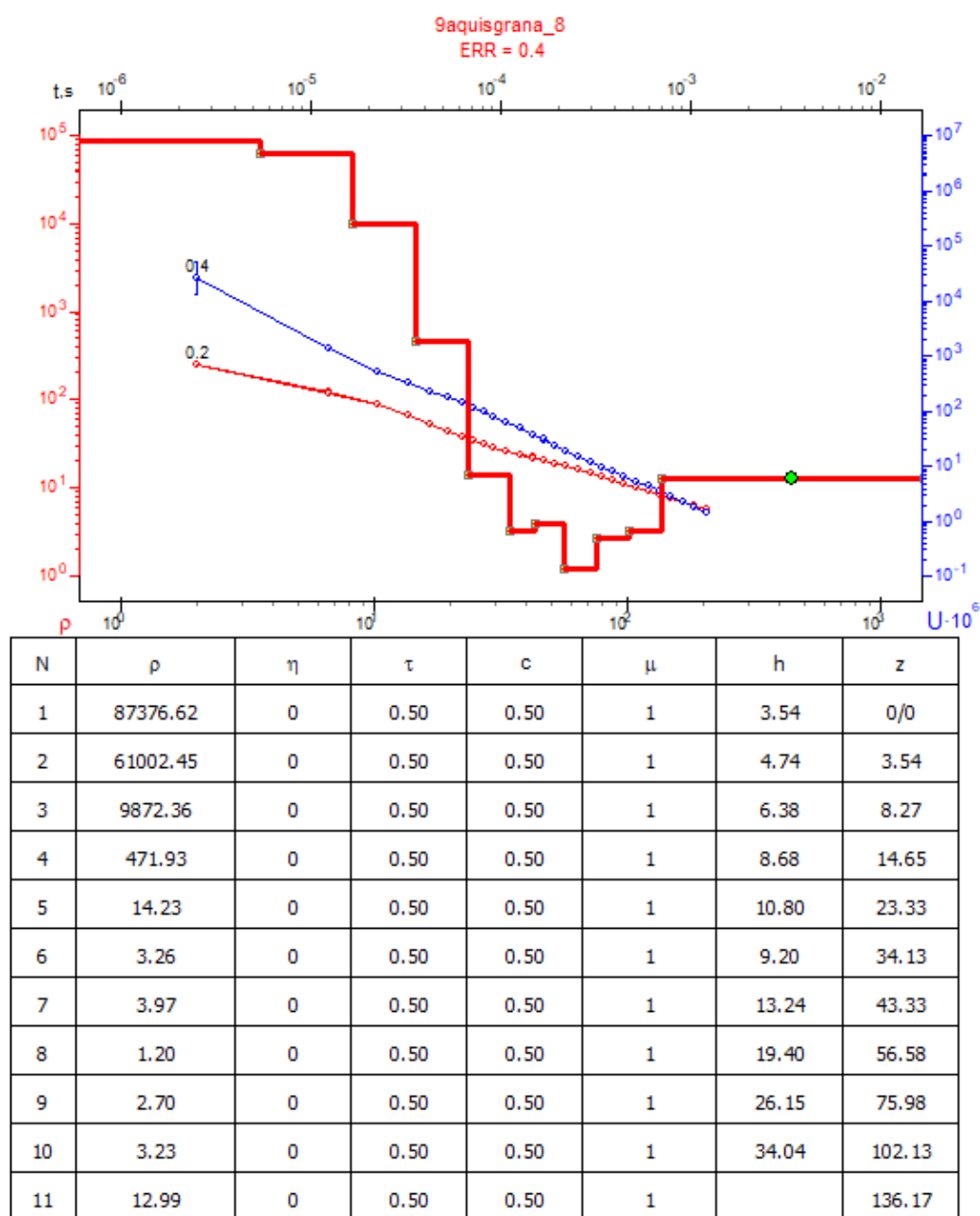


Gráfico 4. 23. Curva procesada con tabla de valores (E9_centrado)

En este caso se perciben los primeros metros como muy resistivos y una creciente conductividad a partir de los 15 m. No se capta un nivel muy resistivo en profundidad, pero sí un ligero aumento resistivo a los 75 m, lo cual podría considerarse contacto con el zócalo sano.

4.2.10.- Estación 10

4.2.10.1.- Bucle único

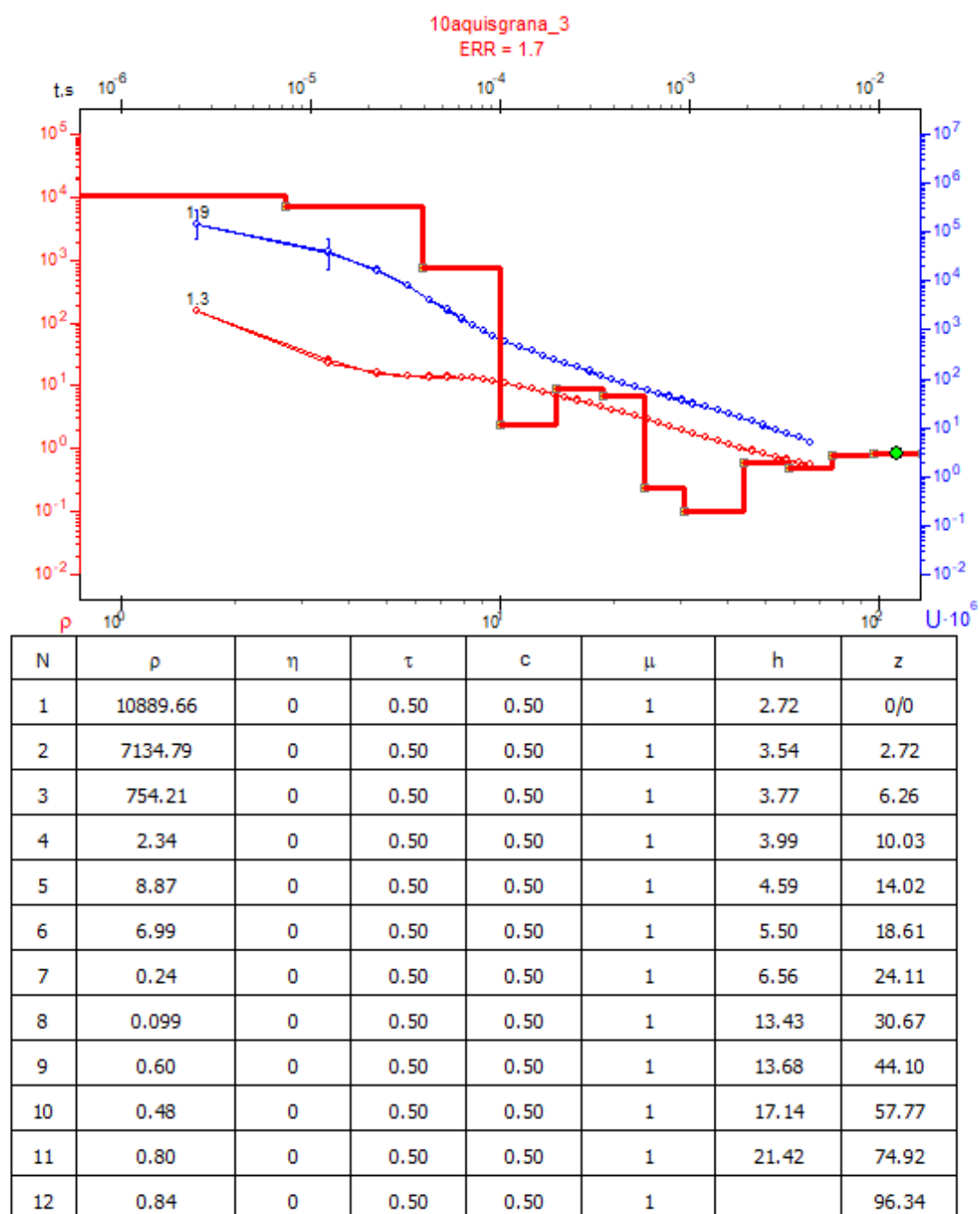


Gráfico 4. 24. Curva procesada con tabla de valores (E10_único)

Se muestran dos nódulos resistivos, uno en los primeros 3 m y el otro entre 14 y 18 m.

4.2.10.2.- Bucle centrado

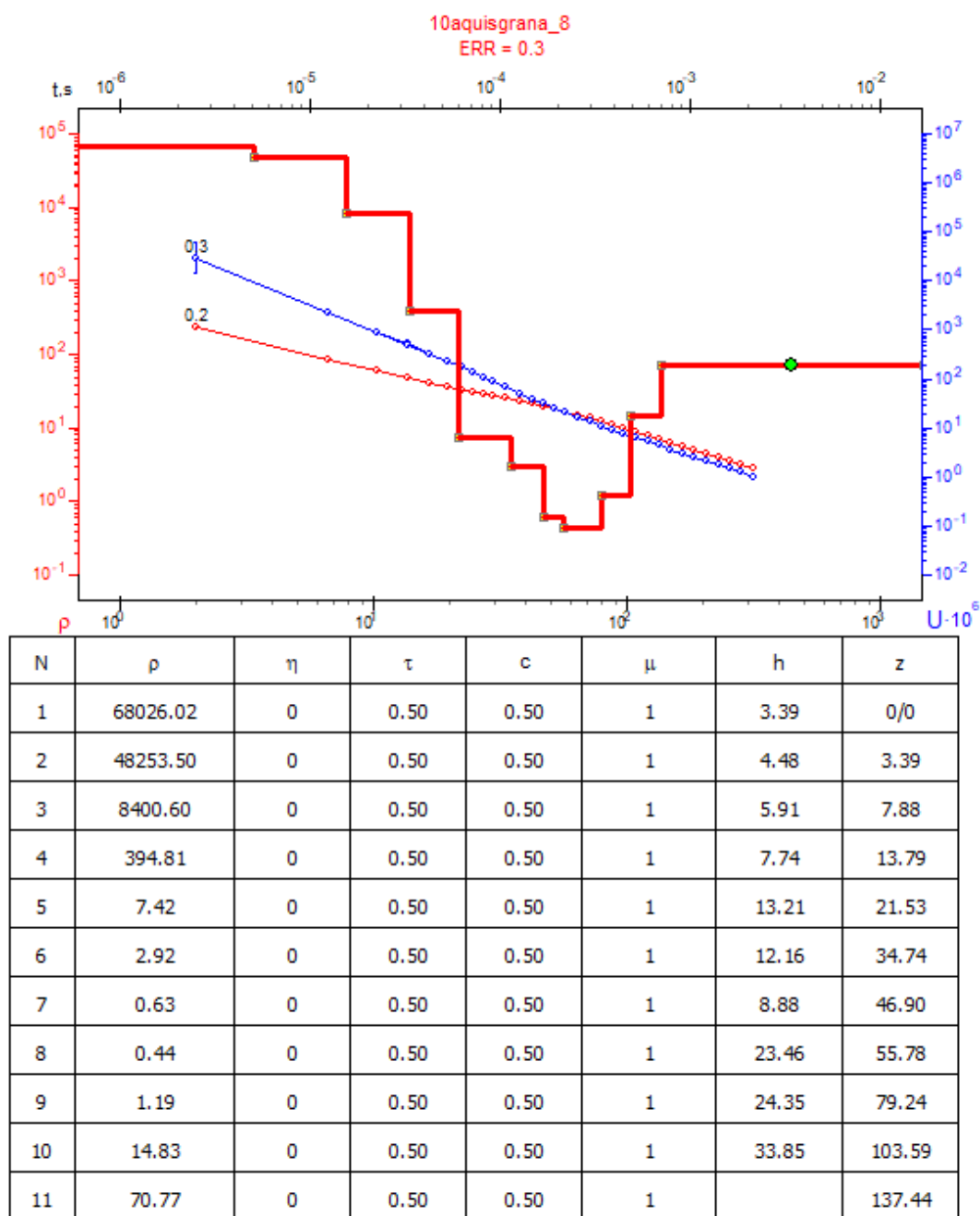


Gráfico 4. 25. Curva procesada con tabla de valores (E10_centrado)

En este caso se perciben los primeros metros como muy resistivos y una creciente conductividad a partir de los 8 m. No se capta un nivel muy resistivo en profundidad, pero sí un ligero aumento resistivo a los 80 m, lo cual podría considerarse contacto con el zócalo sano.

4.2.11.- Estación 11

4.2.11.1.- Bucle único

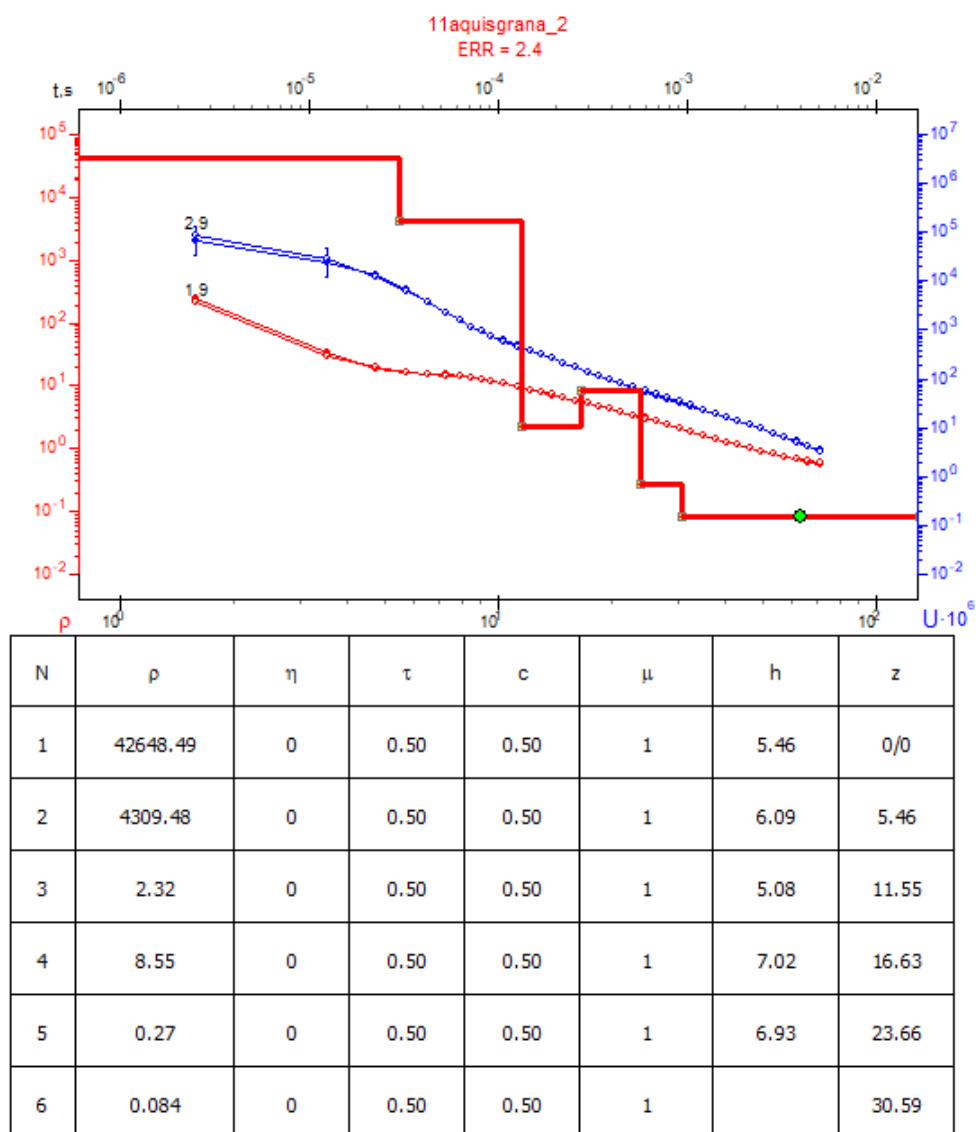


Gráfico 4. 26. Curva procesada con tabla de valores (E11_único)

Se muestran dos nódulos resistivos, uno en los primeros 5 m y el otro entre 11 y 16 m.

