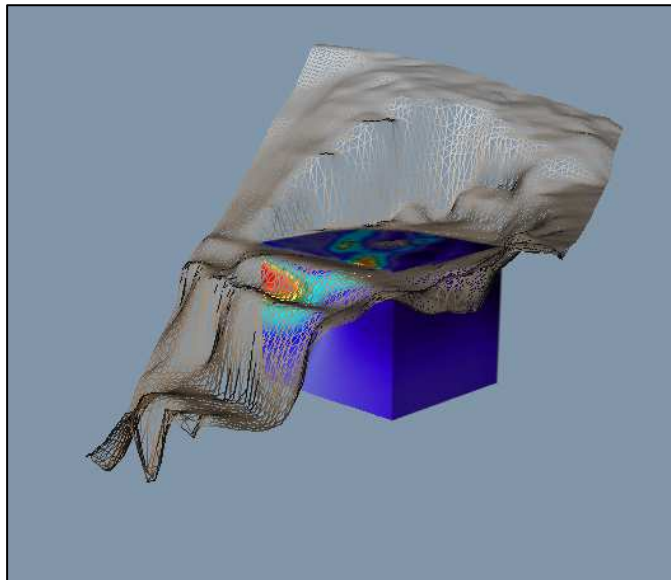


PROYECTO FIN DE MASTER

TÍTULO DEL PROYECTO: “MEJORA DE TÉCNICAS GEOFÍSICAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO MEDIANTE INNOVACIÓN Y EL USO DE HERRAMIENTAS DE GESTIÓN DE INFORMACIÓN ESPACIAL”

MÁSTER EN GEOTECNOLOGÍAS CARTOGRÁFICAS EN INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



AUTOR: PEDRO CARRASCO GARCÍA D.N.I.: 70808154-D

TUTOR: PABLO G. SILVA BARROSO, E.P.S. ÁVILA

FECHA: JULIO 2011

CENTRO: E.P.S. ÁVILA. UNIVERSIDAD DE SALAMANCA



**INDICE**

I.- INTRODUCCION.....	4
II.- TÉCNICAS GEOFÍSICAS, EQUIPOS Y SOFTWARE EMPLEADOS	6
2.1.- Técnicas Geofísicas y equipos empleados	6
2.1.1.- Tomografía Eléctrica (TE)	6
2.1.1.1 - Generalidades.....	6
2.1.1.2 - Resistividad Aparente: Definición	6
2.1.1.3 - Resistividad. Relación con los elementos del Subsuelo.....	7
2.1.1.4 - Dispositivos.	8
2.1.1.5 - Técnica de campo	8
2.1.1.6 - Pseudosección. Resultados.	9
2.1.1.7 - Procesado, Inversión e Interpretación.....	10
2.1.1.8 – Equipo empleado.....	13
2.1.2.- Polarización Inducida (PI)	15
2.1.2.1 - Origen del efecto de la polarización inducida. Generalidades.	15
2.1.2.2 - Polarización de membrana.	15
2.1.2.3 - Polarización de electrodos.	16
2.1.2.4 - Técnica de medida de la polarización inducida en el dominio del tiempo. Generalidades.....	19
2.1.2.5 - Interpretación de los datos.	23
2.1.2.6 - Valoración de método. Consideraciones finales	24
2.1.2.7 – Equipos empleados.....	25
2.1.3.- Mise a la masse (Puesta a masa)	27
2.1.3.1 Principio del método.....	27
2.1.3.2 Parámetros de los Levantamientos	28
2.1.3.3 Aplicaciones en Exploración Minera	28
2.1.3.4 Aplicaciones en embalses y vertederos	28
2.1.4.- Método del Campo Eléctrico natural (Potencial espontaneo)	31
2.1.4.1- Introducción.....	31
2.1.4.2 - Equipo para el levantamiento del campo natural.	36
2.1.4.3 - Metodología y técnica de los trabajos de campo	38
2.1.4.4 -Representación de los resultados de las observaciones	40
2.1.4.5 - Bases de la Interpretación	42
2.1.4.6 - Aplicación del Método	43
2.1.4.7 Medidas de potencial como indicadores de deformación.....	44
2.1.3.- Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (SEDT).....	47
2.1.3.1 - Introducción.....	47
2.1.3.2 – Método electromagnético en el dominio del tiempo SEDT.....	47
2.1.3.3 – Fundamento básico del método SEDT	51
2.1.3.4 – Procesado de datos SEDT.....	53
2.1.3.5 – Equipos empleados.....	54
2.1.4.- Método electromagnético VLF	56
2.1.4.1- Aspectos Generales del Método electromagnético V.L.F.	56
2.1.4.2 - Principio de V.L.F.	56



2.1.4.3 – Equipo empleado.....	58
2.1.5.- Método de Emisión de Campo Electromagnético (ECE).....	59
2.1.5.1 -Principios teóricos.....	59
2.1.5.2 - Resolución del problema inverso.....	61
2.1.5.3 - Registro de Sondeos.....	62
2.2.- Software.....	64
2.1.1.- Rockworks.....	64
2.1.2.- Surfer.....	65
2.1.3.- Voxler.....	66
2.1.4.- SketchUp.....	67
2.1.5.- Google earth.....	68
2.1.6.- ArcGIS.....	68
2.1.7.- Autocad.....	69
2.1.8.- Excell.....	70
III.- METODOLOGÍA, RESULTADOS Y ANALISIS DE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS.....	72
3.1.- Realización de una prospección geofísica mediante Tomografía Eléctrica 3D para la localización de cavidades en el embalse de Santolea (Teruel).	73
3.1.1.- Introducción.....	73
3.1.2.- Objetivos.....	74
3.1.3 Justificación de los trabajos realizados.....	75
3.1.4. Resultados obtenidos.....	75
3.1.4.1. Bloque 3D.....	76
3.1.4.2. Los perfiles 1,2,3, y4.....	82
3.1.4.3. Perfiles complementarios.....	84
3.1.5. Análisis de la investigación.....	87
3.2.- Caracterización del deslizamiento de la margen derecha de la presa de Beninar. T,M. Berja (Almería).	89
3.2.1. Introducción.....	89
3.2.2. Potencial Espontáneo (P.E.).....	89
3.2.2.1 Interpretación.....	91



3.2.3. Tomografía Eléctrica (T.E.)	93
3.2.3.1 <i>Interpretación</i>	95
3.2.4. Sondeos Electromagnéticos en el Dominio de Tiempos (SEDT)	101
3.2.5. Emisión de campo Electromagnético (ECE)	104
3.2.5.1. <i>Trabajos en superficie</i>	104
3.2.5.2. <i>Interpretación de los resultados</i>	104
3.2.6. Trabajos en sondeos	107
3.2.6.1 <i>Resultados</i>	108
3.2.6.2. <i>Sondeo S2 – Inclínómetro I11</i>	108
3.2.6.3. <i>Sondeo S9 – Inclínómetro I18</i>	109
3.2.6.4. <i>Sondeo S11 – Inclínómetro I20</i>	110
3.2.7. Análisis conjunto de resultados	111
3.2.7.1. <i>Estudio tridimensional de la masa deslizada</i>	111
3.3.- Prospección Geofísica para la definición del flujo subterráneo del agua termal de la antigua fuente de los aguachines que quedo bajo el Embalse de Linares (Segovia) y propuesta de aprovechamiento.	115
3.3.1.- Antecedentes	115
3.3.2.- Geología e hidrogeología	117
3.3.2.1.- <i>Encuadre Geológico</i>	117
3.3.2.2.- <i>Hidrogeología</i>	118
3.3.4.- Trabajos realizados	120
3.3.4.1.- <i>Sondeos Electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT)</i>	121
3.1.4.2.- <i>Tomografía Eléctrica</i>	122
3.3.4.3.- <i>Método electromagnético V.L.F</i>	122
3.3.4.4.- <i>Creación de Modelo 3D mediante el programa SketchUP</i>	123
3.3.5.- Resultados	124
IV.- CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS	127
4.1.- Conclusiones	127
4.2.- Desarrollos futuros	128
V.- BIBLIOGRAFÍA	129



I.- INTRODUCCION

En el presente proyecto se inicia una investigación para la mejora de la caracterización del subsuelo mediante el uso de programas específicos de gestión de información espacial y las técnicas geofísicas Tomografía Eléctrica (TE), Polarización Inducida (PI), Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (SEDT), Potencial Espontáneo (PE), Método de Emisión de Campo Electromagnético (ECE) y VLF entre otras.

El objetivo principal de este proyecto es el de servir de base a una futura Tesis Doctoral, en la cual se pretenderá realizar avances en estas técnicas y confirmar que “la geofísica aplicada”, cuando se encuentra asociada a programas de gestión de información espacial, forma una potente herramienta (económica y no intrusiva) para la solución de problemas mineros, geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos, geotérmicos y medioambientales.

Para la consecución de estos objetivos:

- Se mejoraran las técnicas geofísicas anteriormente citadas (mejora teórica del método o mejora de la operatividad del método en campo)
- Se investigarán nuevas aplicaciones de estas técnicas geofísicas en los campos de la hidrogeología, la geotecnia y el medio ambiente. Estas técnicas han sido desarrolladas y se siguen desarrollando principalmente para la localización y cubicación de yacimientos mineros dejando un vacío de investigación en otras aplicaciones.
- Se mejoran las técnicas mediante la utilización de herramientas específicas de gestión de información espacial tales como, el Rockworks, Surfer, Voxler, Sketchup, Autocad, ArcGis, Google earth y otros programas. De esta forma, se podrán representar y estudiar los datos geofísicos obtenidos de una manera más sencilla y global caracterizando de forma más precisa el subsuelo lo que ayudará a la resolución de problemas mineros, geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos, geotérmicos y medioambientales.

Para comenzar esta investigación, para este proyecto se han realizado tres campañas geofísicas en tres lugares de la geografía española, donde la problemática estaba perfectamente caracterizada y por lo tanto se pudieron corroborar los resultados obtenidos en este proyecto. Las tres campañas geofísicas realizadas fueron las siguientes:

1º REALIZACIÓN DE UNA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 3D PARA LA LOCALIZACIÓN DE CAVIDADES EN EL EMBALSE DE SANTOLEA (TERUEL).



2º CARACTERIZACIÓN DEL DESLIZAMIENTO DE LA MARGEN DERECHA DE LA PRESA DE BENÍNAR. T.M. BERJA (ALMERÍA)

3º PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA DEFINICIÓN DEL FLUJO SUBTERRANEO DEL AGUA TERMAL DE LA ANTIGUA FUENTE DE LOS AGUACHINES QUE QUEDO BAJO EL EMBALSE DE LINARES /SEGOVIA) Y PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO.



II.- TÉCNICAS GEOFÍSICAS, EQUIPOS Y SOFTWARE EMPLEADOS

2.1.- Técnicas Geofísicas y equipos empleados

A continuación se enumeran y se describen los fundamentos teóricos de las diferentes técnicas geofísicas y los equipos utilizados para la realización de este proyecto:

2.1.1.- Tomografía Eléctrica (TE)

2.1.1.1 - Generalidades

El método de la tomografía eléctrica en Dos y Tres dimensiones es una técnica de investigación de Resistividad para la caracterización del subsuelo en temas tan importantes como la Contaminación Ambiental Subterránea, la Polución Agrícola, la Arqueología moderna, la Geotecnología, y en general la localización de estructuras y anomalías complejas por lo general subsuperficiales, tanto geológicas como antrópicas.

La Tomografía Eléctrica consiste en medir la resistividad aparente (RA) con un dispositivo tetraelectródico determinado y con una separación constante entre electrodos denominada “a”, e ir variando las distancias entre los pares de electrodos emisor-receptor por múltiplos de un valor denominado “n”, de tal forma que en el resultado final será una sección de RA a varios niveles “n” en profundidad; datos que posteriormente son tratados por medio de algoritmos matemáticos de inversión.

La Inversión devuelve como resultado una “Imagen de resistividades y profundidades reales” que debe de comprobarse con la información geológica, perforaciones, geoquímica, hidrogeología, edafología, etc. A través de la Interpretación se llega a las conclusiones del diagnóstico, que puede ser constatada con las observaciones de campo, datos de perforaciones, etc.

2.1.1.2 - Resistividad Aparente: Definición

Es la variable experimental que expresa los resultados de las mediciones en Tomografía Eléctrica y la que se toma como base para la inversión y posterior interpretación.

Esta está definida por la ecuación:

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

Donde K es la constante de normalización de cada dispositivo o factor geométrico, AV es la diferencia de potencial medido sobre el terreno, e I la corriente inyectada al mismo.



2.1.1.3 - Resistividad. Relación con los elementos del Subsuelo.

Para pasar de la Tomografía Eléctrica de una Imagen de la distribución de la resistividad real del subsuelo, a una estructura geológica, es muy importante y necesario conocer algunas de las resistividades de los diferentes tipos de materiales de subsuelo y de la geología del área bajo estudio.

En la Tabla 1, se observan los valores de resistividad de las rocas más comunes, materiales de suelo y algunas sustancias químicas (Keller y Frischknecht 1966, Daniela y Alberty 1966, ellana 1982). Las rocas ígneas y metamórficas típicamente tienen altos valores de resistividad. La resistividad de estas rocas depende mucho del grado de facturación que posee, y el porcentaje que agua que rellena las fracturas del terreno.

Las rocas sedimentarias comúnmente son más porosas y tienen un alto contenido de agua, lo que normalmente hace disminuir los valores de resistividad.

Los suelos mojados y el agua fresca del terreno tienen aun más bajos valores de resistividad. Los suelos arcillosos normalmente tienen valores de resistividad más bajos que el suelo arenoso. Si embargo, se destaca que existe una superposición en los valores de resistividad de las diferentes clases de rocas y suelos. Esto es debido a que la resistividad de un muestreo particular del suelo o roca depende de un número de factores tales como la porosidad, el grado de saturación de agua y la concentración de sales disueltas.

La resistividad del agua del terreno varía desde 10 a 100 ohm.m dependiendo de la concentración de sales disueltas. Note que el bajo valor de la resistividad (alrededor de los 0.2 ohm.m) en el agua de mar se debe al alto contenido de sal.

En la figura 1 también se muestra el valor de la resistividad de varios materiales. Los metales, tal como el hierro, tienen valores de resistividad sumamente bajos. Los químicos, tal como sodio y cloruro de potasio, pueden reducir mucho el valor de resistividad del agua del terreno a menos de 1 ohm.m con moderación de concentraciones. El efecto de electrolitos, tal como el ácido acético, es comparativamente menor.

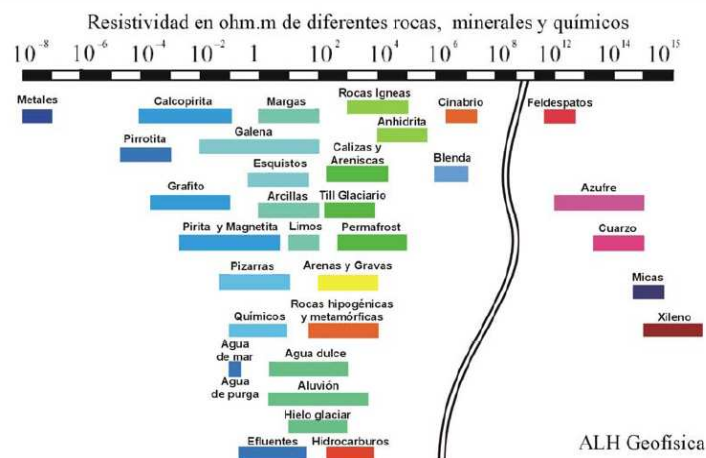


Figura 1. Gráfico de los márgenes de variación más comunes en algunas rocas, minerales y químicos.

La fisuración, impregnación de agua salada, etc., pueden extender estos límites.



2.1.1.4 - Dispositivos.

Un dispositivo es un arreglo de electrodos formando con dos pares de electrodos, dos emisores y dos receptores. A través de los electrodos emisores C1C2 se inyecta la corriente continua al terreno midiendo su intensidad con un miliamperímetro en serie, y a través del segundo par se mide la diferencia potencial entre los electrodos P1P2 con un milivoltímetro. Se tienen arreglos donde uno o dos electrodos se conectan a una distancia lo suficientemente grande, denominados infinitos, a lo cual no producen perturbaciones en la zona de estudio.

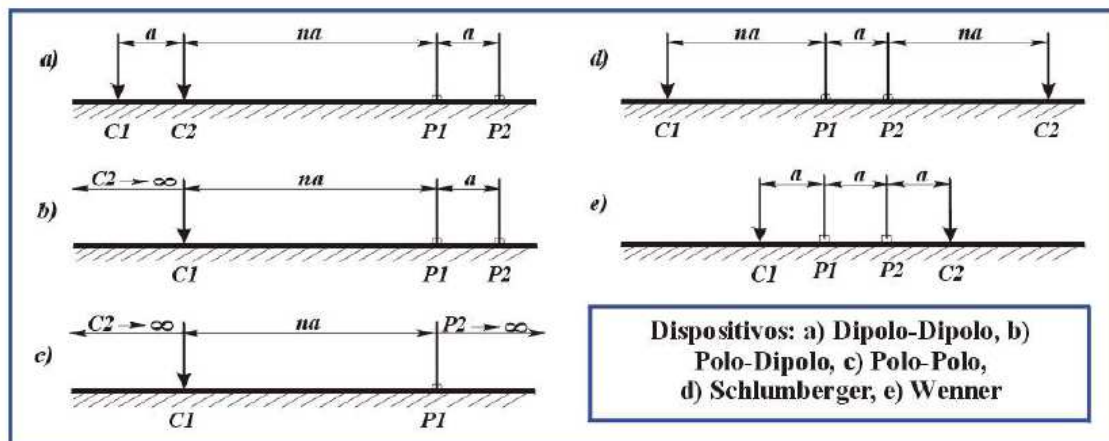


Figura 2. Diferentes Dispositivos usados en Tomografía eléctrica para relevamientos 2D y 3D

Los dispositivos más usados comúnmente para determinaciones de resistividad se muestran en la Figura 2. La elección de la mejor configuración para un sondeo de campo depende del tipo de estructura a ser estudiada, la sensibilidad del resistivímetro y el nivel de ruido de fondo de la zona de estudio.

En la práctica, los conjuntos más usados para la obtención de Imágenes de Resistividad Eléctrica en 2-D son a)Dipolo-Dipolo b)Wenner-Schlumberger c)Wenner d)Polo-Polo d)Polo-Dipolo. De entre las características de un determinado arreglo debe considerarse: i) la profundidad de investigación, ii) la sensibilidad del arreglo a los cambios verticales y horizontales de la resistividad subterránea, iii) la cobertura horizontal de datos y la relación señal ruido.

2.1.1.5 - Técnica de campo

La toma de medidas con el método de la Tomografía Eléctrica, se efectúa comúnmente usando un número grande de electrodos, 25 o más, conectado a un cable multi-conductor (Figura 2). Una microcomputadora portátil junto con un conector electrónico se usa para automáticamente seleccionar los cuatro electrodos correspondientes para cada medida (Figura 3). En la actualidad, tanto el equipo como las técnicas de campo para efectuar sondeos de resistividad 2D están bien desarrollados.

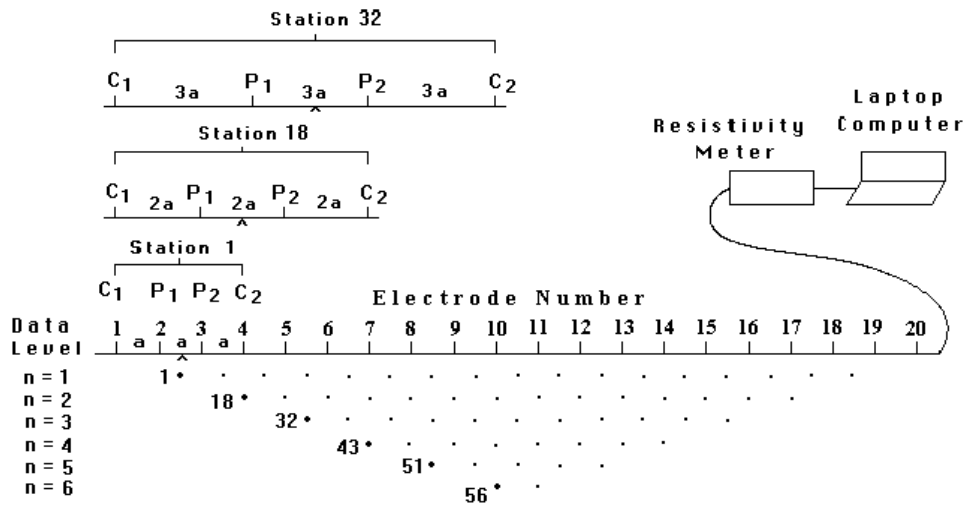


Figura 3. Dispositivo para prospecciones eléctricas 2-D y secuencia de medidas

2.1.1.6 - Pseudosección. Resultados.

Los resultados se vuelcan en pseudosecciones de resistividades aparentes conformando de este modo una malla en dos dimensiones. Una pseudosección constituye una sección con curvas de iso-resistividad que reflejan cualitativamente la variación espacial (2D) de resistividad aparente en el perfil investigado.

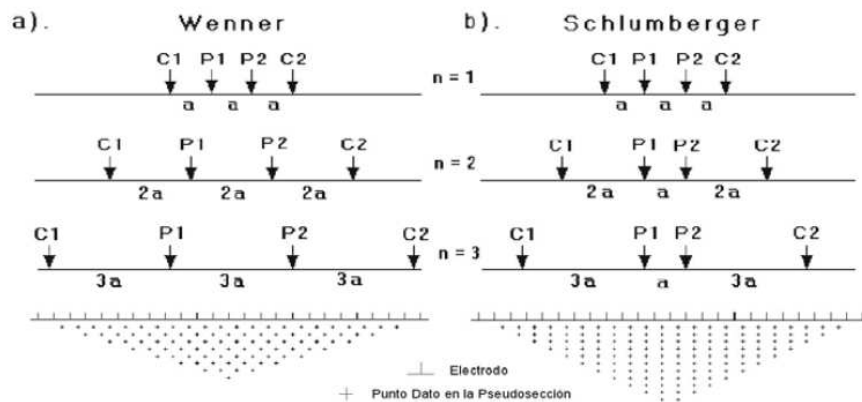


Figura 4. Comparación de Cobertura para los arreglos de electrodos y pseudosección de datos para las configuraciones a) Wenner y b) Wenner-Schlumberger



2.1.1.7 - Procesado, Inversión e Interpretación

Procesado, Inversión e Interpretación en 2D

El resultado obtenido de la toma de medidas en campo es un conjunto de 200 a 500 datos (o aún más), dispuesto en forma de pseudosección de resistividad aparente, a partir de los cuales se puede efectuar una interpretación cualitativa de los datos, permitiendo tener una idea aproximada de la caracterización del subsuelo.

Con estos datos de resistividad aparente se lleva a cabo un procesamiento efectuando un modelado 2D introduciendo los datos de resistividad aparente en un programa de inversión (en nuestro caso el RES2DINV) que efectúa la inversión completa 2D de perfiles eléctricos de superficie para los diferentes dispositivos de medidas (dipolo-dipolo, polo-dipolo, Wenner, polo-polo, etc.).

La inversión de los datos devuelve como resultado una “ Imagen de Resistividades y profundidades reales” la que se correlaciona si es posible con información geológica, perforaciones, sondeos, etc., a fin de delimitar, cualificar y cuantificar las anomalías detectadas en profundidad con objeto de lograr una interpretación coherente en el Diagnóstico.

El procesamiento de datos no es un proceso realizado solo por la computadora sin intervención humana, sino que se trata de la interacción hombre máquina debido a que es necesario configurar un programa de cálculo de acuerdo a las variaciones de los valores de profundidad y resistividad que puedan obtenerse por otros medios como el conocimiento general del área y de la naturaleza de las anomalías investigadas, además de la experiencia propia de quien ejecuta la tarea de interpretación.

Procesado, Inversión e Interpretación en 3D

Una vez que los datos de cada perfil 2D han sido invertidos independientemente para obtener secciones transversales en 2D podemos utilizar la totalidad del conjunto de datos para invertirlos con el propósito de obtener una imagen 3D con el programa RES3DINV.

Puesto que en la naturaleza todas las estructuras son tridimensionales, la generación de un modelo de interpretación tridimensional 3D debería, en teoría, dar resultados más precisos. Sin embargo hasta el presente, las investigaciones 3D están en pleno desarrollo.

Programas Res2dinv y Res3dinv

Los programas Res2dinv y Res3dinv usan la técnica de inversión de los cuadrados mínimos con restricción de alisado (deGroot-Hedlin y Constabe 1990, Sasaki 1992). Una nueva implementación del método de mínimos cuadrados basada en quasi-Newton puede también usarse (Look and Baker 1996). Esta técnica puede ser diez veces más rápida que el método convencional de mínimos cuadrados para una gran cantidad de datos y requiere menos memoria. El método de mínimos cuadrados con restricción de alisado esta basada en la siguiente ecuación:



$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + u\mathbf{F})\mathbf{d} = \mathbf{J}^T \mathbf{g}$$

$$\text{Donde } \mathbf{F} = \mathbf{f}_x \mathbf{f}_x^T + \mathbf{f}_z \mathbf{f}_z^T$$

\mathbf{f}_x = filtro de achatamiento horizontal

\mathbf{f}_z = filtro de achatamiento vertical

\mathbf{J} = matriz de derivadas parciales

\mathbf{J}^T = transpuesta de \mathbf{J}

u = factor de amortiguamiento

\mathbf{d} = vector del modelo de perturbación

\mathbf{g} = vector de discrepancia

Una de las ventajas de este método es que el factor de amortiguamiento y los filtros de achatamiento pueden ser ajustados para satisfacer diferentes tipos de datos.

También puede usarse el método convencional de Gauss-Newton el cual recalcula el Jacobiano de la matriz de derivadas parciales después de cada iteración. Esto es mucho más lento que el método cuasi-Newton, pero en áreas con gran contraste de resistividad más grandes que 10:1, da resultados ligeramente mejores (Loke and Dahlin, 2002). Una tercera opción es utilizar el método Gauss-Newton para las primeras dos o tres iteraciones, después que se usó el método cuasi-Newton. En muchos casos, esto provee la mejor solución. Debido a las mejoras en el código del programa y de los ordenadores la opción más recomendada sería usar el método de Gauss-Newton como método por defecto, sobretodo para el modelo final de interpretación, ya que para la mayoría de los conjuntos de datos, la inversión de datos solo toma algunos minutos en los ordenadores actuales.

Res2dinv

El modelo 2D usado por este programa divide el subsuelo en un número de bloques rectangulares (figura 5). El propósito de este programa es determinar la resistividad real de los bloques rectangulares que producirían una pseudosección de resistividades aparentes como la medida en campo. Para los dispositivos Wenner y Schlumberger, el espesor de la primera capa de bloques es 0.5 veces el espacio entre electrodos. Para los dispositivos Polo-Polo, Dipolo-Dipolo y polo-dipolo el espesor es sobre 0.9, 0.3 y 0.6 veces el espacio entre electrodos respectivamente. El espesor de la siguiente capa más profunda tendrá un incremento del 10% (o 25%). La profundidad de las capas puede también ser cambiadas por los usuarios.

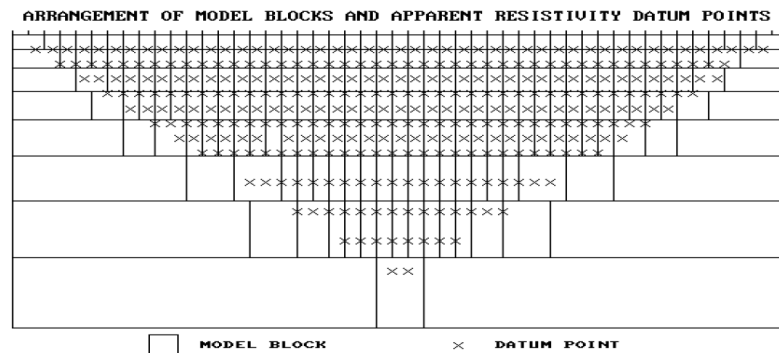


Figura 5. Modelo de bloques y datos de la resistividad aparente

Res3dinv

El modelo de inversión divide el subsuelo en un pequeño número de prismas rectangulares e intenta determinar los valores de resistividad de los prismas para minimizar la diferencia entre los valores de resistividad aparente observados y calculados. Uno de los posibles arreglos usados por Loke and Barker (1996), se muestra en la Figura 6.a. Aquí, cada bloque en el techo de la capa tiene un electrodo en cada esquina. Además de este arreglo básico, otros dos arreglos pueden ser utilizados. Una alternativa es dividir los bloques en el techo de pocas capas por la mitad, en direcciones horizontales solamente (Figura 6.c). La tercera alternativa es dividir las capas por la mitad en la dirección vertical también (Figura 6.b). Desde que la resolución del método de resistividad decrece rápidamente con la profundidad ha sido encontrado que subdividir los bloques es solamente provechoso para el techo de las dos primeras capas únicamente. En muchos casos, subdividir el techo de la capa únicamente es suficiente. Por subdivisión de los bloques, el número de parámetros del modelo y así el tiempo de computadora requerido para invertir los datos, puede incrementar dramáticamente.

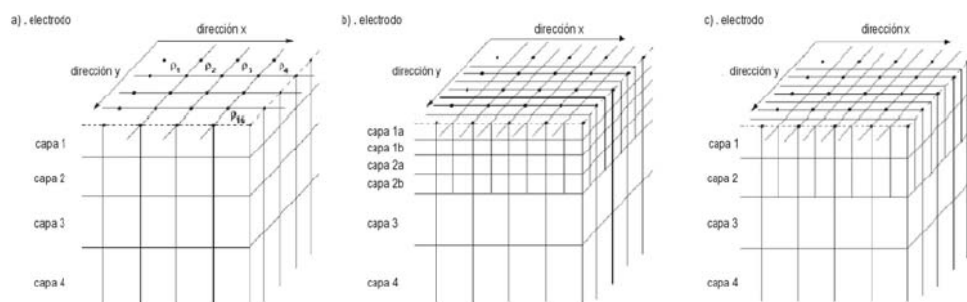


Figura 6. Los modelos usados en la inversión. (a) Modelo convencional donde los anchos de los bloques rectangulares son iguales a los espaciados de electrodo unitario en las direcciones x e y. (b) Un modelo donde el techo de pocas capas se divide por la mitad, ambos verticalmente y horizontalmente, para proporcionar la mejor resolución. (c) Un modelo donde los bloques se dividen en direcciones de la horizontal pero no en la dirección vertical.

El método de optimización intenta reducir la diferencia entre la resistividad aparente calculada y la medida por adecuación de la resistividad del modelo de bloques. Una medida de esta dada por el error del término medio de la raíz cuadrada. Sin embargo el modelo con el error RMS más bajo posible puede, algunas veces, mostrar grandes y no realistas variaciones en los valores en el modelo de resistividad y puede no ser siempre el “mejor” modelo desde la



perspectiva geológica. En general la aproximación más prudente es elegir el modelo para una iteración, después del cual el RMS no cambia significativamente. Esto usualmente ocurre entre la cuarta y quinta iteración.

El resultado obtenido mediante la Técnica de Tomografía Eléctrica es una sección o bloque de Resistividad de Alta Resolución con una muy buena aproximación del modelo de resistividades y profundidades reales del subsuelo, resultado que puede ser, en la mayoría de los casos, constatado con observaciones de campo, datos de perforaciones, etc.

El resultado obtenido mediante la Técnica de Tomografía Eléctrica es una sección o bloque de Resistividad de Alta Resolución con una muy buena aproximación del modelo de resistividades y profundidades reales del subsuelo, resultado que puede ser, en la mayoría de los casos, constatado con observaciones de campo, datos de perforaciones, etc.

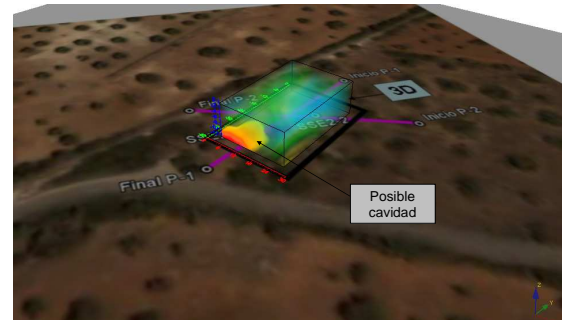
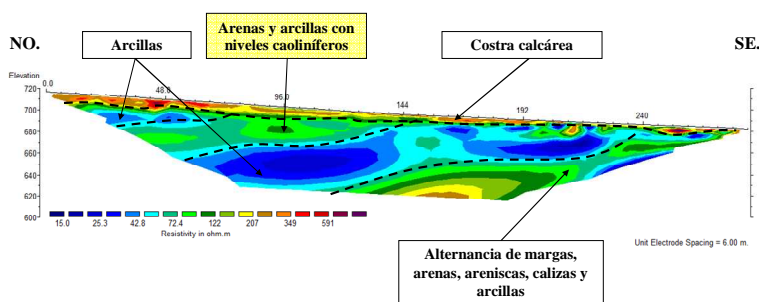


Figura 7. Ejemplos Tomografía Eléctrica 2D y 3D

2.1.1.8 – Equipo empleado

CARACTERISTICAS TÉCNICAS DEL EQUIPO DE MEDIDAS DE RESISTIVIDAD: SYSCAL Pro



Figura 8. Equipo Syscal-Pro



OUTPUT SPECIFICATIONS

- Automatic injection ranging (microprocessor controlled)
- Current: up to 2.5 A
- Voltage: up to 1000 V (1500 V with an external DC/DC converter)
- Power: up to 250 W (500 W with an external DC/DC converter) Possibility to use an external AC/DC 1200 W converter
- Pulse duration: 0.2, 0.25, 0.5, 1, 2, 4 or 8 s
- Current measurement precision: 0.2 % typical
- Switch version output voltage: up to 800 V

INPUT SPECIFICATIONS

- Measuring process: automatic ranging and calibration
- Input impedance: 100 M Ω
- Input voltage: Max. channel 1: 15 V Max. channel 2 to channel 10: 15 V Protection up to 1000V
- 50 to 60 Hz power line rejection
- Voltage measurement: Precision: 0.2 % typical Resolution: 1 μ V
- Noise reduction: automatic stacking number in relation with a given standard deviation value
- SP compensation through automatic linear drift correction
- Induced Polarization (chargeability) measured over up to 20 automatic or user defined slices

GENERAL SPECIFICATIONS.

- Up to 4000 electrodes can be used
- Data flash memory: more than 21 000 readings
- Serial link RS-232 data download
- Power supply: two internal rechargeable 12V, 7.2 Ah batteries ; optional external 12V
- Shock resistant fiber-glass case
- Operating temperature: -20 to +70 °C
- Dimensions (SYSCAL Pro Switch-48): 31 x 23 x 36 cm
- Weight (SYSCAL Pro Switch-48): 13 kg



2.1.2.- Polarización Inducida (PI)

2.1.2.1 - Origen del efecto de la polarización inducida. Generalidades.

Durante el tiempo que fluye la corriente, se supone que algún tipo de energía se almacena en el material. Aunque esta energía teóricamente (y probablemente así sea) puede existir de diferentes formas, por ejemplo: mecánica, eléctrica y química, los estudios realizados en laboratorios de polarización en varios tipos de roca han establecido que la energía química es con mucho la más importante.

Esta energía química almacenada es como consecuencia de:

Variaciones en la movilidad de los iones de los fluidos contenidos en la estructura de la roca;

Variaciones entre conductividad iónica y electrónica donde hay presentes minerales metálico

El primero de estos efectos es conocido como polarización de membrana o electrolítica, y constituye el valor de fondo o el también llamado efecto normal de P.I. Éste puede tener lugar en rocas que no contienen minerales metálicos.

El segundo es conocido como polarización de electrodo o sobrevoltaje. Éste es generalmente mayor en magnitud que el valor de fondo de P.I. y depende de la presencia de minerales metálicos en la roca.

2.1.2.2 - Polarización de membrana.

Este efecto ha sido estudiado exhaustivamente por MARSHAU y MADDEN. Hemos de recurrir a él para poder explicar los efectos de P.I. que se observan en zonas terciarias con presencia de arenas, arcillas, etc., y, en contrapartida, con ausencia de minerales metálicos.

Partimos del hecho de que en la mayoría de las rocas, cuando no están presentes minerales metálicos, la corriente circula por medio de conducción iónica o electrolítica y, por otra parte, la estructura de la roca ha de ser porosa para permitir el flujo de la corriente.

La mayoría de las partículas de mineral presentes en los poros de la roca tienen carga negativa y, en consecuencia, los iones positivos son atraídos hacia la superficie del mineral, produciendo una concentración, mientras que los iones negativos son repelidos por ella.

Cuando se aplica una corriente a su través los iones negativos se acumulan en un extremo de la partícula y los positivos en el otro. Es decir, se produce una separación de cargas para formar una distribución bipolar.

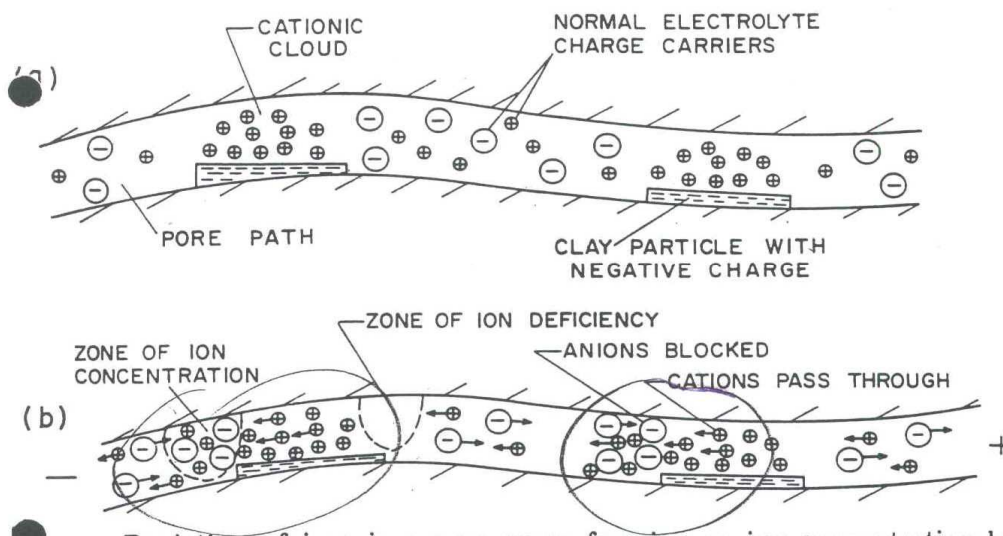


Figura 9. Creación de la polarización de membrana. Posición de los iones antes de la aplicación de un potencial eléctrico a) y después de la aplicación de una corriente eléctrica b).

Como resultado de esta distribución polarizada, se dificulta el paso de la corriente, al no permitir una libre circulación de iones. En un instante posterior, cuando se produce el corte de la corriente, la concentración de iones que se ha ocasionado tarda un tiempo finito en desaparecer, hasta que regresan a su posición original.

El efecto de polarización de membrana es más pronunciado en ausencia de minerales en los que los poros son particularmente pequeños. Este fenómeno no se observa en las arenas limpias de cuarzo.

La magnitud de polarización varía en función de la concentración de arcilla en los minerales. La concentración óptima varía a su vez para diferentes tipos de arcillas, siendo baja en la mormorillonita y alta en la caolinita (Por otra parte, los esquistos, con un alto porcentaje en minerales arcillosos, tienen una polarización relativamente baja.) El efecto de membrana aumenta también con la salinidad de los fluidos que rellenan los poros.

Podríamos decir que la polarización de membrana es generalmente máxima en rocas que contienen minerales arcillosos dispersos a través de la matriz en una concentración $\leq 10\%$ y el electrólito presenta alguna salinidad.

2.1.2.3 - Polarización de electrodos.

Este tipo, similar en principio a la polarización de membrana, tiene lugar cuando en la roca hay presentes minerales metálicos.



Partimos del principio de que la corriente eléctrica es transportada en el terreno normalmente por iones en los electrólitos presentes en los poros de las rocas (conducción electrolítica).

Si el paso de estos iones queda obstruido por ciertas partículas que, como los metales, transportan la corriente por electrones, las caras iónicas se acumulan en el límite electrolito-partícula: las positivas por donde la corriente penetra en la partícula y las negativas por donde la corriente sale. La partícula mineral se polariza al producirse en el límite electrolito-partícula un paso de conducción iónica a electrónica e inversamente.

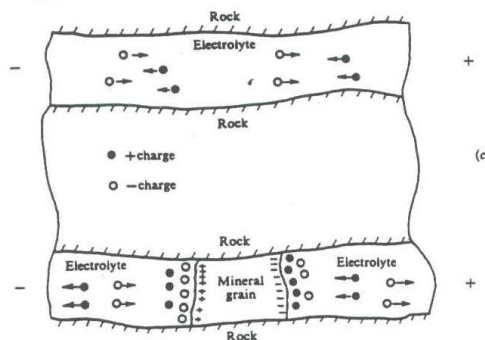


Figura 10. Membrane and electrode polarization effects. Electrolytic flow in upper pore, electrode polarization in lower pore.

En ese contacto ha tenido lugar una reacción química que en fisicoquímica se conoce como sobrevoltaje.

Durante el tiempo que la corriente eléctrica está circulando a través del subsuelo se produce un campo eléctrico primario por la inducción de corriente, y como consecuencia de la polarización que adquieren las partículas minerales metálicas, se crea un campo eléctrico de polarización; el efecto ambos será medido en superficie mediante un par de electrodos im polarizables.

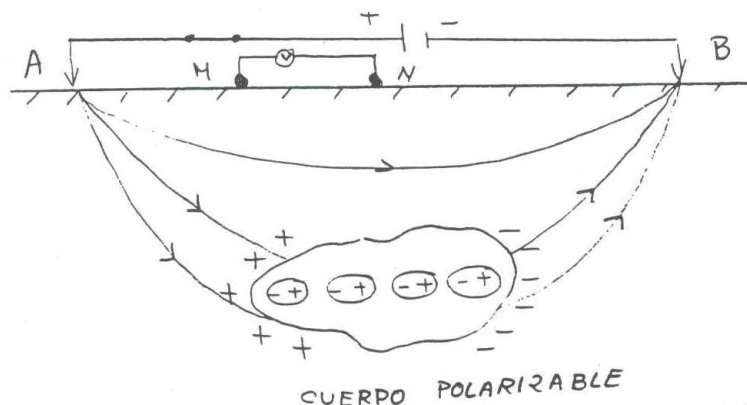


Figura 11. Campo primario + Campo de Polarización



Cuando la corriente se interrumpe, la distribución de iones se modifica volviendo a alcanzar su estado original de equilibrio; esto no se realiza de una manera instantánea sino invirtiendo en ello un cierto tiempo, durante el cual el potencial residual que queda en la partícula (o sobrevoltaje) va decreciendo continuamente hasta estar de nuevo la partícula en equilibrio con el cuerpo que la rodea.