4.2.11.2.- Bucle centrado

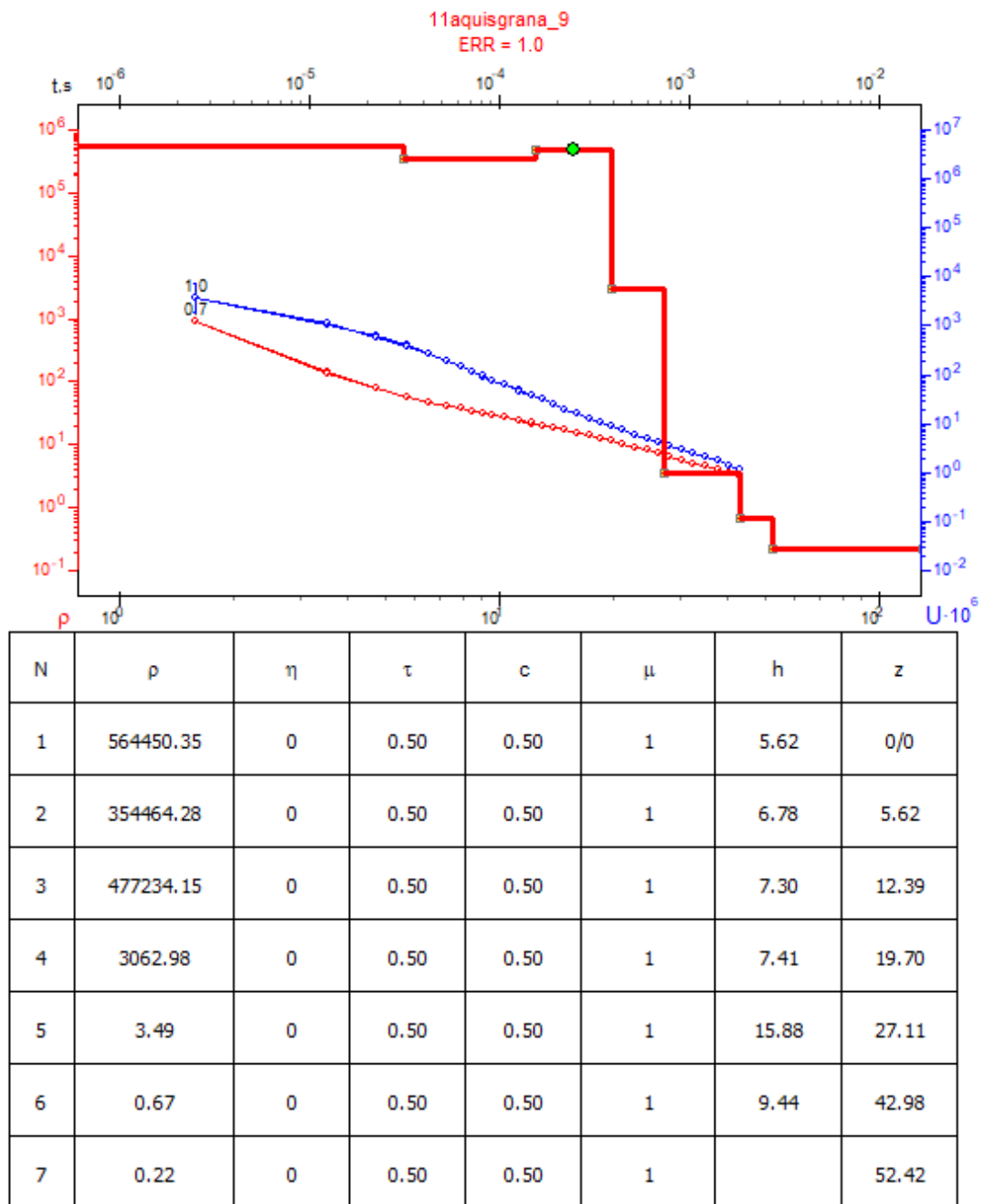
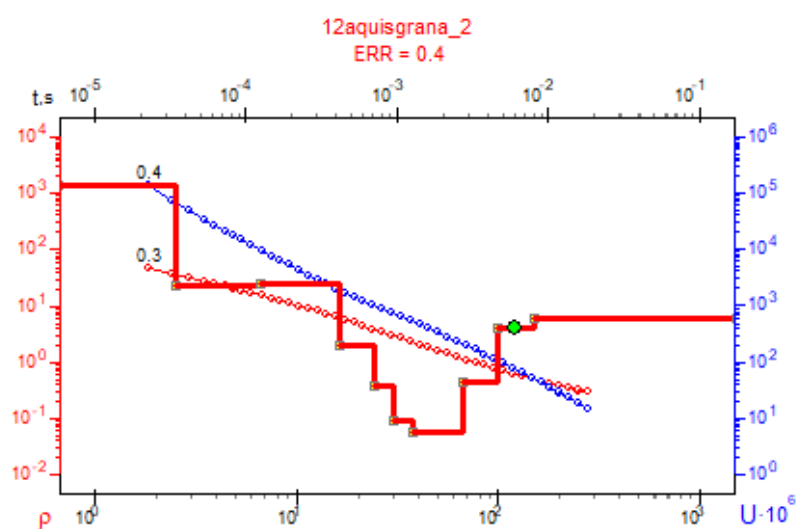


Gráfico 4. 27. Curva procesada con tabla de valores (E11_centrado)

En este caso se perciben los primeros metros como muy resistivos y una creciente conductividad a partir de los 20 m. No se capta un nivel resistivo en profundidad, con lo que no se puede deducir el contacto con el zócalo sano, esto puede ser causado por la presencia de una falla en esa ubicación.

4.2.12.- Estación 12

4.2.12.1.- Bucle único

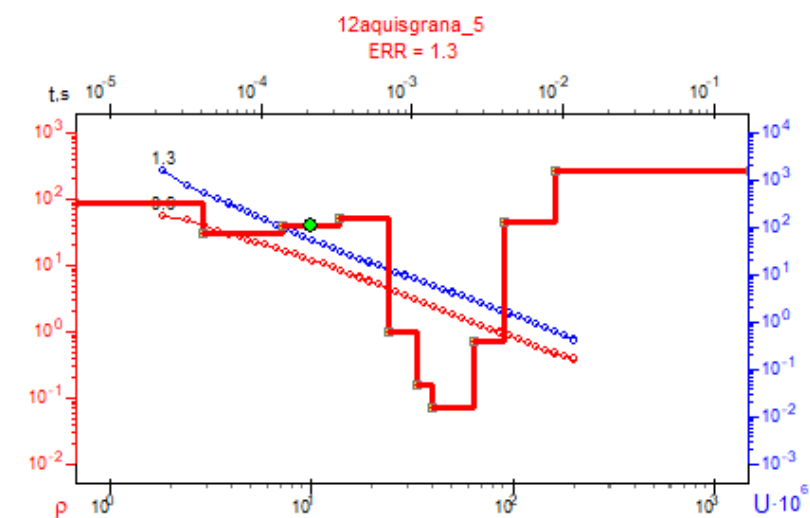


N	ρ	η	τ	c	μ	h	z
1	1368.84	0	0.50	0.50	1	2.52	0/0
2	22.46	0	0.50	0.50	1	4.07	2.52
3	25.61	0	0.50	0.50	1	9.66	6.58
4	1.97	0	0.50	0.50	1	7.83	16.24
5	0.37	0	0.50	0.50	1	6.24	24.07
6	0.091	0	0.50	0.50	1	7.61	30.32
7	0.059	0	0.50	0.50	1	28.37	37.92
8	0.43	0	0.50	0.50	1	32.95	66.29
9	4.07	0	0.50	0.50	1	51.20	99.24
10	5.99	0	0.50	0.50	1		150.45

Gráfico 4. 28. Curva procesada con tabla de valores (E12_único)

Se detecta una elevada resistividad en los primeros 3 metros, seguida de una creciente conductividad que encuentra su máximo entre los 30 y 38 metros de profundidad. Después se observa un aumento resistivo a los 66m, que podría considerarse el contacto con el sustrato inalterado.

4.2.12.2.- Bucle centrado (bucle móvil 12B)



N	ρ	η	τ	c	μ	h	z
1	86.40	0	0.50	0.50	1	2.87	0/0
2	31.49	0	0.50	0.50	1	4.33	2.87
3	38.75	0	0.50	0.50	1	6.67	7.20
4	52.46	0	0.50	0.50	1	10.28	13.87
5	0.99	0	0.50	0.50	1	8.95	24.15
6	0.15	0	0.50	0.50	1	6.75	33.10
7	0.074	0	0.50	0.50	1	24.20	39.86
8	0.71	0	0.50	0.50	1	25.53	64.05
9	44.75	0	0.50	0.50	1	71.75	89.58
10	266.37	0	0.50	0.50	1		161.33

Gráfico 4. 29. Curva procesada con tabla de valores (E12_centrado)

Se capta un aumento resistivo a los 64 m, con lo que se secunda la información aportada por el bucle único.

4.2.13.- Estación 13

4.2.13.1.- Bucle único

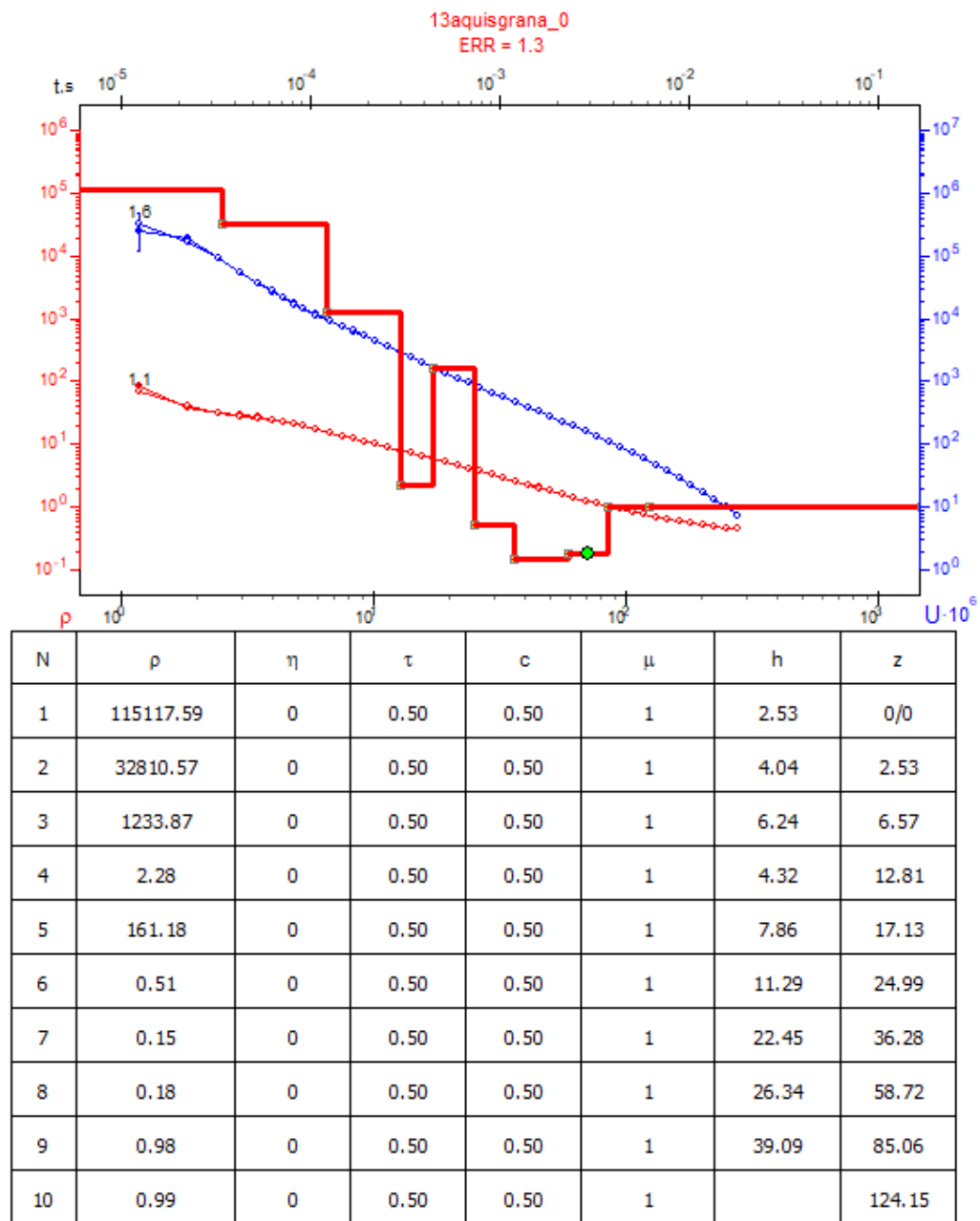


Gráfico 4. 30. Curva procesada con tabla de valores (E13_único)

Se detecta un nódulo resistivo de los 17 a los 25 m y un leve aumento de resistividad a los 85 m que se puede considerar el contacto con el terreno natural inalterado.

4.2.13.2.- Bucle centrado

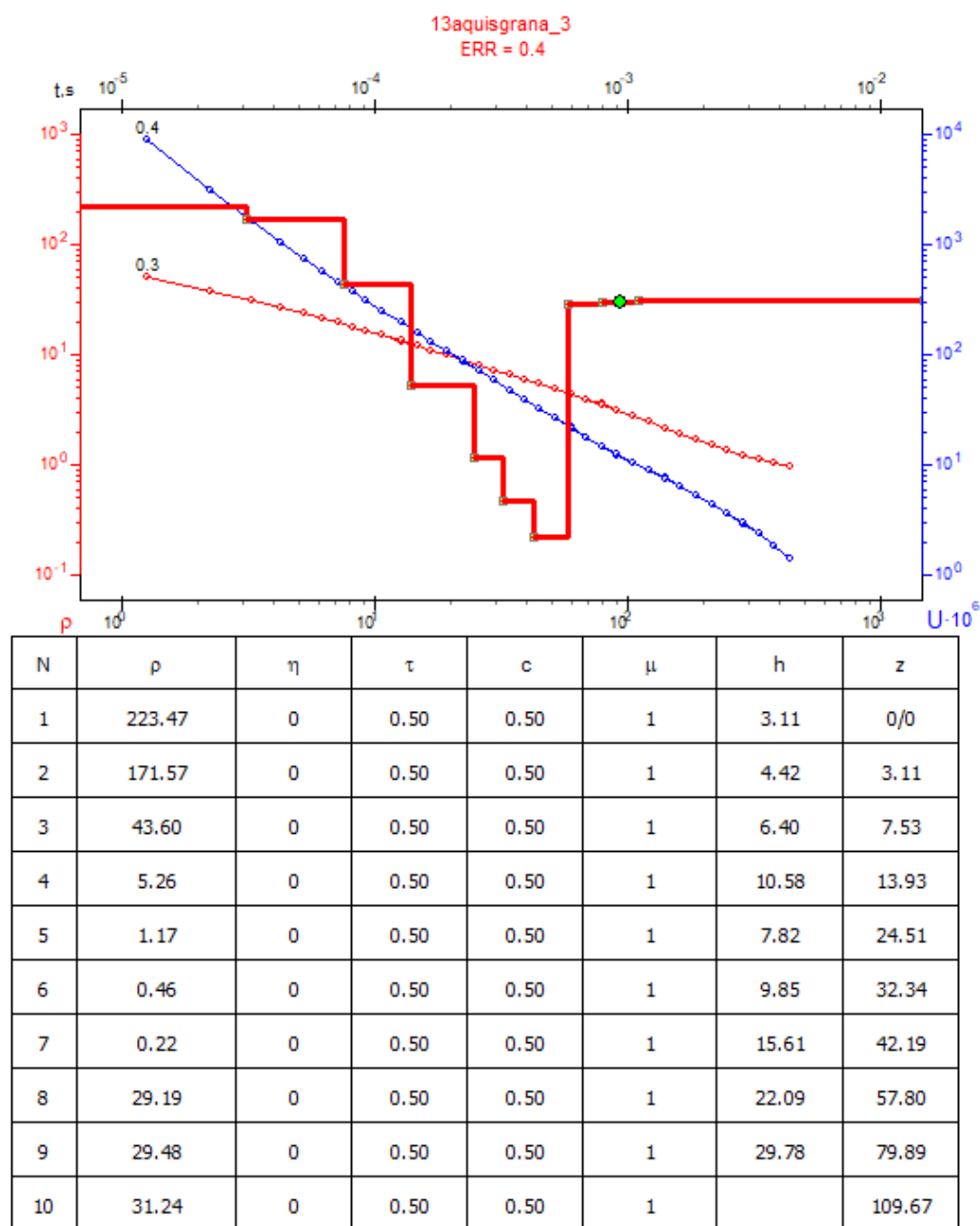


Gráfico 4. 31. Curva procesada con tabla de valores (E13_centrado)

Se detecta un contacto resistivo a los 58 m. Ante la discordancia de la profundidad del contacto con el zócalo de este dispositivo respecto al anterior, se considera el bucle centrado como dato más fiable en profundidad.

4.2.14.- Estación 14

4.2.14.1.- Bucle único

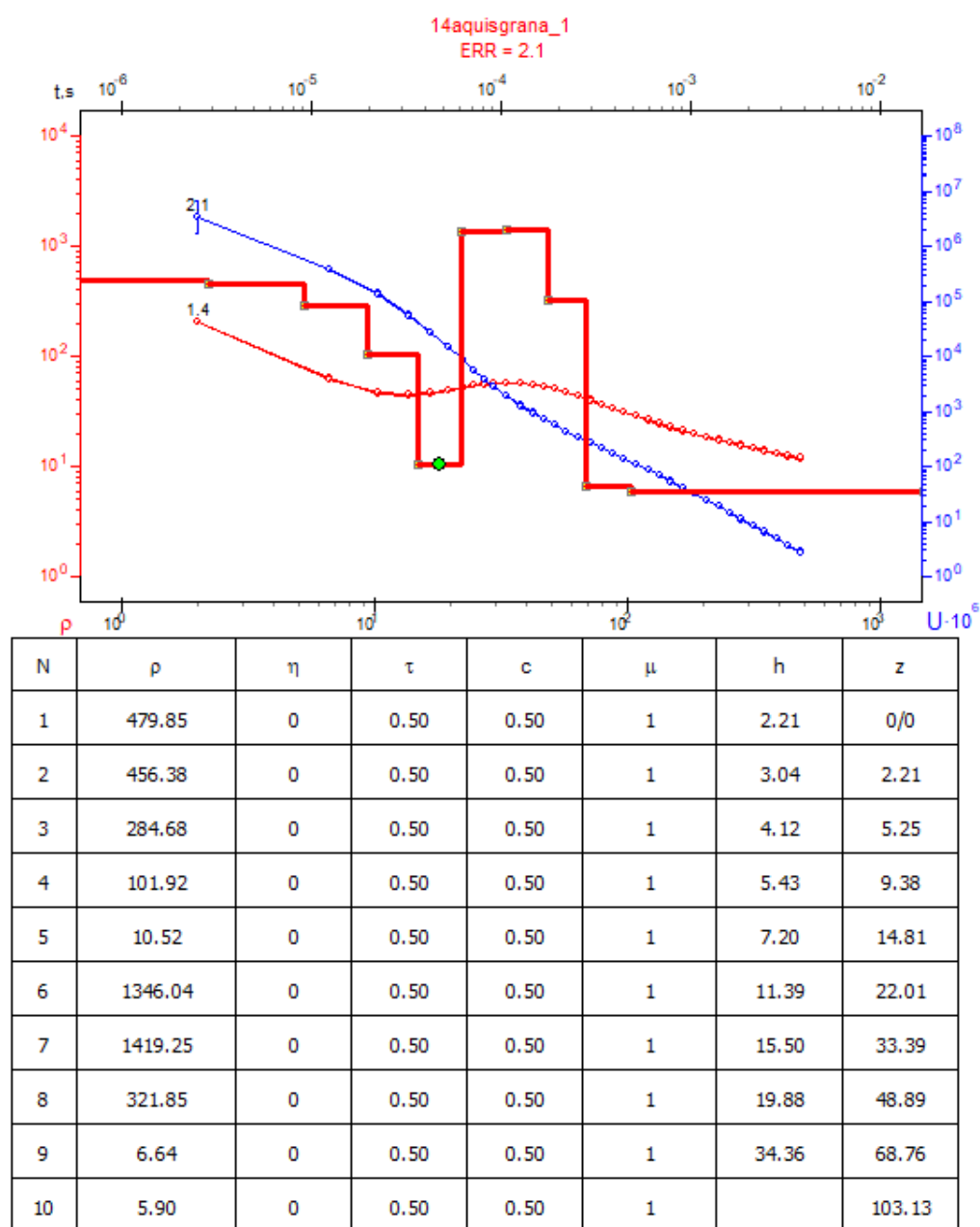


Gráfico 4. 32. Curva procesada con tabla de valores (E14_único)

La posición de este dato sólo coincide con la del bucle móvil 14C, con lo cual los demás dispositivos no podrán ser contrastados con este, ni se tomarán en consideración los valores a profundidades someras de estos.

En este gráfico se observa una resistividad media en superficie y un nódulo resistivo entre los 22 y 33m. No se aprecia contacto con el zócalo.

4.2.14.2.- Bucle móvil A

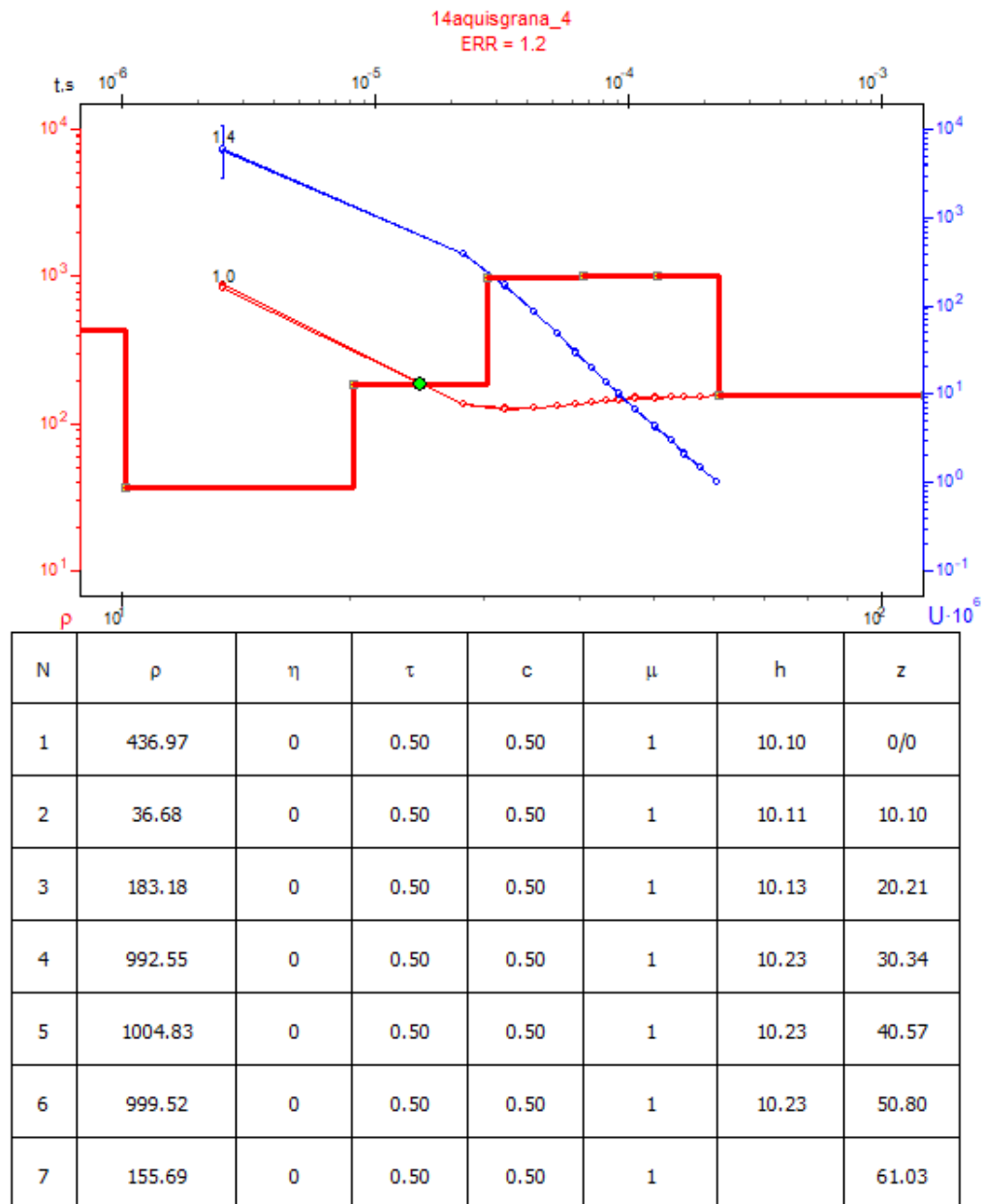


Gráfico 4. 33. Curva procesada con tabla de valores (E14_A)

Se detecta un ligero aumento resistivo a los 20 m, pero se desarrolla con más intensidad a los 30 m, con lo que se considera esta última cota como el contacto con el zócalo, ya que además se ajusta mejor al modelo geológico de la ubicación del centroide.