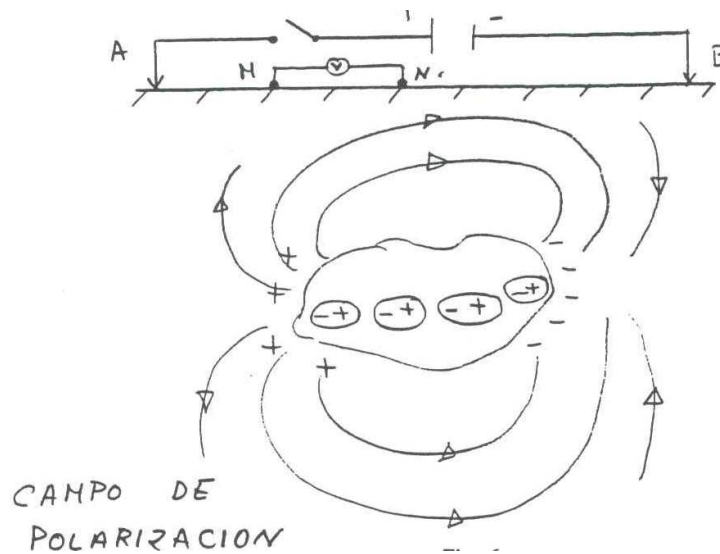


Figura 12. Interrupción de la corriente. Distribución de los iones volviendo a su estado original.

Ha ocurrido que al cesar la corriente el campo eléctrico primario ha desaparecido y sólo queda el campo eléctrico de polarización, cuyo efecto será medido en superficie por los electrodos M y N.

Según lo expuesto, la magnitud de esta polarización depende, por supuesto, de la fuente de corriente externa, y también de una serie de características del medio. Varía directamente con la concentración de mineral, pero debido a que es un fenómeno de superficie, su efecto será más intenso cuanto mayor sea el grado de división de la sustancia que lo origina.

Por ello, podríamos considerar que los yacimientos metálicos diseminados, por ejemplo, los yacimientos de cobre "porfídico", que presentan una gran superficie efectiva en sus partículas de mineral, son objetivos muy adecuados para su investigación mediante el método de P.I.

Parece ser a primera vista que los yacimientos masivos o continuos no producirían anomalías intensas de P.I. debido al pequeño número de superficies susceptibles de polarizarse, pero realmente la situación no es tan simple como ésta, ya que en muchos casos no ocurre así, muchas veces por la presencia de aureolas de mineralización diseminados y otras quizá porque lo que parece una bolsada más o menos homogénea está constituida en realidad por un gran número de cristales limitados por caras susceptibles de polarización.

Además de esta consideración hay otras a tener en cuenta, y diremos que para un caso concreto dado la polarización decrece con el incremento de la porosidad de la roca, ya que en este caso se produce un aumento en el número de caminos alternativos para la conducción



electrolítica. Por tanto, podríamos decir que se esperaría un mayor efecto de P.I. en un sulfuro diseminado que se encuentra en una roca ígnea densa que el que se encuentra en una roca de caja muy porosa.

La polarización varía también con el contenido en fluido de la roca; en muestras experimentales, se ha observado que se produce un máximo cuando alrededor del 75 % del espacio de los poros está lleno de agua.

Se continúa diciendo que los minerales que son conductores electrónicos muestran, polarización de electrodo. Entre ellos se incluyen la mayoría de los sulfuros (pirita, marcasita, galena, calcopirita, etc.), a excepción de la esfalerita, la blenda y el cinabrio (SZn, SHg), que no podrían ser detectados por este método a no ser conductores electrónicos o metálicos.

Existen otras sustancias que no son sulfuros, tienen brillo metálico y presentan el mismo efecto, entre ellas algunos óxidos como la magnetita, casiterita, pirolusita, hematites, y otras como el cobre nativo y, desafortunadamente, el grafito.

Concluyendo con este punto, podríamos en principio considerar que la presencia de una tensión residual de polarización indicaría la presencia de conductores electrónicos (minerales metálicos) dentro del volumen de terreno afectado por el paso de la corriente.

Sabemos, sin embargo, que las cosas no son tan sencillas, porque, como ya hemos expuesto, los fenómenos de polarización inducida se observan también, aunque en menor medida, en rocas carentes de sustancias metálicas.

También se aplica para la investigación de aguas subterráneas y para problemas de contaminación medioambiental.

2.1.2.4 - Técnica de medida de la polarización inducida en el dominio del tiempo.

Generalidades.

Partimos de la necesidad de contar con un dispositivo electródico adecuado que nos permitirá aplicar al terreno por los electrodos AB una intensidad de corriente durante un determinado periodo de tiempo, menor o mayor según se quiera reducir o no la duración de las investigaciones, durante el cual se determina el valor del potencial máximo (V_p) medido en MN. Transcurrido este intervalo se corta la corriente durante un tiempo similar, en el cual se mide el voltaje residual (V_r) entre ambos electrodos.

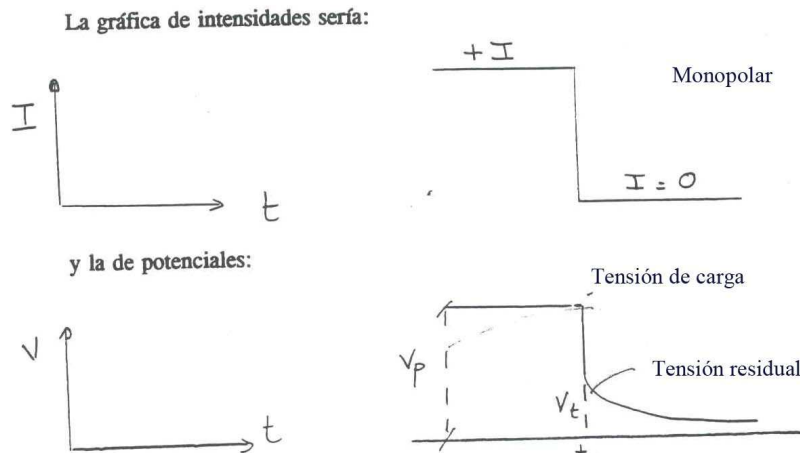


Figura 13. Gráfica de Intensidad y Potencial

El valor de P I. que obtuviéramos con estas medidas se consideraría tomado en “dominio de tiempo en régimen de impulsos aislados”.

Sin embargo, en la práctica, se aplica el método de dominio del tiempo en régimen de impulsos heteropolares, de forma que en el caso anterior, y tras el periodo sin corriente, se inyecta nuevamente la misma intensidad de corriente pero de signo opuesto (polaridad invertida) durante el mismo tiempo, y se mide nuevamente el potencial primario, produciendo un nuevo corte de corriente y determinando en este punto lo que sería un ciclo de medida.

El número de ciclos estudiados en cada estación dependerá de la respuesta del terreno, así como del tiempo previsto para la investigación.

La onda que emite el aparato transmisor es una onda cuadrada y cíclica, que tiene paso por cero.

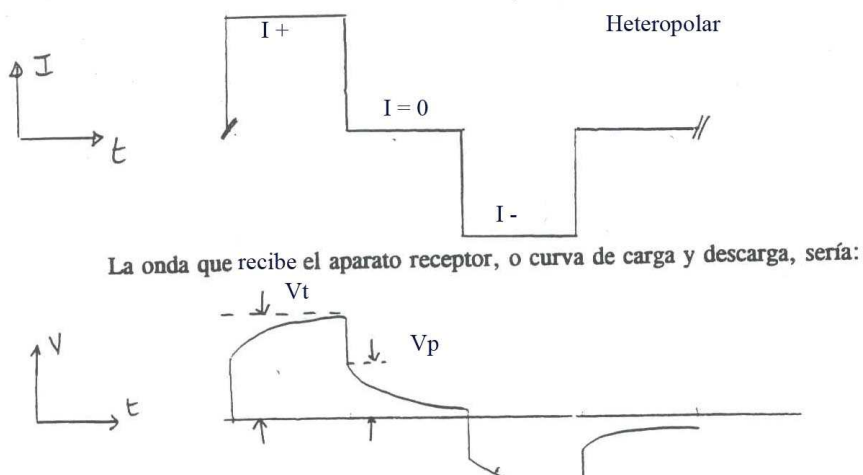


Figura 14. Onda que emite el aparato receptor



Para que el método pueda ser aplicado e interpretado adecuadamente en estudios de prospección geofísica necesitamos tener medidas cuantitativas de P.I.

Una medida sencilla, aunque quizás no demasiado intuitiva, sería el cociente entre la "tensión residual" $V(t)$ es decir, la registrada entre los electrodos M y N en el mismo momento en que se interrumpe la corriente- y la "tensión de carga" V_p , es decir, la medida entre los mismos electrodos una vez estabilizada y durante el periodo de inyección de corriente.

$$P.I. = \frac{V(t)}{V_p}$$

Si en el mismo instante de la interrupción de la corriente medimos V_t .

La tensión residual es pequeña y se expresa generalmente en milivoltios, mientras que la tensión normal se expresa en voltios; en consecuencia, el efecto de P.I. vendría dado en mV/V .

$$P.I. = \frac{V(t) \text{ mV}}{V_p \text{ V}}$$

Debido al bajo valor que alcanza, esta relación suele expresarse en tantos por ciento, expresando las tensiones en la misma unidad:

$$P.I. = \frac{V(t) \text{ mV}}{V_p \text{ mV}} \times 100$$

Esta relación porcentual es denominada por algunos autores como polarizabilidad (η).

$$P.I. = \frac{V(t) \text{ mV}}{V_p \text{ mV}} \times 100$$

Si el medio es homogéneo la relación es el verdadero valor de la polarizabilidad del medio estudiado (η verdadera). Si el medio es heterogéneo, que en realidad son las condiciones típicas o normales que se dan en el subsuelo, esta relación de tensiones dependería de la distribución en el subsuelo de rocas de distinta polarizabilidad y de la acción de electrodos, tipo de electrolito, temperatura, tamaño del poro, etc. Por analogía con la resistividad aparente, el parámetro obtenido se denominará polarizabilidad aparente (η_a).

Hasta ahora hemos considerado que $V(t)$ era medido en el preciso instante del corte de la corriente, pero en la práctica es casi imposible medir ese valor de tensión residual máxima por lo que ha de transcurrir un cierto tiempo antes de que ésta sea medida, es decir, lo será en un momento posterior en "t" segundos a la interrupción de la corriente.

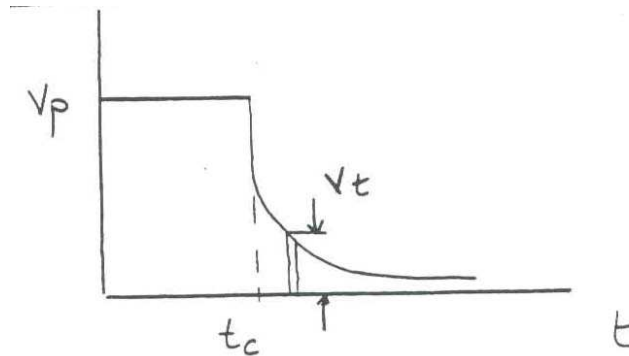


Figura 15. Momento en el que se realiza la medida

El momento del muestreo debe ser lo suficientemente retardado para que debido a las corrientes electromagnéticas secundarias inducidas en el terreno hayan desaparecido, pero también lo suficientemente inmediato para que la tensión residual $V(t)$ no haya caído por debajo de la sensibilidad del instrumento, o hasta el nivel de ruido.

Si en lugar de determinar la tensión residual $V(t)$ en un sólo instante se desea determinada durante un intervalo definido $\Delta t = t_2 - t_1$ es necesario registrar la curva de descarga durante ese intervalo. Se calcula el área comprendida entre esos dos límites de tiempo y la curva de descarga, que vendrá determinada por:

$$\int_{t_1}^{t_2} V(t) dt$$

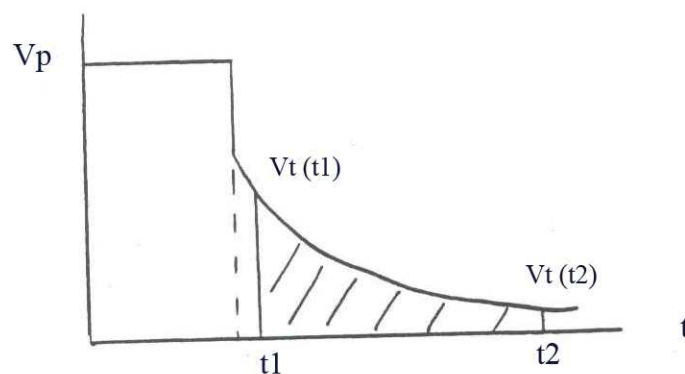


Figura 16. Curva de descarga durante un intervalo

El resultado de esta integral definida se expresa en milivoltios por segundo. Al dividir este resultado por la tensión normal V_p (voltios) se obtiene la medida de lo que denominamos cargabilidad:



$$M = \frac{\int_{t1}^{t2} V(t) dt}{Vp} = \frac{1}{Vp} \cdot \int_{t1}^{t2} V(t) dt$$

La cargabilidad tiene las dimensiones de un tiempo y se expresa en milisegundos.

Los parámetros que se han definido dependen, bien del intervalo transcurrido entre el corte de la corriente y la medida, bien del intervalo sobre el cual se ha realizado la integración, por lo que es necesario especificar los referidos datos de tiempo.

2.1.2.5 - Interpretación de los datos.

En la interpretación de los datos obtenidos en campo se pueden distinguir dos etapas: una primera o interpretación cualitativa y otra segunda o interpretación cuantitativa.

La interpretación cualitativa, que es la que normalmente se hace en P.I., consiste básicamente en búsqueda de anomalías mediante la observación de los perfiles y mapas obtenidos (correlacionando dichos datos con los mapas geológicos), es decir, la búsqueda de zonas donde el parámetro medido (cargabilidad aparente, P.E.F., F.M.) tome valores que superen dos o tres veces al menos al valor normal o de fondo observado en la zona que se investiga, entendiendo que este valor de fondo, corresponde al valor medio registrado en las zonas estériles.

Las anomalías detectadas en los diversos perfiles y situados éstos en un mismo plano de trabajo, se correlacionan, uniendo las que quedan enfrentadas en perfiles contiguos. La correlación permite seguir la marcha de la anomalía en la zona estudiada.

Lógicamente, se habrán seleccionado las anomalías más interesantes en función de su extensión, intensidad o incluso de contraste con la información suministrada por la aplicación de otros métodos geofísicos o geoquímicos que concretamente pueden ayudar mucho en la selección de anomalías.

Es conveniente, por otra parte, distinguir las anomalías verdaderas de las debidas a otros efectos (accidentes del terreno, líneas eléctricas con toma de tierra, líneas de ferrocarril, verjas, etc.). Además, habrá que valorar las deformaciones que puedan tener como consecuencia de diferentes factores que les afectan. Así, la conductividad del recubrimiento o la de las heterogeneidades situadas cerca del cuerpo anómalo actúan amortiguando los valores de polarización tanto más cuanto mayor es la conductividad; de esta forma, una anomalía de cargabilidad de poca intensidad en una zona con recubrimiento muy resistivo, podría ser mayor que otra que se manifiesta con mucha mayor intensidad en una zona muy conductiva.

La topografía del terreno sobre la que se realizan las medidas afecta a los valores de la resistividad, y también a los de polarización inducida, debido a que la posición relativa entre los



electrodos y el cuerpo anómalo es diferente de la que correspondería a un terreno horizontal. Un cuerpo anómalo situado a una determinada profundidad debajo del centro de un valle, y a la misma profundidad debajo del centro de una colina, produce efectos mayores de lo normal en este último caso, y menores en el primero.

La interpretación cuantitativa para llevarla a cabo es preciso establecer, basándose en datos interpretativos que represente adecuadamente al cuerpo anómalo. Se supone que este modelo tiene una forma, resistividad y cargabilidad determinadas, y que se encuentra encajado en un terreno cuya resistividad y cargabilidad también se suponen conocidas. (Partimos de un perfil de la anomalía que pase por un centro y sea perpendicular a su rumbo.)

2.1.2.6 - Valoración de método. Consideraciones finales

Partimos de la base de que éste, como todos los demás métodos de prospección geofísica, tiene sus limitaciones, sus ventajas y desventajas respecto a los demás; lógicamente, siempre en función del tipo de problema que haya que resolver.

SIEGEL, entre otros autores, entiende que el método tiene inconvenientes, como serían:

Un mayor coste económico para su aplicación e interpretación.

Imposibilidad de detectar zonas metalizadas de pequeño tamaño respecto de su profundidad.

No ser posible distinguir cuál es el mineral metálico que produce la anomalía, por lo que no podrían diferenciarse los susceptibles de ser explotados económicamente (SFe) de los que carecen de valor económico (grafito).

No diferencia las anomalías producidas por menas metálicas de las producidas por arcillas, arenas, talco, etc.

Pero, por otra parte, sabemos que todas estas limitaciones no son exclusivas del método de P.I., sino que las podemos encontrar en otros métodos geofísicos de prospección, sin dejar de ser por ello válidos (siempre que se apliquen en las condiciones y a las sustancias adecuadas).

No es un método completamente resolutivo, por lo que lo aconsejable es completar un estudio de P.I. con otro u otros métodos geofísicos que ayuden a disminuir la incertidumbre, inherente a la interpretación de los datos geofísicos (gravimétrico, magnético, electromagnético, geoquímico).

Y, por último, no olvidemos que la característica más atractiva de este método es la buena respuesta que proporcionan las mineralizaciones diseminadas, teniendo en cuenta que otros métodos no trabajan muy bien en estas circunstancias.

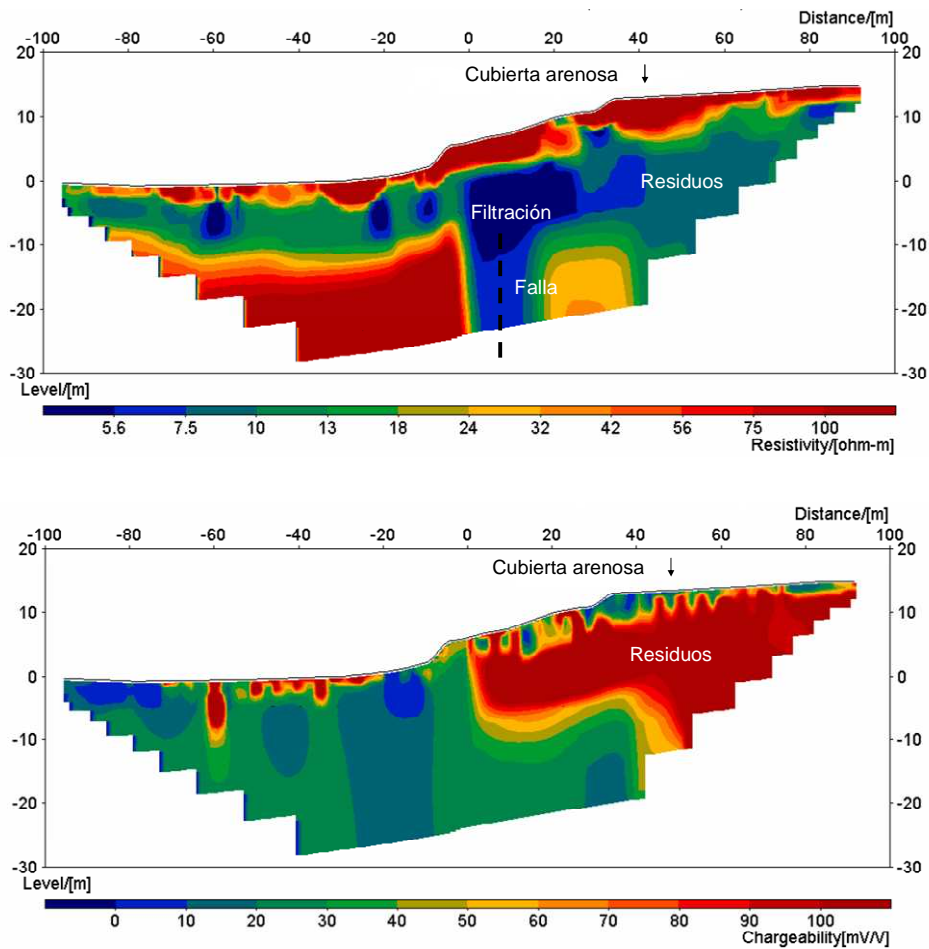


Figura 17. Ejemplo de Polarización Inducida

2.1.2.7 – Equipos empleados

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL EQUIPO DE MEDIDAS DE RESISTIVIDAD: SYSCAL Pro



Figura 18. Equipo Syscal-Pro



OUTPUT SPECIFICATIONS

- Automatic injection ranging (microprocessor controlled)
- Current: up to 2.5 A
- Voltage: up to 1000 V (1500 V with an external DC/DC converter)
- Power: up to 250 W (500 W with an external DC/DC converter) Possibility to use an external AC/DC 1200 W converter
- Pulse duration: 0.2, 0.25, 0.5, 1, 2, 4 or 8 s
- Current measurement precision: 0.2 % typical
- Switch version output voltage: up to 800 V

INPUT SPECIFICATIONS

- Measuring process: automatic ranging and calibration
- Input impedance: 100 M Ω
- Input voltage: Max. channel 1: 15 V Max. channel 2 to channel 10: 15 V Protection up to 1000V
- 50 to 60 Hz power line rejection
- Voltage measurement: Precision: 0.2 % typical Resolution: 1 μ V
- Noise reduction: automatic stacking number in relation with a given standard deviation value
- SP compensation through automatic linear drift correction
- Induced Polarization (chargeability) measured over up to 20 automatic or user defined slices

GENERAL SPECIFICATIONS.

- Up to 4000 electrodes can be used
- Data flash memory: more than 21 000 readings
- Serial link RS-232 data download
- Power supply: two internal rechargeable 12V, 7.2 Ah batteries ; optional external 12V
- Shock resistant fiber-glass case
- Operating temperature: -20 to +70 °C
- Dimensions (SYSCAL Pro Switch-48): 31 x 23 x 36 cm
- Weight (SYSCAL Pro Switch-48): 13 kg

Convertidor 1200 W AC DC

Este equipo es un complemento del Syscal Pro para dotarle de una mayor potencia necesaria para los estudios de Polarización Inducida (cargabilidad).



Figura 19. Equipo 1200 W AC DC converter



2.1.3.- Mise a la masse (Puesta a masa)

El método “mise-a-la-masse” es un dispositivo que usa la masa conductora enterrada como uno de los electrodos de corriente. En minería, la masa conductora es un cuerpo mineral que se accede a él mediante una perforación, en geotecnia, el objeto de investigación podría ser una tubería de metal abandonada, en hidrogeología una masa de agua ...

El segundo electrodo es colocado a una gran distancia (5 o 10 veces la masa que esta siendo investigada). La distribución del potencial de estos dos electrodos de corriente refleja la geometría de la masa conductora y algo de información sobre la forma y extensión del

2.1.3.1 Principio del método

Las técnicas geofísicas que aquí se describen son técnicas geoeléctricas que caracterizan eléctricamente una masa conductora a través de la distribución del potencial eléctrico, V , cuya expresión simplificada viene dada por:

$$V = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{1}{r} \quad (V)$$

Siendo ésta la expresión que da el valor del potencial, V , en un punto cualquiera de un semi-espacio homogéneo e isótropo de resistividad, situado a una distancia r de una electrodo de corriente que introduce en el terreno una corriente I (Ward, 1990). En un medio ideal, como el descrito, se generarán superficies equipotenciales semi-esféricas al electrodo de corriente, siendo perpendiculares a las líneas de corriente. Esta variable es la preferida en este tipo de aplicaciones (Frangos, 1994).

Aunque hay otras ocasiones en las que el parámetro obtenido podrá ser la diferencia de potencial o el gradiente del potencial, ΔV , cuyo valor decrece exponencialmente conforme nos alejamos del electrodo de corriente, siendo su expresión, también para un medio homogéneo e isótropo, la siguiente:

$$\Delta V = -\frac{\rho \cdot I}{2\pi \cdot r^2} \quad (V/m)$$



2.1.3.2 Parámetros de los Levantamientos

Medición del potencial absoluto (V) o de la diferencia de potencial (DV).

El potencial normalizado se obtiene del potencial observado y de la corriente inyectada.

2.1.3.3 Aplicaciones en Exploración Minera

Busca definir la extensión de una zona mineralizada conductiva previamente ubicada en un afloramiento o que ha sido interceptada por taladros.

Determina la proyección en superficie, rumbo, buzamiento e inmersión de una zona conductiva.

Ubicación de cuerpos secundarios mineralizados.

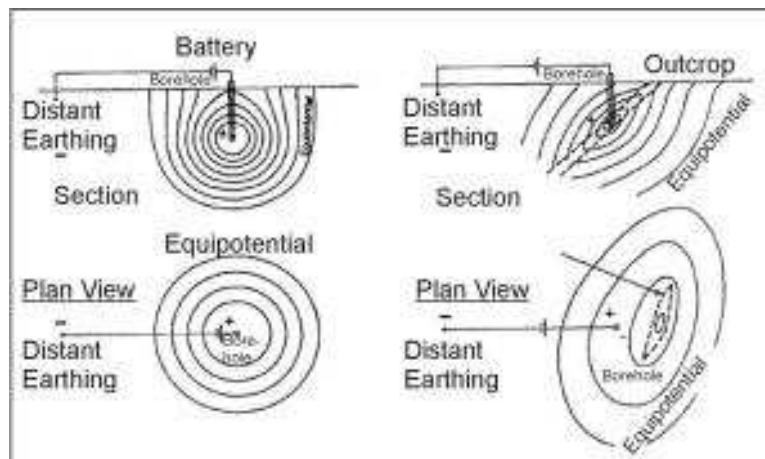


Figura 20. Ubicación de cuerpos secundarios mineralizados

2.1.3.4 Aplicaciones en embalses y vertederos

La corriente eléctrica se hace pasar entre dos electrodos de corriente, uno de los cuales está situado fuera de la geomembrana, electrodo A, pero en contacto con el terreno próximo a la estructura de almacenamiento, y el otro, electrodo B, se sitúa en el interior del embalse de agua; en el caso de vertederos se situará dentro de los residuos o dentro de una capa de arena humedecida que se dispone inmediatamente sobre la geomembrana. Para la detección de anomalías de potencial eléctrico se pueden adoptar dos sistemas de medida: uno que emplea una pareja móvil de electrodos de potencial, denominados M y N, unidos a un potenciómetro y que nos dará diferencias de potencial, V/m, y el otro sistema que emplea un único electrodo móvil de potencial, situando el segundo electrodo de potencial de forma fija en el exterior, simulando que está en el infinito ($V_8 = 0$), con lo cual se estarán obteniendo medidas de potencial V en el electrodo móvil de potencial.

A continuación se representan, de forma esquemática, los diferentes dispositivos implantados para el caso de un vertedero (Caso 1) y para el caso de un embalse de agua (Caso 2).

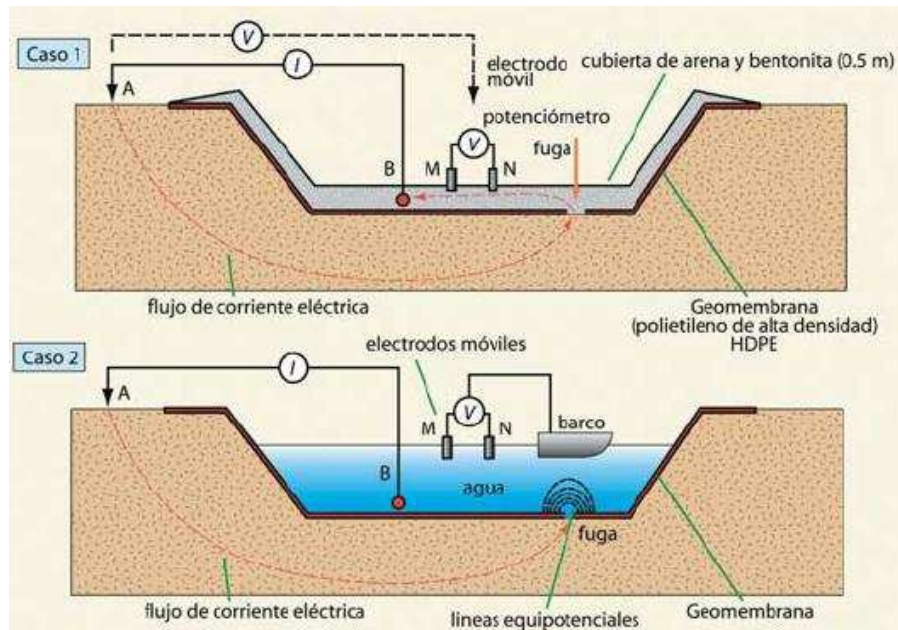


Figura 21. Tipos de dispositivos electrónicos empleados en embalses y vertederos

En ambos casos se puede emplear cualquiera de los dos sistemas descrito anteriormente: pareja móvil de electrodos de potencial o un único electrodo móvil de potencial.

Las anomalías eléctricas debidas a la presencia de fugas en la geomembrana se van a producir al permitirle a la corriente eléctrica penetrar a través de ella. En la siguiente figura se representa un perfil típico ideal que se obtendría de medir la diferencia de potencial, ΔV , sobre un embalse de agua el cual presenta una fuga. Se observa que sobre la posición de dicha fuga, presenta un valor del gradiente igual a bajo flanqueado por un máximo y un mínimo (Mazàc et al., 1990).

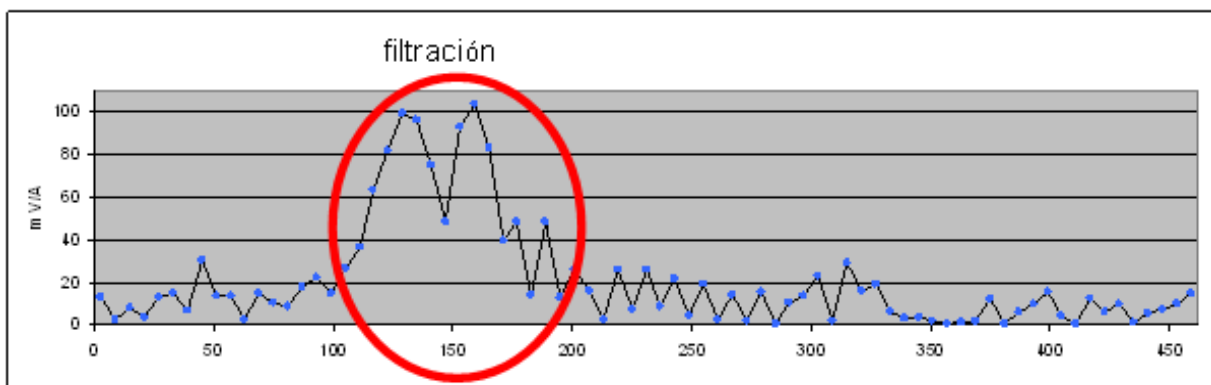


Figura 22. Ejemplo de perfil realizado con la técnica misse a la mase

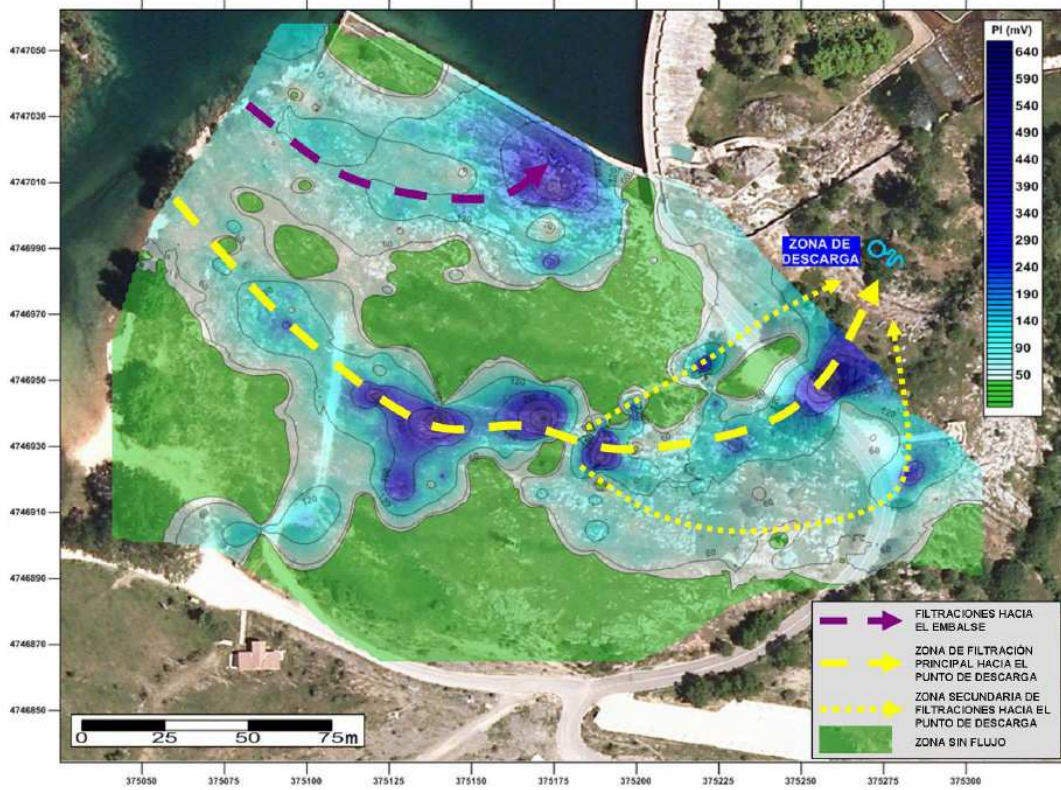


Figura 23. Ejemplo de planta realizada con la técnica misse a la mase y el programa Surfer



2.1.4.- Método del Campo Eléctrico natural (Potencial espontaneo)

2.1.4.1- Introducción

El método del campo eléctrico natural [abreviadamente método PE] está basado en la observación de los campos eléctricos creados por las fuerzas electromotrices naturales de procedencia electroquímica, de filtración y difusión.

Campo electroquímico. Las fuerzas electromotrices de naturaleza electroquímica se observan en el medio geológico, en los casos en que en las rocas del medio que poseen conductancia iónica existen acumulaciones de minerales buenos conductores con conductancia electrónica, tales como piritita, calcopiritita, bornita, petlandita, arsenopiritita, magnetita y otros. El cuerpo mineral junto con las rocas circundantes forma un elemento galvánico natural. El mecanismo de su origen e influencia, resultado de las leyes electroquímicas, se puede presentar del modo siguiente.

En la superficie de un conductor electrónico, colocado en un medio de conducción iónica, es decir, en el límite de las fases de conductancia de distinta naturaleza, se crea una capa eléctrica binaria. La misma se forma debido al paso de los cationes metálicos de la red cristalina a la solución, o a la precipitación de los cationes sobre la superficie del conductor, o a la adsorción selectiva de los iones de una fase de la superficie por la otra fase. Esta capa se caracteriza por un salto del potencial, cuya magnitud y signo dependen de los factores determinantes del potencial: propiedades, composición y estado del conductor en el medio circundante, los cuales participan en el proceso de formación de la capa eléctrica binaria. Por consiguiente, el conductor electrónico, en relación al medio circundante, adquiere un potencial que se denomina potencial de electrodo.

Los factores básicos determinantes del potencial son: a) la composición química de las aguas subterráneas que circulan en las rocas encajantes e impregnan el cuerpo mineral; b) la composición mineral y las características texto-estructurales del cuerpo mineral.

La influencia de estos factores se manifiesta en su dependencia de las condiciones físico-geológicas tales como resistividad de las rocas y minerales, velocidad de circulación de las aguas subterráneas e interacción de las mismas con las rocas y minerales, a causa de lo cual cambia la composición de las aguas en primer lugar y su grado de oxidación y contenido de iones de sulfuro de hidrógeno y de hierro.

Si el valor y signo del salto de potencial de la capa eléctrica binaria permanece constante en toda la superficie del conductor, entonces este cerrará uniformemente la superficie polarizada, no creándose en el medio circundante un campo eléctrico. Las condiciones necesarias para que surja un campo en el medio externo es la diferencia de valor o signo del salto de potencial de la capa eléctrica binaria en las diversas zonas de la superficie polarizada.



En un medio geológico el valor del salto de potencial en las diferentes partes de la superficie polarizada normalmente es diferente. Para los yacimientos minerales polarizantes, ello significa que los factores determinantes del potencial deben ser diferentes para las distintas partes del cuerpo mineral. Esto puede ser consecuencia de la presencia bien de una zonalidad en la distribución de los minerales en el yacimiento, bien de la variación de composición química de las aguas subterráneas. En las condiciones geológicas tiene más importancia la segunda causa, que a su vez está relacionada con la disminución del contenido de oxígeno con la profundidad.

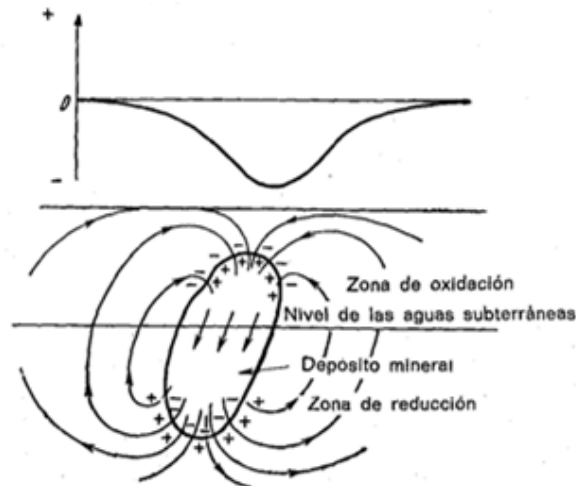


Figura 24. Esquema del nacimiento de un campo natural sobre un depósito mineral

La influencia conjunta de todos los factores enumerados lleva a que en las condiciones naturales, la magnitud del salto de potencial de la capa eléctrica binaria crezca con la profundidad. De esta forma, un depósito mineral junto con sus rocas encajantes forma un elemento galvánico en el cual el cátodo se sitúa en la parte superior del yacimiento y el ánodo en la inferior. El circuito interno del elemento es el mismo cuerpo mineral y el externo, el paquete de rocas encajantes. Dado que las rocas y en especial el cuerpo mineral poseen buena conductancia eléctrica, entre los electrodos del elemento galvánico así creado comienza a circular la corriente. Los portadores en el circuito interno serán los electrones libres y en el externo, los iones.

Se sabe que la corriente en el circuito externo de un elemento galvánico depende de la f.e.m del elemento y de la resistencia total del circuito. La resistencia total se compone de las resistencias de las partes interna y externa del circuito. Para un depósito mineral polarizado, esto significa que el campo en su entorno será tanto más intenso cuanto más se diferencien los valores del salto de potencial en las distintas partes del depósito y cuanto menos sea su resistencia interna. La resistencia interna de la pila natural considerada, depende de la resistividad del mineral y también de las reacciones electroquímicas que se producen en el contacto del cuerpo mineral y de las soluciones que lo impregnan, si por este contacto circula la corriente eléctrica. Los productos de estas reacciones, al acumularse en las zonas anódica y catódica, conducen al aumento de la resistencia interna de la pila natural y con ello a la disminución del campo eléctrico en el medio exterior. En Electroquímica este fenómeno se denomina polarización del elemento galvánico (no hay que confundir este concepto con la polarización de los cuerpos



minerales, como resultado de la cual surge un campo eléctrico natural). En relación con esto, la condición indispensable para la permanencia de la acción de cualquier elemento galvánico, entre ellos también los naturales, es su despolarización o sea la destrucción o separación de los productos de las reacciones electroquímicas.

Como despolarizantes de primer orden se tiene el oxígeno que procede del aire, junto con las aguas subterráneas y los iones de hierro, contenidos en las mismas aguas. También tiene un gran valor para la despolarización la disolución y transporte por las aguas subterráneas de los productos de las reacciones electroquímicas.

Puesto que algunos de los factores enumerados (por ejemplo, el régimen de las aguas subterráneas) disminuyen con el tiempo, entonces también variará el campo natural que depende de ellos. Sin embargo, estas variaciones ocurren muy lentamente. Observaciones repetidas del campo natural sobre algunos lentejones de piritas del Ural y Cáucaso, realizadas durante varios años, han demostrado que en dicho tiempo el campo no varía prácticamente.

La intensidad de los campos naturales observados sobre cuerpos sulfurados en diferentes yacimientos, oscila entre amplios límites, desde algunas decenas hasta varias centenas de milivoltios.

También se señalan campos eléctricos naturales sobre capas de antracita, grafito, pizarras carboníferas y rocas grafitizadas las cuales también presentan conductancia electrónica. Sin embargo, en medio iónico las mismas se comportan como electrodos inertes, pues tienen una red cristalina sólida y no ceden cationes al medio iónico. El origen de los campos eléctricos está relacionado en este caso con la formación de una capa eléctrica binaria por adsorción por el grafito o la antracita de los iones de las aguas subterráneas. La anomalía negativa observada en tal caso alcanza a menudo cientos de milivoltios.

Campos de filtración. También surgen campos eléctricos naturales por la filtración de las aguas subterráneas en las rocas porosas. Prácticamente estos campos existen en todas partes, porque los procesos de filtración ocurren universalmente. Pero normalmente las fuerzas electromotrices de filtración son insignificantes y el campo eléctrico relacionado con ellas es débil. Sólo en casos aislados, por ejemplo, en la salida bajo los aluviones de agua a presión de manantiales subterráneos, por drenaje intenso de aguas subterráneas en terrenos accidentados, filtraciones en o obras hidráulicas..., los campos eléctricos procedentes de la filtración se intensifican hasta tal punto que la observación sobre ellos permite resolver algunos problemas hidrogeológicos y geotécnicos.

Imáginese un capilar, por el que debido a la diferencia de presión hidrostática a la entrada y salida, en la dirección indicada, pasa un electrolito. A causa de la adsorción por las paredes del capilar de los iones del mismo signo (normalmente de aniones, que tienen mayor radio iónico), en el límite entre la solución y la pared de materia sólida se forma una capa eléctrica binaria, la externa (fija) cuyo revestimiento consiste en iones negativos adsorbidos y la interna (positiva) que a su vez consta de dos partes: una fija relacionada con la atracción electrostática del revestimiento negativo y otra móvil, distribuida por difusión según la sección transversal del capilar.

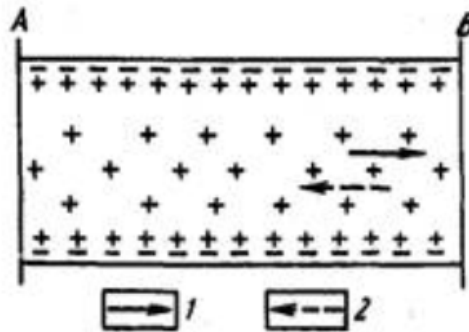


Figura 25. Capa eléctrica binaria en un capilar. Direcciones: 1) marcha del líquido; 2) de la corriente eléctrica.