4.2.14.3.- Bucle móvil B

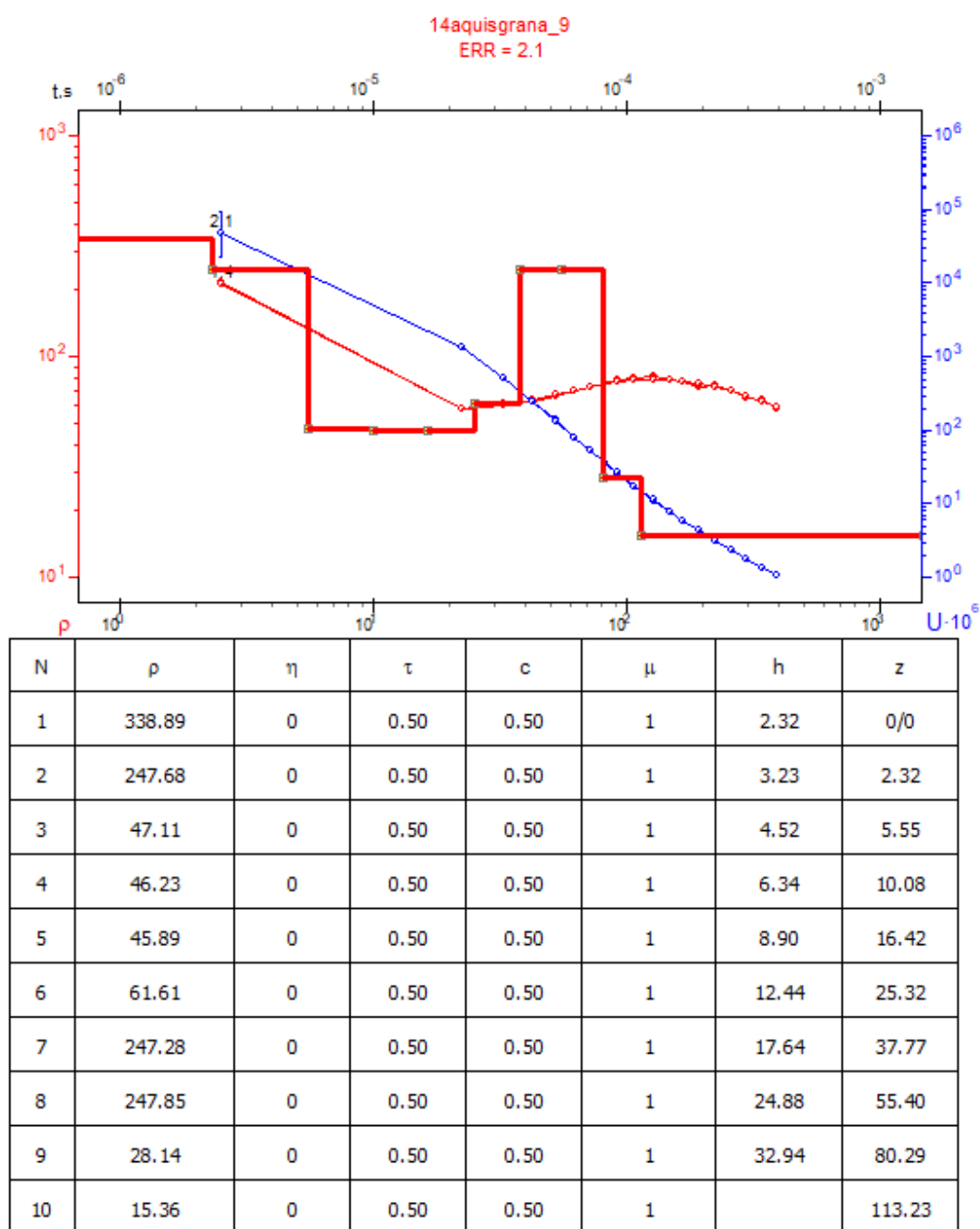


Gráfico 4. 34. Curva procesada con tabla de valores (E14_B)

Se detecta el contacto resistivo a 38m, lo cual encaja con la ubicación del centroide.

4.2.14.4.- Bucle móvil C

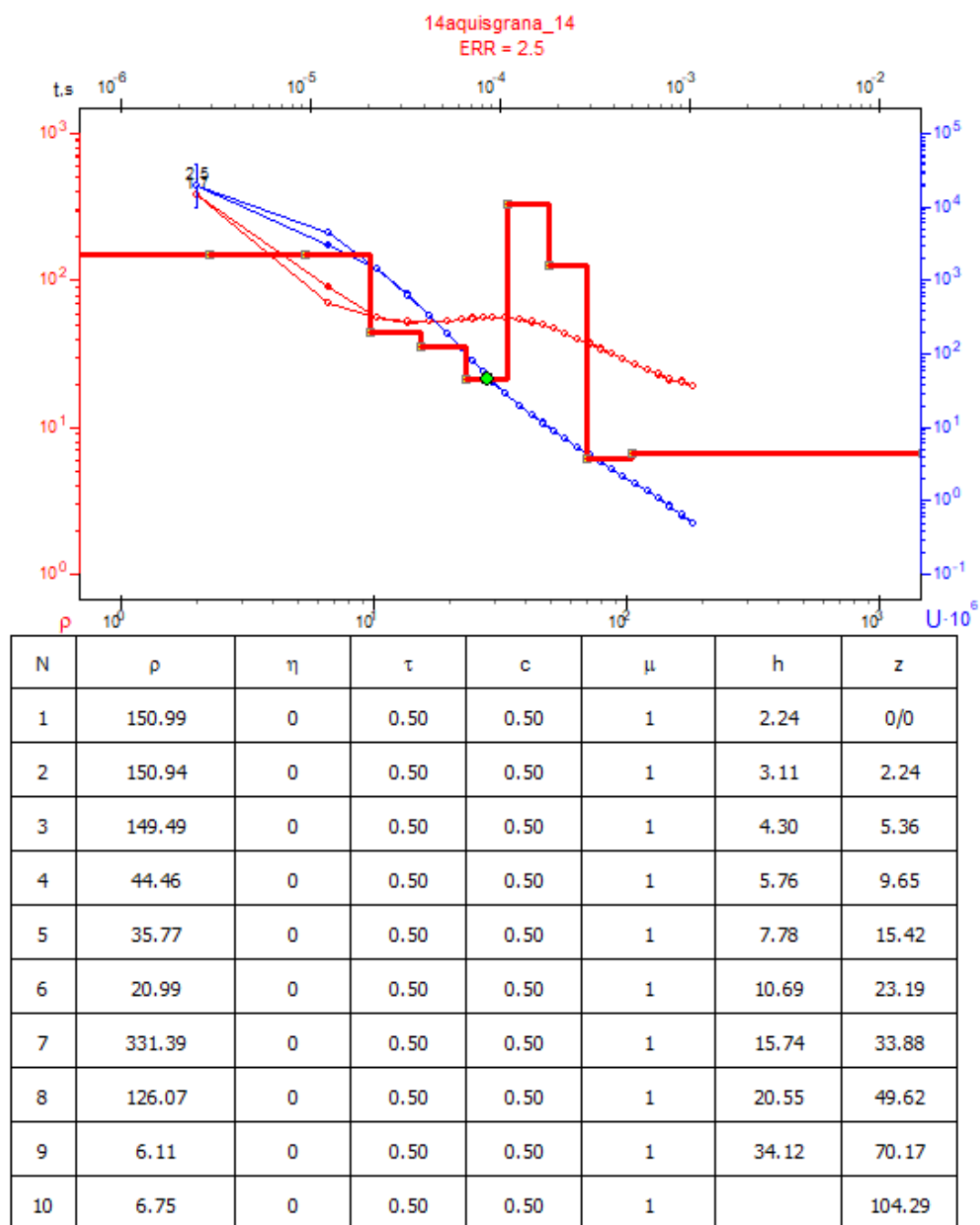


Gráfico 4. 35. Curva procesada con tabla de valores (E14_C)

En este gráfico se detecta el mismo nódulo resistivo mencionado en el bucle único, pero dada la poca profundidad del contraste resistivo, no se puede considerar válida la cota de este bucle. Después de esto se aprecia un ligero aumento resistivo a 104m, que es el contacto con el terreno inalterado.

4.2.14.5.- Bucle móvil D

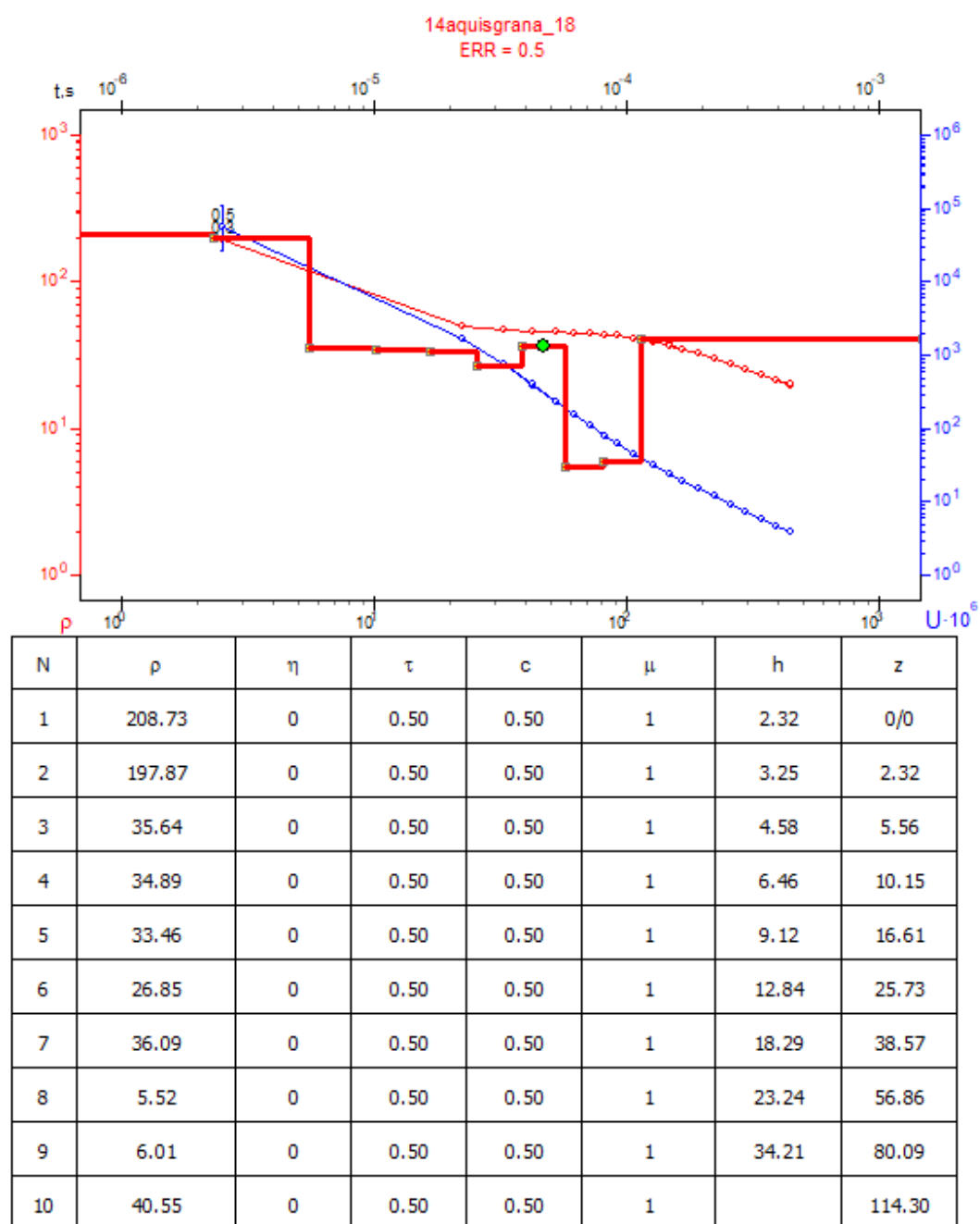


Gráfico 4. 36. Curva procesada con tabla de valores (E14_D)

Se detecta una pequeña subida de resistividad a los 39m, lo cual podría considerarse el contacto con el zócalo, y posteriormente otro aumento resistivo a 114m, que podría tratarse del inicio del material inalterado.

4.2.14.6.- Bucle móvil E

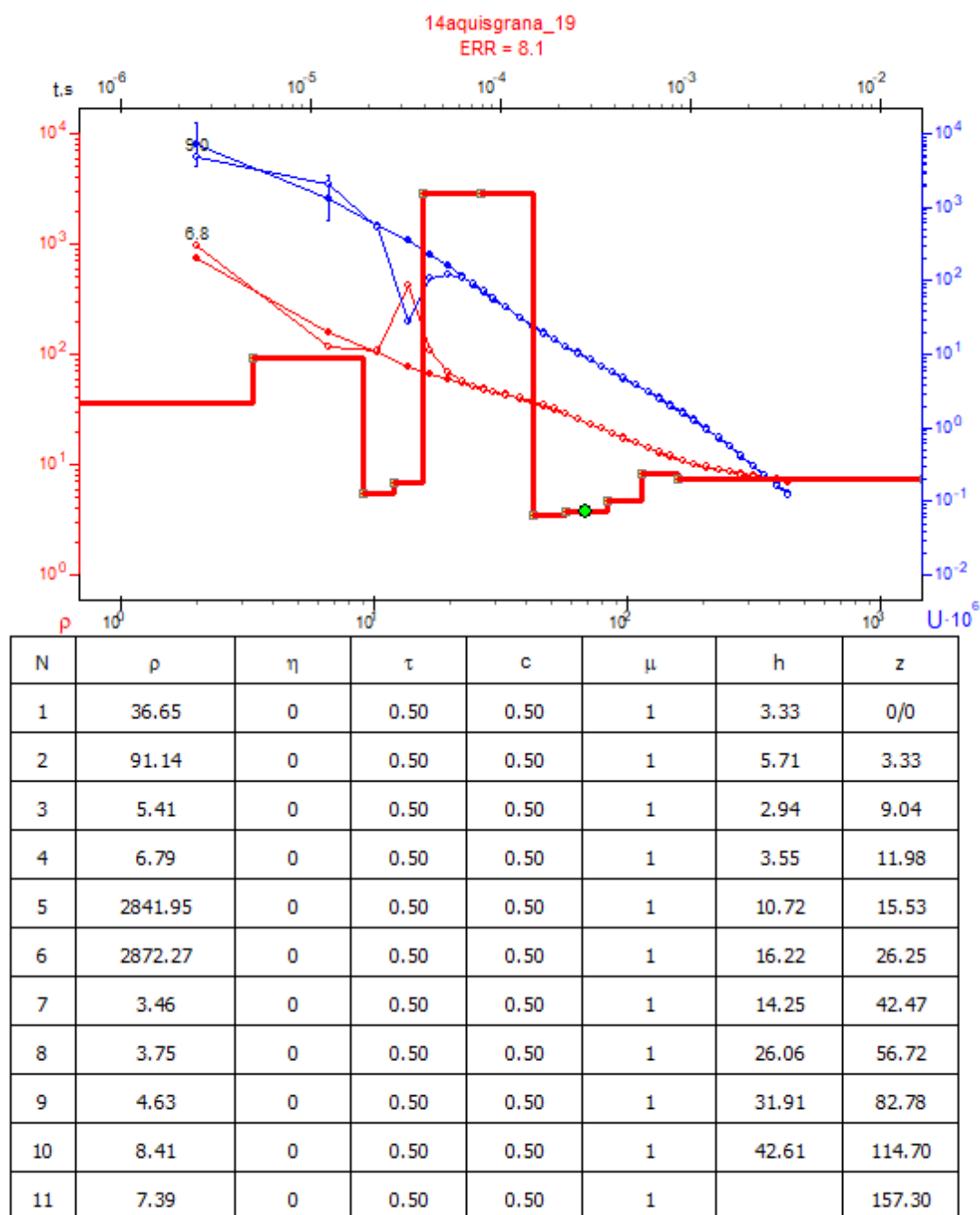


Gráfico 4. 37. Curva procesada con tabla de valores (E14_E)

Se detecta un nódulo muy resistivo entre 15 y 42 m, seguido de un ligero contraste resistivo a 57m, que puede marcar el contacto con el zócalo natural.