Como consecuencia, del capilar se extraen más iones positivos que negativos y por ello en la salida del capilar se acumulan cargas positivas y a la entrada surge el exceso relativo de cargas negativas. Entre el final B y principio A del capilar, surgen diferencias de potencial proporcionales a la caída de presión hidrostática y que dependen también de las constantes eléctricas del líquido. Su valor puede ser calculado por la fórmula:

$$\Delta U = \zeta \epsilon p \rho / 4. \pi \eta,$$

Siendo ζ la diferencia de potencial en la capa binaria del revestimiento; ϵ la constante dieléctrica del líquido; p la diferencia de presión entre los extremos del capilar; ρ la resistividad del líquido, y η la viscosidad del líquido.

La diferencia de potencial entre los extremos del capilar produce una corriente eléctrica dirigida contra la corriente del líquido y que impide la acumulación de las cargas en el extremo del capilar.

Los poros de las rocas se pueden considerar como sistemas complejos de capilares, en cada uno de los cuales se producen procesos análogos a los descritos. Para las soluciones de filtración, a través de los poros de las capas, la diferencia de potencial electrocinética que se produce en cada capilar considerado aisladamente, se integra en un campo eléctrico general que abarca tanto al acuífero como a las capas circundantes. Puesto que las rocas poseen una conductancia variable, bajo la influencia del campo eléctrico en las zonas de circulación de las aguas subterráneas, surgen corrientes eléctricas.

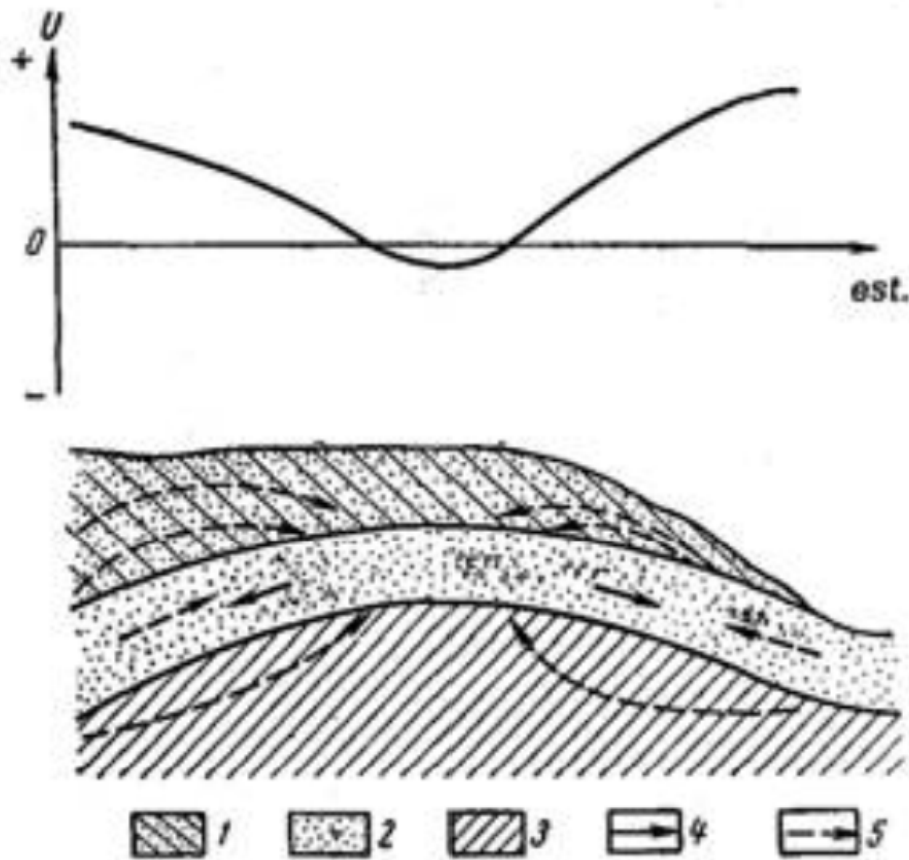


Figura 26. Corrientes de filtración en una capa acuífera. 1) arenas arcillosas; 2) arenas; 3) arcillas; 4) dirección de la filtración; 5) líneas de corriente.

En esta figura se tiene de modo esquemático la distribución de las corrientes en una capa acuífera filtrante y su entorno.

Campo de difusión. También se crea un campo natural como resultado de los procesos de difusión, que se producen en los contactos de las rocas que contienen en sus poros soluciones de una misma sal con diferentes concentraciones o soluciones de diferentes sales. En el primer caso, a causa de que la movilidad de los iones de distinto signo es diferente en el electrolito, en el proceso de nivelación de las concentraciones los iones de mayor movilidad adelantan a los de menor movilidad y a un lado del contacto se produce la acumulación de iones principalmente del mismo signo y en el otro de signo contrario. En el segundo caso, en el proceso de difusión también se produce la separación de los iones de mayor movilidad de los de menor movilidad y la acumulación correspondiente de cargas contrarias a cada lado del límite de contacto de las soluciones. Una nueva distribución de los iones lleva también a la creación de un campo eléctrico. La diferencia de potencial que surge por difusión, puede expresarse por la fórmula

$$\Delta U = \frac{u-v}{u+v} \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_2}{C_1},$$



Siendo u y v la movilidad de los cationes y aniones; R la constante de los gases; T la temperatura absoluta; F el número de Faraday; C_1 y C_2 las concentraciones de las soluciones; n la valencia de los iones.

Los campos eléctricos de difusión no presentan demasiado interés para los métodos de campo de la exploración eléctrica, porque sólo pueden observarse claramente en la práctica, con el estudio de los sondeos mecánicos mediante métodos de testificación eléctrica.

Campos variables en el tiempo. Algunos investigadores (A. S. Semenov y otros) han descubierto campos con variaciones claras en el tiempo. Estos campos tienen un ciclo diario con máximo en las primeras horas de la mañana y mínimo en la segunda mitad del día. La amplitud de la variación diaria alcanza 200-300 mV, pudiendo cambiar el signo del potencial. Se ha establecido una relación entre los campos y la temperatura del suelo; al aumentar la temperatura baja el potencial; el gradiente de potencial con la temperatura alcanza decenas de milivoltios por 1° .

Los campos variables en el tiempo se observan en terrenos abiertos donde el espesor del suelo no excede de 10 a 20 cm y falta la vegetación. Se ha establecido la relación entre las áreas anómalas con la presencia de cuarcitas y con zonas de cuarcificación y de otras rocas de alteración hidrotermal. A la inversa, no se aprecian tales campos sobre rocas arenó-arcillosas y muy saturadas. Esta asociación de los campos variables en el tiempo, da pie para utilizarlos en la cartografía geológica y para la localización de zonas de cuarcificación y de rocas de alteración hidrotermal.

2.1.4.2 - Equipo para el levantamiento del campo natural.

En la figura siguiente se tiene el dispositivo de medición para el trabajo por el método del campo natural. Consta de un instrumento de medida multímetro M , tomas de tierra de medición M y N y los cables que los unen. Como tomas de tierra se emplean electrodos de construcción especial, denominados impolarizables. Normalmente en este caso no se emplean los electrodos metálicos a causa de su gran polarización.

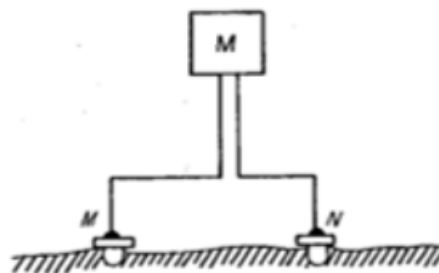


Figura 27. Esquema básico del dispositivo de medición pan el levantamiento del campo



Si la observación de los campos eléctricos naturales la realizáramos con electrodos metálicos, la diferencia de potencial del campo natural se perturbaría en su valor a causa de los potenciales de electrodos. Esta magnitud a menudo es del mismo orden que las diferencias de potencial del campo natural observadas y también cambia de una medición a otra.

La aplicación del compensador de polarización para anular estas interferencias no es posible en principio, ya que la polarización se superpone a la diferencia de potencial del campo natural medida, y no es posible separarlas en el dispositivo de medición. En relación con esto, la eliminación de la polarización de los electrodos en el resultado de la medición del campo natural se realiza por otros medios, que son la aplicación de los electrodos impolarizables. La construcción de los mismos está basada en que el contacto de la varilla metálica del electrodo con el terreno se realiza no directamente, sino a través de una solución salina del mismo metal de que está hecho el electrodo, al tiempo que la concentración de la solución en ambos electrodos del dispositivo de medición se mantiene igual. Gracias a esto el potencial de electrodo permanece constante durante la medición y de valor análogo en ambos electrodos. En este caso la polarización total de ambos electrodos, como diferencia de sus potenciales de electrodo, será próxima a cero y lo que es más importante, siempre constante en el tiempo. En cuanto a la f.e.m. de difusión que surge al contacto de la solución salina con las soluciones del terreno, es insignificante y no tiene una gran influencia en la medición.

En la práctica de la exploración eléctrica la mayor aplicación la tienen los electrodos impolarizables de cobre y de plomo.

En las figuras de a continuación se tienen los detalles constructivos y aspecto exterior del electrodo impolarizable.

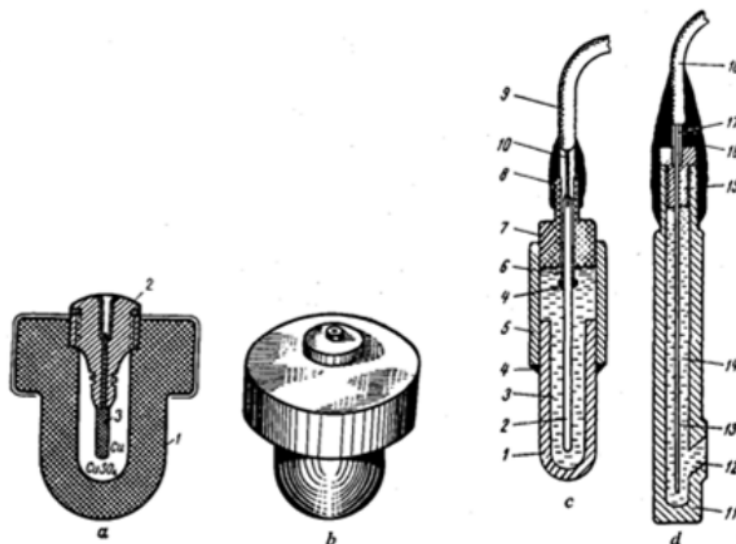


Figura 28. Electrodo impolarizables. a) en corte (1) cuerpo. 2) tapón de plástico. 3) varilla de cobre), b) aspecto exterior. Electrodo de pozo en corte: c) electrodo de vaso cerámico poroso (1) vaso. 2) varilla de cobre o de cloruro de plomo. 3) solución de CuSO_4 , o KCl en gelatina. 4) masilla o resina epoxi. 5) tubo de vidrio. 6) tubo de vinilo. 7) tapón de plástico, 8) goma virgen. 9) cable. 10) conductor del cable; d) electrodo de canal 11) vaso. 12) canal. 13) varilla de cobre o de cloruro de plomo. 14) solución de CuSO_4 , o



KCI en gelatina. 15) tapón de plástico. 16) goma virgen. 17) conductor del cable. 18) cable.

El cuerpo del electrodo es hecho de cerámica porosa y está esmaltado por su parte superior. En el cuerpo hay atornillado un tapón 2 de cerámica esmaltada o plástico, dentro del cual se tiene una abertura para una varilla de cobre 3 con un clavijero en la parte superior para conectar el electrodo con el circuito de medición. La varilla de cobre se hace de cobre electrolítico y se asegura en el tapón con ayuda de masilla químicamente inerte. La cavidad interna del electrodo se llena con una solución saturada de sulfato de cobre.

La polarización de los electrodos durante el trabajo varía algo debido a la introducción dentro del electrodo de iones de las soluciones del suelo. En tal caso, los electrodos se lavan cuidadosamente con agua destilada y se llenan de solución nueva de sulfato de cobre.

2.1.4.3 - Metodología y técnica de los trabajos de campo

Los puntos de observación para el levantamiento de los campos naturales se disponen normalmente a intervalos determinados a lo largo de un sistema de perfiles paralelos. Solo a veces se realiza la investigación del campo mediante itinerarios sueltos. La red de observaciones se prepara antes del comienzo del levantamiento.

El levantamiento del campo natural consiste en la medición, en una secuencia determinada, de las diferencias de potencial entre los puntos de observación. Dando un cierto valor condicional al potencial en el punto inicial, por los valores medidos de ΔU , se calcula el potencial en todos los restantes puntos y se obtiene un cuadro de la distribución del potencial a lo largo de los diversos perfiles y en toda la zona del levantamiento.

Trabajos de campo. Las observaciones del campo natural se pueden realizar por dos métodos: por levantamiento de gradientes y por levantamiento de potencial. En condiciones industriales, básicamente se emplea el levantamiento de potencial. El levantamiento de gradientes se emplea solo en el caso de fuertes interferencias por corrientes vagabundas, para trabajos en itinerarios y en levantamientos de detalle. En nuestro caso, se utilizó el método por levantamiento de potencial debido a la necesidad de referir todos los datos a una misma base para poder comparar cuantitativamente los valores de potencial medidos. Gracias a este método se pueden localizar filtraciones, catalogarlas de más a menos importantes, e incluso con datos suficientes cuantificarlas.

Diariamente, antes de la salida a los trabajos de campo, de entre los electrodos impolarizables disponibles se elige el par que presenta menos polarización. Para ello, los electrodos, por parejas y con distintas combinaciones, se colocan uno junto a otro en hoyos en terreno húmedo; a continuación y repetidamente se mide el valor de la polarización permutando los electrodos. Se puede también realizar la medición dejando los electrodos en un recipiente común con sulfato de cobre. De los pares medidos se eligen aquellos en que la polarización no excede de 5 mV.

En el proceso de las mediciones de campo, para los electrodos de las tomas de tierra, se cavan junto a los jalones, con una paleta pequeña (de zapador), hoyos de 5 a 8 cm de



profundidad. Se sitúa cada electrodo en un hoyo y se le echa tierra, pero de forma que toque solo la base del vaso poroso. Hay que procurar también que la cabeza del electrodo no toque la vegetación. Durante el trabajo, la temperatura de los electrodos debe ser en lo posible la misma, por tanto de ello se deduce que hay que protegerlos de los rayos directos del sol; durante las pausas de trabajo se deben colocar en un hoyo común y unirlos con conductores.

Si el levantamiento se realiza en suelo seco entonces, a causa de la mayor resistencia de la toma de tierra y por consiguiente menor sensibilidad de la línea de medición, dichas mediciones se hacen inexactas. En este caso hay que regar previamente el terreno junto a los jalones, en el punto de disposición del electrodo, con agua o con una solución débil de sulfato de cobre. El riego se debe realizar al menos una hora antes del comienzo del trabajo, para que la f.e.m. de filtración que surge por la penetración en el suelo del agua o solución, no altere los resultados de la medición.

Al final del día los electrodos se lavan de la tierra adherida a los mismos, se les añade sulfato de cobre, se colocan en un recipiente con solución de sulfato de cobre o en terreno húmedo regado con sulfato de cobre y se unen entre sí con un conductor. En las pausas largas en el trabajo (más de 4 a 5 días) y para preservar los vasos de la posibilidad de rajarse, se lavan en agua limpia y se conservan en ella 24 horas, después de lo cual se ponen a secar.

Método de levantamiento del potencial. Para el trabajo por este método, las mediciones se realizan desplazando solamente el electrodo delantero conectado al borne M del potenciómetro o autocompensador. El segundo electrodo se conecta al borne N y se deja fijo en un punto. Desplazando el electrodo M sucesivamente a todos los puntos de observación, se mide cada vez la diferencia de potencial entre los electrodos fijo y móvil. Si el potencial del punto de parada del electrodo fijo se supone cero, entonces las diferencias de potencial medidas corresponderán a los potenciales en los puntos de observación respecto al punto de parada del electrodo N (punto de cero). Esto permite aumentar considerablemente el rendimiento de las observaciones y también simplificar el tratamiento de las mismas. Solamente hay que recordar que para el trabajo por este método, la polarización entra en la diferencia de potencial medida siempre con el mismo signo, debido a lo cual es necesario en el levantamiento observar con esmero la permanencia de los electrodos y el valor de su polarización. La variación del valor de la polarización durante el trabajo no debe exceder de 5mV en 1 km de perfil.

El esquema de montaje del dispositivo para el levantamiento por este método, se tiene en la figura a continuación en el apartado I.

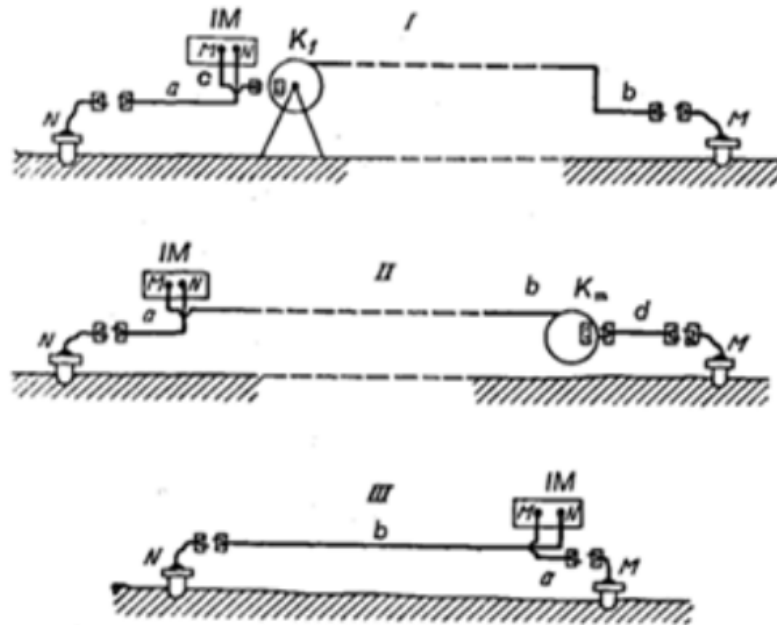


Figura 29. Esquema de montaje del dispositivo para la investigación del campo natural. Métodos: I) de potenciales, con carrete K_f , fijo. II) de potenciales, con carrete K_m móvil. III) de gradientes; IM) instrumento de medición.

El autocompensador (o potenciómetro) permanece durante la medición junto al punto cero y unido al electrodo fijo N mediante el conductor a. El conductor b se enrolla en el carrete fijo K, situado junto al instrumento en un caballete y que tiene una longitud suficiente para que con una estación del instrumento se pueda efectuar la medición en todo el perfil. Este carrete está unido al instrumento por un cable c.

Si se tienen cables más ligeros se puede emplear un dispositivo con carrete móvil K_m que se lleva con el electrodo M. El carrete se une al electrodo con un conductor d y se desplaza junto con el mismo (apartado II). Para ello se emplea un carrete portátil.

2.1.4.4 -Representación de los resultados de las observaciones

Los resultados del levantamiento de los campos naturales se representan en forma de mapas de líneas equipotenciales, de gráficas de potencial y de mapas de gráficas de potencial.

Para La confección de mapas de líneas equipotenciales del campo natural, se llevan a un programa de interpolación obteniendo así las líneas equipotenciales. La densidad de las líneas equipotenciales depende de la intensidad del campo observado. Es deseable que las isolíneas reflejen lo más claramente posible las particularidades de la distribución del potencial en la zona del levantamiento.

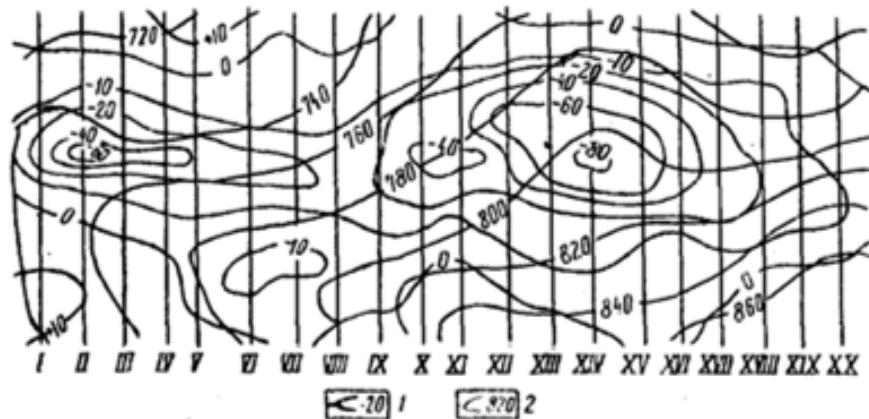


Figura 30. Mapa de líneas equipotenciales del campo natural en un yacimiento sulfurado. 1) Isolíneas de campo natural; 2) Curvas de nivel; I a XX curvas de nivel

Para la confección de la gráfica de potenciales, sobre el eje de abscisas se sitúan los puntos de observación y en el de ordenadas se trazan los valores del potencial en los puntos correspondientes.

La gráfica se dibuja en forma de línea quebrada. Debajo de ella se traza el relieve del terreno y el corte geológico y se representan los datos de la interpretación subsiguiente a las observaciones geofísicas.

Para una comparación más cómoda de los datos de los diferentes perfiles, se confeccionan mapas de gráficas. Para ello se llevan a un plano todos los perfiles y a lo largo de cada perfil, en el plano, se construyen las gráficas de potencial. Como líneas de los perfiles en el plano sirven los ejes de abscisas de gráficas.

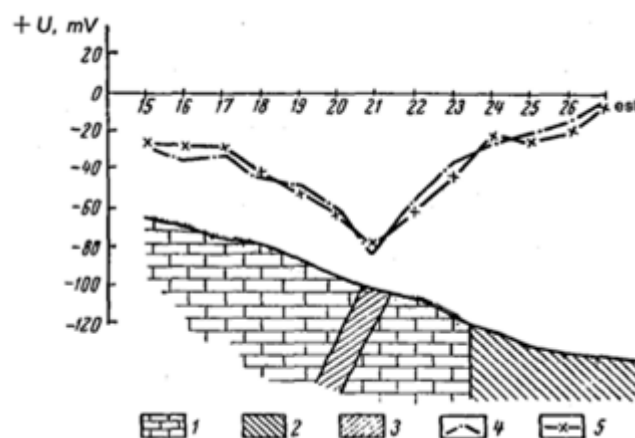


Figura 31. Gráfica del potencial del campo natural sobre un filón potimetalítico. 1) calizas; 2) esquistos 3) filón potimetalítico; gráficas: 4) de las observaciones principales; 5) de las observaciones repetidas

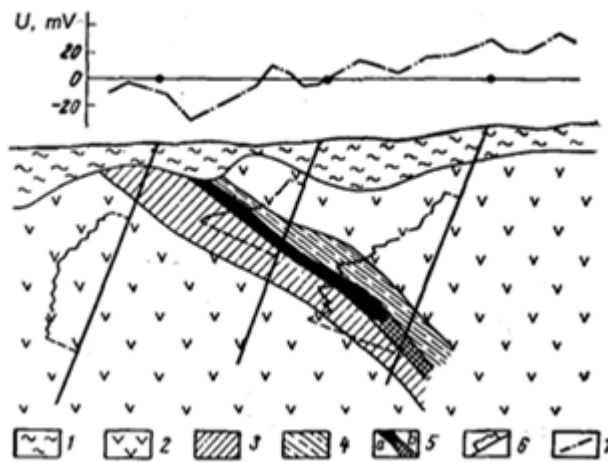


Figura 32. Mapa de gráficas de potencial en un yacimiento de calcopirita 1) sedimentos cuaternarios y corteza de erosión; 2) porfiritas; 3) jaspes; 4) esquistos cuarzosericíticos y cloriciticos; 5) menas de calcopirita a) ricas, b) pobres; gráficas de potencial: 6) en sondeos, 7) a lo largo de la línea de investigación (datos del levantamiento superficial).

2.1.4.5 - Bases de la Interpretación

La etapa final en el estudio del campo natural es la interpretación de los mapas y gráficas de potencial obtenidos.

Por las áreas de valores mínimos del potencial, en los mapas de líneas equipotenciales y de gráficas de potencial, se puede establecer de modo aproximado la situación del objeto proyectado. La ausencia en el mapa de áreas de valores máximos del potencial contiguas a las áreas del potencial mínimo, es síntoma de un cuerpo polarizado vertical mente, lo que es frecuente encontrar en la práctica.

La forma de las líneas de potencial permite hacerse una idea del contorno del cuerpo. En el caso de que las isolíneas sean poco alargadas, el cuerpo es un yacimiento más o menos isométrico en planta, y el centro de las isolíneas muestra la posición del epicentro de dicho yacimiento. En caso de isolíneas muy alargadas, el eje del área de potencial mínimo define la posición del eje del cuerpo.

Si el objeto prospectado presenta una polarización oblicua, entonces en el mapa de líneas equipotenciales, cerca del área del potencial mínimo, habrá un área de valores elevados del potencial y las gráficas del potencial en los perfiles serán asimétricas.

Para una interpretación cuantitativa de los resultados del levantamiento, los objetos alargados se pueden asimilar, en función de los datos geológicos, bien a un cilindro (si se trata de un yacimiento lenticular) o bien a una capa (si se trata de un yacimiento filoniano). Es evidente que la extensión de tal cuerpo en la dirección horizontal será bastante menor que la longitud del área anómala del mapa de líneas equipotenciales.



2.1.4.6 - Aplicación del Método

Los objetos más favorables para su investigación son los cuerpos constituidos por minerales sulfurados conductores, grafito y antracita y que yacen en un medio hidrogeológico favorable para el nacimiento de campos eléctricos naturales. El método puede ser empleado también para detectar objetos que no se polarizan pero que están asociados a otros que sí lo hacen (por ejemplo con rocas grafitizadas o piritizadas), las cuales por si mismas no presentan interés para su prospección e investigación.

A una mayor efectividad del método contribuye una conductividad eléctrica alta de los minerales. Factores desfavorables son una situación profunda del nivel acuífero y un desarrollo amplio de la zona de minerales oxidados (la denominada montera).

Se pueden señalar tres direcciones básicas en la aplicación del método del campo natural: a) cartografía geológica; b) prospección de yacimientos de minerales industriales; c) búsqueda de filtraciones.

En la cartografía geológica, el método permite observar áreas de rocas grafitizadas, carbónitizadas y chungitizadas y localizar zonas de rocas piritizadas y pirronizadas y también las que contienen magnetita. La cartografía de tales terrenos y zonas permite, no sólo detectar la distribución superficial de los correspondientes sedimentos y formaciones, en aquellos casos en que existe una relación genética de las mismas con los procesos de grafitización o piritización de las rocas, sino determinar también las áreas de posible interés en relación con yacimientos polimetálicos y sulfurados. En particular la piritización es el resultado de procesos hidrotermales y neumatolíticos con los que están relacionados los yacimientos de oro, molibdeno, wolframio y otros de metales raros y no férricos.

El método se utiliza ampliamente en yacimientos de minerales de calcopirita y de yacimientos sulfurados de níquel. Encuentra también aplicación en los yacimientos de casiterita, así como en yacimientos de algunos metales raros, en los casos en que la masa mineral contiene como minerales acompañantes piritita, pirrotina y otros sulfurados buenos conductores.

PARASNIS (1971) dijo que el empleo de las anomalías de P.E. para la cartografía litológica y estructural de las rocas recubiertas constituye un aspecto algo descuidado de la prospección geofísica, y que no cabe duda de que la interpretación cuidadosa de tales anomalías puede dar abundante información acerca de fisuras someras, fallas, zonas de rotura, etc.

Un objetivo más difícil para la aplicación del método del campo natural son los yacimientos polimetálicos. Esto se puede explicar porque los minerales de galena-esfarelita tienen una resistividad propia mucho mayor que la de otros sulfurados, lo que lleva a una considerable atenuación del campo eléctrico.

A esto se une el que los minerales secundarios de plomo y cinc (sulfato y óxidos) formados por reacciones electroquímicas, poseen una solubilidad escasa y al permanecer en el lugar de formación, obstaculizan la polarización de los minerales primarios. En virtud de estas



circunstancias, en la mayoría de los casos, sobre los yacimientos de minerales polimetálicos se observan solamente anomalías débiles. Sin embargo, la presencia en los cuerpos polimetálicos, a título de impurezas, de sulfures de hierro y cobre favorece el desarrollo de campos más intensos.

El método también encuentra aplicación en la prospección de yacimientos de grafito y antracita

Un área de utilización del método del campo natural es el estudio de los procesos de filtración de las aguas subterráneas. La observación de los campos eléctricos naturales procedentes de la filtración permite determinar la dirección del movimiento de las corrientes subterráneas, revelar los puntos de filtración de las aguas en las obras hidráulicas, descubrir zonas de circulación de aguas en fisuras y su salida bajo los aluviones. A título de ejemplo, en la figura siguiente se tiene la gráfica del potencial del campo natural sobre una cavidad cárstica, por la que tiene lugar la alimentación de las aguas de sedimentos aluviales.

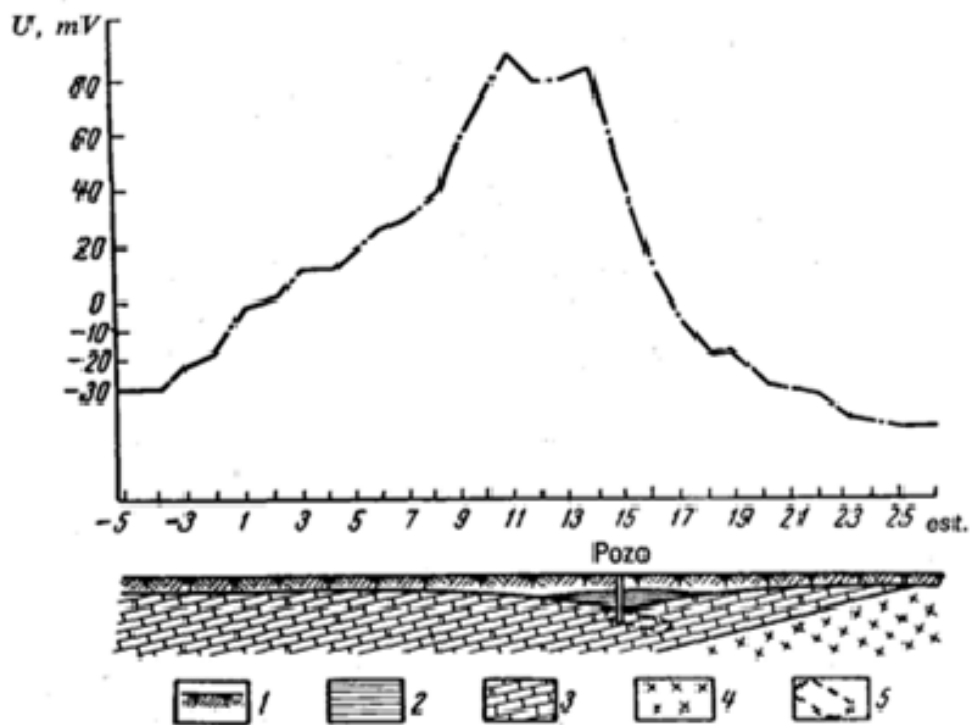


Figura 33. Gráfica del potencial del campo natural sobre el afloramiento de un manantial cubierto por aluviones (según N. Severianov). 1) aluviones; 2) aluviones antiguos; 3) calizas; 4) tobas de rocas eruptivas; 5) cavidad cárstica.

2.1.4.7 Medidas de potencial como indicadores de deformación

Cuando sometemos un material a un esfuerzo de deformación de tipo compresivo, se producen una serie de respuestas anómalas en el potencial espontáneo que pueden indicarnos el estado del material. El sistema de potencial espontáneo permite caracterizar los fenómenos de compresión y/o fracturación del medio físico.



La respuesta del potencial espontáneo durante este tipo de eventos está bien documentada (Jouniaux y Pozzi, 1995; Lorne y otros., 1999b; Yoshida, 2001; Eccles y otros., 2005) tanto en pruebas de laboratorio como en estudios en campo.

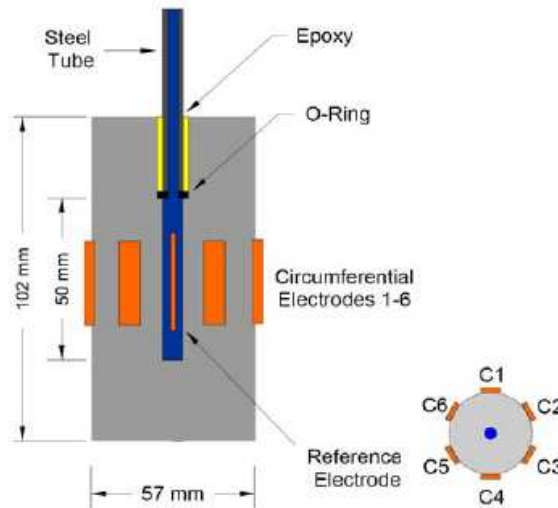


Figura 34: Esquema de la configuración de los electrodos de registro del Potencial Espontáneo en ensayos triaxiales. Application of the Self-Potential Method in Hydrogeology. J. R. Moore.

Si tomamos una muestra de material inalterado y la sometemos a un esfuerzo constante de tipo compresivo mediante un ensayo de tipo triaxial y registramos las variaciones de potencial espontáneo, podemos ver como se producen las siguientes variaciones a lo largo del tiempo (figura 35):

- El incremento en los valores de potencial es constante y poco importante hasta alcanzar el 75 % de la deformación plástica del material.
- Cuando se supera el 75 % de la deformación plástica y hasta el comienzo de la rotura frágil, se observa la mayor variación en los valores de potencial espontáneo. Esta fase incluye los primeros instantes de la rotura frágil, en la que la muestra no está totalmente fracturada
- Tras la rotura de la muestra, los valores de potencial espontáneo sufren un brusco descenso alcanzando rápidamente los valores de la muestra antes del inicio del ensayo.

La aplicación a zonas de deslizamientos radica en la posibilidad de localizar zonas del mismo que están sufriendo procesos deformacionales de tipo compresivo, las cuales vendrán definidas por anomalías de potencial de tipo positivo, así como zonas fracturadas y/o relajadas, caracterizadas por anomalías de potencial de tipo negativo. Además, las zonas de fracturación funcionan como sectores de alteración y filtración preferentes que hacen disminuir complementariamente los valores de potencial espontáneo.

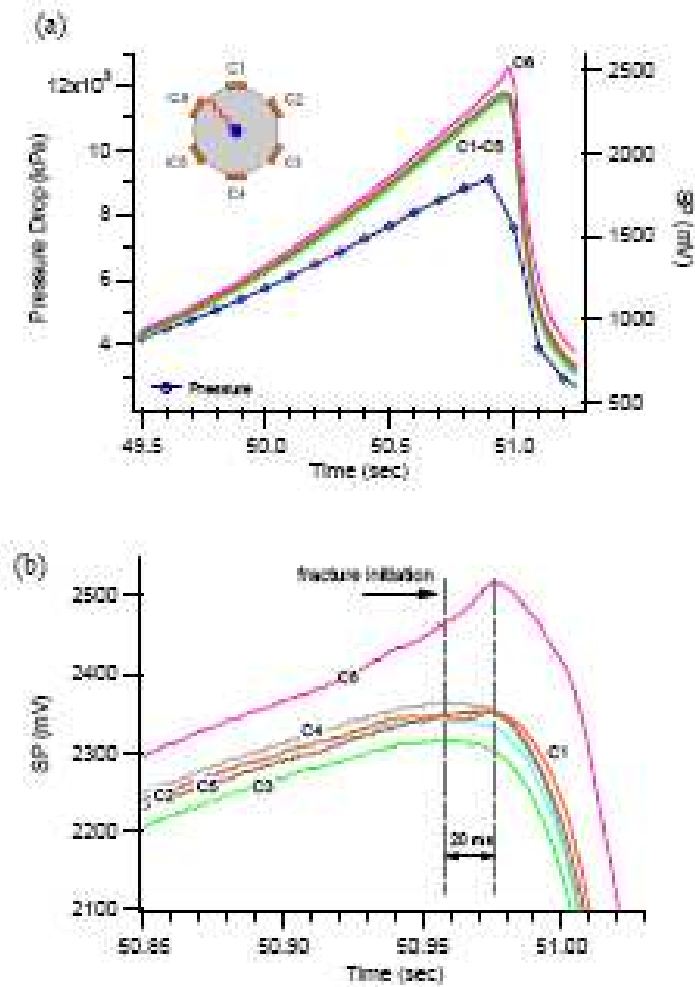


Figura 35. Ensayos de deformación triaxiales. A) Relación entre la presión aplicada y el potencial registrado en cada electrodo en función del tiempo. B) Variación del Potencial registrado a lo largo de la prueba. Nótese el descenso en los valores de potencial registrados tras la fracturación del material. Application of the Self-Potential Method in Hydrogeology. J. R. Moore.



2.1.3.- Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (SEDT)

2.1.3.1 - Introducción

El método de los Sondeos Electromagnéticos en Dominio del Tiempos (SEDT) constituyó a principio de los años ochenta una innovación muy relevante en el ámbito de la Geofísica aplicada. En estos años la aplicación del método ha permitido acumular una notable experiencia respecto a la capacidad real de esta técnica en investigaciones Hidrológicas, Mineras, Contaminación Ambiental Subterránea, Arqueología, Geotecnología, y en general la localización de estructuras y anomalías complejas por lo general subsuperficiales, tanto geológicas como antrópicas. Además en estos años se han podido observar, sus ventajas respecto a los SEV, limitaciones y ámbitos de aplicación. La experiencia recogida unida a la mejora de los dispositivos hace de este método uno de lo más eficaces de la geofísica actual.

Con este método se pretende mostrar una distribución del subsuelo en términos de homogeneidad basados en la caracterización resistiva. Debido a la gran resolución vertical que se obtiene con esta técnica, es posible obtener una imagen de la disposición de las unidades en el subsuelo. En las secciones geoeléctricas es posible observar las heterogeneidades (zonas anómalas) debidas a estructuras geológicas, cambios de facies y fracturación de la roca.

2.1.3.2 – Método electromagnético en el dominio del tiempo SEDT

El método del sondeo electromagnético en el dominio del tiempo (SEDT) es una técnica de exploración geofísica usada para medir la resistividad o conductividad eléctrica del subsuelo.

Los SEDT son realizados con una unidad transmisora unida a un bucle (espira grande ó bobina) que recibe y manda la señal a una unidad receptora. Entonces al inyectar una corriente constante en el bucle transmisor se produce un campo magnético primario estable en el subsuelo. Cuando se corta de forma instantánea la corriente que circula por la bobina transmisora (por tanto se corta a su vez el campo magnético existente) se produce por ley de Faraday, una inducción electromagnética de corrientes eléctricas (parásitas EMF) en el subsuelo (ver figura 1). Estas corrientes, fluyen en trayectorias cerradas en el subsuelo y migran en profundidad y lateralmente, mientras que su intensidad disminuye conforme pasa el tiempo, lo que genera a su vez un campo magnético secundario transitorio decreciente en la superficie.

Este campo secundario induce un voltaje variable en tiempo en el receptor. La forma en que decae el voltaje contiene la información sobre la resistividad del subsuelo, puesto que la magnitud y distribución de las corrientes inducidas dependen de la resistividad. El carácter migratorio en profundidad, es decir, los voltajes de tiempos cortos proveen información de la resistividad somera, mientras que los tiempos largos pertenecen a resistividades de mayor profundidad.

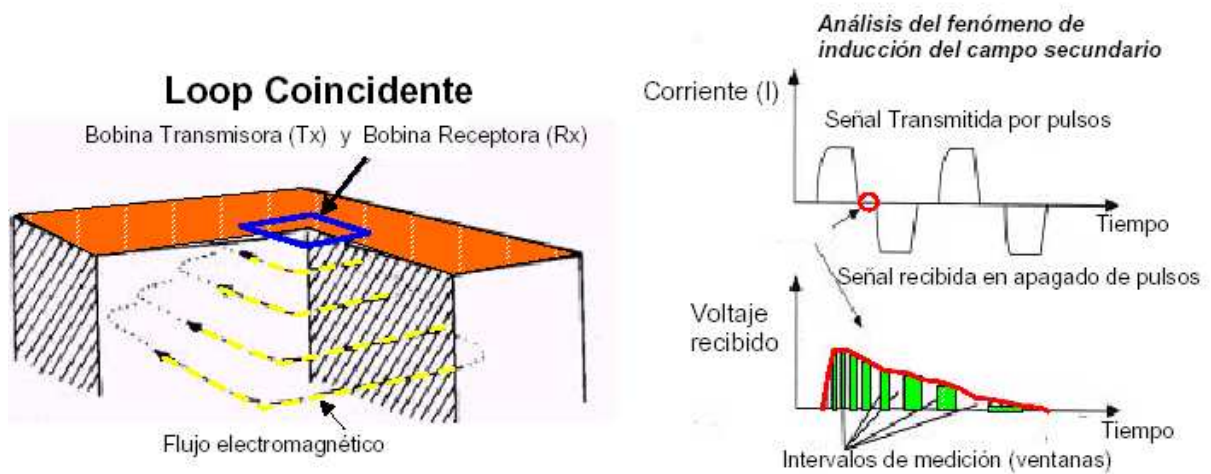


Fig. 36.- Dispositivo general de un sondeo electromagnético

Podemos decir entonces, que el proceso de funcionamiento es el siguiente:

La corriente que circula por la espira transmisora crea un campo magnético primario, variable con el tiempo.

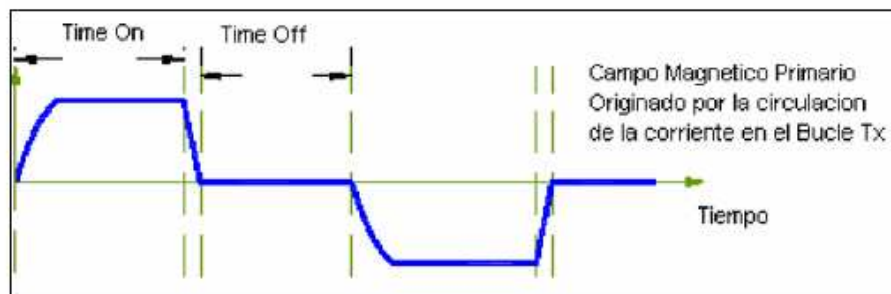


Fig. 37.- Campo magnético primario

1. Según la ley de Faraday, una disminución rápida de la corriente transmitida, y por lo tanto, del campo magnético primario induce una fuerza electromotriz (emf) en el subsuelo.

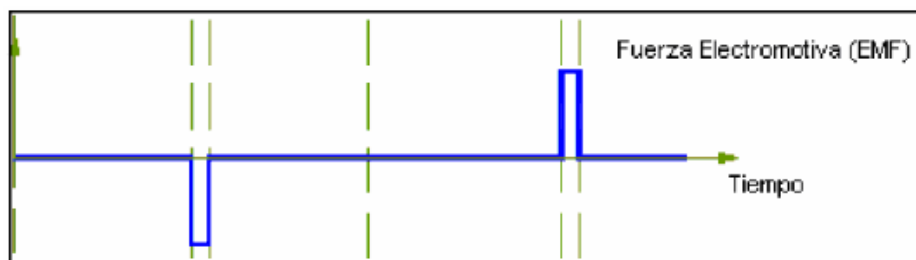


Fig. 38.- Fuerza electromotriz



2. Estas corrientes inducidas generan, a su vez, un campo magnético secundario, del que se mide su variación con el tiempo en la bobina receptora, mientras el transmisor no esté emitiendo.

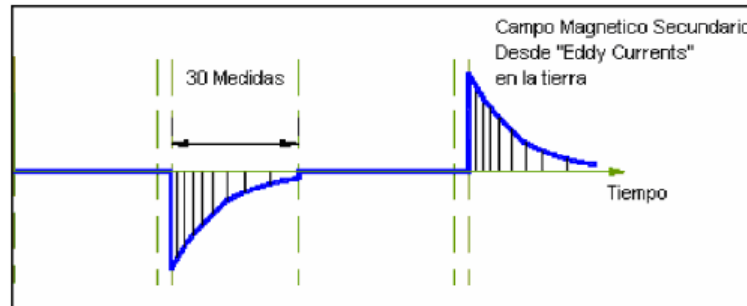


Fig. 39.- Campo magnético secundario

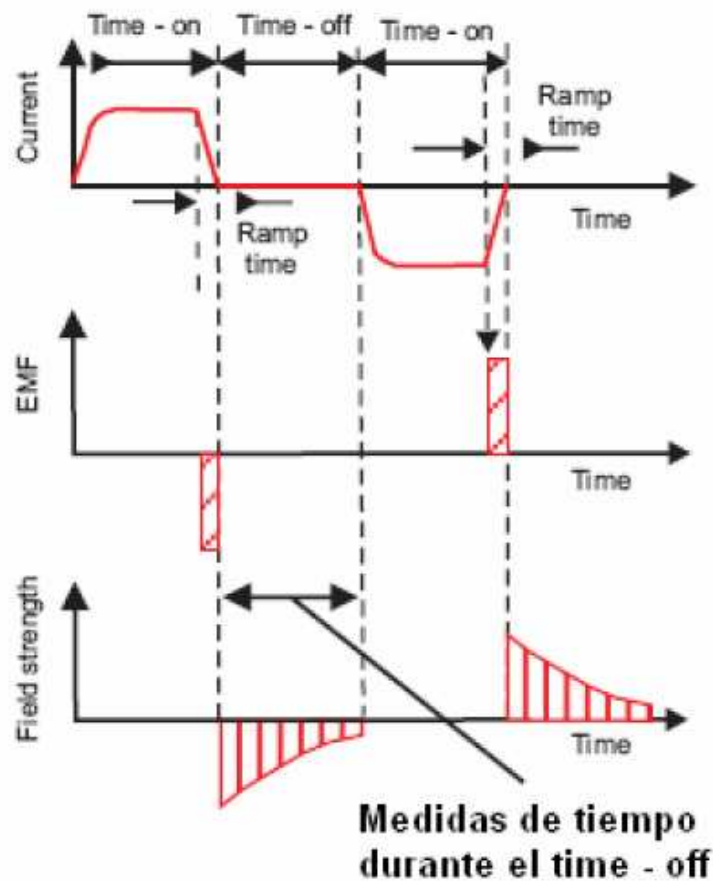


Fig. 40.- Diagrama de tiempo en el que se realizan las medidas por el receptor

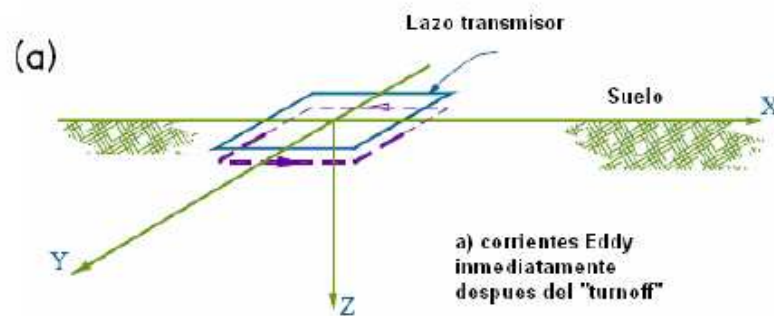
Al medir el campo secundario, en ausencia del campo primario, el método SEDT es mucho menos sensible a errores debidos a la geometría Transmisor/Receptor que todos los demás métodos eléctricos y EM, por lo que la separación T/R juega un papel mucho menos significativo, en la profundidad de investigación, del que tiene en los otros métodos convencionales de campo artificial.



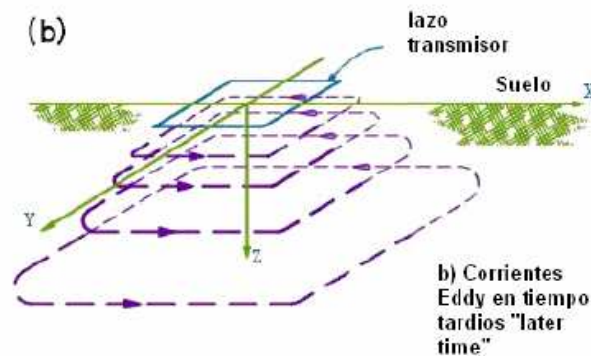
Por esto, el SEDT es el único método de prospección eléctrica que puede operar con una separación T/R menor que la profundidad de la estructura buscada, esta circunstancia mejora mucho la resolución lateral del método. Sin embargo, en la práctica, la consideración del ruido hace que la distancia T/R sea mayor para investigaciones más profundas, lo cual es particularmente cierto en la configuración de espira normal más utilizada (FITTERMAN y STEWART, 1986).

Esquemas de la distribución de las corrientes inducidas en el subsuelo:

1. Inmediatamente después del corte de corriente



2. Transcurrido un cierto tiempo.



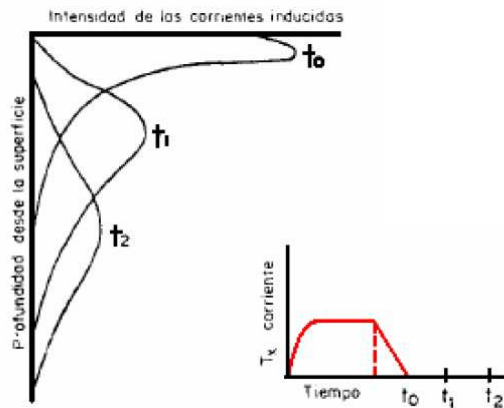


Fig.41.- Densidad de la corriente en función de la profundidad, para diferentes tiempos.

2.1.3.3 – Fundamento básico del método SEDT

Como se menciona en la sección anterior, la medida TEM se hace midiendo la amplitud de la señal transmitida con respecto al tiempo. Por ley de Faraday al variar un campo eléctrico se induce un campo magnético y viceversa.

$$\nabla \times \mathbf{e} = - (\partial \mathbf{b} / \partial t)$$

Donde \mathbf{e} es igual al campo eléctrico y \mathbf{b} es la inducción magnética

Esto significa que una corriente directa que corre de una bobina induce un campo magnético estático, el campo primario. Este campo no contiene información de la tierra, pero es proporcional al momento magnético, M :

$$M = InA_{loop}$$

Siendo I la corriente directa, n el número de vueltas y A_{loop} es el área del bucle.

Después de un periodo de tiempo, la corriente es volteada abruptamente y el campo primario comienza a decaer, causando un campo eléctrico a ser inducido y corrientes de Foucault que empiezan a correr en el suelo cerca de la bobina. Debido a la pérdida óhmica estas corrientes rápidamente comienzan a decaer, induciendo así, un campo magnético secundario. Inmediatamente después de que las corrientes han sido apagadas, las fuerzas de los campos primario y secundario son iguales. El decaimiento de estas corrientes es función de la conductividad en la tierra. El decaimiento del campo magnético secundario induce una fuerza electromotriz en la bobina receptora.

Con el tiempo cerca, las corrientes de Foucault se difunden hacia abajo y hacia fuera en



un ángulo aproximado de 30° a través del suelo. La profundidad de penetración, Z_d , en un momento dado, t , es dado por:

$$Z_d = (2t/\mu\sigma)^{1/2}$$

Dónde μ es la permeabilidad magnética y σ es la conductividad del medio. La profundidad máxima al cual podemos medir se obtiene a través de Z_{last} , donde no es solo función del momento sino también del nivel de ruido, V_{noise}

$$Z_{last} = (2/25\pi^3)^{1/10}(M/\sigma V_{noise})^{1/5}$$

En esta profundidad las medidas están influenciadas por el ruido, siendo así, insatisfactorias. Según Christensen (1995) un limite común es cuando el cociente señal – ruido, S/N, es igual a 1. Como podemos ver la máxima profundidad de penetración decrece cuando incrementa la conductividad.

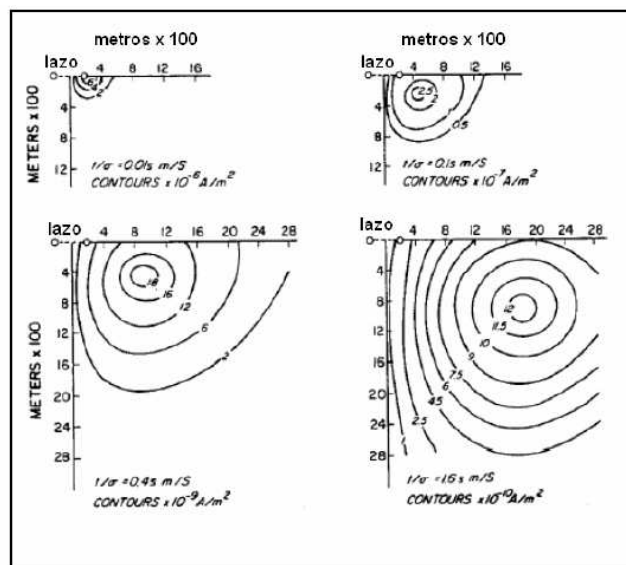


Fig. 42.- Profundidades de penetración para diferentes conductividades.

Podemos decir que la máxima profundidad de penetración esta ligada directamente con el momento magnético. Z_{last} es proporcional a $M^{1/5}$, haciendo así, que un incremento en el momento magnético es necesario para aumentar la máxima profundidad de penetración.

En cualquier caso, la profundidad de investigación en el método SEDT se determina, en principio, no por la separación T/R (transmisor- receptor), sino por el tiempo que transcurre desde que el transmisor deje de emitir y el momento magnético asociado.

Para explorar a mayores profundidades, es necesario por tanto recoger la señal en tiempos posteriores. Obviamente, con tiempos cortos, debido al efecto skin, las corrientes de Foucault (Eddy) se concentran en los estratos superficiales. Como consecuencia, las primeras medidas de



la emf, serán más sensibles a la resistividad de los estratos superiores. Según transcurre el tiempo, la intensidad de corriente alcanza profundidades mayores y la emf medida está más influida por dichas profundidades.

Además, la densidad de corriente disminuye en los estratos superiores y por tanto, las resistividades eléctricas de estos estratos tienen una influencia pequeña en la emf medida en tiempos prolongados. Esto ayuda a eliminar el efecto de las variaciones de resistividad cerca de la superficie, que es la causa de la pérdida de calidad de los datos obtenidos por otros métodos de prospección eléctrica.

2.1.3.4 – Procesado de datos SEDT

Los métodos utilizados, para el procesado de los datos SEDT, son similares a los de los demás métodos de prospección eléctrica. La emf medida, como función del tiempo, se convierte en resistividad aparente, y ésta se introduce en un programa de inversión, que calcula la estratificación de conductividades aparentes mediante el algoritmo de Spiker, con el mejor ajuste posible a la curva de resistividades aparentes observadas.

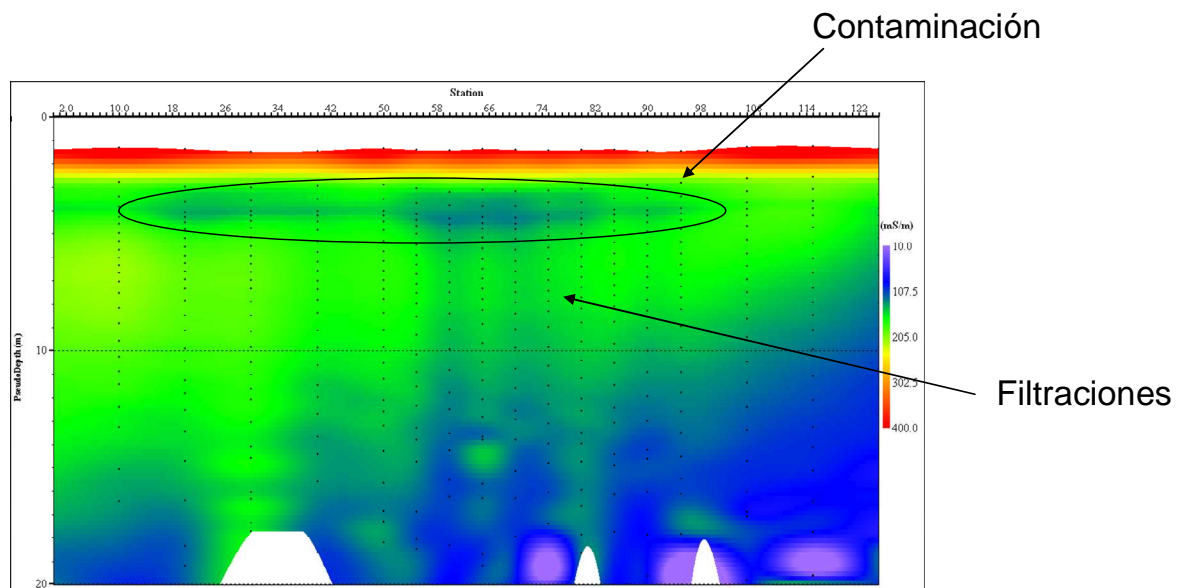


Fig. 43.- Ejemplo de Tomografía Electromagnética



2.1.3.5 – Equipos empleados

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL EQUIPO PARA PROSPECCIÓN ELECTRÓMAGNETICA EN EL DOMINIO DEL TIEMPO



Fig. 44.- Equipo TerraTem

SYSTEM

The terraTEM is a new transient electromagnetic survey system designed and constructed in Australia. It incorporates a 10 Amp transmitter and a true simultaneous 500 kHz 3-component receiver. The unit is powered by an external 24 V battery pack system allowing 6-8 hours of continuous operation. An inbuilt GPS is mounted on the front panel, allows for location information to be automatically recorded with soundings. All connectors are external to the case allowing easy transportation without having to shutdown between sites. The user interface comprises a 15" colour LCD panel and a touch-screen. Menus are designed to allow intuitive and rapid transition between critical acquisition parameters and data display. Spectral analysis, combined with DSP options, allows the user to monitor and identify local sources of noise; these may be removed ultimately using additional filters specific to local site conditions. A diagnostic menu provides access to a spectrum analyser as well as time-domain views of the input signal for rapid troubleshooting or optimisation of acquisition parameters to ambient site conditions. Data is stored in an expandable 1 GByte solid-state memory. This provides the user with essentially unlimited storage space (up to 500,000 soundings), making the terraTEM system ideal for rapid, high-resolution surveys. System parameters are stored automatically with each sounding for post-survey quality assurance.

SPECIFICATIONS

	terraTEM	Options
Transmitter Output	10 Amps. (max.)	Enhanced Transmitter
Receivers	1 Channel	3 Channels (simultaneous)
High Resolution Sampling Rates	500 kHz	-
User Selectable Multiple Time Gates	-	Option
Data Visualisation and Processing in field	Standard Software	Enhanced Software
Storage Device – 1 GB Flash Disk	Standard	-
GPS Receiver – 12 channel	-	Option
Communications – Port for Data Transfer	USB and RS-232 Standard	-
External Synchronisation	-	Option
Continuous Recording (with external GPS Interface)	-	Option
Extra Stacking Options and Gain Functions	10 Selectable Gain Settings from 1 to 8,000	Auto Gain
Vectem 3 Interface Module (down-hole)	-	Option
Interface Options (third party devices)	-	Option
Dimensions:		
Console: 530 x 350 x 160 mm. 13 kg		
Battery Box: 280 x 250 x 180 mm. 12 kg.		
Operating Temperature: -10 to 40 degrees C.		



terraTX-50

External terraTEM Transmitter



Fig. 45.- Equipo TerraTx-50

Terra TX50

Este aparato es un complemento para dotarle de una mayor potencia al momento inductor. Se trata del transmisor para esta técnica más potente del mercado en la actualidad.

Technical Specifications

Output Voltage	24, 36, 72 and 96 Volts DC-selectable	Data Visualisation and Processing in field	Standard Software
Output Current	1 - 50 Amps	Display	Including Battery Voltage, Loop Current, Warnings of Overheating and Short-circuit.
Waveform	Bipolar. 50% Duty Cycle. On time equals Off Time	Cooling	Convection by Heat-sink
Turn-off Time	Depending on Loop Inductance and Current. Only 35 usecs on a 100 m loop and 40 A.	Operating Temperature	-20 to +50 degrees C.
Repetition Rate	Controlled by terraTEM to be the same as terraTEM	Operational safety protection	Overvoltage and Short-circuit protection
Synchronisation	Cable or GPS Timing	Dimensions	45 x 32 x 15 cm.
		Weight	10 kg.



2.1.4.- Método electromagnético VLF

2.1.4.1- Aspectos Generales del Método electromagnético V.L.F.

Al objeto de detectar fracturas, discontinuidades o diques (zonas preferentes de concentración de aguas subterráneas) dentro de los macizos ígneos, metamórficos y volcánicos. Se puede usar el método electromagnético V.L.F. Este método localiza estructuras donde pueden estar atrapadas grandes cantidades de aguas subterráneas.

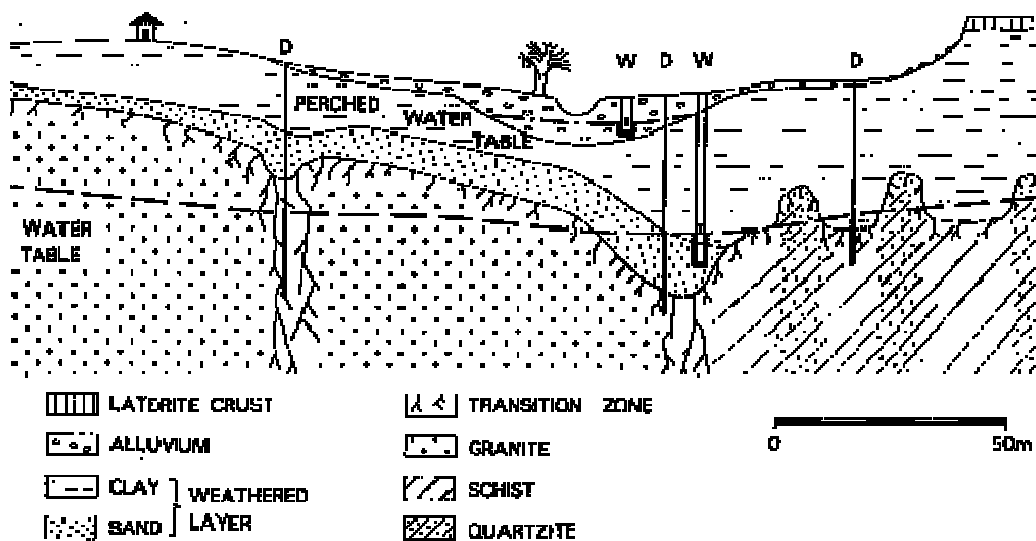


Fig. 46.- Modelo del terreno ejemplo

2.1.4.2 - Principio de V.L.F.

Este sistema, utiliza los componentes magnético del campo electromagnético generado por transmisores de ondas lejanas existentes, que usan la banda V.L.F. (muy baja frecuencia 15-30 Khz.) .Estos transmisores funcionan en muchas países. Se utilizan principalmente para las comunicaciones a larga distancia.

Las estructuras que conducen electricidad en la superficie o bajo la tierra, aunque estén cubiertas por una pesada capa, afectan a la dirección e intensidad del campo que genera la señal de radio transmitida. Entorno a la estructura geológica se forma un débil campo secundario. Este campo puede ser medido y analizado. El equipo mide la intensidad de campo y el desplazamiento de fase en una zona de roca fracturada. Los resultados de las mediciones se expresan en forma de componente real (componente en fase) y componente imaginaria (componente en cuadratura).



THE VLF PRINCIPLE

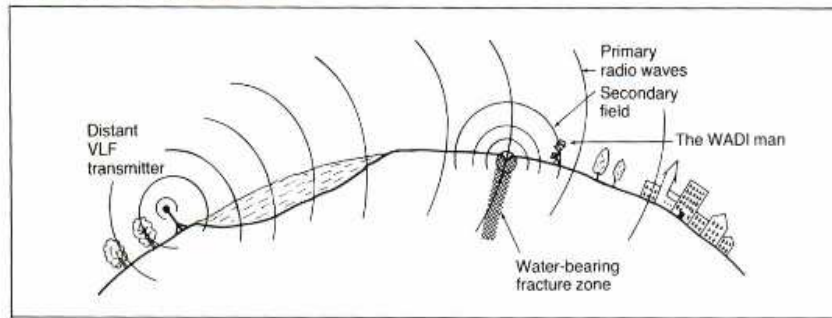


Fig. 47.- Principio del VLF

Esta metodología permite detectar fracturas, contactos, diques, fallas y otras estructuras interesantes., pudiendo determinar la potencia y la profundidad de la zona anómala, así como, las características de los materiales que rellenan las fracturas o diques, permitiendo evaluar sus posibilidades hidrogeológicas.

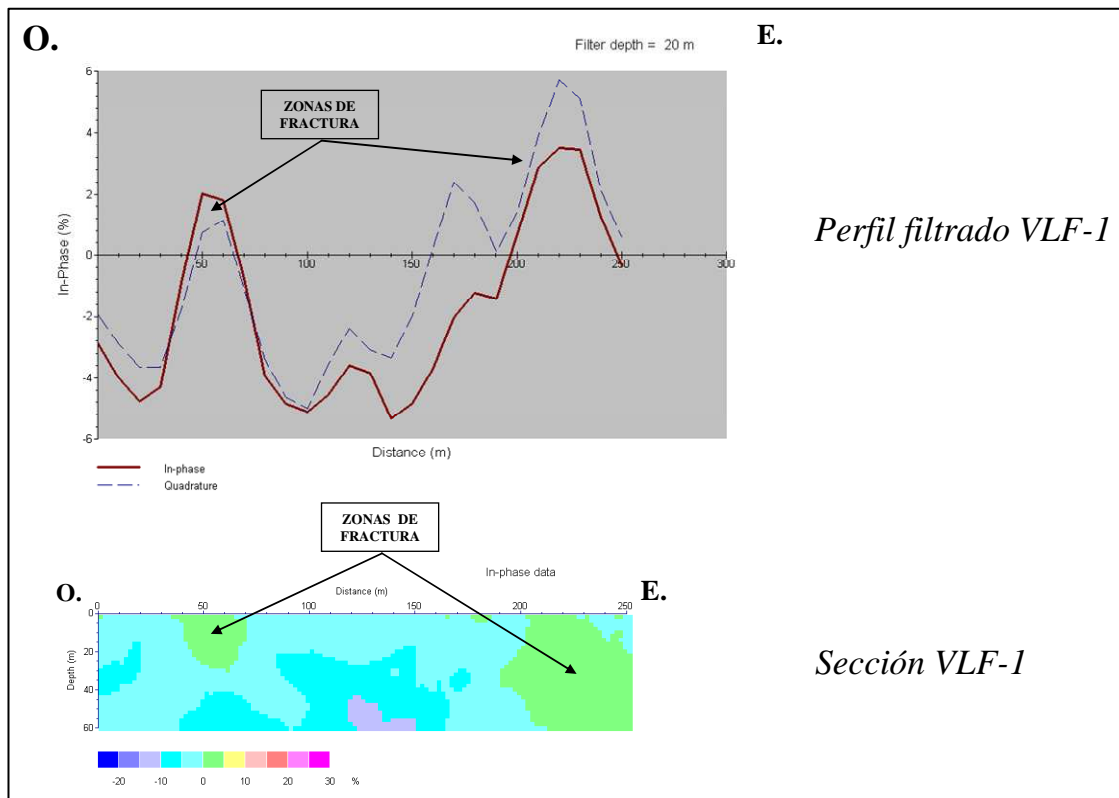


Fig.48.- Ejemplo del método Electromagnético VLF



2.1.4.3 – Equipo empleado

CARACTERISTICAS TÉCNICAS DEL EQUIPO ELÉCTROMAGNÉTICO DE MEDIDAS ABEM WADI



Fig.49.- Equipo ABEM WADI

TECHNICAL SPECIFICATION

Primary field

Magnetic components of the EM field emanating from regular VLF transmitters (or the portable TX-27)

Measured parameters

Vertical and horizontal in-phase and quadrature components

Displayed parameter

Vertical in-phase field expressed as percentage of the horizontal field and recalculated as "current density". Alternatively, any of the 4 measured parameters can be displayed

Station selection

Automatic (scans and tunes onto the most suitable station) or manual (station frequency entered from keyboard)

Frequency range

15-30 kHz in steps of 100 Hz

Display

Easy-to-read Supertwist LCD 150x40 mm

Languages

- English/Spanish
- English/French
- English/German
- English/Swedish
- English/Portuguese
- English/Finnish

Help key

Pressing this key together with any other key provides context-sensitive help

Diagnostics

Four-option service menu:

- Internal voltages check
- Change of language
- Memory test
- Inclinator calibration

Inclinometer

Range -10° to +10°
Precision 0.2 %

Field strength

100 nanoamp/m - 500 milliamp/m

Transmitter range:

WADI can normally be used at distances ranging from 75-100 km to about 10 000 km from a powerful transmitter

Memory capacity

Data from about 4000 measuring stations

Data output

Via RS 232C interface to serial dot matrix printer (PRINT F0 OR PRINT F1) or modem (SEND DATA)

Power

9 V from 6 standard D-cells or (optionally) rechargeable cells

Battery life

Approximately 2 weeks of field work

Ambient temperature

-20 ° C - +50° C (Built-in heater warms display at low temperatures)

Weight basic system

Hand-held controller unit 1.6 kg
Entire system 6 kg
Shipping weight 10 kg
(Freight cost is based on bulk weight 16 kg)

STANDARD BASIC SYSTEM

Item	Description	Order Code	Qty
1	WADI basic system Controller unit Antenna unit Measuring/battery unit Carrying belt Six 1.5 V batteries Instruction and interpretation manuals	9133 0018 05	1

OPTIONAL EQUIPMENT

2	Rechargeable batteries	9139 0400 23	6
3.1	Battery charger 220 V	9133 0018 45	1
3.2	Battery charger for 110V	9133 0018 41	1
4	Service kit WADI	9133 0018 63	1
5	SECTOR Software	(51/4" or 3 1/2")	1
6	Cable WADI-to-PC	(9-pole or 25-pole)	1
7	WADI-to-printer cable	9136 0001 58	1
8	Dot-matrix printer 80 c	9139 9100 04	1
9	Portable VLF transmitter	TX-27	1
10	Generator for TX-27		1



2.1.5.- Método de Emisión de Campo Electromagnético (ECE)

A principios de los años 70 del siglo pasado se descubrió la existencia de numerosos campos electromagnéticos generados como resultado de las transformaciones mecanoeléctricas que se producen en los minerales y rocas de la corteza. Estos campos fueron denominados como “campo natural de impulsos electromagnéticos de la Tierra”.

2.1.5.1 -Principios teóricos

Consideremos una molécula de un mineral dieléctrico, vemos como dentro de la estructura cristalina, los centros de gravedad de las cargas positivas y negativas son coincidentes en ausencia de una influencia exterior, por lo que el momento dipolo de la molécula será igual a cero:

$$\bar{p} = q \cdot l$$

Donde:

q Magnitud de las cargas positivas o negativas iguales de la molécula; **l** Distancia entre los centros de gravedad de las cargas positivas y negativas. Si aplicamos una deformación a la molécula, se produce una variación en la estructura atómica que varía los centros de gravedad de las cargas de los átomos, generando la aparición de un momento dipolo inducido el cual, es proporcional a la tensión de campo E:

$$\bar{p} = e_0 \cdot \alpha \cdot \bar{E} \quad (1)$$

Donde:

α coeficiente de polarización de la molécula; **e0** constante eléctrica. Si analizamos la relación anterior, vemos como la polarización de una molécula depende únicamente de su volumen. De igual manera podemos ver como los minerales dieléctricos pueden polarizarse como consecuencia de la deformación de su estructura atómica o lo que es lo mismo, pasan a un estado en el que los momentos dipolo de cada volumen elemental ΔV son distintos de cero.

El efecto de la deformación o tensión mecánica sobre la estructura atómica de los minerales de la roca genera roturas y desplazamientos que rompen la neutralidad eléctrica de los dieléctricos sólidos. Este fenómeno es el causante de que estos dieléctricos sólidos sean capaces de concentrar cargas eléctricas y, con la deformación, emitir energía electromagnética, siendo esta, la principal fuente de impulsos electromagnéticos registrados con el sistema ECE.

Existen dos mecanismos de perturbación del estado eléctrico de los materiales dieléctricos: polarización eléctrica (aparición de un momento dipolo), y electrización (aparición de exceso de carga eléctrica). La aparición de momentos dipolares eléctricos en cristales dieléctricos está determinada por la migración de iones de la estructura cristalina en direcciones opuestas, al igual que ocurre en otro tipo de potenciales (potencial espontáneo, polarización inducida, etc.).

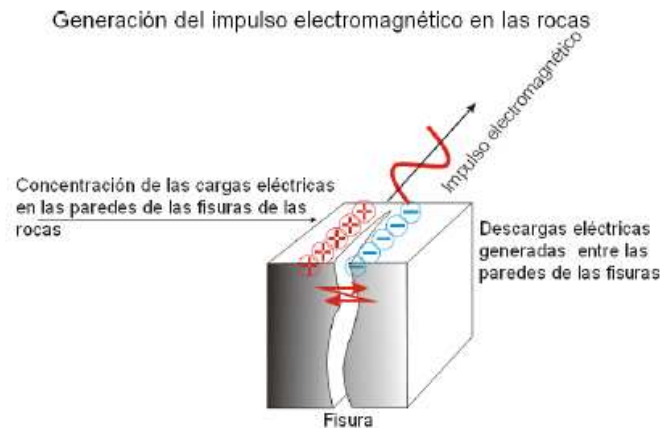


Fig. 50-. Fenómeno de polarización generado por fenómenos de deformación y rotura masiva de la estructura cristalina y partículas dieléctricas.

Este tipo de polarización se produce a parte de por fenómenos de deformación cristalina, a causa de:

- Deformación y rotura masiva de la estructura cristalina de partículas dieléctricas (Figura 50).
- Rotura de capilares llenos de líquido en los poros de los materiales.
- Fenómenos de filtración a través de capilares y flujo a través de los poros, el cual genera un potencial de electrofiltración.

Los procesos anteriores producen emisiones de tipo mecanoiónico (deformación y rotura de la estructura cristalina) y mecanoeléctricas (rotura de capilares y flujos de filtración en poros) que son registrables con el sistema ECE.

En condiciones naturales, la polarización y electrización de formaciones geológicas bajo fenómenos de deformación o tensión mecánica exterior depende de múltiples factores. Esta es la causa de que se considere que la estructura y naturaleza del campo electromagnético es compleja. Para la resolución del problema inverso, hemos de tener en cuenta que la señal registrada con el sistema ECE, es la sumatoria de la componente eléctrica y magnética del campo electromagnético.

En el caso de la componente eléctrica del campo secundario, esta se forma bajo la influencia de múltiples factores externos del medio (movimiento del aire, polvo, gotas de agua, hierba seca, etc.), muchos de los cuales, no están relacionados directamente con el campo de tensiones generado dentro del objeto emisor (anómalo). Esta influencia hace difícil la determinación de la señal útil respecto al fondo de interferencias existente dificultando la interpretación de las anomalías. Todo ello hace necesaria la aplicación de filtros que intenten eliminar o minimizar el efecto de estas interferencias.

En el caso de la componente magnética del campo secundario, esta carece de la mayoría de interferencias que afectan al campo eléctrico lo cual, permite analizar las anomalías relacionadas



con procesos tensodeformacionales del medio.

Por ello, el sistema ECE se basa el registro y análisis de la componente magnética del campo secundario de radiación electromagnética.

2.1.5.2 - Resolución del problema inverso

El potencial en una partícula dieléctrica polarizada uniformemente se determina a partir de la siguiente relación:

$$U = \int_V \frac{\rho}{r} dV + \int_S \frac{\sigma}{r} dS \quad (2)$$

Donde ρ y σ representan la densidad volumétrica y superficial de las cargas. Teniendo en cuenta las condiciones iniciales del problema (delimitación del volumen elemental dV), es necesario excluir el segundo sumando, el cual determina los procesos que tienen lugar fuera de los límites del foco emisor de impulsos electromagnéticos.

Por tanto, para la solución del problema inverso, se puede utilizar la integral que determina la suma de momentos dipolos elementales emisores dentro de un volumen limitado. Si tenemos en cuenta que la zona sometida a deformación ocupa un volumen V , para un determinado momento de tiempo dt , se puede determinar un sistema infinito de dipolos eléctricos elementales con los ejes de los momentos dipolares situados de forma regular.

Por lo tanto, $P \cdot dV$ es el momento bipolar del volumen infinitesimal dV . Para un instante determinado, el volumen del cuerpo polarizado es V y el vector de densidad de corriente es p , el cual se determina como dP . En este caso, el potencial U en punto M situado a una distancia r del volumen dV del cuerpo polarizado, se define como:

$$U_M = \int_V \frac{p \cos(\theta)}{r^2} dV \quad (3)$$

Donde θ es el ángulo formado entre las direcciones del vector de densidad de corriente p y del radiovector r medido desde el centro de dipolo hasta el punto M en la superficie.

$$r = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2} \quad (4)$$

Omitiendo las operaciones de la diferenciación particular de la función potencial en diferentes direcciones, pasamos a la componente del vector de tensión de la componente magnética de ECE. La diferenciación se realiza según las coordenadas de los puntos de observaciones (x, y, z) , y la integración según las coordenadas del cuerpo (x', y', z') . Por esta razón lo podemos resolver bajo una integral. En este caso, para objetos tridimensionales, obtenemos tres componentes de tensión de ECE:



$$\begin{aligned}
 H_x^E &= p_x \int_V \frac{2(x-x')^2 - (y-y')^2 - (z-z')^2}{r^5} dV + 3p_y \int_V \frac{(x-x') \cdot (y-y')}{r^5} dV + 3p_z \int_V \frac{2(x-x') \cdot (z-z')}{r^5} dV, \\
 H_y^E &= p_y \int_V \frac{2(y-y')^2 - (x-x')^2 - (z-z')^2}{r^5} dV + 3p_x \int_V \frac{(x-x') \cdot (y-y')}{r^5} dV + 3p_z \int_V \frac{2(y-y') \cdot (z-z')}{r^5} dV, \\
 H_z^E &= p_z \int_V \frac{2(z-z')^2 - (x-x')^2 - (y-y')^2}{r^5} dV + 3p_x \int_V \frac{(x-x') \cdot (z-z')}{r^5} dV + 3p_y \int_V \frac{2(y-y') \cdot (z-z')}{r^5} dV.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Para los cuerpos en dos dimensiones las formulas de tensión son:

$$\begin{aligned}
 H_x^E &= -2p_x \int_S \frac{(z-z')^2 - (x-x')^2}{[(x-x')^2 + (z-z')^2]^2} dS + 4p_z \int_S \frac{(x-x') \cdot (z-z')}{[(x-x')^2 + (z-z')^2]^2} dS, \\
 H_z^E &= 2p_z \int_S \frac{(z-z')^2 - (x-x')^2}{[(x-x')^2 + (z-z')^2]^2} dS + 4p_x \int_S \frac{(x-x') \cdot (z-z')}{[(x-x')^2 + (z-z')^2]^2} dS.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Actualmente, para el análisis de anomalías con el método de ECE, se emplea el equipo de registro (ADONIS 32M) que permite el registro simultáneo de la frecuencia de impulsos y la emisión máximas. La cantidad de impulsos ECE generados por unidad de tiempo es directamente proporcional a la tensión del campo electromagnético. La amplitud, tal y como se ve en las formulas anteriores (5 y 6), se determina a partir de la magnitud y dirección del vector de densidad de corriente generada a causa de los efectos mecanoeléctricos dentro de objetos anómalos sometidos a deformación. Los parámetros geométricos de la anomalía así como su relación con la distribución de dipolos elementales se describen con funciones integrales.

2.1.5.3 - Registro de Sondeos

El sistema permite, con ayuda de una sonda especial, testificar sondeos. Este tipo de mediciones son muy útiles, ya que permiten establecer la profundidad a la que se emplaza la superficie de rotura (deslizamiento): superficial, profundo, y a favor de varias superficies de rotura deslizamientos complejos). Además, se puede realizar un seguimiento de los mismos, lo cual permite caracterizar y determinar el proceso genético del macizo para prever el desarrollo y tomar medidas de protección.

En los gráficos inferiores (Figura 51) se muestra la distribución de los impulsos electromagnéticos en función de la profundidad, caracterizando de esta forma el grado de deformación de los materiales y las superficies de deslizamiento:

- a) Superficial,
- b) Profundo,
- c) Deformaciones complejas

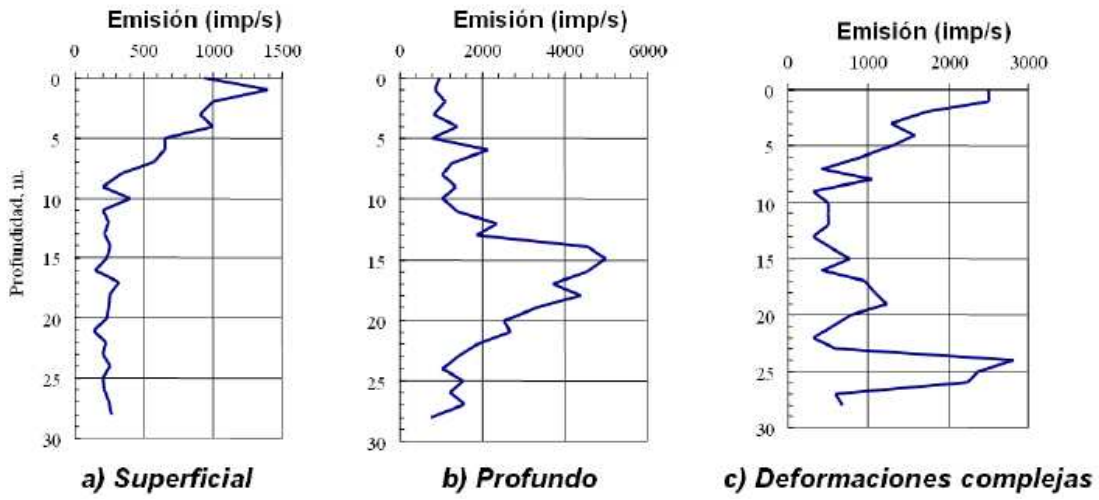


Figura 51. Testificación de sondeos. Distribución de impulsos electromagnéticos en función de la profundidad para diferentes tipologías de deslizamientos



2.2.- Software

Los sistemas de información se han convertido en herramientas muy efectivas de la ingeniería y de las ciencias básicas. A lo largo de los años se han desarrollado infinidad de programas que nos permiten, manipular, organizar, analizar y referenciar datos de manera más fácil y eficiente, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son prueba de ello.

Los SIG son un tipo especializado de sistemas que se distinguen por su capacidad de manejar información espacialmente georeferenciable y que permiten además su representación gráfica.

La manera de almacenamiento de la información es fundamental, dicha información puede ser muy variada, pues toma en cuenta características del mundo real, permite disponer de información tanto de cuerpos y figuras regulares que son bien representados por la geometría tradicional, como información que no podrá ser representada de manera clara y trivial. Si se considera que la mayoría de la información geofísica no es regular, entonces, estos sistemas representan una manera eficiente de organizar, manejar y manipular ésta información.

A continuación se especifican las herramientas SIG (Software) utilizadas para la realización del proyecto:

2.1.1.- Rockworks

RockWorks es la última versión del buque insignia Rockware. Es un programa para el análisis y visualizado de datos del subsuelo, cartografía, geología, modelos de yacimiento, manipulación de datos de pozos, estructurales, estratigráficos, geofísicos y geoquímicos, útil para estudios geotécnicos, mineros, petrolíferos, etc, etc ...

RockWorks ha sido durante mucho tiempo la norma en los sectores del petróleo, ambientales, geotécnicos, la minería y las industrias de visualización de datos del subsuelo a causa de instrumentos populares, tales como mapas, los troncos, las secciones transversales, valla diagramas, modelos sólidos y volumétricos.

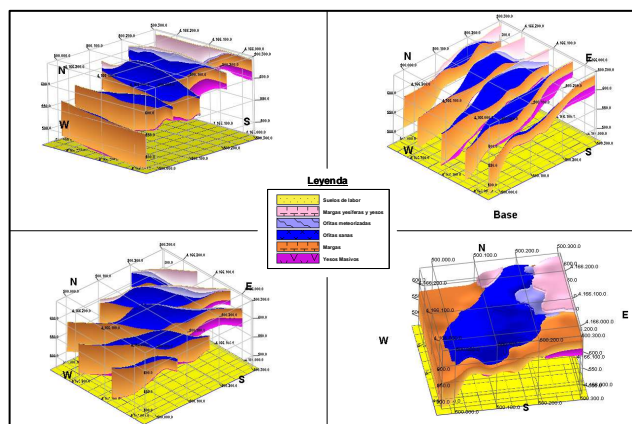


Figura 52. Visualización 3D de datos geológicos obtenidos mediante geofísica con Rockworks



2.1.2.- Surfer

Surfer es un programa para hacer mapas y trazar líneas de contorno en 3D para Windows únicamente. Con facilidad y rapidez, convierte los datos geofísicos en mapas con contorno, superficie, wireframe, vector, imagen y sombras. Virtualmente todos los aspectos de los mapas pueden ser personalizados para que produzcan exactamente la presentación que se desea.