4.3. Correlación de las diferentes técnicas.

Para obtener una visión más completa de los resultados obtenidos, así como de la exactitud de ciertas medidas es interesante comparar gráficamente ambos métodos.

Puesto que los bucles de 20x20 y 50x50 en el TDEM se dispusieron en ejes aproximadamente paralelos, es más sencillo visualizar los valores por separado. De este modo se ha generado una comparativa de la tomografía con las estaciones de la 1 a la 11 del TDEM (figura 4.7) y posteriormente otra comparativa de la misma gráfica generada a partir de la tomografía con las estaciones de la 12 a la 14 del TDEM (figura 4.8).

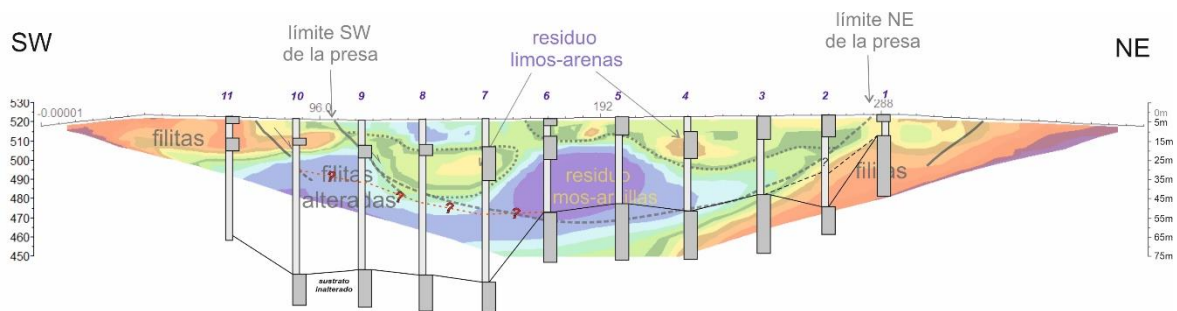


Figura 4. 7. Comparación de resultados de Tomografía y TDEM (bucles 20x20)

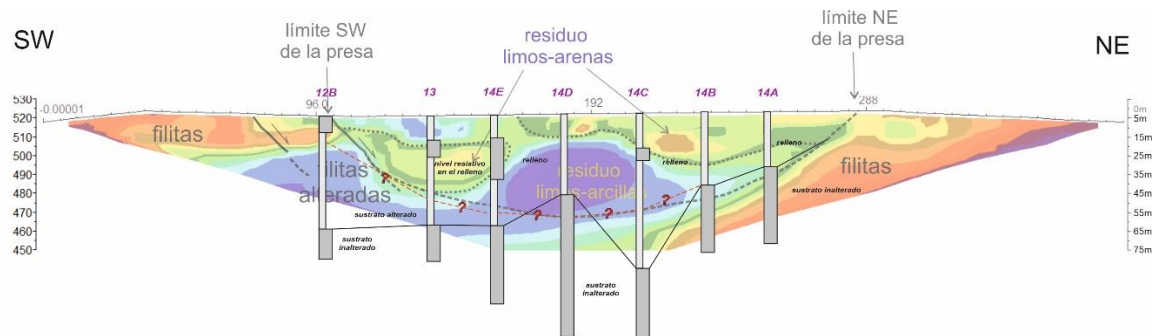


Figura 4. 8. Comparación de resultados de Tomografía y TDEM (bucles 50x50)

En estas figuras se observan las columnas analizadas mediante el TDEM, donde los bloques grises marcan las zonas de mayor resistividad reflejadas en las gráficas que se analizaron en el apartado anterior. Estas columnas se disponen sobre el perfil generado mediante Tomografía, ubicándolas en las posiciones correspondientes a los centroides de cada estación.

Uniendo con una línea negra los contactos resistivos del TDEM, se obtiene una curva que indicaría la supuesta traza del contacto entre el residuo y el terreno natural, pero se observan discordancias entre esta curva y las traza que generan los contactos en Tomografía (curva discontinua gruesa delimitando las zonas de diferentes colores en el gráfico). Dada la

gran diferencia de cota en algunas de las medidas, se confirma la teoría presentada previamente de que en esos casos (estaciones 2, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14C) el contacto encontrado es el inicio del terreno natural inalterado. Esta teoría se respalda conociendo la topografía del valle en el que se ubica la presa, que cuenta con una diferencia de cota de entre 40 y 50 metros en el punto de mayor profundidad.

En estos casos de contactos mucho más profundos de lo esperado, no es posible captar un contraste resistivo en el contacto del residuo con el zócalo debido a la alteración del terreno natural y la conductividad propia de las filitas que afloran en ciertas zonas del zócalo, y por tanto el contraste sólo se muestra una vez se llega al material inalterado.

Es por ello que en ambas gráficas se ha teorizado una posible curva que marca el límite entre el material y el zócalo natural, donde realmente debería encontrarse (líneas discontinuas en rojo) en base a la información obtenida de la tomografía, los datos topográficos y geológicos y la correlación de otras medidas obtenidas mediante el TDEM.

Es importante remarcar que a pesar de las incompatibilidades mencionadas, gran parte de los valores obtenidos en el TDEM coinciden con los resultados de la tomografía (dejando un pequeño margen de error), como es el caso de los nódulos resistivos más superficiales, así como los contactos con el zócalo de las estaciones 1, 3, 4, 5, 6, 14D, 14B, y 14A.

Además, las estaciones 4, 5 y 6 resultan especialmente esclarecedoras, puesto que captan en profundidad el contraste resistivo del zócalo donde la tomografía no había sido capaz de ver con claridad.

CONCLUSIONES

Este Trabajo Fin de Grado se ha realizado con el objetivo de caracterizar geométricamente de la presa de lodos de La Aquisgrana, así como estudiar el residuo y la litología subyacente por medio del empleo de técnicas geofísicas. Llegados a este punto de la investigación, se puede confirmar la consecución de estos objetivos, a partir de los cuales se han obtenido las siguientes conclusiones:

- La conjunción de los datos aportados por la Tomografía eléctrica y el TDEM han permitido delimitar el contacto entre el zócalo natural y el residuo, aunque con ciertas dificultades en el sector SO.

Esto se debe a que ambos métodos permiten detectar perfectamente el contacto entre diferentes cuerpos cuando el contraste de resistividades entre ambos es alto. En este sentido, en el sector noreste, donde en el afloramiento se detectaban intercalaciones cuarcíticas (facies muy resistivas) en la serie pelítica, el contacto se detecta con claridad. Por el contrario, en el sector suroeste, donde el zócalo está representado por pizarras oscuras silúricas (muy conductoras), el contacto no queda constatado con ninguno de los dos métodos, debido a que las dos litologías (relleno y zócalo) son muy conductoras, y por tanto, no existe un contraste de comportamiento ni eléctrico ni electromagnético.

- A partir de los resultados obtenidos con estos ensayos se han podido identificar estructuras geológicas que interfieren en el contraste resistivo entre litologías, como es el caso de la falla ubicada en el lado SO del perfil, e incluso diversos niveles de diferente granulometría (limos-arenas y limos-arcillas) presentes en el residuo, detectadas por la existencia de anomalías resistivas.
- En general, la Tomografía eléctrica resulta mucho más esclarecedora que el TDEM, ya que proporciona información gráfica en 2D, mientras que el segundo método sólo aporta información sobre una columna (1D). Sin embargo, el TDEM presenta mejores resultados que la tomografía tanto en los extremos del perfil, donde existe una zona de sombras en la tomografía, como en profundidades elevadas.

Por tanto, los métodos empleados constituyen herramientas versátiles en cuanto a su aplicación que aportan datos de elevada calidad, permitiendo caracterizar el residuo y las litologías subyacentes sin necesidad de emplear métodos directos para la investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, F. (2006). *Sistemas de Información Geográfica (SIG)*, Universidad de Murcia. Recuperado de SIGMUR: <https://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario.pdf>

AZCÁRATE, J.E; ARGÜELLES, A. (1971). *Evolución tectónica y estructuras filonianas en el distrito de Linares*, Rotterdam, Congr. Hispano-Luso-Americano Geol. Econ.

CARRASCO, P. (2013). *Avance en técnicas geofísicas para la caracterización del subsuelo mediante innovación y el uso de herramientas de gestión de información espacial*. [Tesis Doctoral, Universidad de Salamanca].

CASTELLÓ, R.; ORVIZ, F. (1976). *Mapa y Memoria explicativa de la hoja nº 884 (La Carolina) del mapa Geológico de España*. Escala 1:50.000. IGME, Madrid, España.

CIMADEVILLA, D. (2017). *Valoración de la técnica geofísica de los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT) para la caracterización de zonas poco profundas*. [Trabajo Fin de Máster, Universidad de Oviedo].

COLECTIVO PROYECTO ARRAYANES (2010). *La minería y la metalurgia en el Alto Guadalquivir desde sus orígenes hasta nuestros días*, Jaén, Diputación Provincial de Jaén, Instituto de Estudios Giennenses.

CONSEJERÍA DE POLÍTICA INDUSTRIAL Y ENERGÍA DE LA JUNTA DE ANDALUCÍA. (24 de enero de 2023). *La Junta restaurará el entorno minero de Cortijo de la Lara en La Carolina con una inversión de cinco millones de euros*. Recuperado de <https://www.juntadeandalucia.es/organismos/politicaindustrialyenergia/servicios/actualidad/noticias/detalle/392284.html>

DEL OLMO, V. (2009). *Estrío*. Glosario de la Terminología Minera de la Cuenca de Linares. Linares: Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Minas de Linares, Granada, Jaén y Málaga.

GEODIVERSIDAD. (sf). *Orógeno Varisco*. Recuperado el 6 de febrero de 2023 de <http://www.geodiversidad.es/geologia-de-iberia/varisco#:~:text=La%20Orogenia%20Varisca%20aflora%20en,enmascaradas%20por%20la%20Orogenia%20Alpina>.

GRACIA, A. (2019). *Diseño de una planta de Barita en La Carolina*. [Trabajo Fin de Grado, Universidad de Jaén]. TAUJA: Repositorio de Trabajos Académicos de la Universidad de Jaén. <https://hdl.handle.net/10953.1/9713>

GUTIÉRREZ GUZMÁN, F. (Junio 2007). *Minería en Sierra Morena*, Linares, COIT de Minas de Linares, Granada, Jaén y Málaga.

GUTIÉRREZ-MARCO, J.C.; DE SAN JOSÉ, M. A.; PIEREN, A. P. (1990). *Central-Iberian Zone, Autochthonous Sequences. Post-Cambrian Palaeozoic Stratigraphy. In Pre-Mesozoic Geology of Iberia*, Berlin, Springer-Verlag.

HENKE, W. (1926). *Beitrag zur Geologie der Sierra Morena nördlich von La Carolina (Jaén)*, Abh. Senckenberg. Naturforsch. Ges.

HIDALGO, M.C.; REY, J.; BENAVENTE, J.; MARTÍNEZ-LÓPEZ, J. (2009). *Hydrogeochemistry of abandoned Pb sulphide mines: the mining district of La Carolina (southern Spain)*, Springer.

HOEK, E.; KAISER, P. K.; BAWDEN, W. F. (1995). *Support of underground excavations in hard rock*, Rotterdam, Bolkema publishers.

IBERPIX. (sf). Detalle del Cortijo de Lara, La Carolina [Mapa online]. Escala 1:4.265. Recuperado el 2 de febrero de 2023 de <https://www.ign.es/iberpix/visor/>

LILLO, F. J. (1992). *Geology and Geochemistry of Linares-La Carolina Pb-ore field (Southeastern border of the Hesperian Massif)*, Ph. D. Thesis Univ. Leeds-UK.

LILLO, F. J.; LÓPEZ-SOPEÑA, F.; PIEREN, A.; HERNÁNDEZ-SAMANIEGO, A.; SALAZAR, A.; GUTIÉRREZ-MARCO, J. C.; SARMIENTO, G. N.; PARDO-ALONSO, M. V. (1998). *Mapa y Memoria explicativa de la hoja nº 863 (Aldeaquemada) del mapa Geológico de España*. Escala 1:50.000. IGME, Madrid, España.

LILLO, F. J.; PIEREN, A.; HERNÁNDEZ-SAMANIEGO, A.; ÓLIVE, A.; CARRERAS, F.; GUTIÉRREZ-MARCO, J. C.; SARMIENTO, G. N.; FERNÁNDEZ, D. C. (1998). *Mapa y Memoria explicativa de la hoja nº 862 (Santa Elena) del mapa Geológico de España*. Escala 1:50.000. IGME, Madrid, España.

MARTÍNEZ, J.; HIDALGO, M. C.; REY, J.; GARRIDO, J.; KOHFAHL, C.; BENAVENTE, J.; ROJAS, D. (2016). *A multidisciplinary characterization of a tailings*

pond in the Linares-La Carolina mining district, Spain, Linares, Journal of Geochemical Exploration.

MARTÍNEZ, J.; REY, J.; HIDALGO, M. C.; BENAVENTE, J. (2012). *Characterizing abandoned mining dams by geophysical (ERI) and geochemical methods: the Linares-La Carolina District (southern Spain)*, Linares. Water, Air, & Soil Pollution.

MARTÍNEZ, J.; REY, J.; HIDALGO, M. C.; GARRIDO, J.; ROJAS, D. (2014). *Influence of measurement conditions on resolution of electrical resistivity imaging: the example of abandoned mining dams in the La Carolina District (Southern Spain)*, Linares, International Journal of Mineral Processing.

MENDOZA, R.; REY, J.; MARTÍNEZ, J.; HIDALGO, M.C. (2022). *Geological and Mining Heritage as a Driver of Development: The NE Sector of the Linares-La Carolina District (Southeastern Spain)*, Geosciences.