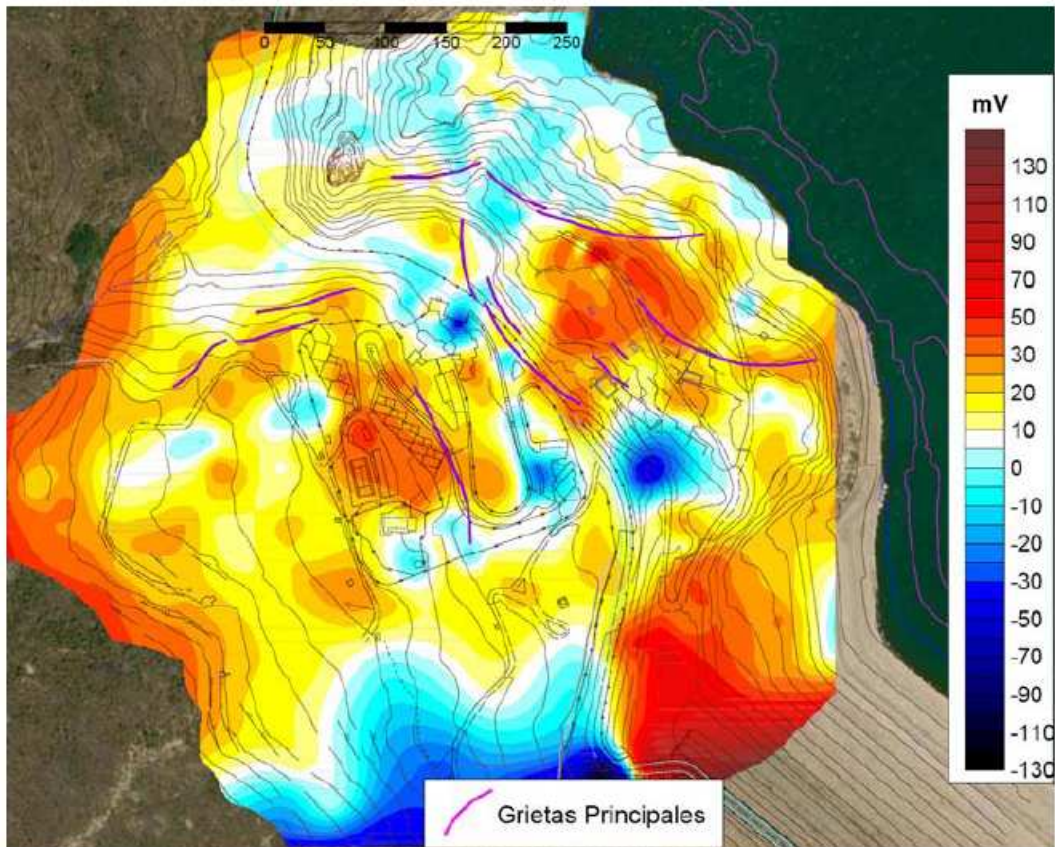


Figura 53. Mapa de contorno de PE creado con Surfer



2.1.3.- Voxler

Es un programa de gran alcance, rápido, con imágenes personalizadas en 3D de datos. Importa fácilmente datos en una multitud de formatos de archivo para crear impresionantes gráficos para explorar las relaciones en un conjunto de datos. Este robusto, pero fácil de usar programa da el poder para mostrar los datos en una variedad de formatos y colores.

Voxler toma los datos en bruto, complejos y los modela en un rico entorno interactivo y visual 3D. La versión actualizada permite visualizar rápidamente y examinar datos. Se Pueden filtrar anomalías, duplicados, o áreas que se desean eliminar.

Interactivamente permite manipular los datos al mismo tiempo que verse los resultados. Las características incluyen: isosuperficies, los volúmenes prestados, contornos, campos de altura, líneas de flujo, diagramas de vectores, diagramas de dispersión, las imágenes orto y oblicua, aviones clip, anotaciones y texto, los ejes, la caja, grillado 3D, más operaciones de cálculo, añadiendo luz a una escena, importación / exportación de varios formatos de archivos, automatización, captura de vídeo, y mucho más.

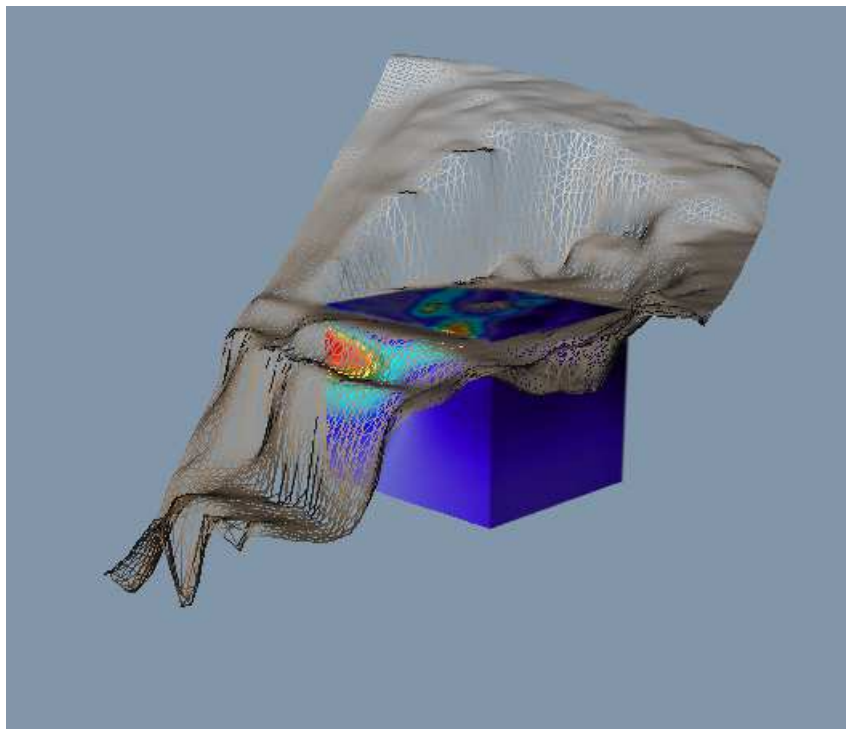


Figura 54. Bloque 3D creado a partir de datos de Tomografía eléctrica con Voxler



2.1.4.- SketchUp

SketchUp es un programa informático de diseño y modelaje en 3D para entornos arquitectónicos, ingeniería civil, diseño industrial, GIS, videojuegos o películas. Es un programa desarrollado y publicado por Google.

Google SketchUp es un conjunto de potentes funciones y aplicaciones para profesionales del diseño y la ingeniería. Permite construir increíbles modelos 3D de forma sencilla y rápida. SketchUp permite exportar tus construcciones a distintos formatos gráficos como JPG, BMP, TIFF, PNG.

La aplicación está pensada para subir modelos a Google Earth y así compartirlos con el resto de usuarios de este programa.

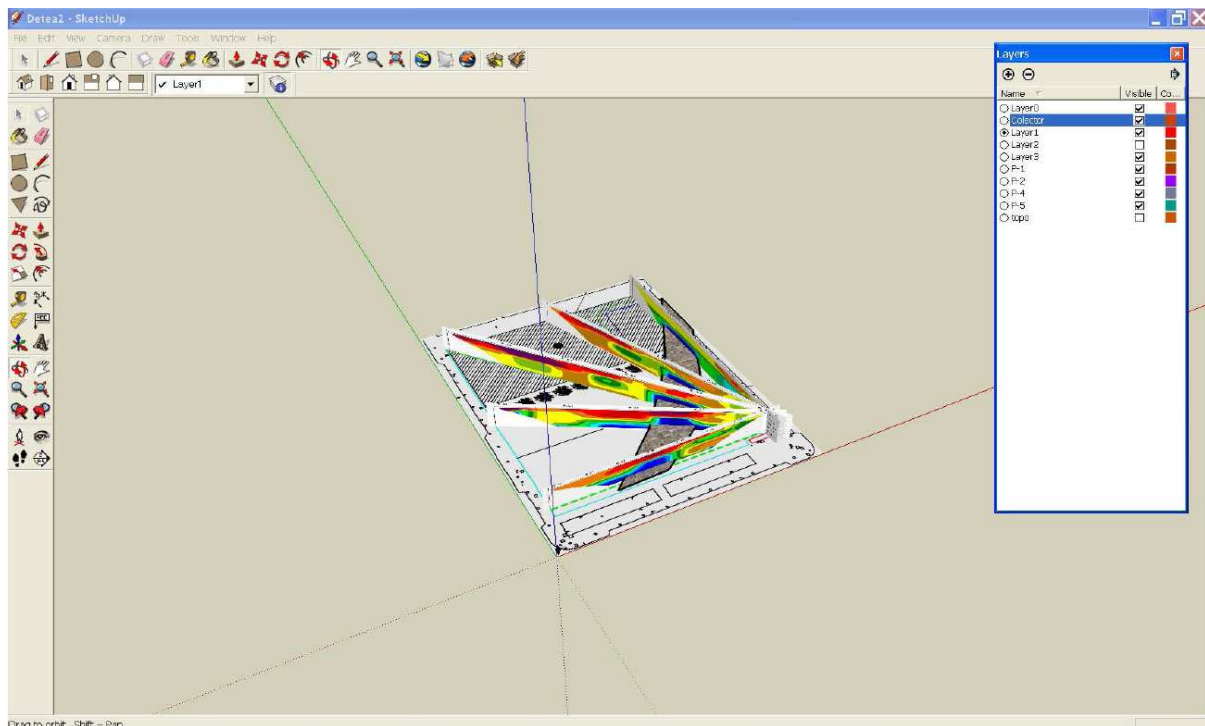


Figura 55. Modelo creado en SketchUp para la localización de un colector mediante tomografía eléctrica



2.1.5.- Google earth

Google Earth es un completísimo atlas interactivo en tres dimensiones. Las capas son el gran atractivo de Google Earth. Cada una añade a las imágenes del satélite una cantidad enorme de información: redes de carreteras, edificios en tres dimensiones, datos de tráfico y meteorología, lugares de interés e incluso fotografías de las calles en las ciudades donde Street View esté disponible. Además, permite la inclusión de tus propias capas.

No todo es explorar sin rumbo fijo. Google Earth puede guardar imágenes y marcadores para compartirlos en la red, así como imprimir lo que estés viendo. Con las herramientas de Google Earth, medir distancias o áreas es muy fácil. Además, es compatible con varios formatos de datos GPS. Además, en Google Earth hay incluso un sencillo simulador de vuelo.



Figura 56. Visualización de capa geológica incluida en Google Earth.

2.1.6.- ArcGIS

ArcGis es una serie integrada de software de Sistemas de Información Geográfica que trabaja como un motor compilador de información geográfica alfanumérica (Bases de Datos) y gráfica (Mapas). El ámbito de acción de Arc Gis es muy amplio. Su arquitectura está elaborada de tal manera que sus herramientas entregan sistemas inteligentes de información geográfica.

En computadoras de escritorio, ArcGIS puede incluir:



- ArcReader, permite ver y consultar mapas creados con otros productos Arc.
- ArcView, permite ver datos espaciales, crear mapas en capas y realizar análisis espacial básico.
- ArcEditor, incluye herramientas más avanzadas para la manipulación de shapefiles y geodatabases.
- ArcInfo, incluye funcionalidades para la manipulación, edición y análisis de datos.

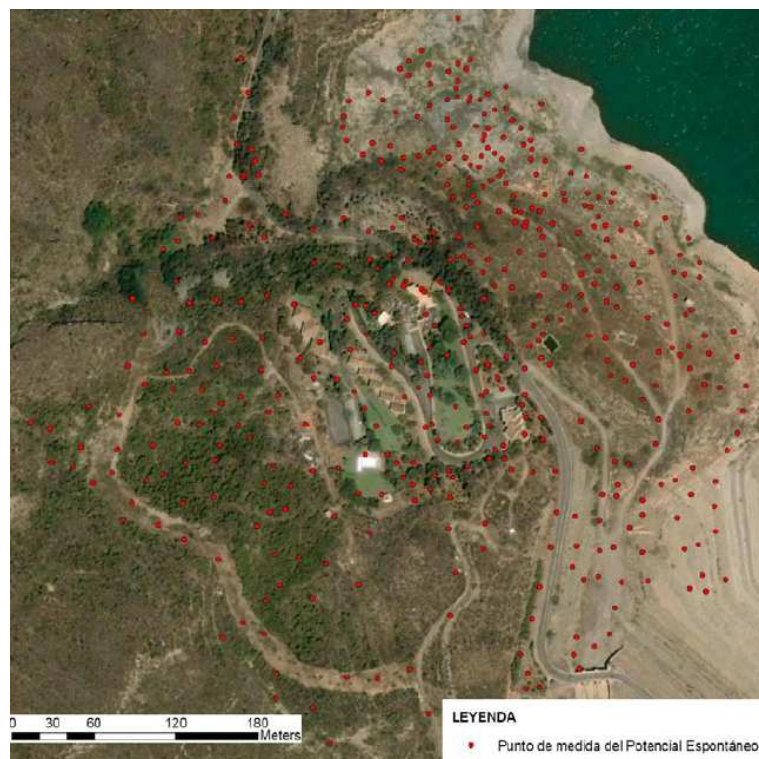


Figura 57. Visualización de los puntos de medidas reanalizados de Potencial espontáneo mediante programa ArcGis en una determinada zona de investigación.

2.1.7.- Autocad

Al igual que otros programas de diseño asistido por computadora, AutoCAD gestiona una base de datos de entidades geométricas (puntos, líneas, arcos, etc) con la que se puede operar a través de una pantalla gráfica en la que se muestran éstas, el llamado editor de dibujo. La interacción del usuario se realiza a través de comandos, de edición o dibujo, desde la línea de órdenes, a la que el programa está fundamentalmente orientado. Las versiones modernas del programa permiten la introducción de éstas mediante una interfaz gráfica de usuario o en inglés GUI, que automatiza el proceso.

Como todos los programas y de DAC, procesa imágenes de tipo vectorial, aunque admite



incorporar archivos de tipo fotográfico o mapa de bits, donde se dibujan figuras básicas o primitivas (líneas, arcos, rectángulos, textos, etc.), y mediante herramientas de edición se crean gráficos más complejos. El programa permite organizar los objetos por medio de capas o estratos, ordenando el dibujo en partes independientes con diferente color y grafismo. El dibujo de objetos seriados se gestiona mediante el uso de bloques, posibilitando la definición y modificación única de múltiples objetos repetidos.

Parte del programa AutoCAD está orientado a la producción de planos, empleando para ello los recursos tradicionales de grafismo en el dibujo, como color, grosor de líneas y texturas tramadas. AutoCAD, a partir de la versión 11, utiliza el concepto de espacio modelo y espacio papel para separar las fases de diseño y dibujo en 2D y 3D, de las específicas para obtener planos trazados en papel a su correspondiente escala. La extensión del archivo de AutoCAD es .dwg, aunque permite exportar en otros formatos (el más conocido es el .dxf). Maneja también los formatos IGES y STEP para manejar compatibilidad con otros softwares de dibujo.

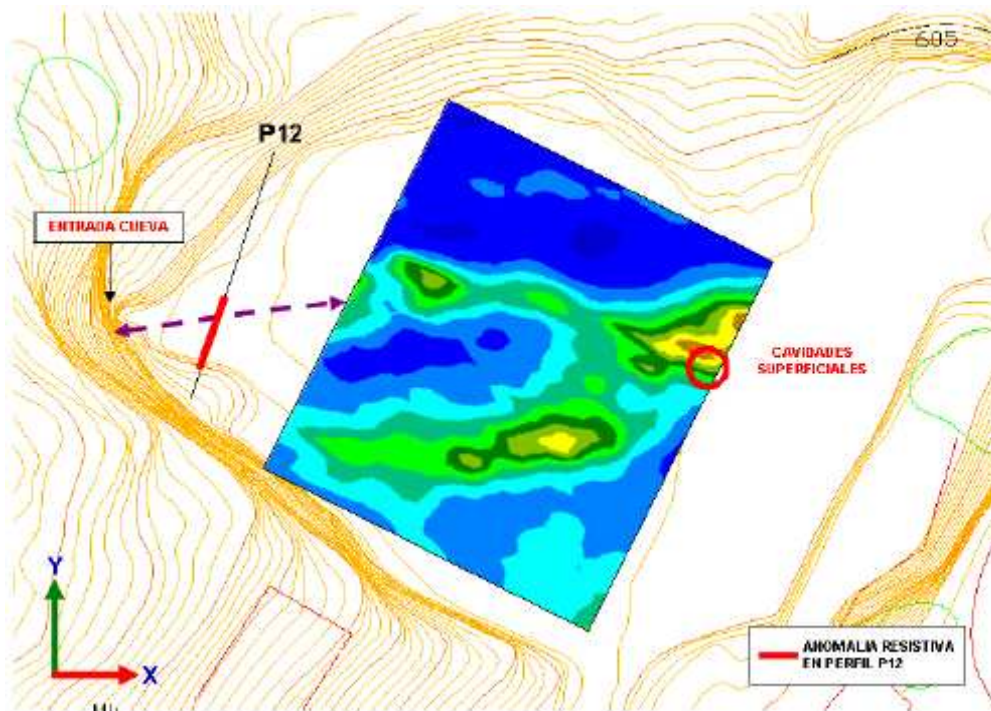


Figura 58. Georeferenciación de datos geofísicos mediante el programa Autocad

2.1.8.- Excell

(Microsoft Excel). Excel es una aplicación desarrollado por Microsoft y distribuido en el paquete Office para usarse en Windows y Macintosh. Excel se utiliza para la creación de hojas cálculo. El programa posee una interfaz intuitiva, con herramientas de cálculos y gráficos de muy fácil uso. Es uno de los programas más populares para realizar hojas de cálculos.

Sus trabajos son almacenados en archivos con extensión ".xls", aunque soporta otras extensiones



como ".csv".

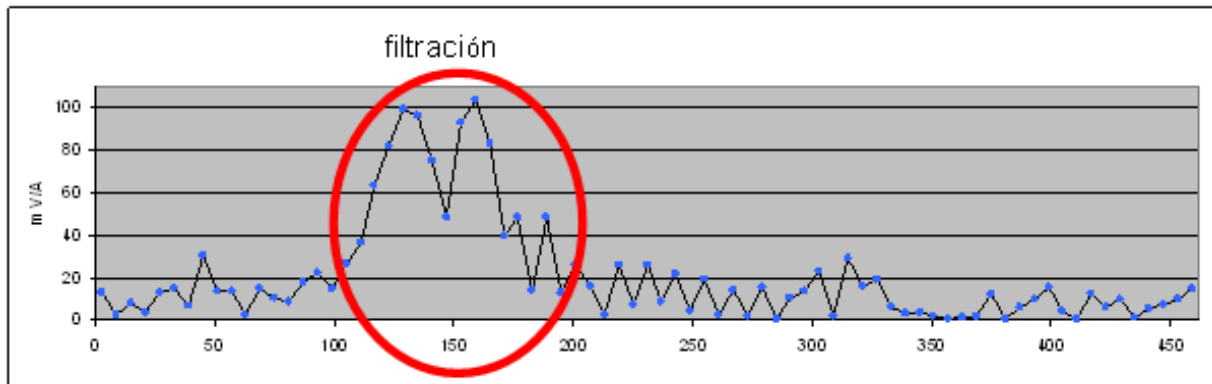


Figura 59. Creación de un perfil de la técnica misse a la msse (voltaje) mediante excell



III.- METODOLOGÍA, RESULTADOS Y ANALISIS DE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS

Para llevar a cabo las investigaciones propuestas en este proyecto, se realizaron tres campañas de prospección geofísica en tres lugares de la geografía española, donde la problemática estaba perfectamente caracterizada o lo está a día de hoy. En algunos casos, se realizaron las pruebas necesarias (en forma de sondeos mecánicos) para la corroboración de la información refrendada en este proyecto.

En estas campañas, se aplicaron las metodologías geofísicas que más se adaptaban a la problemática encontrada. Posteriormente se introdujeron los datos en programas de gestión de información espacial para modelar, visualizar rápidamente y examinar los datos geofísicos de forma global. El objetivo fue siempre la de caracterizar el problema de la forma más detallada posible.

Las tres campañas geofísicas realizadas fueron las siguientes:

1º REALIZACIÓN DE UNA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 3D PARA LA LOCALIZACIÓN DE CAVIDADES EN EL EMBALSE DE SANTOLEA (TERUEL).

2º CARACTERIZACIÓN DEL DESLIZAMIENTO DE LA MARGEN DERECHA DE LA PRESA DE BENÍNAR. T.M. BERJA (ALMERÍA)

3º PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA DEFINICIÓN DEL FLUJO SUBTERRANEO DEL AGUA TERMAL DE LA ANTIGUA FUENTE DE LOS AGUACHINES QUE QUEDO BAJO EL EMBALSE DE LINARES /SEGOVIA) Y PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO.



3.1.- Realización de una prospección geofísica mediante Tomografía Eléctrica 3D para la localización de cavidades en el embalse de Santolea (Teruel).

3.1.1.- Introducción

El presente informe recoge los resultados obtenidos en la campaña de investigación geofísica mediante Tomografía Eléctrica 3D (en adelante TE3D) realizada en el estribo izquierdo de la presa de Santolea. El objetivo de la investigación ha sido la caracterización de los materiales que conforman la cerrada tratando de localizar la posible existencia de una serie de fracturas y/u oquedades geológicas, que afectando a los materiales carbonatados aflorantes, pueden condicionar el recrecimiento de la presa de Santolea (Teruel).

El embalse de Santolea se encuentra emplazado sobre materiales carbonatados del Cretácico inferior (Figura 60).

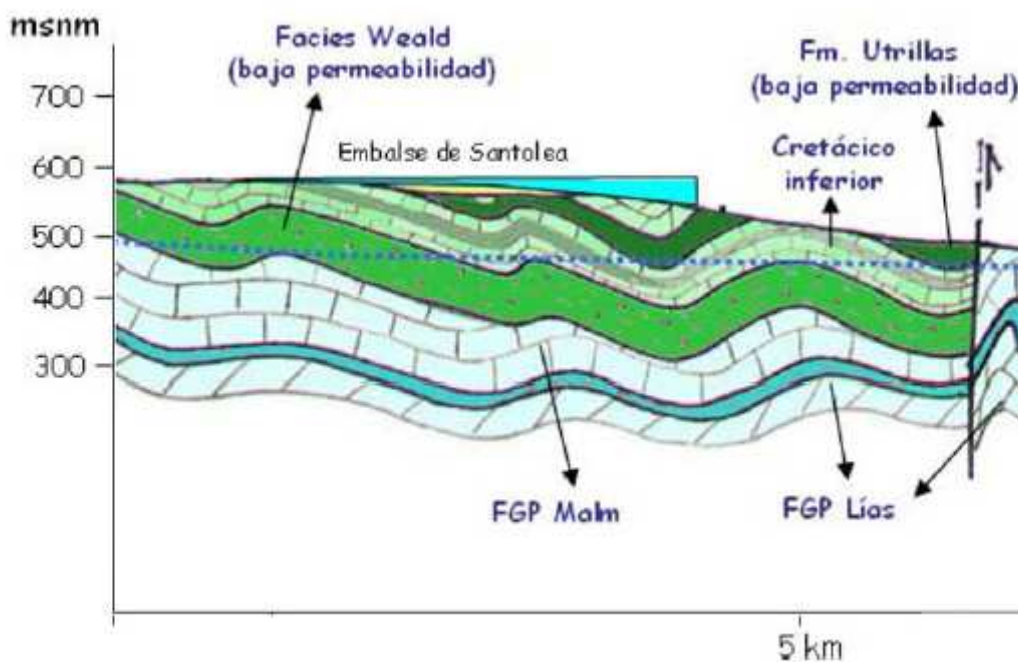


Figura 60: Corte geológico esquemático del emplazamiento del mismo.

Durante las obras de recrecimiento ha aparecido una importante cavidad en el estribo izquierdo de más de 100 m de longitud asociado a formaciones calcáreas del cretácico inferior que se sitúa a cota del futuro nivel de embalse, así como pequeñas faltas en la recuperación de testigo en los sondeos de reconocimiento que ponen de manifiesto la posibilidad de existencia de fenómenos de fracturación y/o karstificación que, afectando a los materiales carbonatados, pueden suponer un problema para las obras de recrecimiento de la presa y su futura gestión. En noviembre de 2009 se realizaron una serie de trabajos geofísicos de caracterización de ambos márgenes que pusieron de manifiesto la existencia de cavidades en la zona del estribo izquierdo.



Tras estos resultados, se ha decidido estudiar con grado de detalle superior la zona que será objeto de las obras de recrecimiento con el objetivo de localizar las posibles cavidades y/o fracturas que puedan afectar a las obras en esta zona.

3.1.2.- Objetivos

El objetivo de la investigación propuesta será la detección de fracturas y/u oquedades dentro de los materiales carbonatados cretácicos que constituyen la cerrada actual de la presa y que serán objeto de los trabajos de recrecimiento de la misma.

Las investigaciones realizadas han consistido en la realización de un estudio geofísico mediante la técnica de Tomografía Eléctrica y su representación mediante los programas Voxler, SketchUp y Autocad.

La campaña de investigación geofísica ha sido planificada teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Existen evidencias de la existencia de una cavidad de dirección norte - sur de gran dimensión (mas de 100 m de largo) junto al estribo izquierdo de la presa.
- Es preciso alcanzar profundidades de investigación que superen los 15m de profundidad.
- Se pretenden localizar anomalías relacionables con la existencia de fracturas y/u oquedades de gran tamaño (superiores al 1 m³ de volumen).
- La zona de estudio comprende la explanada ocupada por la cantera que sirvió para la construcción de la presa original.

Considerando estos condicionantes previos así como los requerimientos de resolución del estudio, espacio disponible y metodología de toma de datos, los trabajos realizados han sido los siguientes:

- Ejecución de 11 perfiles de TE con espaciado interelectrónico de 1 m, 33 m de longitud y separación entre los mismos de 3 m. Dados los requerimientos de resolución y penetración necesarios, se han registrado dos dispositivos, Polo – Dipolo y Polo – Polo.
- Elaboración de 4 perfiles de TE con espaciado interelectrónico de 1 m, 47 m de longitud y separación entre los mismos de 3 m. Al igual que en el caso anterior se han registrado dos dispositivos, Polo – Dipolo y Polo – Polo.
- Realización de 2 perfiles de investigación complementarios de 24 m de longitud con separación interelectrónica de 1 m empleando también los dispositivos Polo – Dipolo y Polo – Polo.



3.1.3 Justificación de los trabajos realizados

El empleo de las técnicas de Tomografía Eléctrica 3D responde a los siguientes factores:

- Elevada sensibilidad del parámetro registrado (resistividad) a la existencia de discontinuidades geoelectricas en los mismos (fracturas, rellenos, oquedades, etc.).
- Obtención de secciones de resistividad bidimensionales y tridimensionales mediante programas de representación que permitirán determinar la posición de las posibles fracturas y/u oquedades dentro de los materiales carbonatados cretácicos. El estudio permite cartografiar en 3D la ubicación de las fracturas, grandes oquedades, zonas de alteración, etc. en caso de existencia dentro de la zona de estudio.
- Precisión en la determinación de los valores de resistividad tanto en la vertical, como lateralmente, dado el numero de perfiles ejecutados, separación de los mismos y espaciado interelectrónico.

3.1.4. Resultados obtenidos

Los trabajos de investigación geofísica han consistido en la realización de 17 perfiles de investigación (figura 61) con objetivos diferenciados:

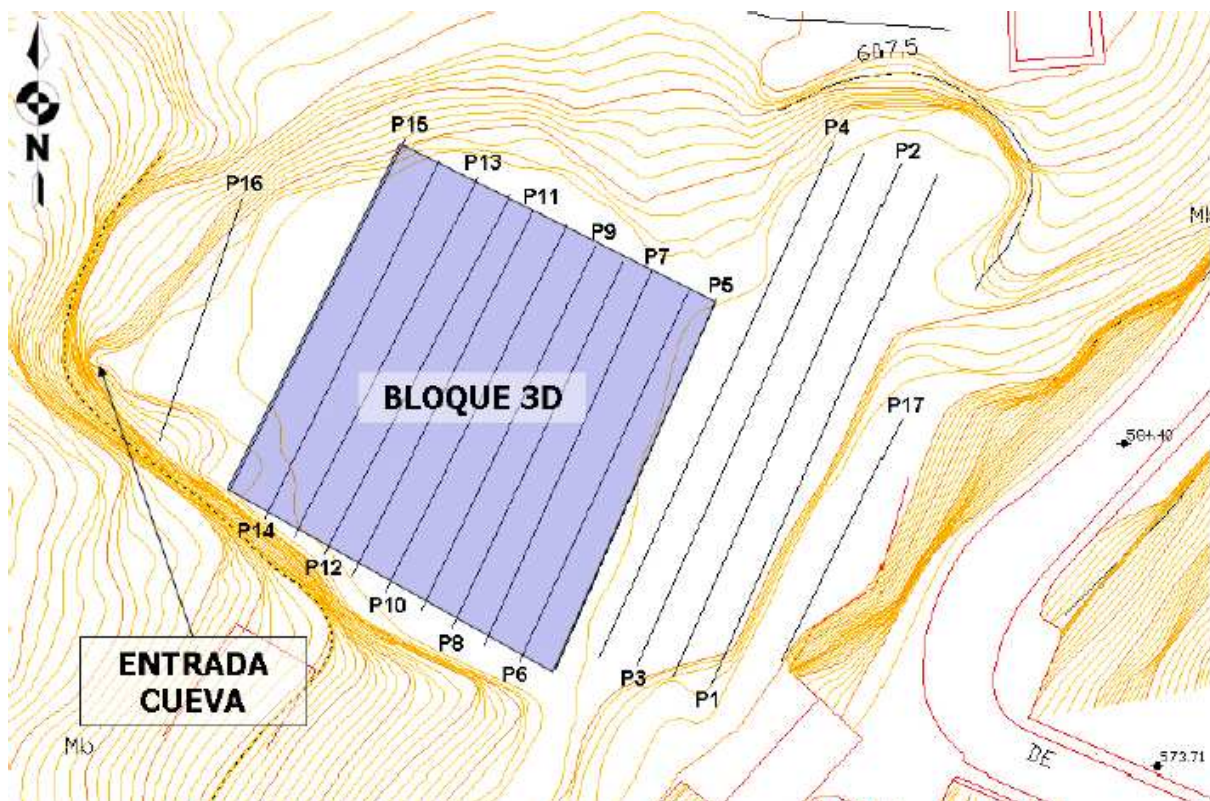


Figura 61: Plano de situación de los perfiles de investigación realizados en la zona de estudio.



- Ejecución de un 11 perfiles de TE con espaciado interelectrónico de 1 m, 33 m de longitud y separación entre los mismos de 3 m. Dados los requerimientos de resolución y penetración necesarios, se han registrado dos dispositivos, Polo – Dipolo y Polo – Polo. Dichos perfiles se han procesado en 3D para localizar con alta resolución, las posibles oquedades y/o fracturas existentes en esta zona.
- Realización de 4 perfiles de TE con espaciado interelectrónico de 1 m, 47 m de longitud y separación entre los mismos de 3 m. Al igual que en el caso anterior se han registrado dos dispositivos, Polo – Dipolo y Polo – Polo.
- Elaboración de 2 perfiles de investigación complementarios de 24 m de longitud con separación interelectrónica de 1 m empleando también los dispositivos Polo – Dipolo y Polo – Polo. El primero de ellos (Perfil 12) se localiza entre la entrada de la cueva y el bloque 3D y trata de analizar la relación entre los resultados del estudio 3D y la cueva. El segundo de ellos (perfil 13) se ha realizado en el extremo sureste de la explanada con idea de analizar también la continuidad de los resultados del estudio 3D y los 4 perfiles de mayor longitud (perfiles 1, 2, 3 y 4) con la zona de excavación del estribo izquierdo de la presa de Santolea.

De cara a la interpretación se ha tomado como referencia y con carácter paramétrico los resultados de los perfiles de investigación N°5 y 6 pertenecientes al bloque 3D, los cuales cortan una zona en la que son visibles la existencia de cavidades que afloran en superficie. Los valores de resistividad que se obtengan en estas zonas serán los que se empleen como referencia a la hora de establecer la posible existencia de oquedades en el resto de la zona de estudio

3.1.4.1. Bloque 3D

El bloque 3D realizado en la zona del estribo izquierdo se ha realizado a partir de la ejecución de 11 perfiles de tomografía eléctrica (perfiles 5 a 15) de 33 m de longitud separados 3 m entre sí. El espaciado interelectrónico en cada uno de los perfiles ha sido de 1 m y se han empleado los dispositivos de registro de Polo – Dipolo y Polo – Polo, dada la necesidad de profundidad de investigación necesaria (más de 22 m de profundidad). El bloque 3D generado presenta unas dimensiones de 33 m de ancho por 30 m de largo y 25 m de profundidad.

De cara a facilitar la interpretación, se ha incluido el modelo topográfico de la zona de estudio (Figura 59).

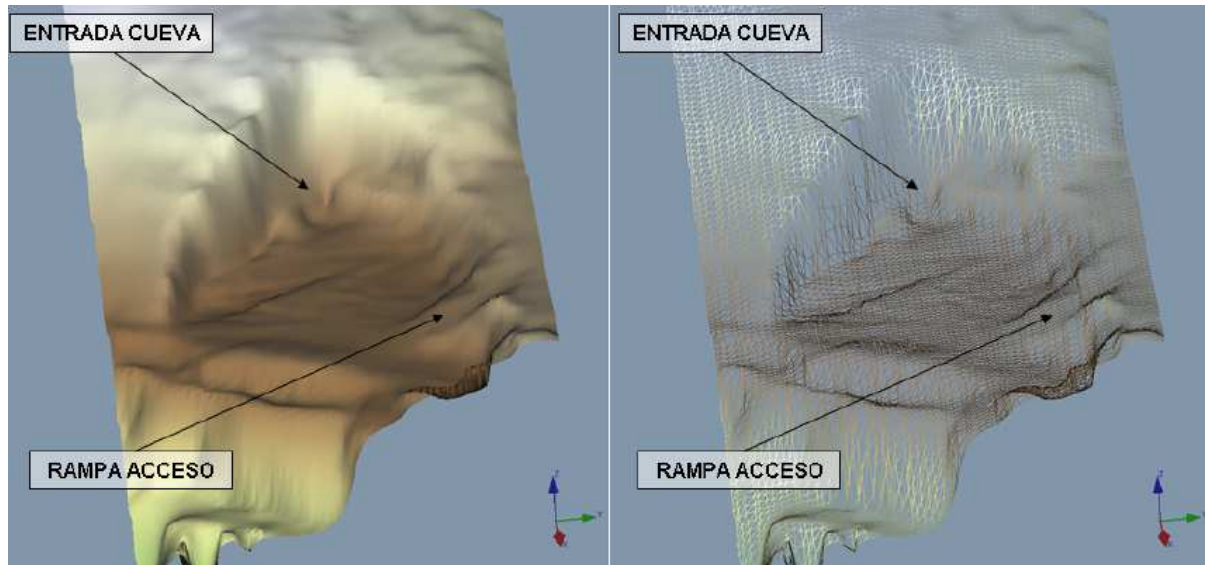


Figura 62: Modelo topográfico de la zona de estudio empleado en la modelización 3D (Voxler)

La inversión de los datos permite obtener el bloque 3D de resistividades del subsuelo (Figura 63).

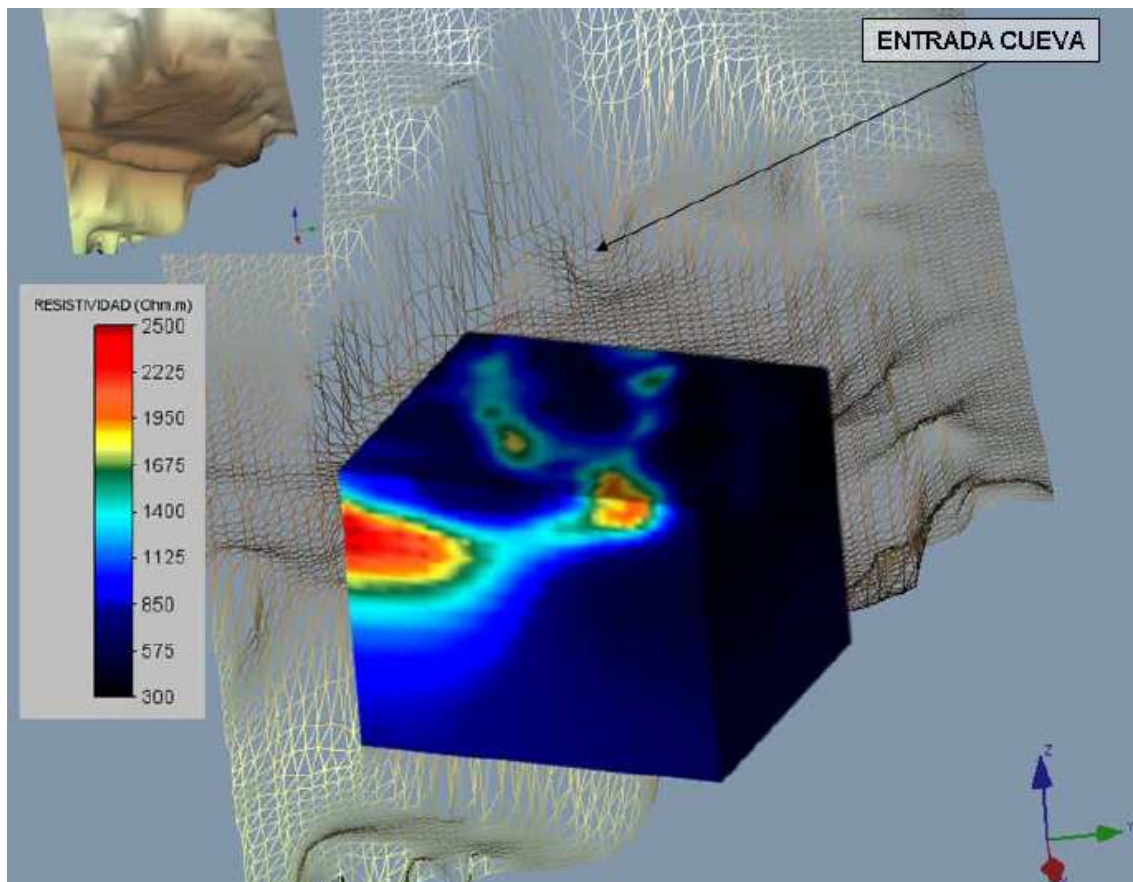


Figura 63: Bloque 3D de resistividades (Voxler)



Un primer análisis de los resultados obtenidos en el bloque 3D de resistividades nos permite observar como en general, los materiales en la zona de estudio se presentan de manera homogénea desde el punto de vista geoelectrico (tonos azulados) y con ausencia de alteraciones yo posibles cavidades Únicamente cabe destacar la existencia de dos bandas de anomalía de naturaleza resistiva (líneas verdes discontinuas que unen zonas de tonos amarillos y rojos) que aparecen en superficie con cierta alineación con la entrada a la cueva existente al fondo de la explanada (Figura 64). Dichas zonas resistivas pueden indicar la presencia de zonas de fracturación y oquedades.

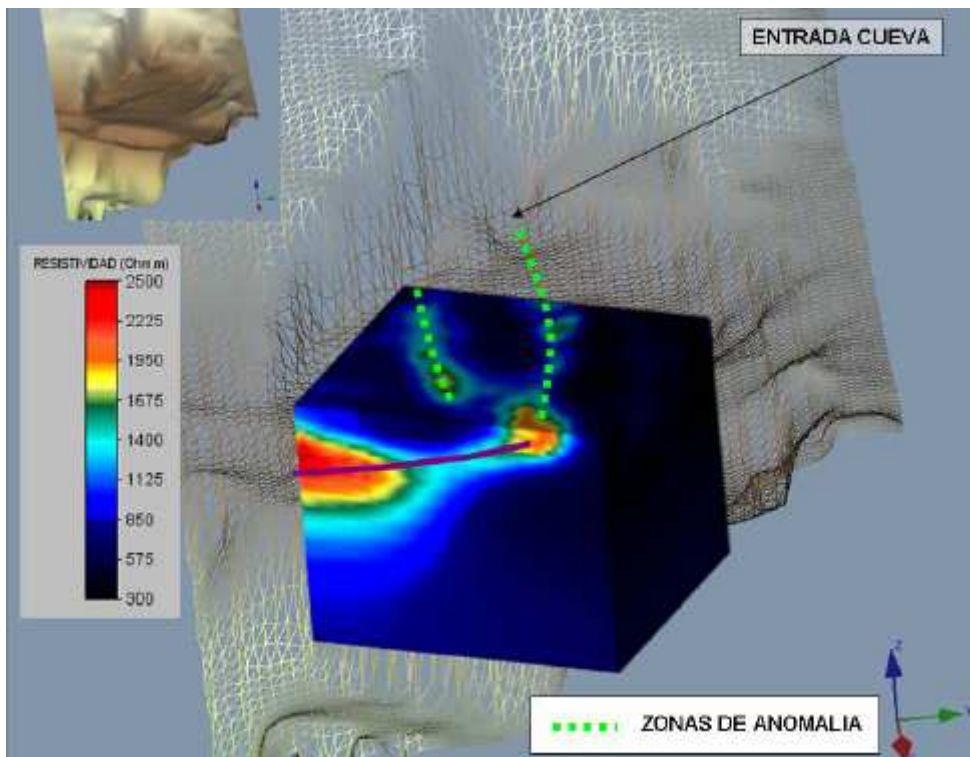


Figura 64: Bloque 3D de resistividades (Voxler)

El análisis del bloque 3D permite definir un posible plano de discontinuidad (línea morada) que uniría parte de las anomalías resistivas superficiales con una anomalía situada en el extremo sur del bloque 3D.

El tratamiento de los datos obtenidos permite generar superficies de igual valor de resistividad que delimiten zonas de interés. En este caso, se han definido dos isosuperficies (Figura 65):

- Isosuperficie de 1.250 Ohm·m (amarillo): delimitación de zonas que pueden presentar fracturación
- Isosuperficie de 1.850 Ohm·m (rojo): delimitación de zonas susceptibles de presentar cavidades.