METEOBLUE (2022). *Archivo meteorológico La Carolina*. Recuperado de https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/weatherarchive/la-carolina_espa%c3%b1a_2516088?fcstlength=1m&year=2022&month=2

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES (RACEFN). (sf). *RACEFN Glosario de Geología*. Recuperado el 4 de febrero de 2023 de https://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac_geologia/rac.htm

REY, J.; HIDALGO, M.C. (2004). *Siliciclastic sedimentation and sequence stratigraphic evolution on a storm-dominated shelf: the Lower Ordovician of the Central Iberian Zone (NE Jaén, Spain)*, Sedimentary Geology.

REY, J.; HIDALGO, M.C.; MARTÍNEZ-LÓPEZ, J. (2005). *Upper Ordovician-Lower Silurian Transgressive-Regressive Cycles of the Central Iberian Zone (NE Jaén, Spain)*, Geological Journal.

REY, J.; MARTÍNEZ-LÓPEZ, J. (2012). *Prospección Geofísica mediante Tomografía Eléctrica. Ejemplos de aplicación en proyectos realizados y/o en ejecución*. En Linares: EPS de Linares.

REYNOLDS, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons.

RÍOS, S. (1977). *Estudio del metalotecto plumbífero del Ordoviense (La Carolina-Santa Elena, Sierra Morena Oriental, Provincia de Jaén)*, Madrid, Univ. Politécnica Madrid.

ROJAS, D. (2019). *Influencia de los residuos geomineros sobre el medio hídrico en el Distrito Minero de La Carolina (Jaén)*. [Tesis Doctoral, Universidad de Jaén].

ROJAS, D.; HIDALGO, M.C.; KOHFAHL, C.; REY, J.; MARTÍNEZ-LÓPEZ, J.; BENAVENTE, J. (2019). *Oxidation Dynamics and Composition of the Flotation Plant Derived Tailing Impoundment Aquisgrana (Spain)*, Springer.

SERRANO ONTIVEROS, J. (2003). *Caracterización geofísica de filtraciones de agua en el subsuelo*. [Tesina, UPC]. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona, Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2099.1/6231>

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge university press.

YÁNEZ, R.A. (2017). *Análisis interpretativo del recurso hídrico subterráneo utilizando el método transiente electromagnético en el dominio del tiempo en la cuenca del Río Limarí, IV Región de Coquimbo, Chile*. [Trabajo Fin de Máster, Universidad de Concepción].

ANEXOS

I. Tablas de parámetros de medida empleados en el análisis TDEM

Tabla I. 1. Parámetros de medida Estación 1 TDEM

Num	File	Quality	Line	Station	Comp	Area(TX)	N(TX)	Area(RX)	N(RX)	Current(A)	Range(V)	Time-off(ms)
1	1aquisgrana_0.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	3	10	10
2	1aquisgrana_1.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	5	10	10
3	1aquisgrana_2.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	5	1	10
4	1aquisgrana_3.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	1	10	10
5	1aquisgrana_4.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	1	10	10
6	1aquisgrana_5.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	10	10
7	1aquisgrana_6.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	10	10
8	1aquisgrana_7.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	1	10
9	1aquisgrana_8.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	3	1	10

Tabla I. 2. Parámetros de medida Estación 2 TDEM

Num	File	Quality	Line	Station	Comp	Area(TX)	N(TX)	Area(RX)	N(RX)	Current(A)	Range(V)	Time-off(ms)
1	2aquisgrana_0.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	3	1	10
2	2aquisgrana_1.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	3	10	10
3	2aquisgrana_2.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	5	10	10
4	2aquisgrana_3.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	5	1	10
5	2aquisgrana_4.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	1	10
6	2aquisgrana_5.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	10	10
7	2aquisgrana_6.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	3	10	10
8	2aquisgrana_7.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	3	1	10

Tabla I. 3. Parámetros de medida Estación 3 TDEM

Num	File	Quality	Line	Station	Comp	Area(TX)	N(TX)	Area(RX)	N(RX)	Current(A)	Range(V)	Time-off(ms)
1	3aquisgrana_0.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	3	1	10
2	3aquisgrana_1.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	3	10	10
3	3aquisgrana_2.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	5	10	10
4	3aquisgrana_3.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	5	1	10
5	3aquisgrana_4.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	10	10
6	3aquisgrana_5.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	1	10
7		☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	3	1	10
8	3aquisgrana_7.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	1	10
9	3aquisgrana_8.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	3	10	10

Tabla I. 4. Parámetros de medida Estación 4 TDEM

Num	File	Quality	Line	Station	Comp	Area(TX)	N(TX)	Area(RX)	N(RX)	Current(A)	Range(V)	Time-off(ms)
1	4aquisgrana_0.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	3	10	10
2	4aquisgrana_1.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	3	1	10
3	4aquisgrana_2.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	5	1	10
4	4aquisgrana_3.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	5	10	10
5	4aquisgrana_4.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	10	10
6	4aquisgrana_5.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	1	10
7	4aquisgrana_6.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	3	1	10
8	4aquisgrana_7.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	3	10	10

Tabla I. 5. Parámetros de medida Estación 5 TDEM

Num	File	Quality	Line	Station	Comp	Area(TX)	N(TX)	Area(RX)	N(RX)	Current(A)	Range(V)	Time-off(ms)
1	5aquisgrana_0.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	3	10	10
2	5aquisgrana_1.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	3	1	10
3	5aquisgrana_2.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	5	1	10
4	5aquisgrana_3.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	5	10	10
5	5aquisgrana_4.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	10	10
6	5aquisgrana_5.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	1	10
7	5aquisgrana_6.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	3	1	10
8	5aquisgrana_7.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	8	1	10

Tabla I. 6. Parámetros de medida Estación 6 TDEM

Num	File	Quality	Line	Station	Comp	Area(TX)	N(TX)	Area(RX)	N(RX)	Current(A)	Range(V)	Time-off(ms)
1	6aquisgrana_0.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	8	1	10
2	6aquisgrana_1.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	5	1	10
3	6aquisgrana_2.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	5	10	10
4	6aquisgrana_3.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	3	10	10
5	6aquisgrana_4.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	3	1	10
6	6aquisgrana_5.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	3	1	10
7	6aquisgrana_6.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	3	10	10
8	6aquisgrana_7.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	10	10
9	6aquisgrana_8.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	1	10
10	6aquisgrana_9.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	8	1	10

Tabla I. 7. Parámetros de medida Estación 7 TDEM

Num	File	Quality	Line	Station	Comp	Area(TX)	N(TX)	Area(RX)	N(RX)	Current(A)	Range(V)	Time-off(ms)
1	7aquisgrana_0.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	8	1	10
2	7aquisgrana_1.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	8	10	10
3	7aquisgrana_10.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	8	1	10
4	7aquisgrana_11.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	8	10	10
5	7aquisgrana_2.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	5	10	10
6	7aquisgrana_3.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	5	1	10
7	7aquisgrana_4.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	3	1	10
8	7aquisgrana_5.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	3	10	10
9	7aquisgrana_6.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	3	10	10
10	7aquisgrana_7.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	3	1	10
11	7aquisgrana_8.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	1	10
12	7aquisgrana_9.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	10	10

Tabla I. 8. Parámetros de medida Estación 8 TDEM

Num	File	Quality	Line	Station	Comp	Area(TX)	N(TX)	Area(RX)	N(RX)	Current(A)	Range(V)	Time-off(ms)
1	8aquisgrana_0.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	8	10	10
2	8aquisgrana_1.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	8	1	10
3	8aquisgrana_10.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	1	10
4	8aquisgrana_11.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	8	1	10
5	8aquisgrana_12.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	8	10	10
6	8aquisgrana_2.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	5	1	10
7	8aquisgrana_3.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	5	10	10
8	8aquisgrana_4.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	3	10	10
9	8aquisgrana_5.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	400	1	3	1	10
10	8aquisgrana_6.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	3	1	10
11	8aquisgrana_7.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	3	1	10
12	8aquisgrana_8.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	3	10	10
13	8aquisgrana_9.bem	☐ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	10	10

Tabla I. 9. Parámetros de medida Estación 9 TDEM

Num	File	Quality	Line	Station	Comp	Area(TX)	N(TX)	Area(RX)	N(RX)	Current(A)	Range(V)	Time-off(ms)
1	9aquisgrana_0.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	400	1	8	10	10
2	9aquisgrana_1.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	400	1	8	1	10
3	9aquisgrana_10.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	40	1	8	1	10
4	9aquisgrana_11.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	40	1	8	10	10
5	9aquisgrana_2.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	400	1	5	1	10
6	9aquisgrana_3.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	400	1	5	10	10
7	9aquisgrana_4.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	400	1	3	10	10
8	9aquisgrana_5.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	400	1	3	1	10
9	9aquisgrana_6.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	40	1	3	1	10
10	9aquisgrana_7.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	40	1	3	10	10
11	9aquisgrana_8.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	10	10
12	9aquisgrana_9.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	1	10

Tabla I. 10. Parámetros de medida Estación 10 TDEM

File	Quality	Line	Station	Comp	Area(TX)	N(TX)	Area(RX)	N(RX)	Current(A)	Range(V)	Time-off(ms)
10aquisgrana_0.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	400	1	8	10	10
10aquisgrana_1.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	400	1	8	1	10
10aquisgrana_10.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	40	1	8	1	10
10aquisgrana_11.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	40	1	8	10	10
10aquisgrana_2.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	400	1	5	1	10
10aquisgrana_3.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	400	1	5	10	10
10aquisgrana_4.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	400	1	3	10	10
10aquisgrana_5.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	400	1	3	1	10
10aquisgrana_6.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	40	1	3	1	10
10aquisgrana_7.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	40	1	3	10	10
10aquisgrana_8.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	10	10
10aquisgrana_9.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	1	10

Tabla I. 11. Parámetros de medida Estación 11 TDEM

Num	File	Quality	Line	Station	Comp	Area(TX)	N(TX)	Area(RX)	N(RX)	Current(A)	Range(V)	Time-off(ms)
1	11aquisgrana_0.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	400	1	8	10	10
2	11aquisgrana_1.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	400	1	8	1	10
3	11aquisgrana_10.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	40	1	8	1	10
4	11aquisgrana_11.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	40	1	8	10	10
5	11aquisgrana_2.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	400	1	5	1	10
6	11aquisgrana_3.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	400	1	5	10	10
7	11aquisgrana_4.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	400	1	3	10	10
8	11aquisgrana_5.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	400	1	3	1	10
9	11aquisgrana_6.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	40	1	3	1	10
10	11aquisgrana_7.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	40	1	3	10	10
11	11aquisgrana_8.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	10	10
12	11aquisgrana_9.bem	☒ OK	1	1	Z	400	1	40	1	5	1	10

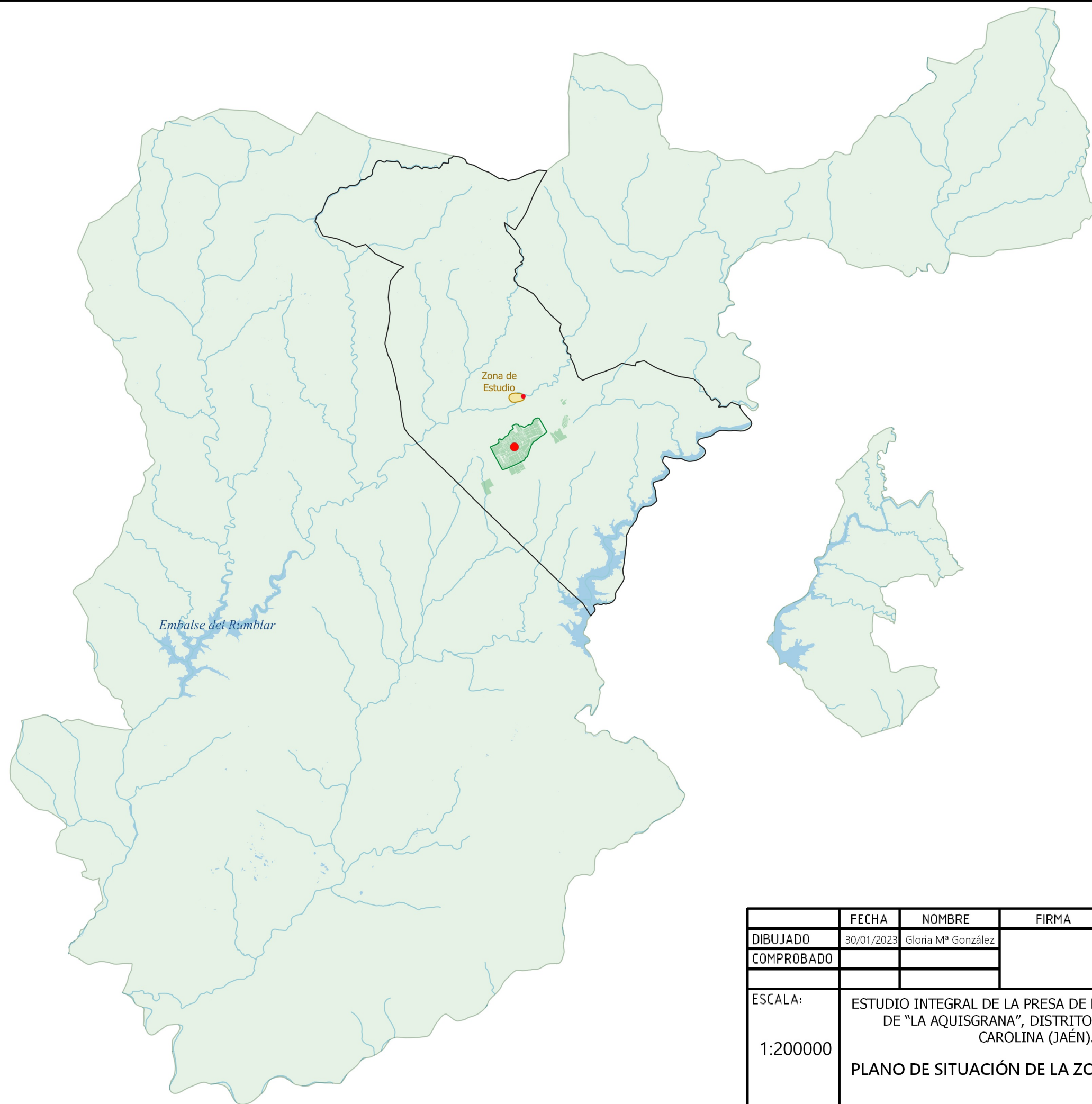
Tabla I. 12. Parámetros de medida Estación 13 TDEM

Num	File	Quality	Line	Station	Comp	Area(TX)	N(TX)	Area(RX)	N(RX)	Current(A)	Range(V)	Time-off(ms)
1	13aquisgrana_0.bem	☒ OK	1	1	Z	2500	1	2500	1	5	1	20
2	13aquisgrana_1.bem	☒ OK	1	1	Z	2500	1	2500	1	8	1	20
3	13aquisgrana_2.bem	☒ OK	1	1	Z	2500	1	40	1	8	1	20
4	13aquisgrana_3.bem	☒ OK	1	1	Z	2500	1	40	1	5	10	20
5	13aquisgrana_4.bem	☒ OK	1	1	Z	2500	1	40	1	5	1	20

Tabla I. 13. Parámetros de medida Estación 14 TDEM

Num	File	Quality	Line	Station	Comp	Area(TX)	N(TX)	Area(RX)	N(RX)	Current(A)	Range(V)	Time-off(ms)
1	14aquisgrana_0.bem	OK	1	1 Z		2500	1	2500	1	5	1	20
2	14aquisgrana_1.bem	OK	1	1 Z		2500	1	2500	1	5	10	20
3	14aquisgrana_10.bem	OK	1	1 Z		2500	1	40	1	5	10	20
4	14aquisgrana_11.bem	OK	1	1 Z		2500	1	40	1	8	10	20
5	14aquisgrana_12.bem	OK	1	1 Z		2500	1	40	1	8	10	20
6	14aquisgrana_13.bem	OK	1	1 Z		2500	1	40	1	5	10	20
7	14aquisgrana_14.bem	OK	1	1 Z		2500	1	40	1	5	1	20
8	14aquisgrana_15.bem	OK	1	1 Z		2500	1	40	1	5	1	20
9	14aquisgrana_16.bem	OK	1	1 Z		2500	1	40	1	5	10	20
10	14aquisgrana_17.bem	OK	1	1 Z		2500	1	40	1	8	10	20
11	14aquisgrana_18.bem	OK	1	1 Z		2500	1	40	1	8	1	20
12	14aquisgrana_19.bem	OK	1	1 Z		2500	1	40	1	8	1	20
13	14aquisgrana_2.bem	OK	1	1 Z		2500	1	2500	1	8	10	20
14	14aquisgrana_20.bem	OK	1	1 Z		2500	1	40	1	8	10	20
15	14aquisgrana_21.bem	OK	1	1 Z		2500	1	40	1	5	10	20
16	14aquisgrana_22.bem	OK	1	1 Z		2500	1	40	1	5	1	20
17	14aquisgrana_3.bem	OK	1	1 Z		2500	1	2500	1	8	1	20
18	14aquisgrana_4.bem	OK	1	1 Z		2500	1	40	1	8	1	20
19	14aquisgrana_5.bem	OK	1	1 Z		2500	1	40	1	8	10	20
20	14aquisgrana_6.bem	OK	1	1 Z		2500	1	40	1	5	10	20
21	14aquisgrana_7.bem	OK	1	1 Z		2500	1	40	1	5	1	20
22	14aquisgrana_8.bem	OK	1	1 Z		2500	1	40	1	5	1	20
23	14aquisgrana_9.bem	OK	1	1 Z		2500	1	40	1	5	1	20

II. Planos



LEYENDA

Centroides de Emplazamientos

- La Carolina 
- La Aquisgrana 

Límites Administrativos

- Zonas pobladas 
- Límite de población 
- Término Municipal 
- Comarca 

Hidrografía

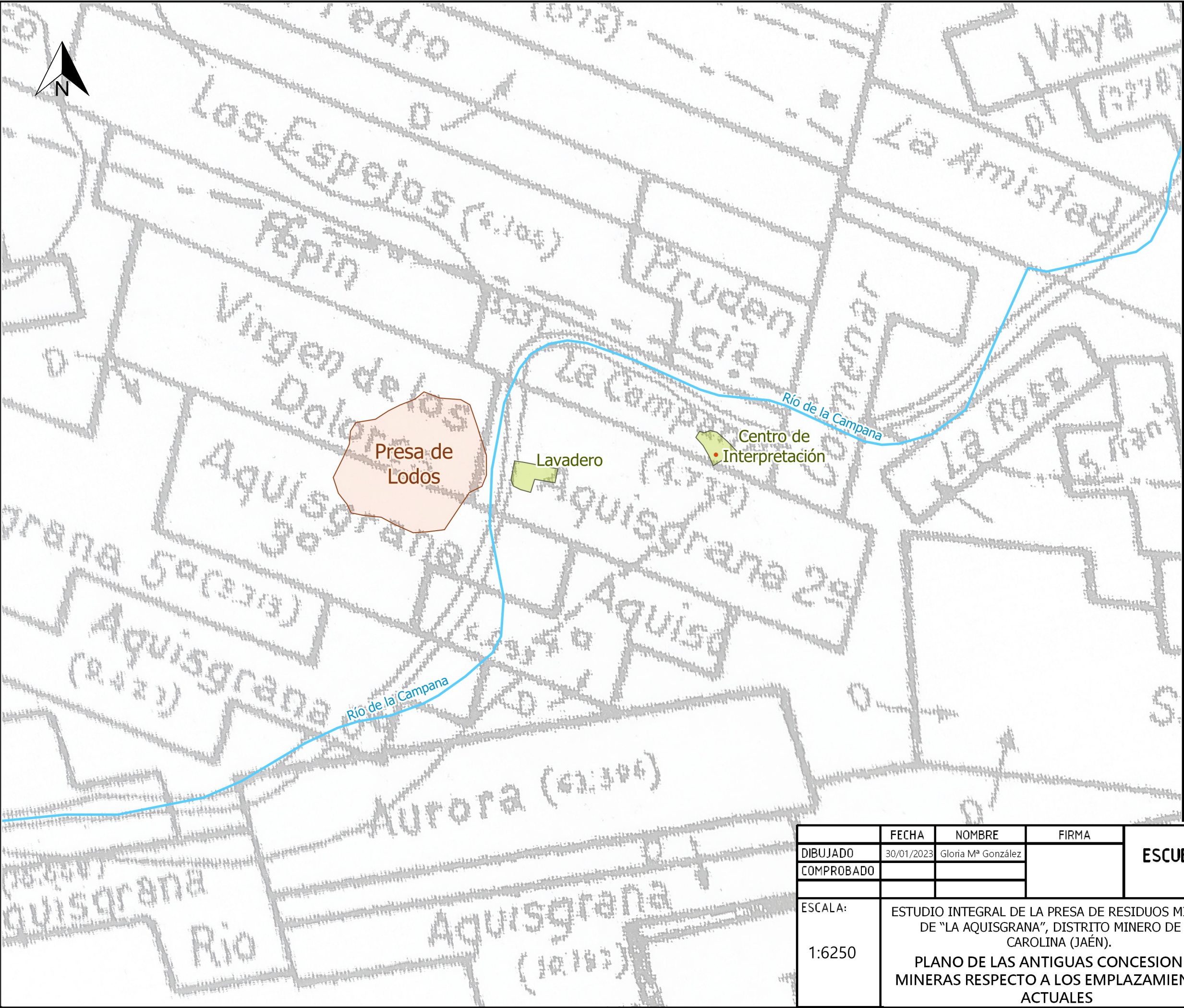
- Ríos 

Mapa de situación:



UNIVERSIDAD DE JAÉN

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO	30/01/2023	Gloria Mª González			
COMPROBADO					
ESCALA:	ESTUDIO INTEGRAL DE LA PRESA DE RESIDUOS MINEROS DE "LA AQUISGRANA", DISTRITO MINERO DE LA CAROLINA (JAÉN).			Nº PLANO	
1:200000				1/5	
				SUSTITUYE A:	
	PLANO DE SITUACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO			SUSTITUIDO POR:	



LEYENDA

EMPLAZAMIENTOS ACTUALES

Instalaciones Aquisgrana

Presa de Lodos

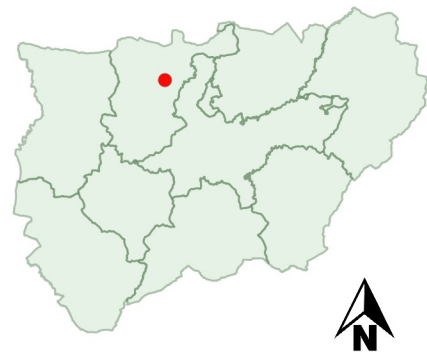
RÍOS Y MASAS DE AGUA

Rio de la Campana

PLANOS HISTÓRICOS

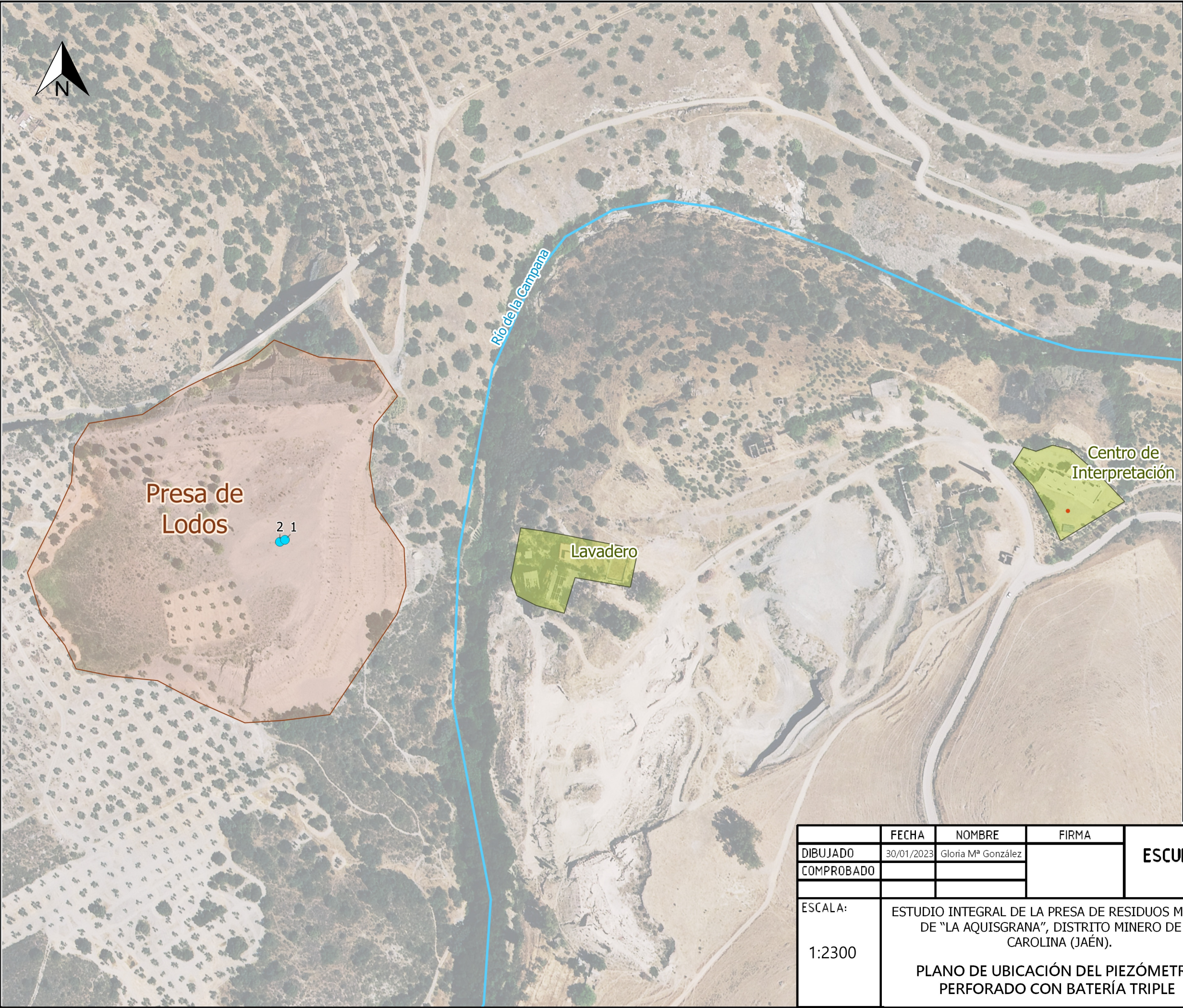
Concesiones Mineras

Mapa de situación:



UNIVERSIDAD DE JAÉN

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO	30/01/2023	Gloria Mª González			
COMPROBADO					
ESCALA:	ESTUDIO INTEGRAL DE LA PRESA DE RESIDUOS MINEROS DE "LA AQUISGRANA", DISTRITO MINERO DE LA CAROLINA (JAÉN). PLANO DE LAS ANTIGUAS CONCESIONES MINERAS RESPECTO A LOS EMPLAZAMIENTOS ACTUALES			Nº PLANO	
1:6250				2/5	
				SUSTITUYE A:	
				SUSTITUIDO POR:	