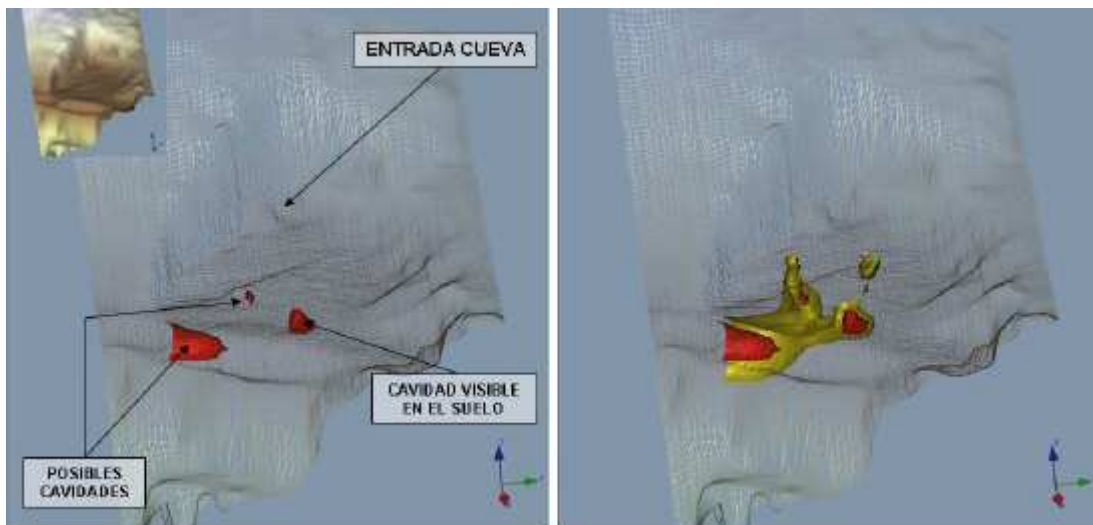


Figura 65: Modelo de isosuperficies para la delimitación espacial de posibles cavidades (izquierda) y zonas de fracturación (derecha). Visualización mediante Voxler

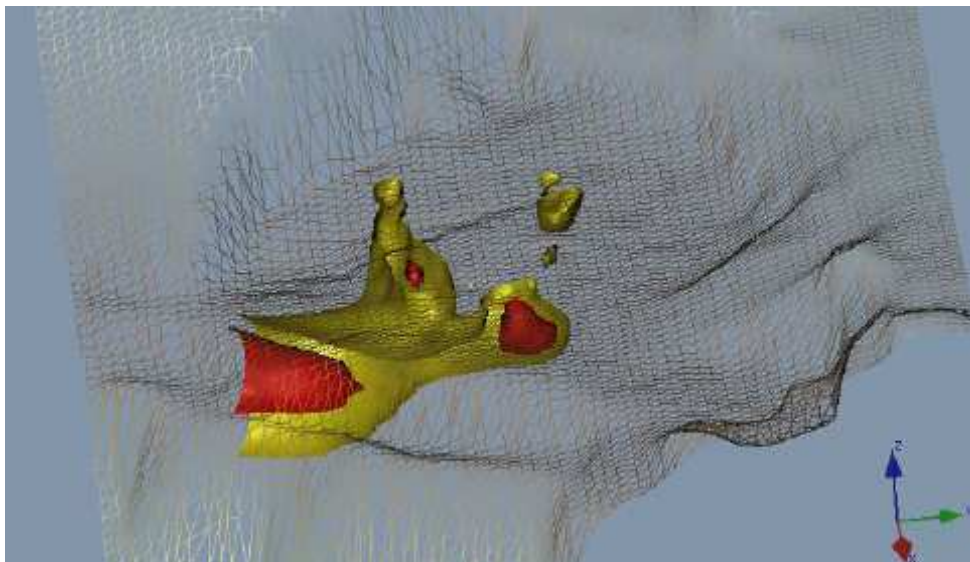


Figura 66: Detalle del modelo de isosuperficies delimitando posibles cavidades (rojo) y zonas de fracturación (amarillo). Visualización mediante Voxler

El tratamiento de los datos también permite la obtención de plantas a diferentes profundidades permitiendo analizar la variación de la resistividad de los materiales en función de la profundidad.

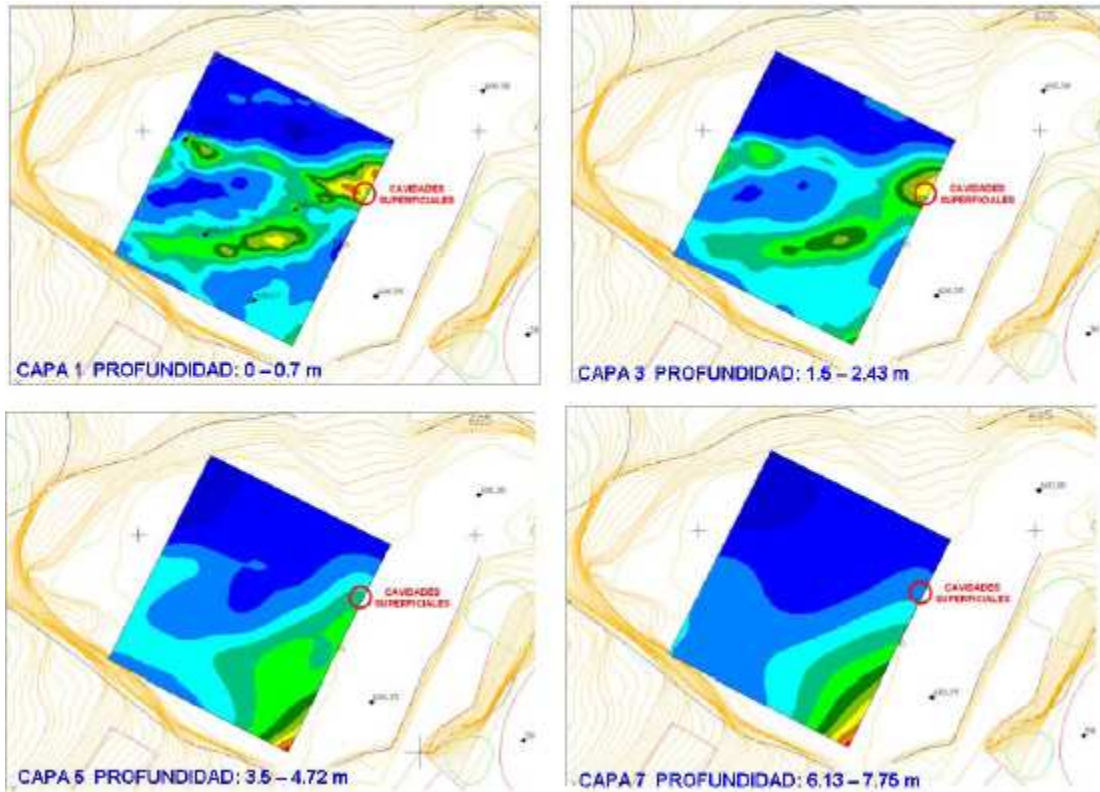


Figura 67: Plantas de resistividad a diferentes profundidades (Autocad)

Las figuras 67 y 68 muestran la variación de resistividades en función de la profundidad. Podemos ver como a nivel de superficie (capa1) se denotan con claridad la existencia de dos bandas de anomalía resistiva (tonos verdes – y rojos) que parecen coalescer en la esquina oeste del bloque 3D. En esta zona es donde aparecen los valores de mayor resistividad y es coincidente con la posición de las cavidades que afloran en superficie en la explanada. Estos valores se emplean con carácter paramétrico de cara a delimitar las posibles zonas en las que pueden existir cavidades en otras zonas del bloque 3D. Si continuamos el análisis observando los resultados a mayor profundidad vemos como las dos zonas de anomalía resistiva superficial van desapareciendo. De hecho, en la planta correspondiente a la capa 7 no parecen quedar restos de ambas anomalías. Por lo tanto, podemos definir la ubicación de las zonas de fracturación y/o cavidades con precisión, las cuales, no parecen prolongarse más allá de los 7 m de profundidad.

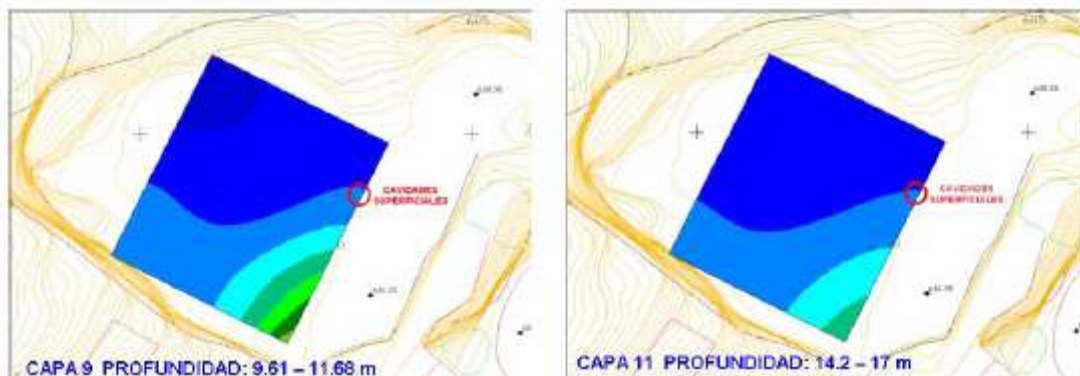


Figura 68: Plantas de resistividad a diferentes profundidades



El análisis de la variación de resistividades de las plantas a diferentes profundidades permite la localización de una zona de anomalía resistiva situada en la esquina sur del bloque 3D que, dados los valores obtenidos, podría indicar la existencia de una cavidad en este sector la cual parece estar situada entre los 4 y 9 m de profundidad (Figura 69). No obstante, la posición de la misma (en el extremo del bloque 3D/perfil n°5) así como el fuerte contraste de resistividades parece indicar que el tamaño real de la anomalía así como la entidad de la misma debe ser mucho menor.

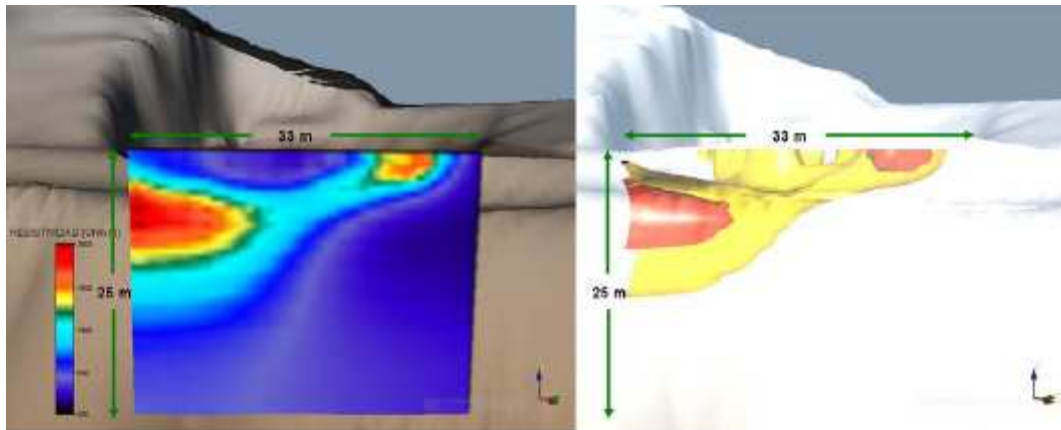


Figura 69: Vista frontal del bloque 3D correspondiente al perfil TE 5 mostrando la posible conexión entre las anomalías superficiales y la profunda (Voxler)

Parece existir cierta relación entre las anomalías resistivas de carácter superficial la anomalía situada en profundidad en la esquina sur del modelo 3D (Figura 69). Esta relación podría marcar un posible plano de fracturación que uniría ambas zonas de anomalía y podría ser el causante de las cavidades existentes en ambas zonas. Atendiendo a la estructura general de los materiales de la cerrada, dicho plano podría estar relacionado con la estratificación de la zona y más concretamente con uno de los estratos mas margosos de la secuencia carbonatada.

La figura 70 muestra una visión cenital de las isosuperficies generadas para delimitar las posibles zonas de fracturación y cavidades.



Figura 70: Imagen cenital de las isosuperficies generadas para delimitar la zona de posibles cavidades y de fracturación



El análisis de ambas imágenes muestra la posible conexión entre las anomalías correspondientes a las cavidades superficiales y a la situada en profundidad en el extremo sur del bloque 3D.

El resto del bloque 3D aparece con valores de resistividad que indican el carácter inalterado de los materiales analizados.

3.1.4.2. Los perfiles 1,2,3, y 4

Los perfiles 1, 2, 3 y 4 presentan una longitud mayor alcanzando los 47 m de longitud y se han realizado aprovechando el mayor espaciado que presenta la explanada su la zona sureste (Figura 71). El objetivo de los mismos es analizar la continuidad lateral de los resultados obtenidos por el bloque 3D.

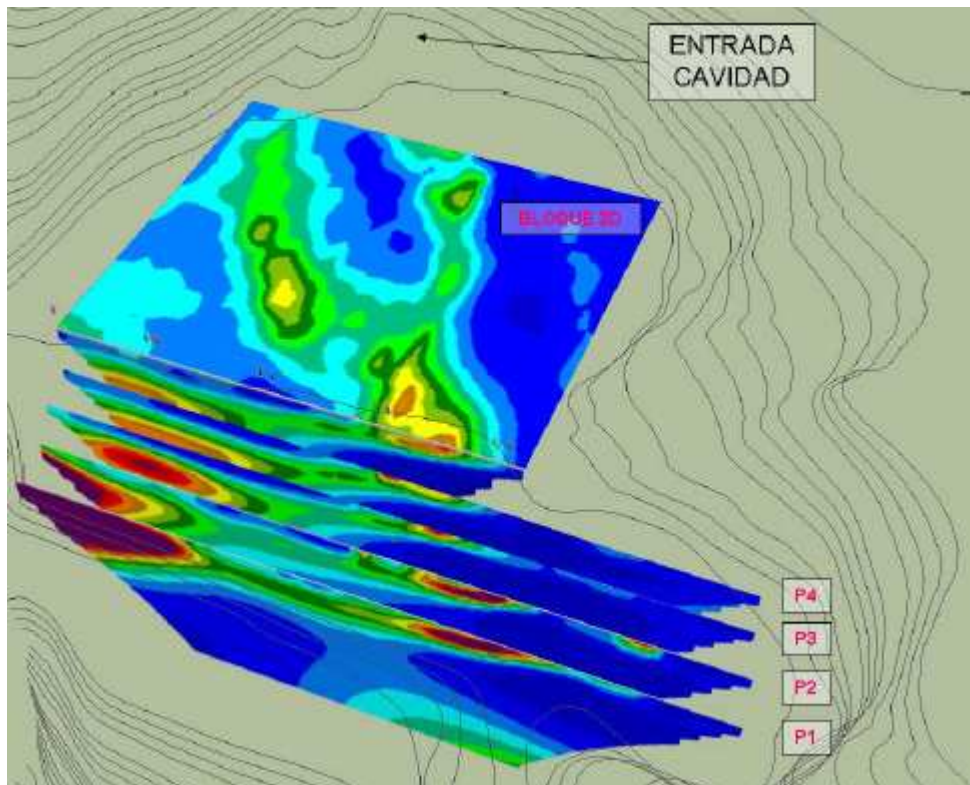


Figura 71: Imagen 3D de los perfiles TE 1, 2, 3 y 4 (SketchUp)

Los perfiles 3 y 4 son los situados de forma más cercana al bloque 3D. Ambos perfiles muestran resultados similares mostrando con claridad la continuación de la anomalía superficial y de la posible cavidad situada en profundidad en la parte sur del bloque 3d (Figura 72).

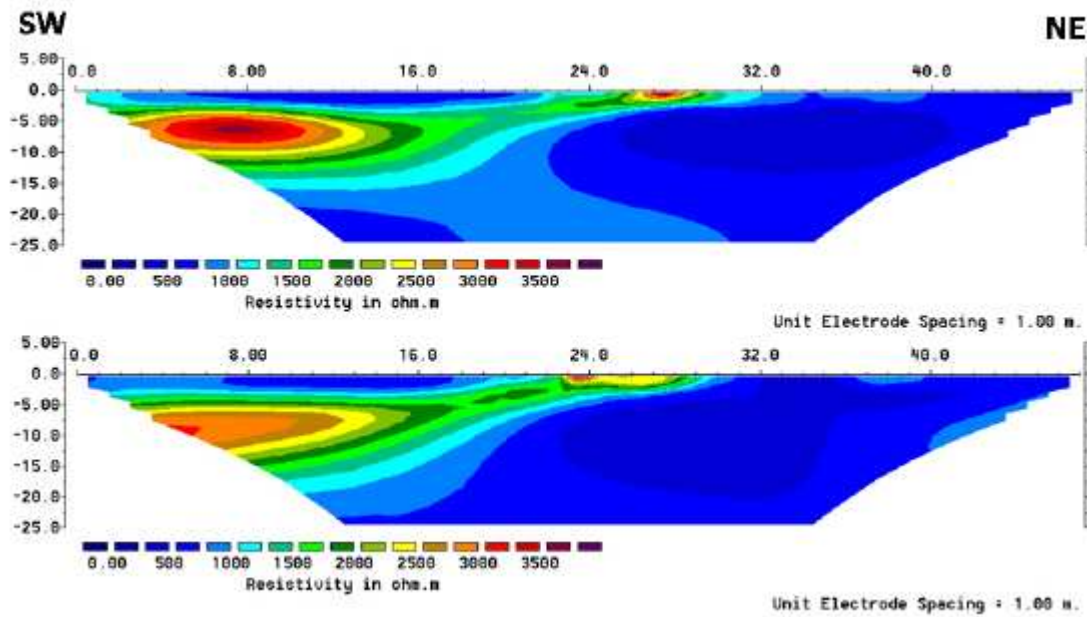


Figura 72: Sección geoelectrica de los perfiles 3 (arriba) y 4 (abajo)

En el caso de los perfiles 1 y 2, los resultados de los mismos muestran una anomalía muy resistiva en el extremo SW debida a la presencia de hormigón armado empleado en esta zona como refuerzo del talud o ejecución de muros en el borde de la explanada de la cantera (Figura 73).

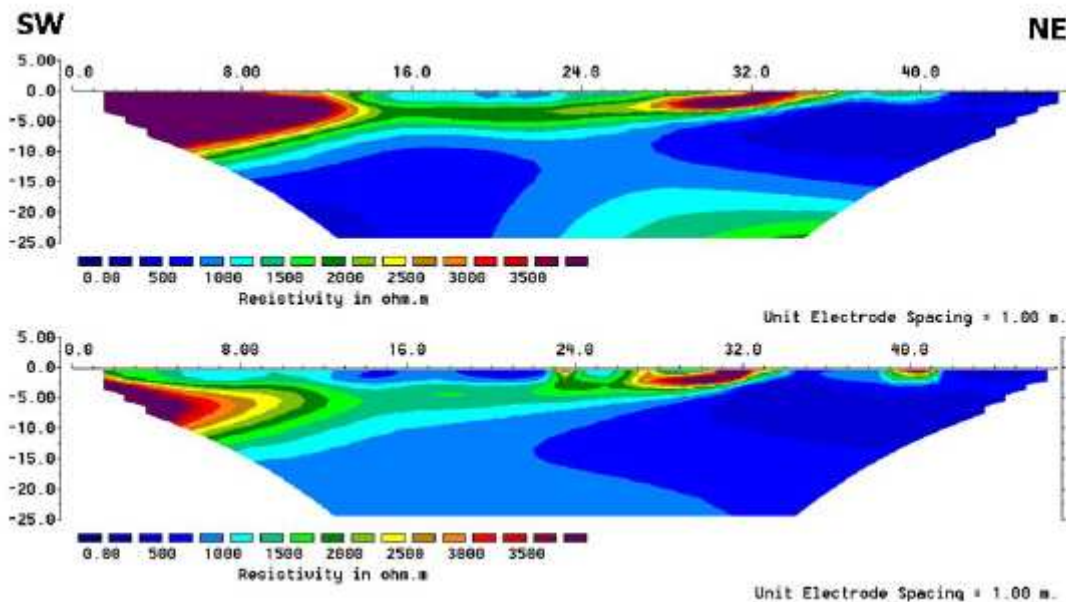


Figura 73: Sección geoelectrica de los perfiles 1 (arriba) y 2 (abajo)

La presencia de estos materiales así como el efecto que generan impide el estudio de la continuidad de la anomalía relacionada con la existencia de una posible cavidad detectada en este sector en el bloque 3D y los perfiles 3 y 4.



3.1.4.3. Perfiles complementarios

Perfil de Tomografía Eléctrica nº16

El perfil de investigación N°16 se localiza entre la entrada de la cueva y el bloque 3D y trata de analizar la posible relación entre los resultados del bloque 3D y la cueva existente en esta zona.

Presenta una reducida longitud de tan solo 24 m de longitud, debido al poco espaciadisponible para la implantación del mismo. La separación interelectrónica ha sido de 1 m empleando los dispositivos de registro Polo – Dipolo y Polo – Polo.

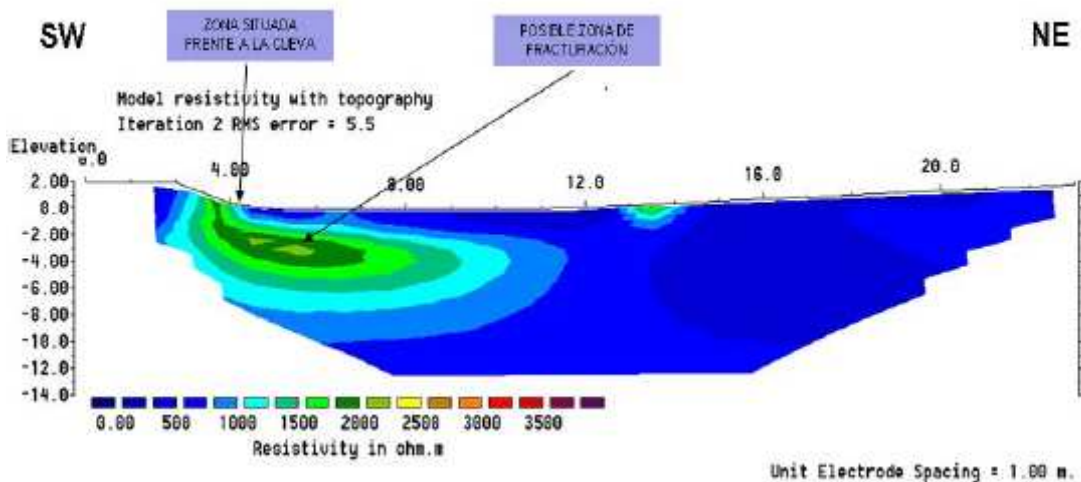


Figura 74: Sección geoléctrica del perfil P12

El análisis del perfil muestra una anomalía resistiva que podría indicar la presencia de una zona fracturada coincidente con la posición de la entrada a la cueva y que marca una alineación entre dicha entrada y una de las zonas fracturadas que marca el bloque 3D realizado (línea morada en la Figura 75).

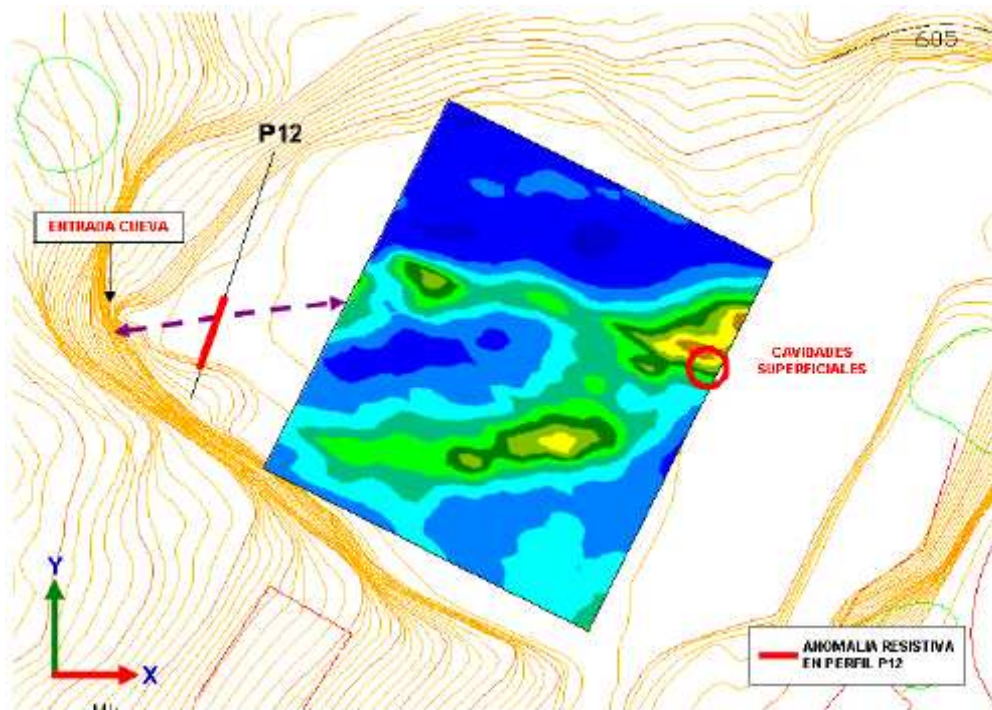


Figura 75: Esquema mostrando la alineación existente entre la anomalía resistiva del perfil P12 y las del bloque 3D (Autocad)

Perfil de Tomografía Eléctrica nº17

El perfil de investigación N°17 se localiza en el borde SW de la explanada objeto de estudio. El objetivo del mismo es analizar el sustrato en la zona de excavación del estribo izquierdo de la presa. Al igual que en el caso del perfil anterior, la longitud del mismo es de únicamente 24 m debido al poco espacio disponible para la implantación del mismos. La separación interelectródica ha sido de 1 m empleando los dispositivos de registro Polo – Dipolo y Polo – Polo.

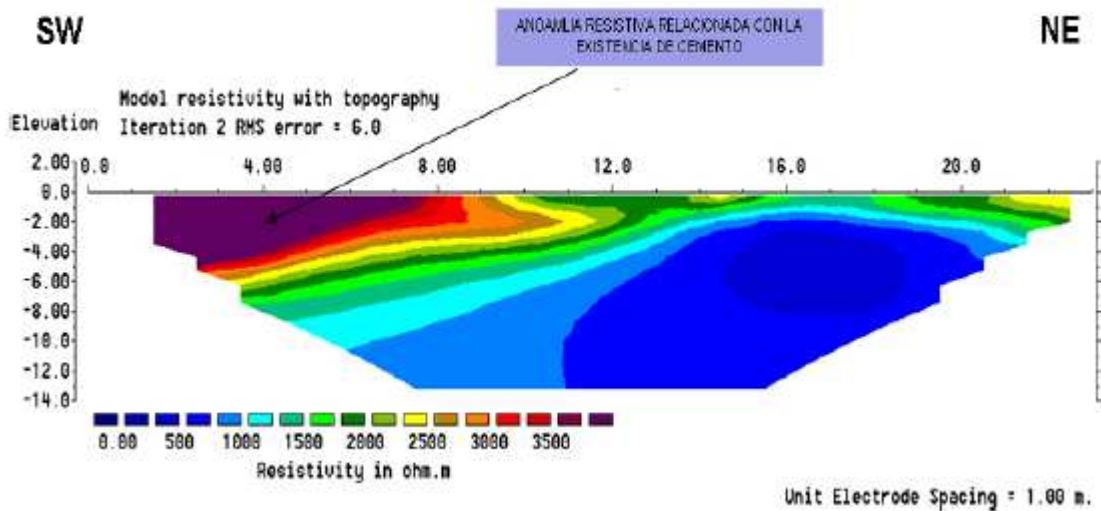


Figura 76: Sección geoelectrica del perfil P13

El perfil muestra una importante anomalía resistiva en el extremo SW del perfil debida a que el perfil discurre en esta parte, por el muro de refuerzo del talud del estribo izquierdo de la



presa. Desde el punto de vista geoelectrico, esta zona no parece presentar zonas de fracturación y/u oquedades.

Si analizamos de forma conjunta los resultados de todos los perfiles realizados en la zona de estudio (Figura 76) vemos la concordancia en los resultados de m los mismos:

- Se aprecia con claridad la alineación que forman las anomalías resistivas superficiales hasta el borde sureste de la explanada.
- Estas anomalías superficiales no parecen presentar un desarrollo vertical hacia el macizo rocoso.
- Se delimita con claridad la posición de la posible cavidad situada en la parte sur del bloque 3D y los perfiles 3 y 4.
- Se define un posible plano de fracturación que uniría las zonas de anomalía resistiva relacionadas con la posible existencia de cavidades y/o zonas de fracturación.. Atendiendo a la estructura general de los materiales de la cerrada, dicho plano podría estar relacionado con la estratificación de la zona y más concretamente con uno de los estratos mas margosos de la secuencia carbonatada.

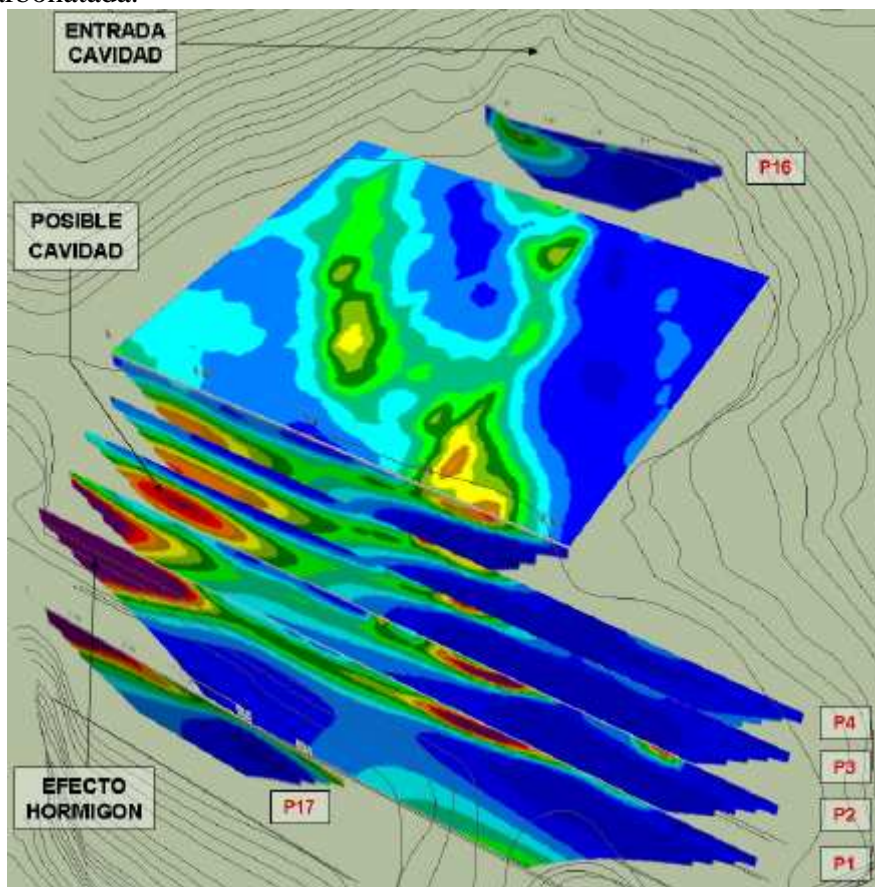


Figura 77: Montaje 3D conjunto de los perfiles realizados y bloque 3D (SketchUp)

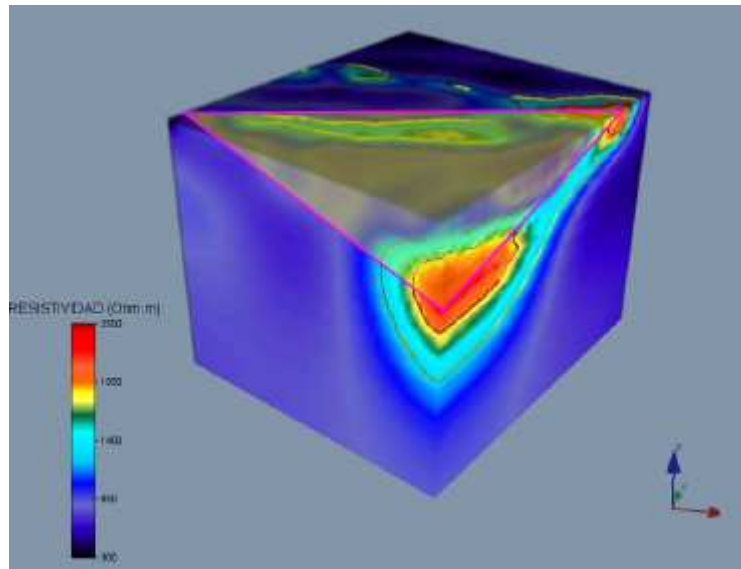


Figura 78: Plano que une las anomalías correspondientes a zonas de fracturación y posibles cavidades. (Voxler)

3.1.5. Análisis de la investigación

El análisis de los resultados obtenidos es el siguiente:

- El estudio de Tomografía Eléctrica 3D y su representaciones mediante los programas Voxler, SketchUp y Autocad han permitido localizar con claridad la existencia de una serie de anomalías resistivas relacionables con la existencia de cavidades y zonas de fracturación dentro de los materiales carbonatados que conforman la zona investigada de la zona del estribo izquierdo.
- A nivel superficial se detectan dos alineaciones de zonas resistivas que podrían indicar la existencia de cavidades. Dichas zonas de anomalía no se extienden en profundidad más allá de los 7 m. y no parecen por tanto, presentar desarrollo vertical hacia el macizo rocoso.
- Ambas alineaciones parecen estar relacionadas con la gran cavidad existente en el extremo oeste de la explanada. Este hecho se pone de manifiesto al comparar la alineación existente entre las anomalías que aparecen en el bloque 3D, y en el resto de perfiles realizados en la explanada (perfiles 1, 2, 3, 4 y 16).
- Existe una anomalía resistiva en el extremo sur del bloque 3D que parece indicar la existencia de una posible cavidad situada entre los 4 y 9 m de profundidad. No obstante, la posición de la misma (en el extremo del bloque 3D) así como el fuerte contraste de resistividades parece indicar que el tamaño real de la anomalía así como la entidad de la misma debe ser mucho menor. Esta anomalía se aprecia en los perfiles 3 y 4 confirmando la continuidad lateral de la misma.
- El análisis de los datos 3D pone de manifiesto la posible relación geométrica entre la anomalía resistiva situada en profundidad en la esquina sur del modelo 3D y perfiles de tomografía 3 y 4 con las zonas de anomalía superficial que presentan cavidades aflorantes en superficie. Esta relación podría marcar un posible plano de fracturación que uniría ambas zonas de anomalía pudiendo ser el causante de las cavidades existentes en ambas zonas. Dicho plano podría estar



relacionado con la estratificación de la zona y más concretamente con uno de los estratos mas margosos de la secuencia carbonatada de la cerrada.

– Los perfiles 1, 2, 3 y 4 muestran una clara continuidad de los resultados obtenidos en el bloque 3D. En el caso de los perfiles 3 y 4 se detecta con claridad la existencia de la posible cavidad existente en el extremo sur del bloque 3D, así como la prolongación de las anomalías resistivas detectadas en superficie.

– Los perfiles 1 y 2 presentan una fuerte anomalía resistiva en el extremo suroeste de los mismos debido a que la traza de los mismos se situó sobre terreno hormigonado siendo este el causante de la anomalía. Esta interferencia no permite determinar la continuidad de la cavidad detectada en esta zona tanto por el bloque 3D así como por los perfiles 3 y 4.

– El perfil P16 se encuentra situado entre la entrada de la cueva y el bloque 3D y trata de analizar la posible relación entre los resultados del bloque 3D y la cueva existente en esta zona. El perfil muestra la existencia de anomalía resistiva que podría indicar la presencia de una zona fracturada coincidente con la posición de la entrada a la cueva y que marca una alineación entre dicha entrada y una de las zonas fracturadas que marca el bloque 3D realizado.

– El perfil de investigación N°17 se localiza en el borde SW de la explanada objeto de estudio y se ha realizado con el objetivo de analizar el sustrato en la zona de excavación del estribo izquierdo de la presa. El perfil muestra una importante anomalía resistiva en el extremo SW del perfil debida al muro de refuerzo del talud del estribo izquierdo de la presa. Desde el punto de vista geoelectrico, esta zona no parece presentar zonas de fracturación y/u oquedades.

– En general, los materiales en la zona de estudio se presentan inalterados exceptuando las zonas de anomalía anteriormente señaladas

Para finalizar este estudio se realizaron varios sondeos mecánicos y catas en las zonas donde, según los resultados, se preveía la existencia de cavidades. Estos ensayos fueron todo un éxito corroborando la información de esta investigación.



3.2.- Caracterización del deslizamiento de la margen derecha de la presa de Beninar. T,M. Berja (Almería).

3.2.1. Introducción

El estudio de la zona deslizada de la margen derecha del embalse de Beninar persigue múltiples objetivos tratando, en definitiva, de reducir las incertidumbres existentes sobre el tamaño y límites del área movilizada, volumen de material afectado y comportamiento futuro de la zona durante la gestión del embalse.

Para ello, se han realizado trabajos específicos de prospección geofísica mediante una serie de técnicas y programas con el objetivo de alcanzar los siguientes objetivos:

- Delimitar espacialmente la masa deslizada, tanto lateral como verticalmente.
- Analizar el estado tensional actual de la zona afectada por el deslizamiento, analizando, desde el punto de vista geofísico, la estabilidad de la misma.

3.2.2. Potencial Espontáneo (P.E.)

El objetivo de la realización de una campaña de investigación mediante Potencial Espontáneo en este sector, se fundamenta en la utilidad de este sistema de investigación para la delimitación espacial de zonas sometidas a fenómenos de deformación como consecuencia del proceso de movilización de la masa deslizada, así como la detección de zonas de alteración relacionables con fracturas asociadas a este movimiento.

Los trabajos realizados en este sector han consistido en la toma de un total de 443 puntos de observación distribuidos de forma aleatoria a lo largo de una superficie aproximada de 22 Ha (Figura 79). Dicha superficie sobrepasa la extensión supuesta de la zona movilizada por el deslizamiento con el fin de detectar los límites de la masa que está involucrada en el deslizamiento.

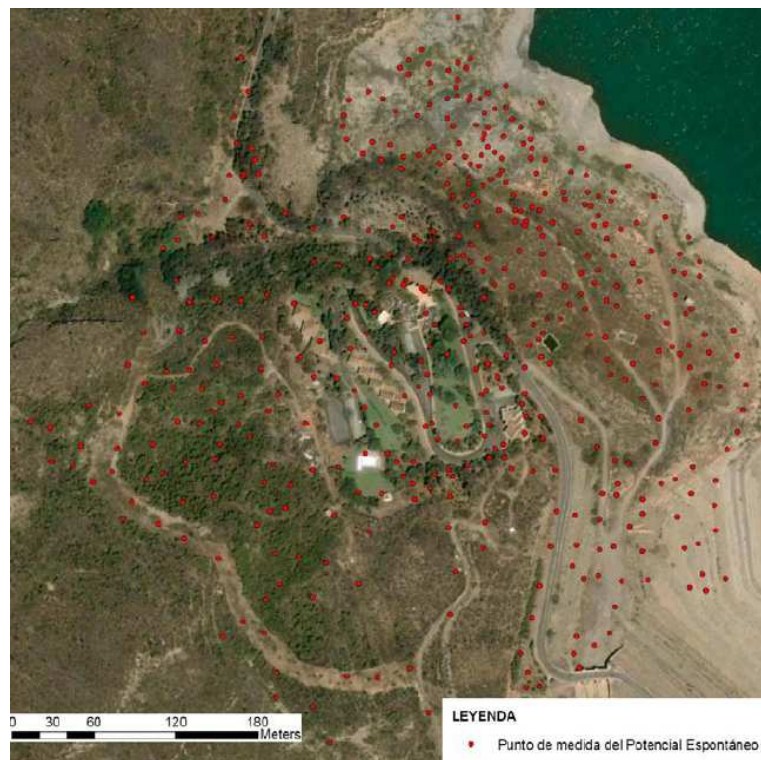


Figura 79. Distribución espacial de los puntos de investigación del Potencial Espontáneo realizado en la margen derecha para el estudio del deslizamiento (Representación mediante ArcGIS)

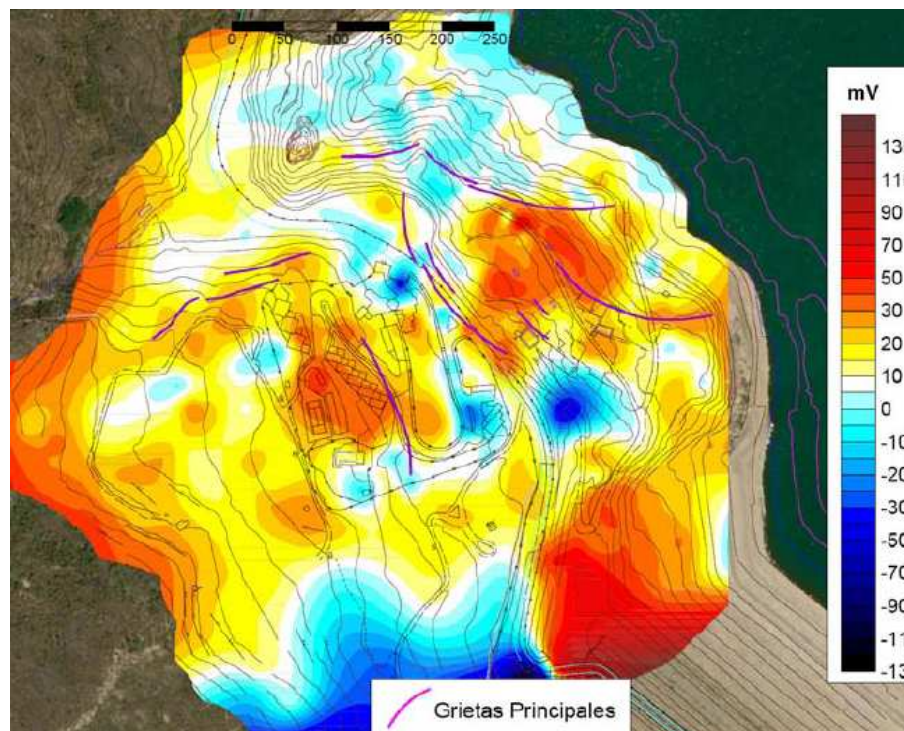


Figura 80. Potencial Espontáneo de la zona correspondiente al deslizamiento de la Margen derecha de la Presa de Beninar con indicación de las principales grietas observables en superficie (Surfer)



3.2.2.1 Interpretación

El análisis de los datos de potencial espontáneo (Figura 81) mediante Surfer muestra la posible dimensión y estructura de la masa deslizada basada en la correlación entre los valores de potencial obtenidos y las características de los materiales analizados.

De forma general, los sectores con un elevado valor de potencial se suelen relacionar con zonas o bloques de material sometidos a procesos de deformación plástica los cuales suelen estar relativamente inalterados mientras que las zonas de bajo potencial corresponden a zonas relajadas y/o fracturadas en las que se suelen concentrar planos de debilidad y/o alteración que facilitan la infiltración de agua, haciendo disminuir notablemente los bajos valores de potencial y crear anomalías negativas.

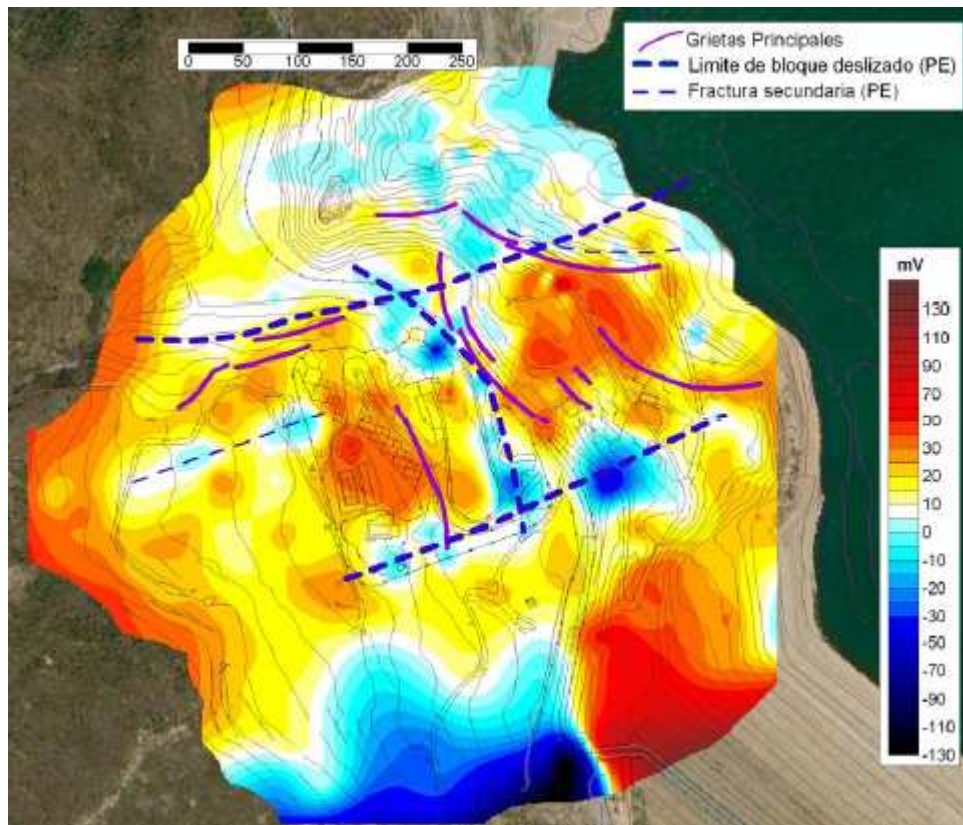


Figura 81. Potencial Espontáneo de la zona correspondiente al deslizamiento de la Margen derecha de la Presa de Benínar con indicación de los límites geofísicos de la zona deslizada. (Surfer)

Si analizamos los resultados del potencial espontáneo obtenido para la zona afectada por el deslizamiento (Figura 81), vemos como se aprecian una serie de zonas o bloques geofísicos caracterizados por presentar valores elevados de potencial (> 15 mV) y limitados lateralmente y entre ellos, por zonas de bajo potencial espontáneo (< 10 mV). Estas zonas de límite entre bloques, presentan una cierta alineación que indicaría la posible dirección de los planos de ruptura principales que pueden corresponder con los límites de la masa deslizada y de los bloques involucrados en el deslizamiento (figura 82).