LEYENDA

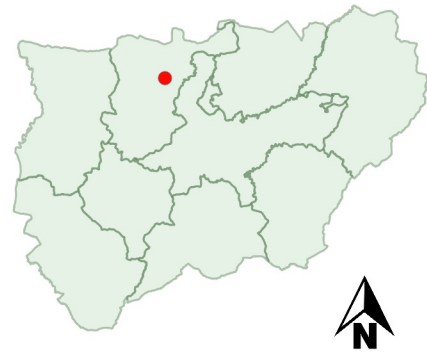
EMPLAZAMIENTOS ACTUALES

- Instalaciones Aquisgrana
- Presa de lodos
- Piezómetro

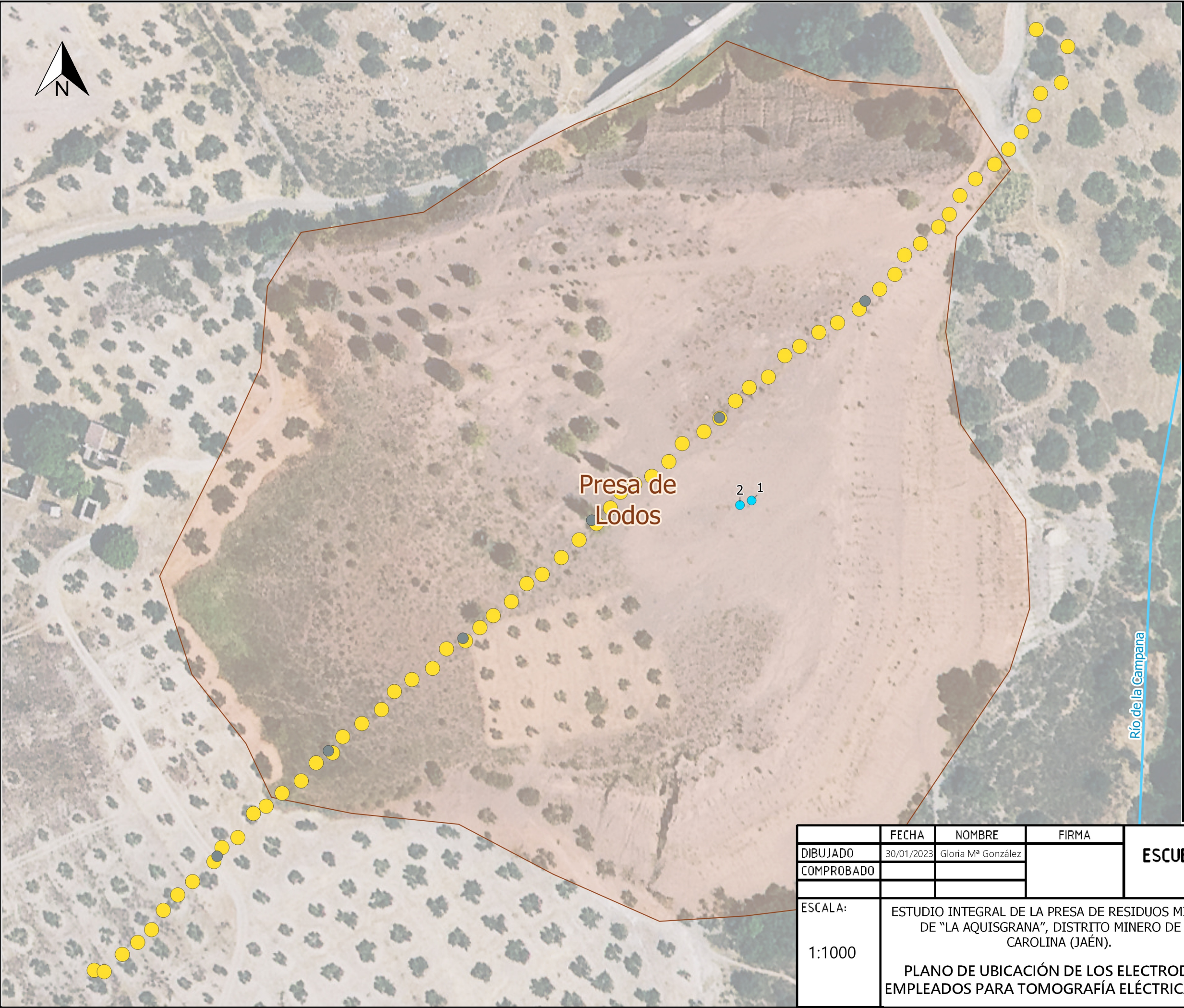
RÍOS Y MASAS DE AGUA

- Río de la Campana

Mapa de situación:



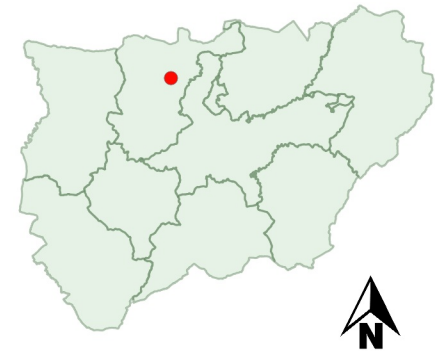
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO	30/01/2023	Gloria Mª González			
COMPROBADO					
ESCALA:	ESTUDIO INTEGRAL DE LA PRESA DE RESIDUOS MINEROS DE "LA AQUISGRANA", DISTRITO MINERO DE LA CAROLINA (JAÉN).			Nº PLANO	
1:2300				3/5	
				SUSTITUYE A:	
	PLANO DE UBICACIÓN DEL PIEZÓMETRO PERFORADO CON BATERÍA TRIPLE			SUSTITUIDO POR:	



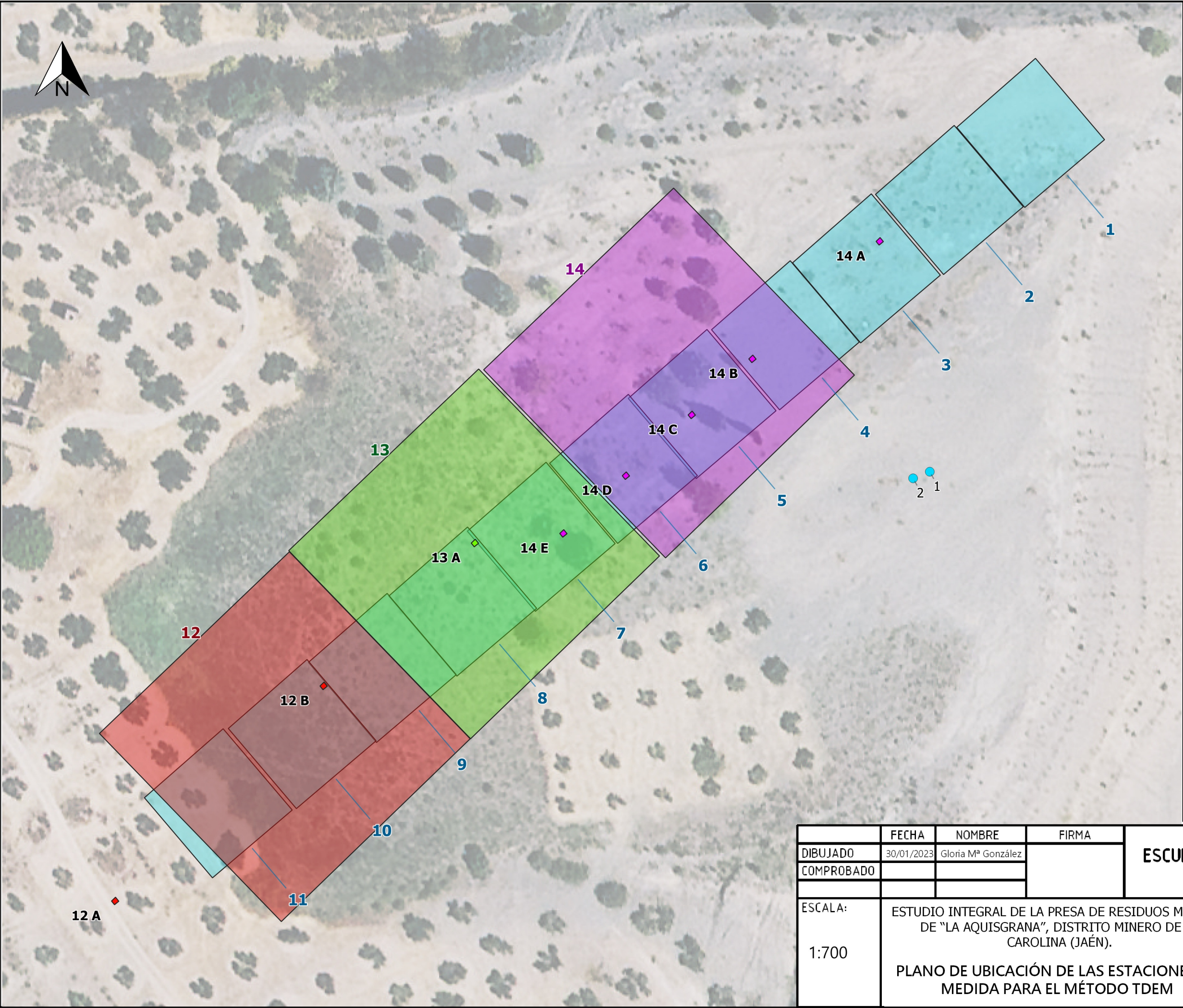
LEYENDA

- UBICACIÓN DEL EQUIPO**
- Electrodos
 - Conexiones
 - Piezómetro
- EMPLAZAMIENTOS ACTUALES**
- Presa de lodos
- RÍOS Y MASAS DE AGUA**
- Río de la Campana

Mapa de situación:



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	30/01/2023	Gloria Mª González		
COMPROBADO				
ESCALA:	ESTUDIO INTEGRAL DE LA PRESA DE RESIDUOS MINEROS DE "LA AQUISGRANA", DISTRITO MINERO DE LA CAROLINA (JAÉN). PLANO DE UBICACIÓN DE LOS ELECTRODOS EMPLEADOS PARA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA (ERI)			Nº PLANO
1:1000				4/5
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:

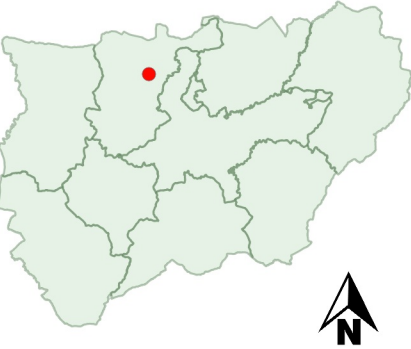


LEYENDA

Estaciones de medida

- Estación 14 (50x50)
- Estación 13 (50x50)
- Estación 12 (50x50)
- Estaciones 1-11 (20x20)
- Receptores móviles (E14)
- Receptores móviles (E13)
- Receptores móviles (E12)
- Piezómetro

Mapa de situación:



UNIVERSIDAD DE JAÉN

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO	30/01/2023	Gloria Mª González			
COMPROBADO					
ESCALA:	ESTUDIO INTEGRAL DE LA PRESA DE RESIDUOS MINEROS DE "LA AQUISGRANA", DISTRITO MINERO DE LA CAROLINA (JAÉN).			Nº PLANO	
1:700				5/5	
				SUSTITUYE A:	
	PLANO DE UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES DE MEDIDA PARA EL MÉTODO TDEM			SUSTITUIDO POR:	

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	2
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	10
ÍNDICE DE ANEXOS.....	12
RESUMEN.....	13
INTRODUCCIÓN.....	14
OBJETIVOS.....	17
Objetivos generales.....	17
Objetivos específicos.....	17
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES.....	19
1.1.- Contexto geológico del Distrito Minero de La Carolina.....	19
1.1.1.- Cuarcitas Armoricanas.....	20
1.1.2.- Alternancia Inferior.....	21
1.1.3.- Pizarras de Correderas.....	21
1.1.4.- Alternancia Superior.....	21
1.1.5.- Cuarcitas de Castellar.....	22
1.2.- Tipología de los yacimientos en el distrito minero de La Carolina. Sistema de explotación.....	22
1.3.- Descripción de las técnicas de concentración de mineral utilizadas en el distrito minero de La Carolina. Tipología de residuos.....	24
1.4.- Características geológicas y mineras del área estudiada.....	25
1.5.- Técnicas de investigación directas: sondeo mecánico. Descripción de la técnica de perforación utilizada (batería triple) y testificación realizada...26	
1.6.- Estudios geoquímicos realizados.....	28
1.7.- Hidrogeoquímica de la presa.....	28

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS: TÉCNICAS INDIRECTAS DE INVESTIGACIÓN EN ESTE ESTUDIO.....	31
2.1.-Tomografía eléctrica (ERI).....	31
2.1.1.- <i>Fundamentos y descripción del método:.....</i>	<i>31</i>
2.1.2.- <i>Descripción del equipo.....</i>	<i>34</i>
2.1.3.- <i>Metodología de adquisición de datos en campo.....</i>	<i>36</i>
2.1.4.- <i>Tratamiento e inversión de datos.....</i>	<i>40</i>
2.2.- Método Electromagnético en el Dominio de los Tiempos (TDEM)....	45
2.2.1.- <i>Fundamentos y descripción del método.....</i>	<i>45</i>
2.2.2.- <i>Conceptos relacionados con el TDEM.....</i>	<i>46</i>
2.2.3.- <i>Bucles: distintos dispositivos.....</i>	<i>47</i>
2.2.4.- <i>Descripción del equipo.....</i>	<i>50</i>
2.2.5.- <i>Metodología de adquisición de datos en campo.....</i>	<i>55</i>
2.2.6.- <i>Tratamiento e inversión de datos.....</i>	<i>60</i>
2.3.- Representación cartográfica mediante QGIS.....	65
2.3.1.- <i>QGIS y los Sistemas de Información Geográfica (SIG).....</i>	<i>65</i>
2.3.2.- <i>Metodología del software.....</i>	<i>65</i>
CAPÍTULO 3: TRABAJO DE CAMPO.....	69
3.1. Campaña de Tomografía Eléctrica (ERI).....	69
3.2. Campaña de TDEM.....	74
3.2.1.- <i>Dispositivos, estaciones y medidas.....</i>	<i>74</i>
3.2.2.- <i>Descripción del desarrollo de la jornada.....</i>	<i>76</i>
3.3. Toma de coordenadas y generación de la cartografía.....	79
3.3.1.- <i>Desarrollo cartográfico.....</i>	<i>79</i>
3.3.2.- <i>Fuentes de datos.....</i>	<i>81</i>
3.3.3.- <i>Aplicaciones de QGIS en este proyecto.....</i>	<i>83</i>
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	84

4.1. Tomografía Eléctrica: Discusión e interpretación de los resultados....	84
4.1.1.- Valores de Resistividad.....	84
4.1.2.- Valores de Polarización Inducida	87
4.2. TDEM: Discusión e interpretación de los resultados.....	88
4.2.1.- Estación 1	91
4.2.2.- Estación 2.....	93
4.2.3.- Estación 3.....	95
4.2.4.- Estación 4.....	97
4.2.5.- Estación 5.....	99
4.2.6.- Estación 6.....	101
4.2.7.- Estación 7.....	103
4.2.8.- Estación 8.....	105
4.2.9.- Estación 9.....	107
4.2.10.- Estación 10.....	109
4.2.11.- Estación 11.....	111
4.2.12.- Estación 12.....	113
4.2.13.- Estación 13.....	115
4.2.14.- Estación 14.....	117
4.3. Correlación de las diferentes técnicas.....	123
CONCLUSIONES.....	125
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126
ANEXOS.....	130
I. Tablas de parámetros de medida empleados en el análisis TDEM..	131
II. Planos.....	136
ÍNDICE.....	142