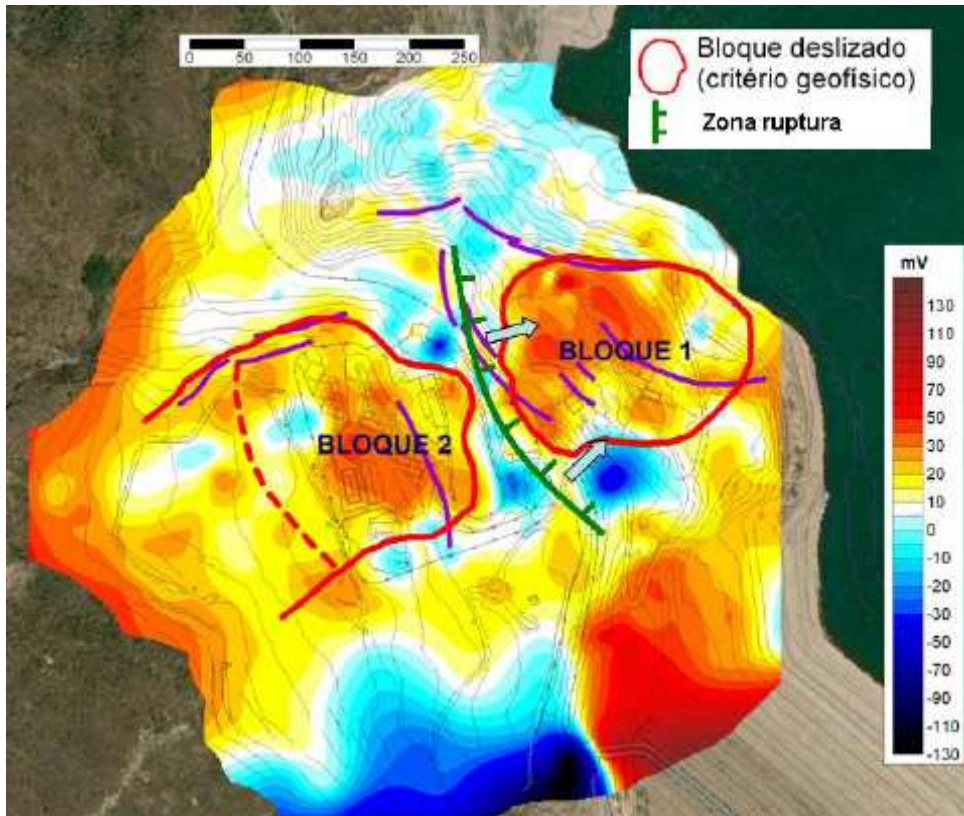


Figura 82. Potencial Espontáneo de la zona correspondiente al deslizamiento de la Margen derecha de la Presa de Benínar con indicación de los bloques geofísicos detectados y la zona de ruptura entre los mismos (Surfer)

En detalle, si analizamos las zonas de bajo potencial asociadas a los límites de la masa deslizada, podemos destacar los siguientes aspectos:

1. Se distingue con claridad el posible límite norte de la zona deslizada
2. El límite sur discurre a lo largo de una alineación que se sitúa entre el transformador anejo a la piscina, transcurre paralelo al límite sur del poblado, pasa bajo las oficinas de la presa y termina al cruzar la carretera Benínar – Turón. No hay evidencias claras de que la zona se prolongue hacia el pantano.
3. La zona deslizada está formada por dos bloques principales (Bloques 1 y 2) limitados por una zona de bajo potencial situada aproximadamente a lo largo de la carretera de servicio existente dentro del poblado. En esta carretera se aprecian un gran grupo de grietas con altas deformaciones en el terreno (zona de ruptura Figura 82).
4. Existen otra serie de mínimos que indicar zonas de rotura secundarias dentro de los bloques principales.

Por tanto parece clara la existencia de un bloque geofísico bien delimitado, bloque 1, el cual aparece separado y parcialmente deslizado del bloque 2 hacia el pantano. Los límites del Bloque 2 no aparecen definidos con tanta nitidez, el límite superior del mismo (línea roja



discontinua Figura 82) podría indicar la futura zona de ruptura y movilización del bloque hacia el pantano en caso de avanzar de forma remontante el deslizamiento hacia la cabecera del mismo.

Cabe destacar como el límite sur de la zona de estudio se encuentra fuertemente afectado por fenómenos de oxidación-reducción relacionados con la estructura del aliviadero y probablemente, con el fuerte pilotado que se realizó en el sector para contener el deslizamiento generado durante la excavación de la plataforma del mismo (Figura 83).

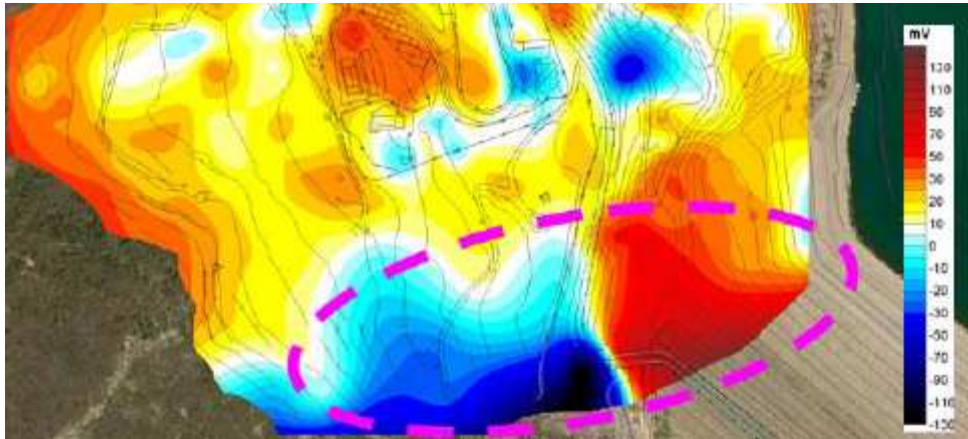


Figura 83. Potencial Espontáneo en la zona sur de estudio mostrando los efectos de Oxidación-Reducción (Surfer)

3.2.3. Tomografía Eléctrica (T.E.)

La aplicación del Sistema de Tomografía Eléctrica en esta zona, persigue el objetivo de caracterización espacial y litológica de la masa movilizada, sirviendo de apoyo al correcto dimensionamiento del modelo de simulación matemático a crear. Para ello, se han realizado un total de cuatro perfiles de investigación con el fin de obtener una caracterización geométrica tridimensional de la masa deslizada.

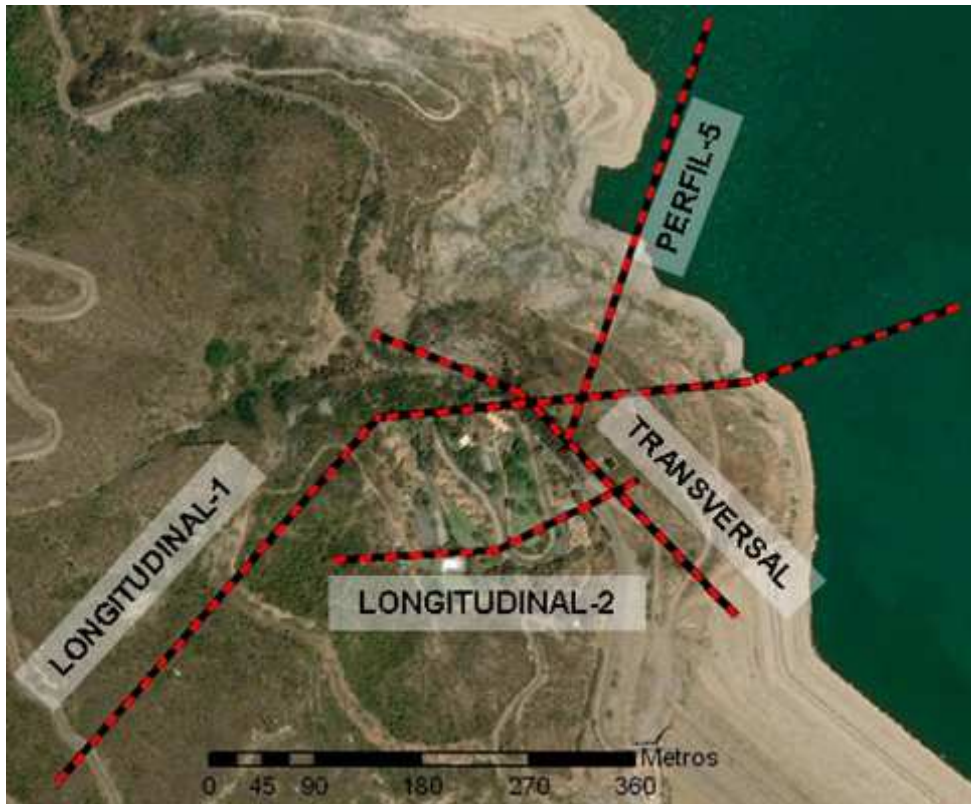


Figura 84 Planta con la posición de los perfiles de Tomografía Eléctrica realizados (ArcGIS)

La traza de los perfiles (figura 84) se fijado teniendo en cuenta el posible vector de máximo movimiento de la masa deslizada (perfil longitudinal 1 y 2) y ortogonal al mismo (perfil transversal).

Las características principales de los perfiles de investigación de Tomografía Eléctrica se encuentran resumidas en la siguiente tabla (Tabla 1):

PERFIL	COORDENADAS								LONGITUD (m)
	INICIAL X	INICIAL Y	GIRO X (1)	GIRO Y (1)	GIRO X (2)	GIRO Y (2)	FINAL X	FINAL Y	
P-LONG 1 (P3 A)	497.851	4.081.773	497.677	4.081.710	497.360	4.081.679	497.361	4.081.679	502
P-LONG 2	497.323	4.081.558	497.460	4.081.566			497.581	4.081.626	272
P-TRANSV	497.355	4.081.750	497.481	4.081.699			497.663	4.081.511	397
P5 (A)	497.640	4.082.017					497.517	4.081.650	387

Tabla 1. Características principales de los perfiles de Tomografía Eléctrica realizados en la zona del deslizamiento.



3.2.3.1 Interpretación

Los perfiles geológicos contruidos a partir de los cortes geoelectricos y datos de sondeos existentes, muestran, de forma coincidente una cubierta resistiva ($> 150 \text{ Ohm.m}$) de potencia muy variable situada sobre una importante zona conductora. Esta capa resistiva corresponde a una tabla o masa de naturaleza carbonatada de diferente competencia, coluviones cementados, caliches, etc. la cual se ha sido denominada en múltiples estudios como “coluvión” (CEDEX). La capa conductora inferior corresponde a las launas (filitas) las cuales suele venir definidas en estos perfiles por valores de resistividad inferiores a los 70 Ohm.m .

Bajo ambas capas, y dependiendo de la potencia de las launas y penetración obtenida en cada perfil, suele aparecer una capa resistiva correspondiente a una nueva capa de materiales carbonatados. Esta estructura repetitiva (carbonatos – filitas – carbonatos) es concordante con la estructura geológica general del embalse, compuesta por el apilamiento tectónico de diferentes mantos de cabalgamiento (Alcazar, Lújar, Murtas) compuestos por carbonatos y filitas.

De cara a la interpretación de los resultados, se ha optado por hacer una diferenciación en la capa superficial resistiva en carbonatos y coluvión. Veamos de forma detallada los resultados obtenidos en cada perfil de investigación.

Perfil Longitudinal 1

Este perfil, con más de 950 m de longitud, es el de mayores dimensiones de los ejecutados en este sector. El perfil se dispone con orientación NW-SE tratando de seccionar la zona deslizada por su eje de mayor longitud.

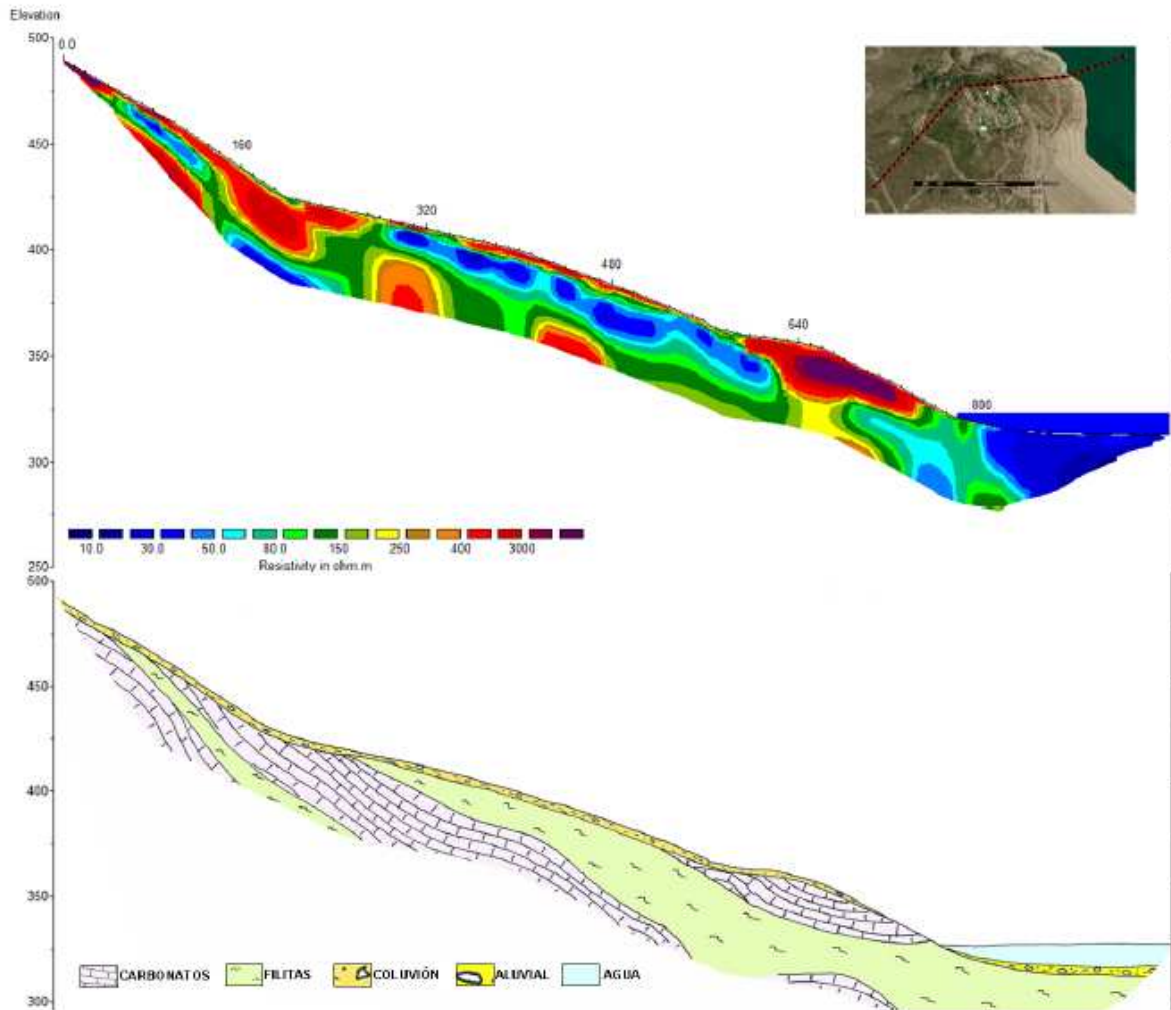


Figura 85. Perfil Longitudinal-1 de Tomografía Eléctrica
Sección geoelectrica e interpretación geológica

La interpretación del perfil muestra una primera capa de espesor muy variable de naturaleza carbonatada. Dicha capa superficial posee una potencia media de unos 10 m en la mayor parte del perfil, engrosándose de forma importante entre los metros 600 y 750, en los que supera los 45 m de espesor. La capa resistiva desaparece en los metros finales del perfil, justo antes de penetrar en la zona inundada del embalse.

Los valores de resistividad obtenidos para esta capa superficial son variables pero siempre de naturaleza resistiva. En el caso de la de menor potencia (parte inicial y media del perfil), los valores de resistividad obtenidos indican que los carbonatos deben estar meteorizados y/o fracturados o bien, corresponder a coluviones cementados mientras que la zona baja de mayor potencia, presenta valores mucho más elevados correspondientes a carbonatos inalterados.



El notable cambio de espesor de los materiales carbonatados podría indicar la presencia de una fractura o juego de estas entre los metros 540 y 600 que hunde la zona inferior basculándolo e incrementando su potencia notablemente, si bien, esta no se identifica con claridad a partir de los datos obtenidos por la T.E. Sin embargo, esta zona si que es coincidente con fracturas visibles en la superficie del terreno que indican que el hundimiento del bloque inferior, justificando el incremento de potencia.

Bajo la capa resistiva carbonatada superior aparece una zona conductora de naturaleza filítica cuya potencia parece aumentar de forma constante hacia la zona del vaso. Dicha capa aflora en el perfil en las inmediaciones del inicio de la zona inundada.

Cabe destacar que la disposición del perfil en su parte central discurre cercano al barranco que limita la zona ocupada por el poblado de Confederación y en el límite de los posibles afloramientos carbonatados movilizados, los cuales, en este sector, se encuentran muy adelgazados.

Perfil Longitudinal 2

Perfil realizado para mejorar el conocimiento de la parte central de la masa deslizada, debido a los condicionantes que presenta el Perfil longitudinal – 1 descritos con anterioridad. La longitud del mismo es de unos 280 m y se dispone paralelo al supuesto eje de mayor longitud de la masa deslizada. El espaciado interelectrónico empleado es de 6 metros por lo que la resolución espacial del perfil es mayor que en el resto de perfiles (espaciado interelectrónico de 10 metros).

La interpretación del corte geoelectrico muestra la presencia de una potente capa carbonatada que presenta un adelgazamiento notable en su parte central coincidente con un descenso en los valores de resistividad de los carbonatos. La interpretación de este adelgazamiento y descenso en la resistividad corresponde a una zona de importante fracturación y por tanto, de alteración, la cual divide la capa carbonatada aflorante en dos bloques (Figura 86).

Todo el conjunto aparece situado sobre una capa filítica de naturaleza continua.

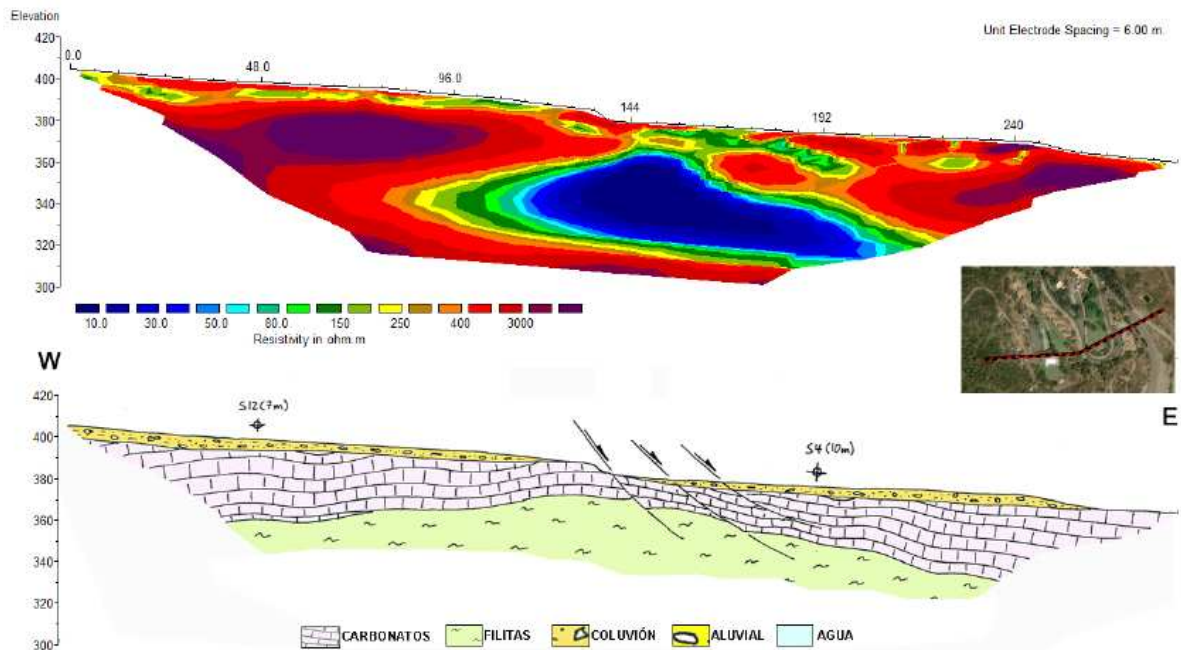


Figura 86. Perfil Longitudinal-2 de Tomografía Eléctrica. Sección geoelectrica e interpretación geológica

Perfil Transversal

Perfil de 390 m de longitud realizado sobre la carretera de Benínar – Turón, el cual, comienza sobre la escombreras de relleno de la antigua zona de los talleres situadas al norte del poblado y finaliza en las inmediaciones del estribo derecho de la presa.

La interpretación geológica del corte geoelectrico muestra, al igual que en el caso de los dos perfiles longitudinales, una capa resistiva de carbonatos sobre una zona conductora de filitas. En este caso, se aprecia que la masa carbonatada presenta una morfología cóncava indicando un acunamiento de los mismos en los extremos llegando a desaparecer en la parte norte del perfil. Entorno al metro 120 del perfil aparece una anomalía resistiva ovalada en profundidad que podría corresponderse con un bloque carbonatado aislado.

Perfil N°5

Perfil de investigación realizado con un doble objetivo: estudio de la estructura de la zona afectada por el deslizamiento e investigación de las filtraciones en la zona inundada del embalse. En el caso del análisis de la estructura de la zona afectada por el deslizamiento, la interpretación del corte geoelectrico muestra con claridad una capa carbonatada sobre las filitas, las cuales afloran en toda la zona próxima a la orilla del pantano. Geomorfológicamente, el escarpe topográfico del perfil lo genera el frente de afloramiento de los carbonatos. En esta zona de frente, abundan numerosas grietas y bloques caídos fruto del desplazamiento de la masa deslizada hacia la orilla (Figura 89).

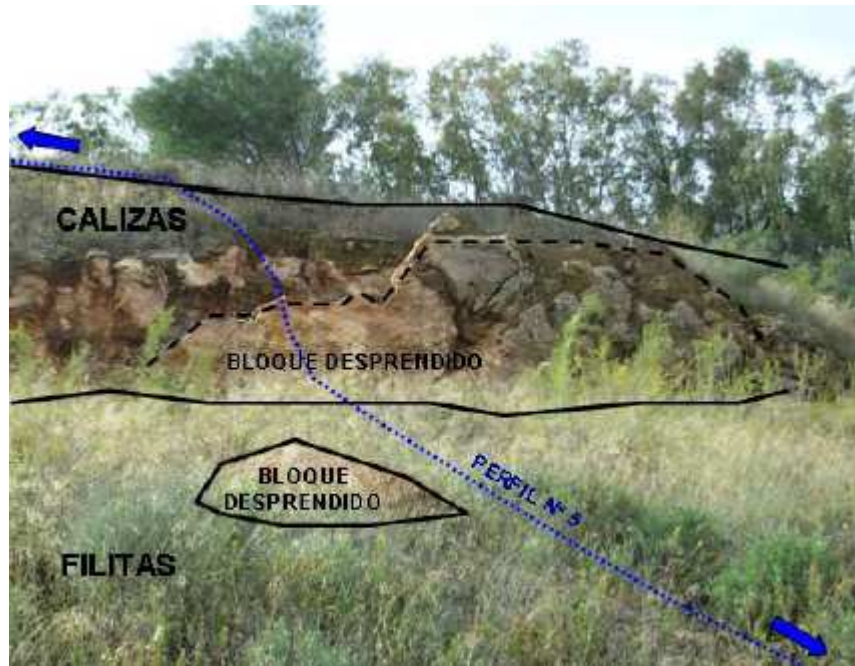


Figura 87. Fotografía del frente de desprendimiento en las inmediaciones del Perfil de investigación 5

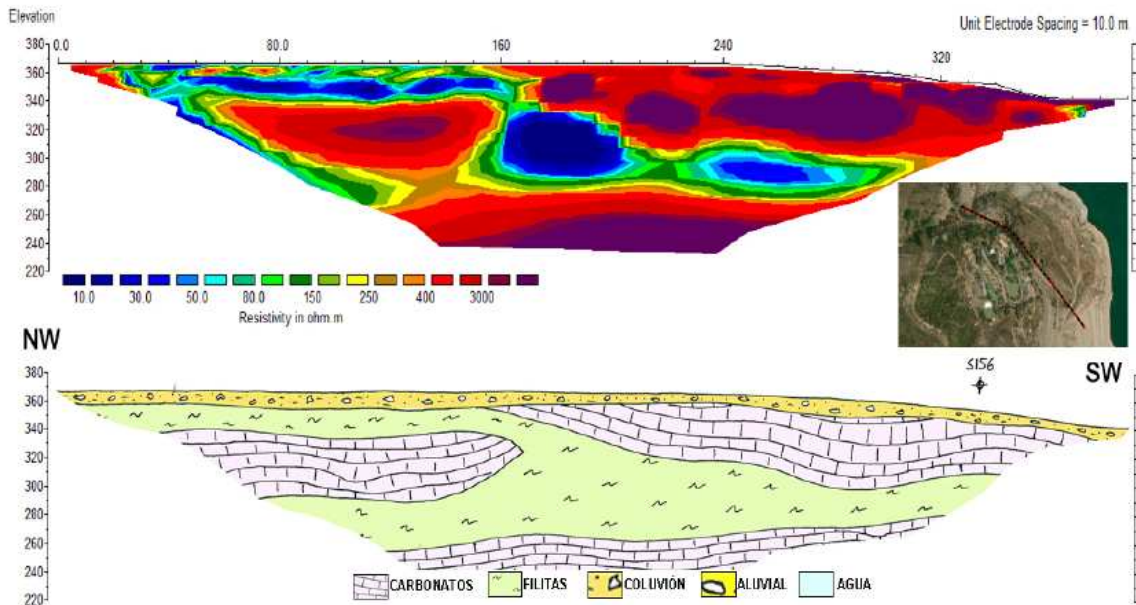


Figura 88. Perfil Transversal de Tomografía Eléctrica. Sección geoelectrica e interpretación geológica

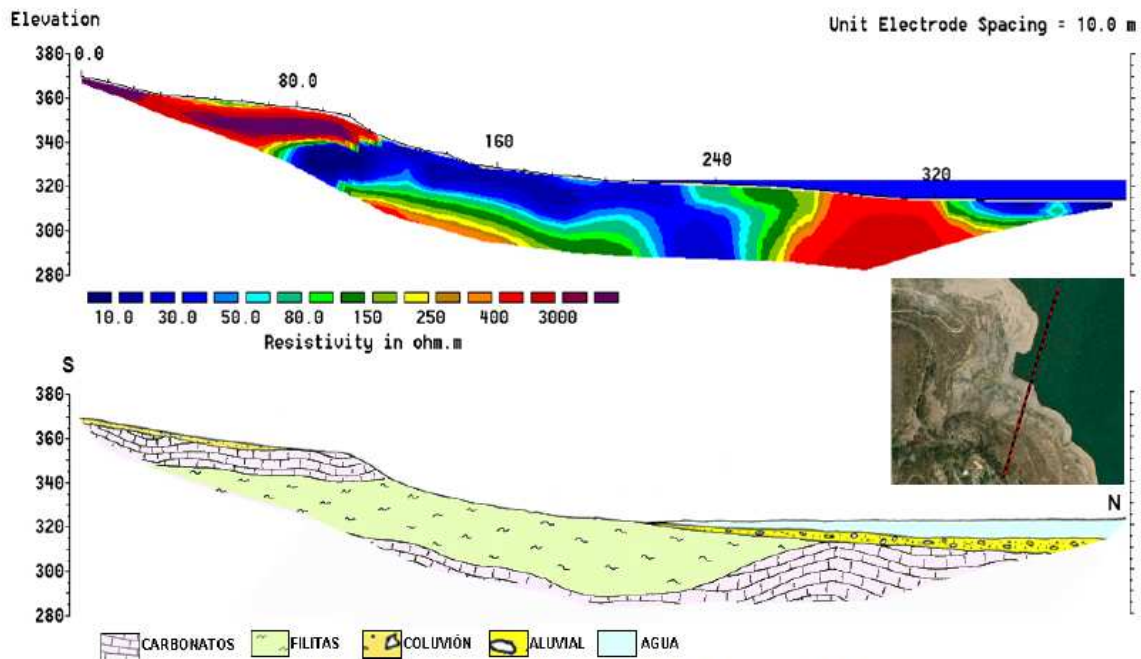


Figura 89. Perfil P-5 de Tomografía Eléctrica. Sección geoelectrica e interpretación geológica.

El análisis conjunto de los cuatro perfiles muestra con claridad la estructura litológica en la zona analizada. La estructura general se caracteriza por la existencia de una tabla carbonatada superior flotando sobre una importante capa filítica. En detalle, los resultados obtenidos ponen de manifiesto los siguientes aspectos:

- Existe una estructura de apilamiento caracterizada por el cabalgamiento de un primer grupo de materiales carbonatados y filíticos sobre una nueva secuencia de la que solo se ha alcanzado a observar la parte superior carbonatada (¿manto de Lujar?)
- La capa carbonatada presenta espesores variables lo que indica una posible sectorización de la misma en zonas o bloques, las cuales están limitadas por la presencia de fracturas (Perfil Longitudinal 2). El espesor variable podría estar generado por un hundimiento diferencial de los bloques inferiores a favor de las numerosas fracturas existentes en superficie.

Se ha realizado una cartografía de las principales fracturas visibles en superficie así como la detección de otras posibles zonas de fractura a partir del estudio topográfico de la zona y análisis estereoscópico de fotografías aéreas. El resultado obtenido (Figura 90) muestra la existencia de numerosas zonas de fracturación que segmentan la zona de afección en varios bloques.

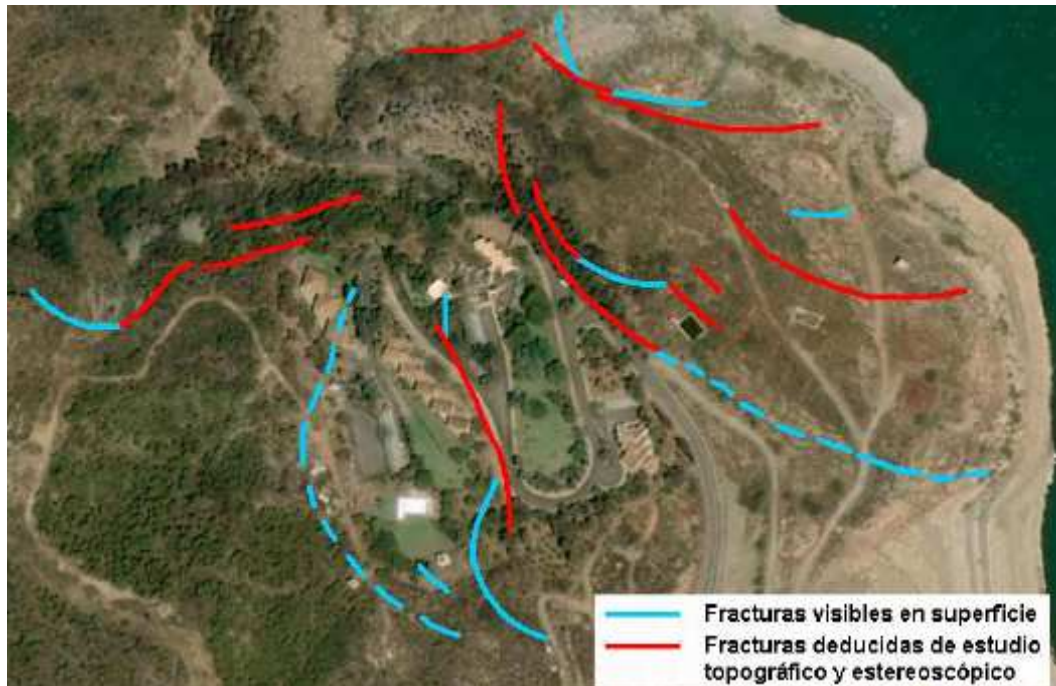


Figura 90. Plano de grietas existentes en la zona de afección del deslizamiento de la margen derecha del embalse de Benínar (ArcGIS)

3.2.4. Sondeos Electromagnéticos en el Dominio de Tiempos (SEDT)

Se han realizado un total de 13 sondeos electromagnéticos sobre sondeos e inclinómetros de la zona deslizada con el fin de tratar de obtener, dadas las características del sistema, el nivel de base de alteración correspondiente con la posible base del deslizamiento.



Figura 91. Curva del SEDT 2-S21-119



Figura 92. Plano con indicación de la posición de los SEDT realizados en la zona de la margen derecha (ArcGIS)

La interpretación de las curvas obtenidas es de carácter subjetivo, por lo que para realizar esta tarea, se han empleado de forma paramétrica y para determinar la factibilidad del sistema en la determinación de las zonas de alteración relacionables con los niveles de deslizamiento, los datos de perforación, columnas litológicas de los sondeos y los registros inclinométricos.

SEDT	INCLINOMETRO	X	Y
1		497.325	4.081.618
2	19	497.289	4.081.722
3	25	497.430	4.081.723
4		497.483	4.081.643
5	21	497.543	4.081.686
6	20	497.621	4.081.721
7		497.226	4.081.565
8		497.646	4.081.615
9		497.665	4.081.626
10		497.078	4.081.402
11		497.595	4.081.494
12		497.592	4.081.468
13		497.589	4.081.443

Tabla 2. SEDT ejecutados en la zona del deslizamiento de la margen del embalse de Benívar

Una vez analizados los resultados de interpretación de los SEDT realizados, vemos que esta tecnología ha permitido resolver, de forma parcial, los objetivos de aplicación de la misma.

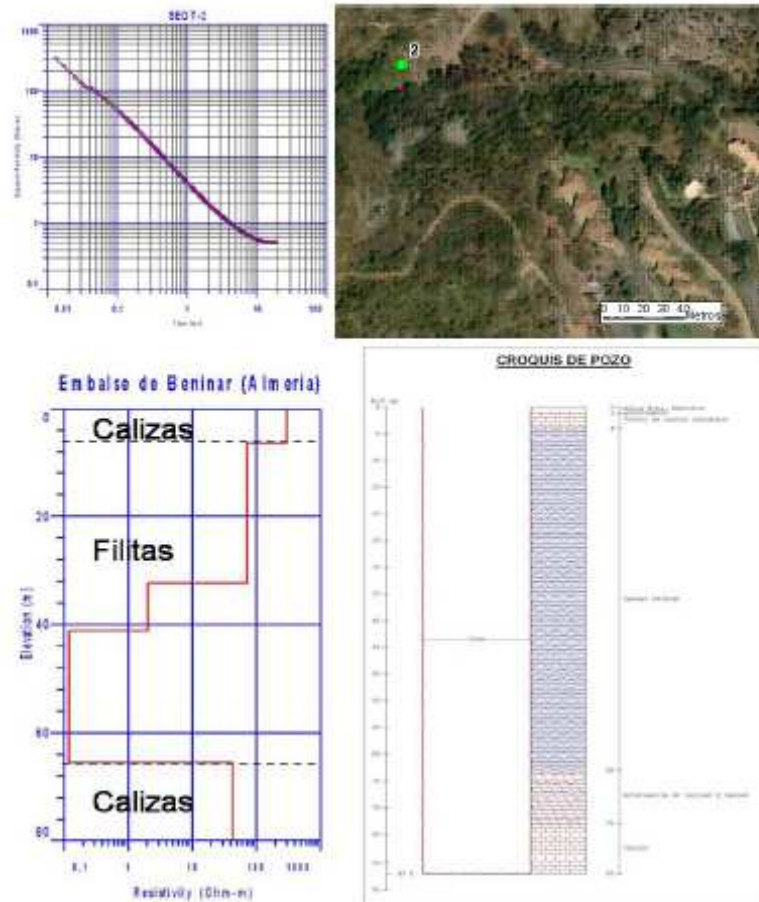


Figura 93. Punto de investigación SEDT N°2.

En el caso de la determinación clara de las zonas de alteración que correspondan al nivel de base del deslizamiento, esta no ha sido posible, al menos, de forma clara debido a la heterogeneidad en la composición que presentan las filitas. La base teórica para la detección de la zona de base del deslizamiento radica en que la resistividad de esta zona de alteración (techo de filitas y base del coluvión) debería presentar resistividades intermedias a las de ambos materiales sin alterar (coluvión resistivo, filitas conductoras). Como la naturaleza de las filitas no es homogénea, al igual que en el caso del coluvión, las resistividades que debe presentar la zona de alteración es similar a los materiales que la rodean dificultando la determinación.

El segundo de los objetivos si ha sido cubierto con mejores resultados ya que la ejecución de puntos de investigación SEDT ha permitido el establecimiento de la potencia de la cobertera carbonatada en cada punto de investigación.



3.2.5. Emisión de campo Electromagnético (ECE)

3.2.5.1. Trabajos en superficie

Los trabajos en superficie han consistido en la realización de perfiles paralelos entre sí con puntos de medición cada 10 m. Dadas las condiciones topográficas, vegetación, y edificaciones existentes dentro del área analizada, se ha optado en ciertos sectores (poblado, bosque), por una investigación basada en la toma de puntos aleatorios tratando de cubrir homogéneamente la zona de estudio. Además de estos condicionantes y dadas las condiciones de ruido ambiental variable, las mediciones se han realizado con diferente sensibilidad por lo que se realizará un análisis por sectores de la zona de estudio.

Como apoyo a la interpretación de los datos obtenidos, se empleará una cartografía de las grietas principales que se pueden visualizar en campo así como otras obtenidas mediante estudio topográfico y del análisis estereoscópico de la zona, con el objetivo de relacionar las zonas de tensión y distensión obtenidas, con la ubicación de las mismas.

3.2.5.2. Interpretación de los resultados

Debido a las dimensiones de la zona afectada por el deslizamiento se decidió sectorizar la misma en diferentes áreas de investigación. El procesado de los datos se ha realizado por separado para cada una de las zonas realizando una interpretación conjunta de los mismos.

La figura 94 muestra los resultados obtenidos para la zona del deslizamiento de la margen derecha del embalse de Benínar. En el plano se han representado una serie de zonas caracterizadas por presentar valores anómalos de ECE, las cuales, han sido divididas en dos categorías:

- Zonas de tensión elevada (círculos azules). Se trata de zonas en las que se recogen emisiones entre 2 y 5 veces más intensas que el fondo de radiación natural de todo el sector de estudio.

- Zonas de fracturación peligrosa o futura (círculos rojos). En este caso, estas zonas presentan emisividad superiores a 5 veces el fondo de radiación natural de todo el sector de estudio. Este tipo de zonas presentarán grietas y roturas en un corto periodo de tiempo.



Fig. 94. Plano de Intensidad ECE en la zona de barranco al norte del poblado (Surfer)

La distribución de las anomalías muestra una serie de patrones de alineación que podrían corresponder a los límites de la zona de deslizamiento.

– La principal alineación (1) corresponde al grupo de anomalías de mayor intensidad de emisión en toda la zona, las cuales se alinean con dirección suroeste – noreste extendiéndose a lo largo de una zona comprendida entre la parte de la zona alta del cortafuegos, el transformador de la piscina y terminando cerca del edificio de las oficinas de la presa.

– La segunda alineación (2) se sitúa al norte de la zona de estudio y su traza es menos clara que en el caso anterior. La zona une numerosas anomalías de escaso tamaño que son coincidentes con los numerosos deslizamientos y roturas existentes a lo largo de este sector y con la traza del barranco situado al norte del poblado, el cual es fruto de la existencia de una falla de gran tamaño.

– La tercera alineación discurre de forma más o menos paralela a la carretera Benívar-Turón (3). Esta alineación coincide con numerosas fracturas y deformaciones



visibles a lo largo de la carretera y taludes adyacentes.

– Por último, llama la atención la existencia de una alineación que divide la plataforma situada bajo el poblado en dos sectores.



Fig.95. Plano de zonación de anomalías ECE relacionadas con los posibles límites del deslizamiento (Surfer)

El análisis comparativo de las anomalías ECE con los resultados de otros sistemas de investigación aplicados en la zona de estudio, como en el caso del Potencial Espontáneo, muestra una serie de analogías tal y como se puede apreciar en la imagen inferior (Figura 96).

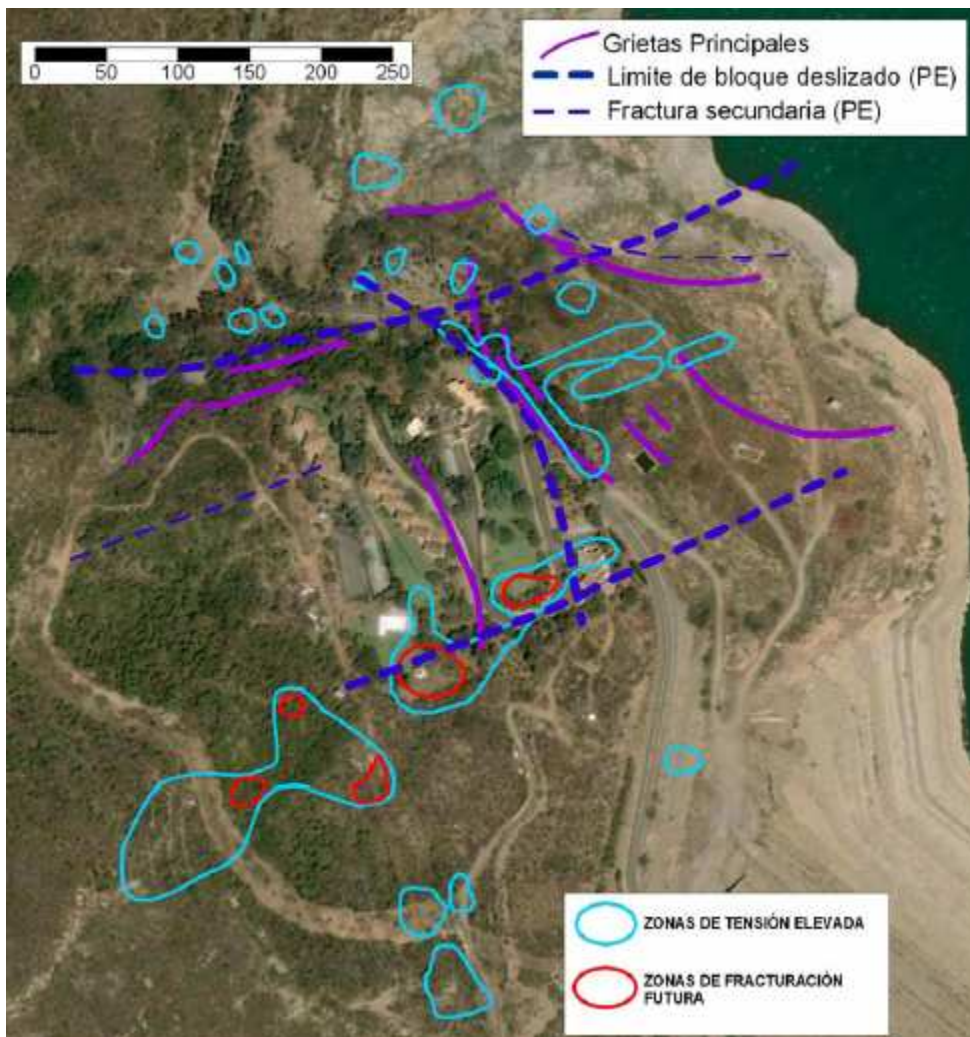


Fig.96. Comparación entre las anomalías ECE y los resultados del sistema de Potencial Espontáneo (Surfer)

Cabe destacar el especial interés que muestra la anomalía N°1, la cual podría corresponder al límite sur de la masa deslizada, el cual, no había sido definido hasta la actualidad al no existir evidencias de tipo geológico y topográfico que lo definan en superficie.

3.2.6. Trabajos en sondeos

El sistema ECE permite obtener un registro vertical del estado tensional de los materiales atravesados en un sondeo introduciendo una sonda en el mismo. Esta aplicación permite obtener zonas en las que pueden existir zonas de tensión y/o fracturación que puedan estar relacionadas con los posibles niveles de deslizamiento.

En este caso, se han testificado un total de 22 sondeos, instalados como inclinómetros o como piezómetros. La numeración, posición y características de los sondeos investigados son las siguientes:

En muchos casos, no ha sido posible la testificación de algunos sondeos debido a la



obstrucción de la tubería o bien, por enganches de la sonda en bridas o soldaduras de las mismas.

SONDEO	INCLINÓMETRO	X	Y	Z
1	10	497528	4081431	380
2	11	497457	4081611	381
3	12	497573	4081428	357
4	13	497517	4081582	374,5
5	14	497616	4081440	355,5
6		497443	4081404	397
7	16	497607	4081502	354
8	17	497413	4081532	393
9	18	497610	4081555	357
11	20	497614	4081728	342
12		497374	4081554	397
16	21	497555	4081676	359
17	22	497580	4081650	358,5
20	23	497349	4081720	372
24	24j	497296	4081719	373
25	25j	497439	4081734	372
29		497584	4081691	354
31		497512	4081632	373
32		497523	4081376	387
33	33j	497470	4081487	387
sb 93-1	4	497537	4081498	378,4
sb 93-4	7	497684	4081691	330,3

Tabla 3. Sondeos de la margen derecha investigados con el Sistema ECE

3.2.6.1 Resultados.

La investigación en sondeos se ha realizado con la aplicación de sonda electromagnética fabricada especialmente. La conexión de la sonda con el aparato fue realizada mediante un cable coaxial. El registro se realizaba con un intervalo de 1m empezando por la boca de sondeo y terminando por el fondo o nivel de profundidad accesible. En cada sondeo fue elaborado un diagrama de intensidad ECE en forma de una curva de valores medios aritméticos y una curva de la dispersión. La metodología de registro al igual que la interpretación de resultados fue idéntica a los del resto de investigaciones en superficie y galerías.

3.2.6.2. Sondeo S2 – Inclínómetro I11

Sondeo situado al borde del camino de servicio del poblado cercano a la residencia. Las gráficas obtenidas para el sondeo S2 (inclínómetro I11) muestran un estado tensional homogéneo a lo largo de toda la columna investigada, excepto entre los metros 20 y 23, en los que se distingue un fuerte incremento en los valores de emisividad duplicando los valores medios de todo el sondeo. De forma análoga, aumenta también la varianza en estos puntos de registro. Esta zona podría indicar la situación de uno de los posibles planos de rotura de la masa deslizada, el cual debe situarse, dados los resultados obtenidos, entorno a los metros 23 – 26 de profundidad.

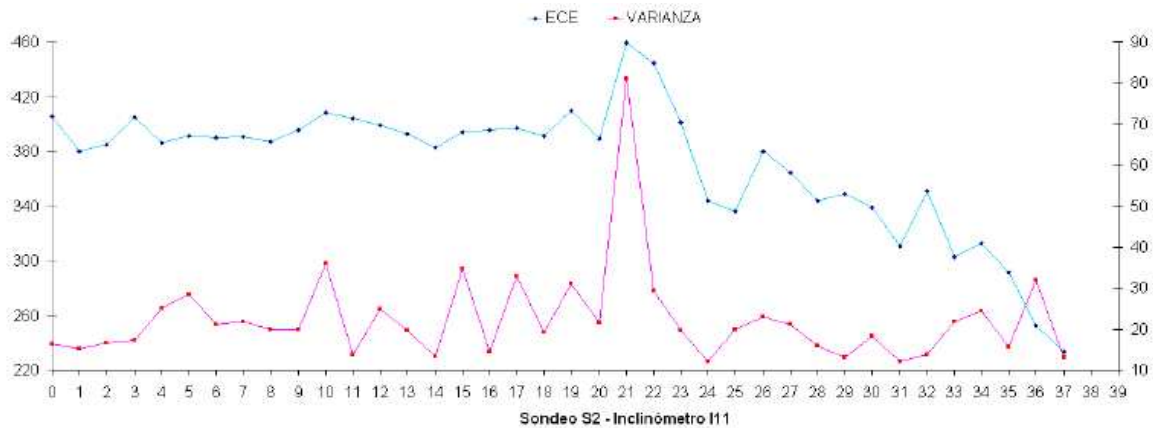


Figura 97. Resultados de la testificación ECE del sondeo S2 (Inclinómetro I11)

Si analizamos la columna del sondeo, esta sitúa la zona de contacto entre los carbonatos deslizados y las filitas entorno al metro 26, de forma coincidente con la profundidad de emisiones anómalas registradas por el equipo ECE. Por tanto, se puede concluir que el nivel de deslizamiento en este sondeo se sitúa en la zona de contacto entre los carbonatos y las filitas.

3.2.6.3. Sondeo S9 – Inclinómetro I18

Situado al borde del camino de acceso de la plataforma existente bajo el poblado, la gráfica obtenida para este sondeo S2 (inclinómetro I11) muestra un campo de tensiones heterogéneo que presenta una fuerte anomalía de descenso en los valores de emisividad entorno a los 12 m de profundidad. Esta anomalía se encuentra precedida y seguida de dos picos de emisividad y elevada varianza que indican acumulación de tensiones entorno a este mínimo de emisividad.

La columna del sondeo muestra que la posición del contacto entre los carbonatos y las filitas se encuentra situada a unos 14 metros.

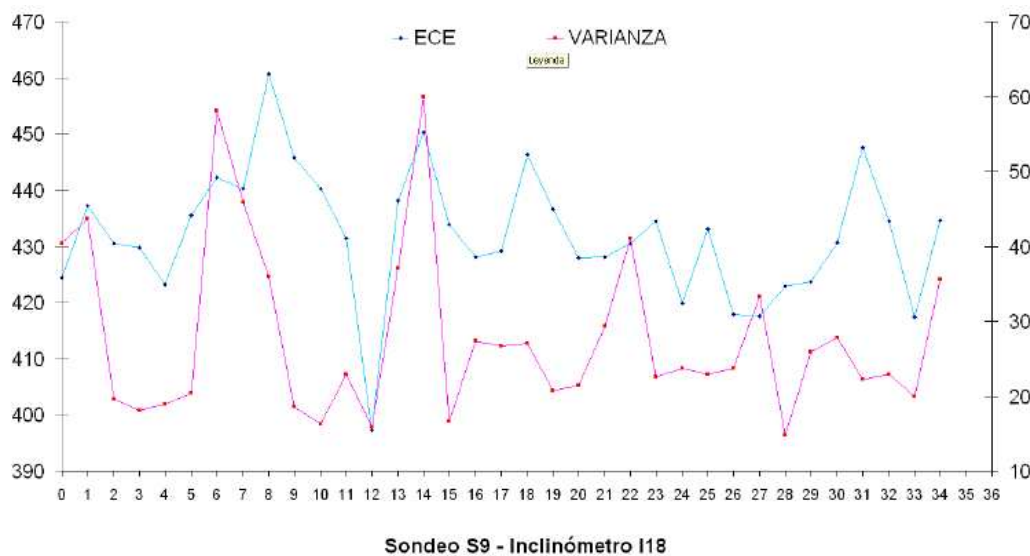


Figura 98. Resultados de la testificación ECE del sondeo S9 (Inclinómetro I11)



Las causas de esta anomalía pueden deberse a la presencia de un plano de fracturación entorno al metro 12 que podría deberse a la existencia de planos subverticales de fracturación similares a los encontrados en las inmediaciones de la zona. También podría relacionarse con el plano de deslizamiento general de los carbonatos sobre las filitas en este bloque aunque este hecho no parece tan claro como en otros sondeos.

3.2.6.4. Sondeo S11 – Inclínómetro I20

Sondeo situado en la parte baja del deslizamiento en el camino de acceso a los inclinómetros I4 e I7. Litológicamente, el sondeo atraviesa únicamente dos metros de carbonatos siendo el resto filitas. La gráfica muestra un incremento de emisividad relativo entre los metros 11 y 15 de profundidad coincidentes con un pico en la varianza que puede ser interpretado como la presencia de una zona de materiales sometidos a deformación.

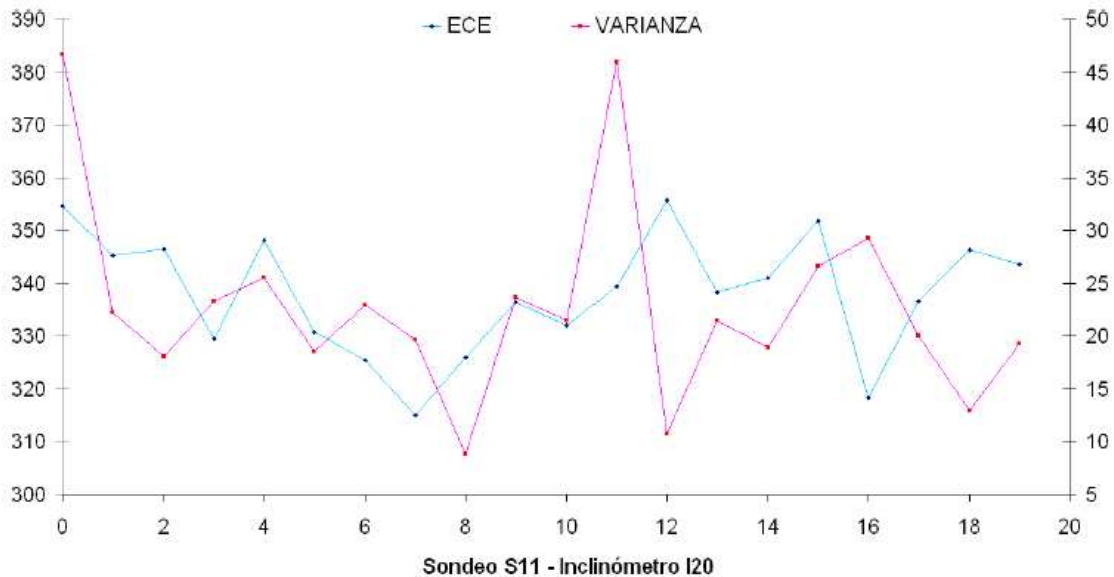


Figura 99. Resultados de la testificación ECE del sondeo S9 (Inclínómetro I11)

La profundidad a la que se observan estos fenómenos implican que la deformación afecta a los materiales filíticos varios metros por debajo de la zona de contacto con los carbonatos, lo cual, podría indicar la existencia de planos de rotura por debajo de esta superficie.

Cabe destacar la rotura de algunos de los inclinómetros a profundidades muy superiores a la del emplazamiento de la superficie de contacto carbonatosfilitas (inclinómetro 13 a 67 m; inclinómetro 17 a 53 m; etc.) lo cual podría indicar la existencia de varios planos de deslizamiento:

- Superficial. Responsable de la movilización de los carbonatos sobre las filitas.
- Profundo. Plano que implica la movilización de los carbonatos superficiales e importantes volúmenes de filitas.



3.2.7. Análisis conjunto de resultados

3.2.7.1. Estudio tridimensional de la masa deslizada

Si asumimos como masa deslizada a los materiales carbonatados aflorantes en la zona de estudio, los cuales deslizan sobre las filitas, es de vital importancia conocer la morfología de la zona de contacto de los mismos. En un primer análisis, es posible obtener un plano de isopacas de los materiales carbonatados aflorantes en base a los resultados de perforación de los numerosos sondeos existentes a lo largo de la zona de estudio (Figura 100).

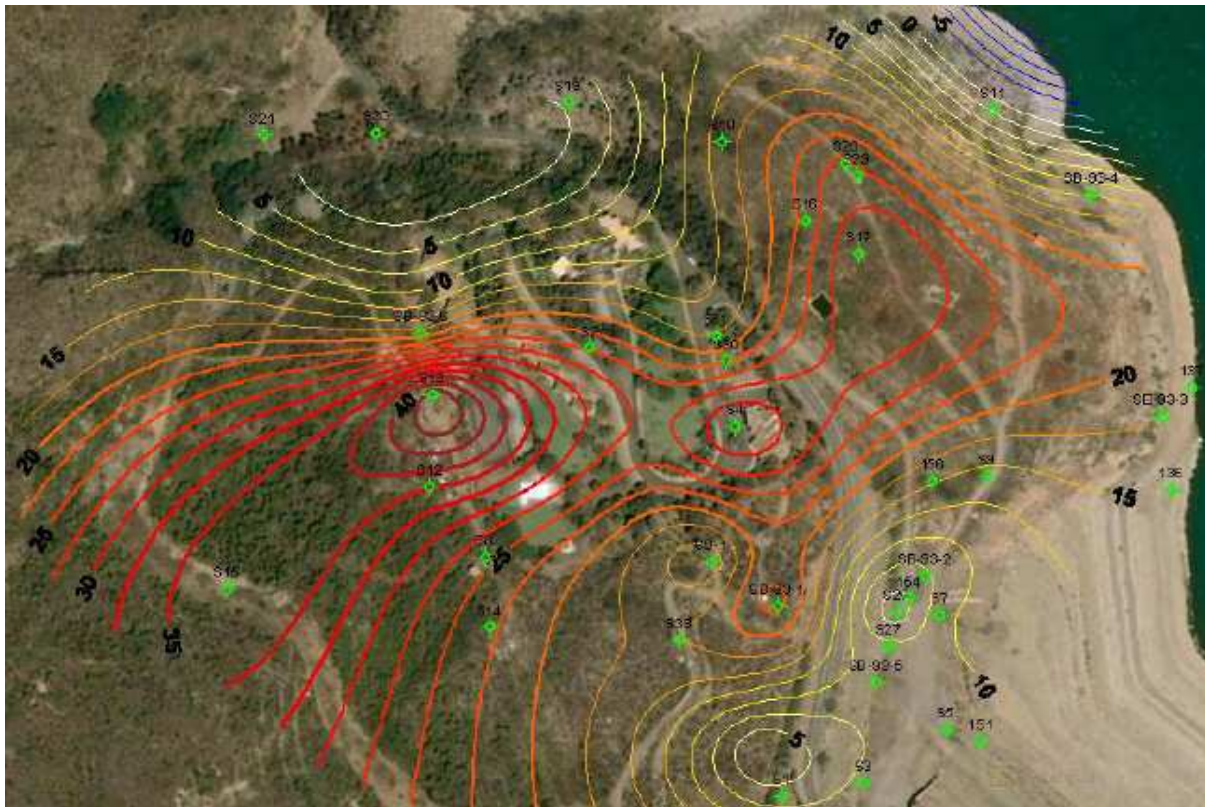


Figura 100. Potencia de los materiales carbonatados (coluvión) establecida a partir de los datos de perforación de los sondeos. (Surfer)

Los resultados de interpolación muestran que la superficie de contacto entre los carbonatos aflorantes y las filitas es cóncava, por lo que las mayores potencias de carbonatos se encuentran en el centro de los bloques deslizados acuniándose hasta desaparecer en la zona norte de la urbanización y adelgazándose de forma importante en la zona sur. Esta morfología cóncava es concordante con los resultados de los perfiles de T.E. realizados en la zona de estudio.

Si introducimos todos los datos disponibles de profundidad de la superficie de interés deducidos a partir de las investigaciones geofísicas realizadas en la zona (T.E. y SEDT), el plano anterior cobra una mayor precisión asemejándose más a la realidad. Además, se puede tener en cuenta el efecto de las numerosas fracturas existentes a lo largo de la zona de estudio establecidas mediante reconocimiento de campo y análisis topográfico y estereoscópico (Figura 101).

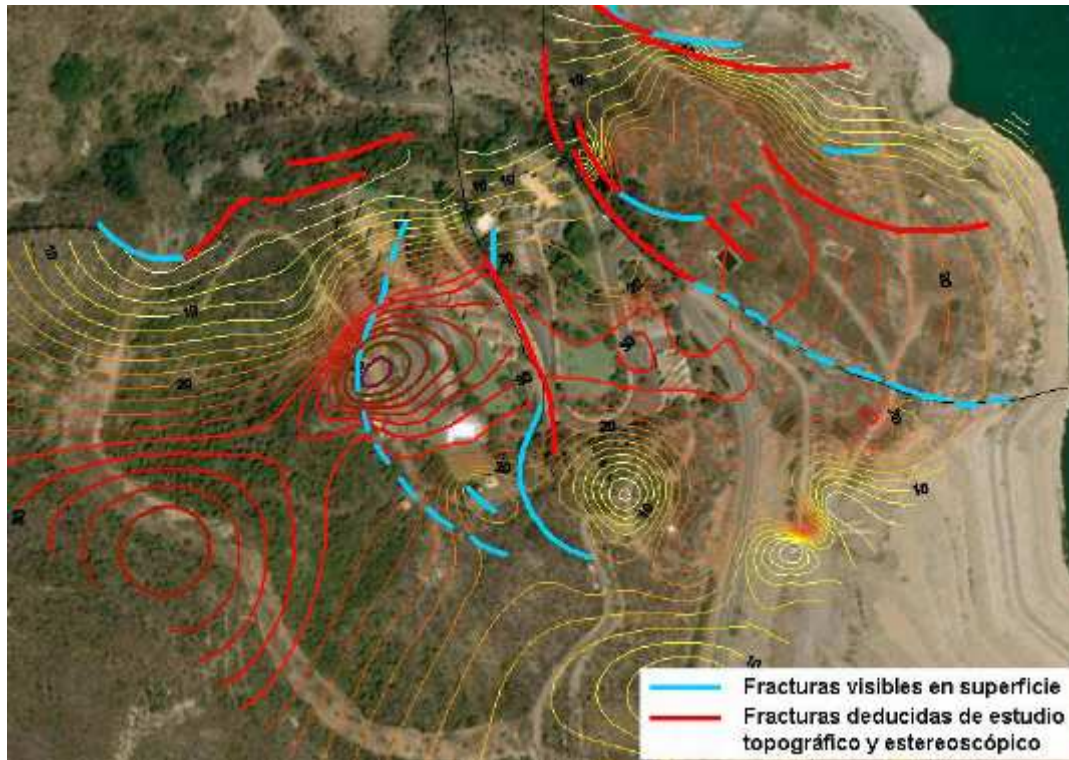


Figura 101. Plano de isopacas de los materiales carbonatados (coluvión) establecida a partir de los datos de perforación de los sondeos e investigaciones geofísicas T.E. y SEDT).

Por último, se puede generar un plano de isobatas del muro de los materiales carbonatados (figura 101) a partir de todas las fuentes de información disponibles (sondeos, investigaciones geofísicas, etc.) y teniendo en cuenta de cara a la interpolación, el efecto de las principales fracturas de la zona.

El resultado obtenido muestra la segmentación de los materiales carbonatados en al menos, tres bloques que van hundiéndose progresivamente unos respecto a otros a medida que nos acercamos a la zona inundada del embalse.

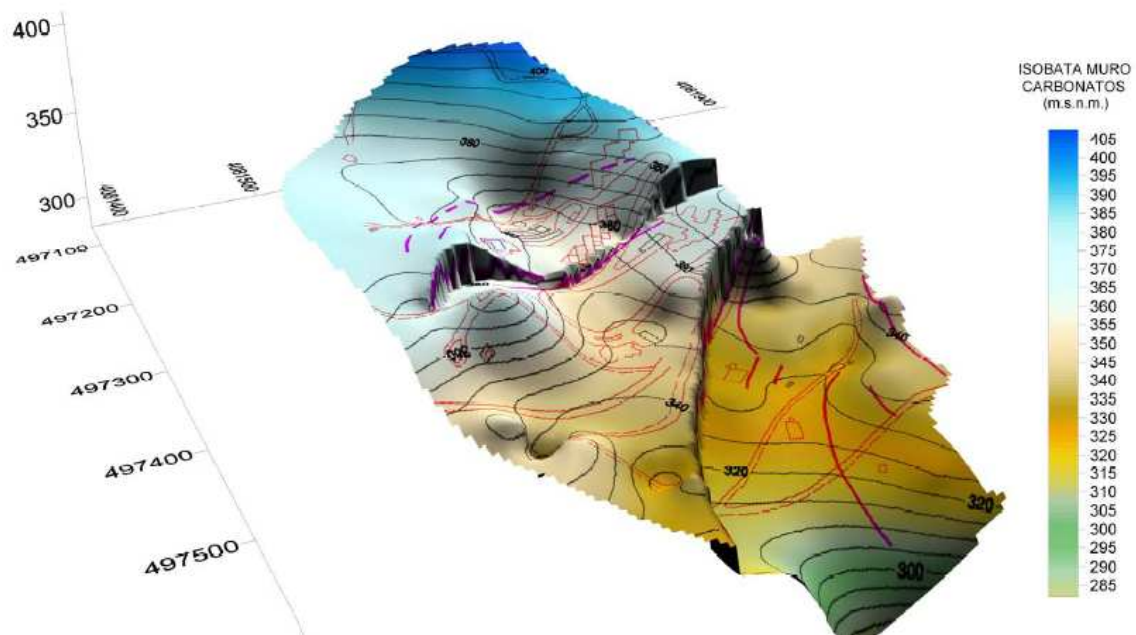


Figura 102. Isobatas del muro de los materiales carbonatados (coluvión) establecidas a partir de todas las fuentes de información disponibles (sondeos y geofísica) teniendo en cuenta el efecto de las fracturas (Isolíneas cada 5 m)

En el caso de los resultados de los sistemas de P.E. y ECE, los resultados obtenidos concuerdan con la estructura definida por los sistemas de T.E. y SEDT, definiendo la estructura en bloques de la masa deslizada.

Desde el punto de vista de la cinemática y de la definición de los límites de la masa deslizada son muy interesantes los datos obtenidos por ambos sistemas, ya que detectan una anomalía en el lado sur del poblado que debe corresponder al límite lateral de la masa deslizada.

Parece probable que la masa deslizada presentara movimientos anteriores a la construcción del embalse. Esto se deduce de la morfología de la ladera y de las numerosas huellas de fracturas detectadas en el análisis topográfico y a través del estudio estereoscópico de la ladera con fotografías previas a la construcción de la presa. El vector natural de deslizamiento antes de la construcción del embalse, debía tener una componente de caída directa hacia el pantano. La construcción de la presa y su entrada en funcionamiento produjo un doble efecto. Por un lado, los episodios de embalse y desembalse han reactivado el deslizamiento, mientras que la estructura de la presa ha modificado el vector de deslizamiento al comportarse esta, como un contrafuerte que impide el flujo natural de la masa deslizada (Figura 103).



Figura 103. Trayectoria histórica y actual de la masa deslizada

Esta alteración en el vector de deslizamiento es la responsable de la aparición de las anomalías de ECE y PE existentes en la zona sur de la zona de estudio (Figura 104), las cuales responden a la existencia de una zona de desgarre definida por el contacto entre los carbonatos (coluvión) no movilizadas en la actualidad por la acción de la presa como contrafuerte y los carbonatos (coluvión) que fluyen libremente hacia el embalse. Este desgarre se traduce en la existencia de una fuerte deformación y alteración en los materiales carbonatados que se observa con claridad en los resultados del P.E. y ECE.

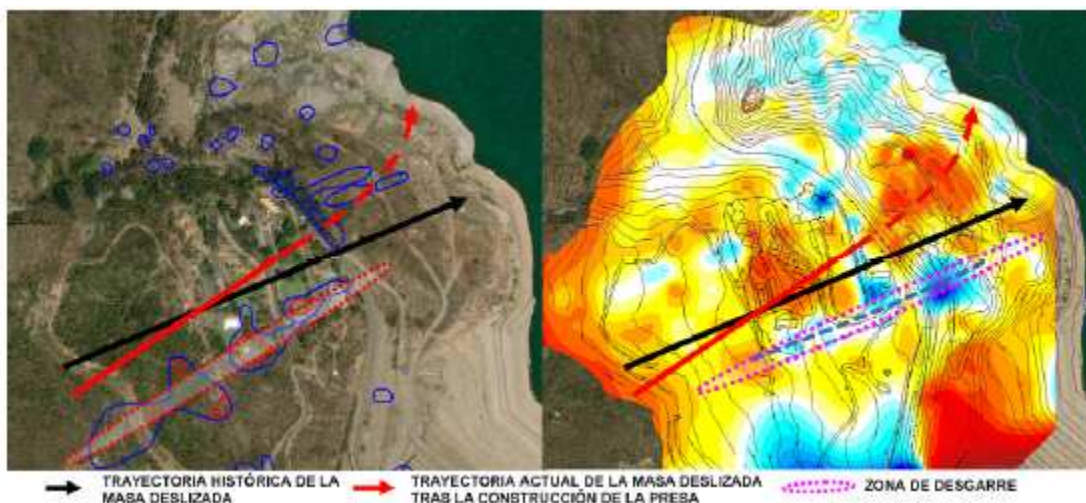


Figura 104. Trayectoria histórica y actual de la masa deslizada



3.3.- Prospección Geofísica para la definición del flujo subterráneo del agua termal de la antigua fuente de los aguachines que quedó bajo el Embalse de Linares (Segovia) y propuesta de aprovechamiento.

3.3.1.- Antecedentes

Esta campaña geofísica se refiere a la investigación de una antigua surgencia en el río Riaza, que quedó anegada en 1951 con la construcción del Pantano de Linares en el término municipal de Maderuelo (Segovia).

Se tiene constancia desde la primera década del siglo XX de la existencia de la mencionada fuente denominada Los Aguachines, situada en la margen izquierda del río Riaza y a 500 metros al Sur del pueblo de Linares del Arroyo. Según comentarios el caudal era importante, estimándose entre 100 y 150 l/s y el agua era considerada como minero-medicinal, según el análisis realizado en su día mostrado a continuación:

Anhídrido sulfúrico	0,01888 gr/l
Cal	0,10292 “
Magnesia	0,03963 “
Cloro	0,01420 “
Cloruro sódico	0,02340 “
Grado hidrotimétrico	21°

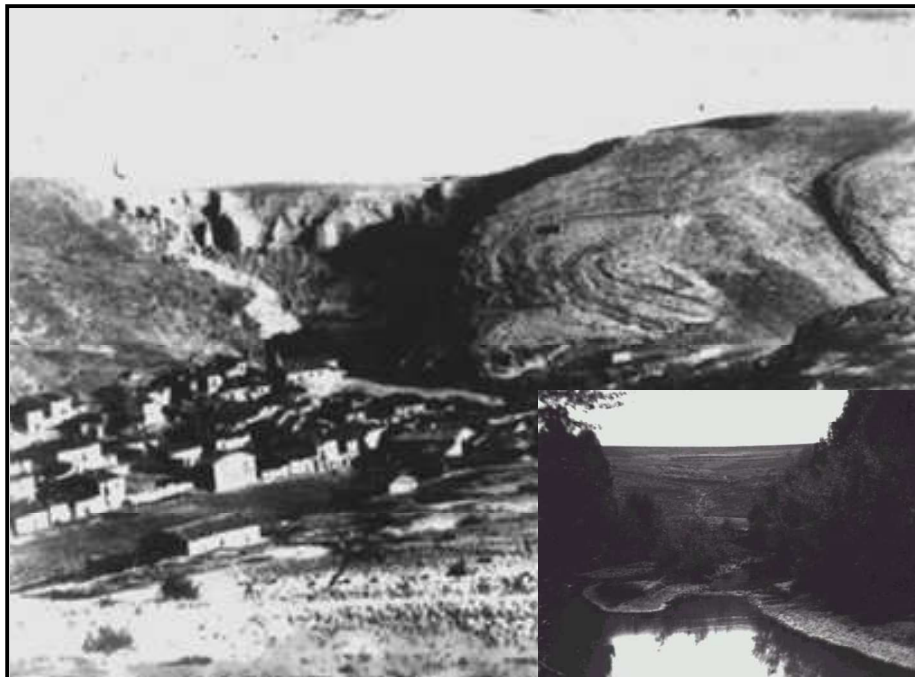


Figura 105. Fotografías del Pueblo de Linares y charca de la fuente mineral antes de quedar bajo el Embalse



Dadas las características minero-medicinales del citado manantial el Ayuntamiento de Maderuelo pretendió localizar dicho alumbramiento en el área exterior al pantano para recuperar el manantial y efectuar ensayos de caudal, análisis químicos, etc., y si las circunstancias son favorables fomentar la creación de un balneario que impulsaría las posibilidades socio-económicas del municipio.

A priori, el objetivo de esta investigación ha sido doble. En una primera fase, se trató de localizar la surgencia bajo la lámina de agua mediante un barrido con una barca y un equipo de testificación de sondeos, con la finalidad de localizar la fuente y tomar muestras para realizar análisis físico-químicos. Estos ensayos resultaron infructuosos, posiblemente, por la altura de la lámina de agua, que debido a la presión ejercida sobre la fuente impedirá el nivel de surgencia habitual y minimizará el gradiente de temperatura. En consecuencia, siendo imposible su detección mediante métodos geofísicos se localizó (en coordenadas U.T.M) la charca de la fuente de los Aguachines mediante la superposición de un plano del año 1931 y uno actual.

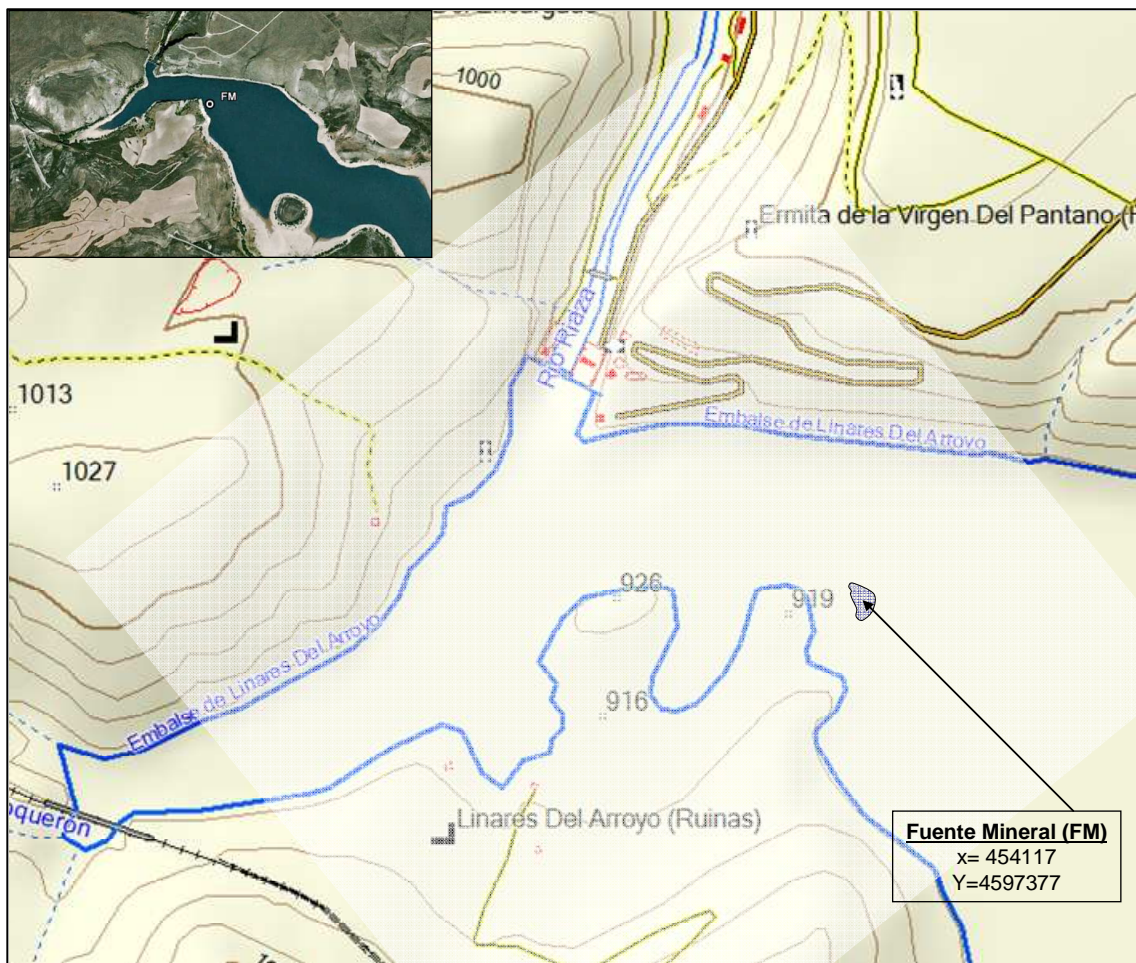


Figura 106. Localización en U.T.M de la charca de la fuente de los Aguachines mediante la superposición de un plano del año 1931 y uno actual.



En una segunda fase, se trató de buscar en el área aledaña a la mencionada fuente la formación o accidente tectónico que genera el flujo de agua y que da lugar a la surgencia de la Fuente de Los Aguachines.

El programa de investigación realizado comprendió:

- Análisis y reconocimiento geológico e hidrogeológico
- Prospección geofísica por el método de resistividades en el modalidad de Tomografía Eléctrica.
- Prospección geofísica por el método electromagnético en el dominio de frecuencia VLF.
- Protección geofísica por el método de Sondeos Electromagnético en el Dominio del Tiempo (SEDT).
- Procesado e interpretación.

3.3.2.- Geología e hidrogeología

3.3.2.1.- *Encuadre Geológico*

La zona de Maderuelo está encuadrada en el sector suroriental de la Cuenca del Duero. Esta cuenca es la mayor de las depresiones de la meseta Ibérica y está individualizada en la submeseta meridional por el Horst que constituye el Sistema Central. Aunque la cuenca del Duero está rellena por materiales terciarios, más o menos afectados por la orogenia alpina, y por materiales cuaternarios. El área que nos ocupa es uno de los pocos asomos internos de la cuenca donde afloran por causas tectónicas y por denudación de materiales del zócalo antiguo y de la cobertera mesozoica. Este zócalo está formado por materiales precámbricos y ordovícicos afectados por la orogenia hercínica que los plegó y por la alpina que provocó su fracturación y compartimentación en bloques escalonados que van elevándose hacia el Sistema Central. La cobertera mesozoica, que fosiliza el zócalo hercínico, es relativamente delgada, contiene materiales tanto triásicos como jurásicos y cretácicos, con predominio de estos últimos. Debido a su escasa potencia, sus deformaciones se adaptan a la disposición tectónica en escalones del zócalo, estructurándose en pliegues vergentes al Norte y frecuentemente en rodilla.

En cuanto a los rellenos Cenozoicos correspondientes a la cuenca del Duero están constituidos por materiales detríticos de origen fluvial y aluvial (conglomerados, gravas, limos y arcillas) y por calizos formados, según las áreas, en medios lacustres, palustres o de "playa-lake".

A nivel del área investigada en el Pantano de Linares las formaciones aflorantes pertenecen al Cretácico y al Terciario.

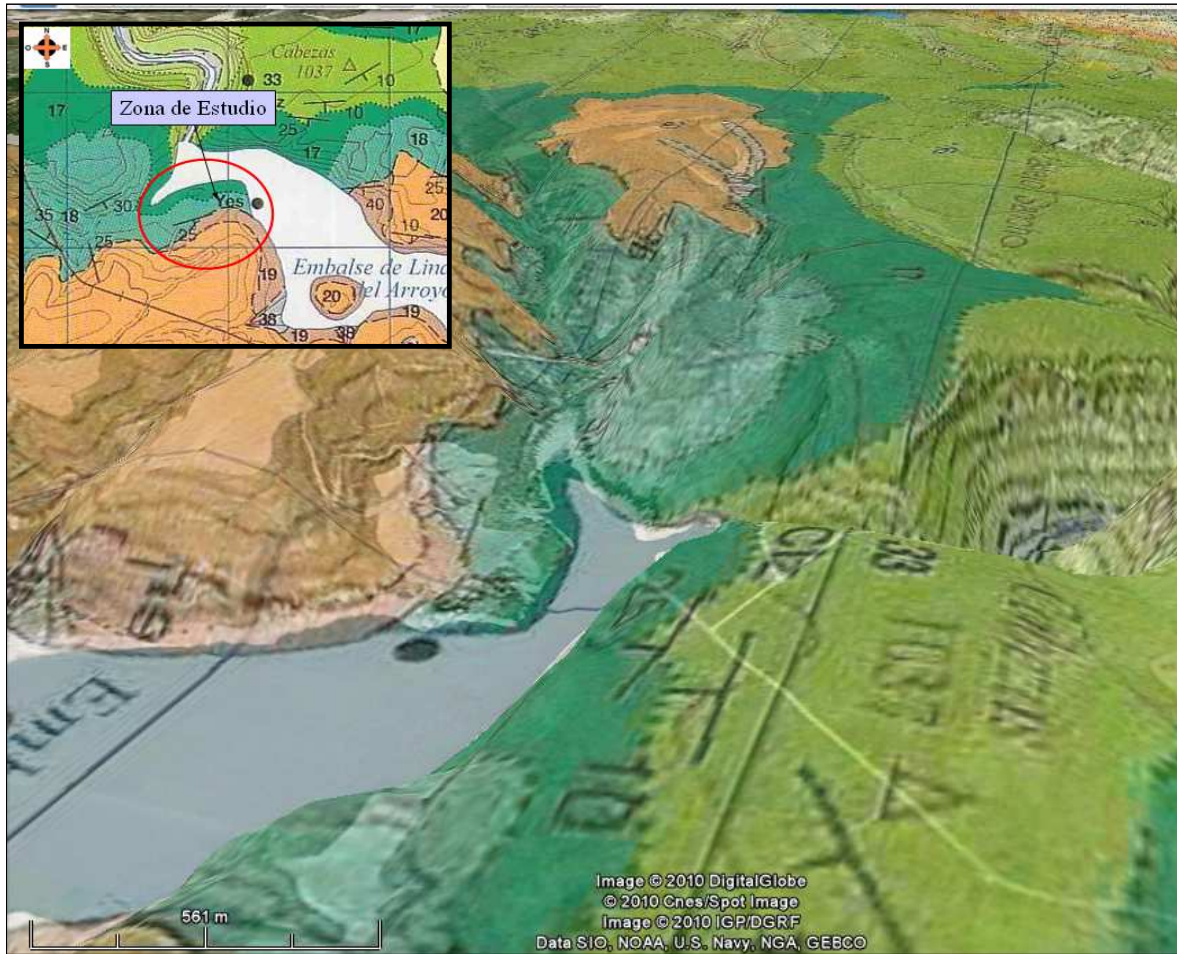


Figura 107. Mapa Geológico de la Zona (Google Earth)

Las formaciones Cretácicas se dividen en dos grupos:

Unidad de dolomías masivas. Calizas y margas.
Dolomías margas y yesos.

Respecto a las unidades terciarias pertenecen al Paleógeno y Neógeno y están constituidas de muro a techo por limos y arcillas con niveles de areniscas y conglomerados.

3.3.2.2.- Hidrogeología

En el área de Maderuelo, los materiales de interés hidrogeológico se agrupan en tres grandes unidades hidrogeológicas: el acuífero inferior del Mesozoico, el acuífero superior del Mesozoico, y el acuífero detrítico del Terciario.



- Acuífero inferior del Mesozoico
- Acuífero superior del Mesozoico
- Acuífero detrítico del Neógeno

Acuífero Inferior del Mesozoico.

En este acuífero se incluyen materiales de litologías y permeabilidades y heterogéneas pero que se han agrupado para constituir un conjunto continuo, sin intercalaciones impermeables de gran importancia.

El acuífero está constituido, de muro a techo, por:

- 200 m de materiales detríticos triásicos, con porosidad intergranular escasa, y con intercalaciones lenticulares arcillosas impermeables con desarrollo y potencia en ocasiones considerables.

- 60 m de dolomías rethienses, con porosidad por fisuración y karstificación importante aunque con intercalaciones impermeables de margas dolomíticas.

0 a 15 m de calizas micríticas del Lías inferior, con porosidad moderada por fracturación y karstificación.

-250 m de materiales detríticos en facies Utrillas, más conglomeráticos en la base y con porosidad intergranular moderada por la presencia de arcillas, decreciendo de muro a techo debido a la disminución de la granulometría; también aumentan hacia techo las intercalaciones arcillosas lenticulares.

El Precámbrico y Ordovícico inferior constituyen los materiales impermeables a muro, mientras que el impermeable de techo son los 100 m de arcillas y margas del Cenomaniense superior y Turoniense inferior.

Acuífero Superior del Mesozoico.

Está formado por dos importantes niveles carbonatados con porosidad por fracturación y karstificación, los 50 m de calizas del Turoniense superior y los 80 m de calizas y dolomías del Coniaciense superior- Maestrichtiense medio, separados ambos por una pequeña intercalación margosa dolomítica del Coniaciense, con 10 m de potencia.

El nivel impermeable de muro son las arcillas y margas del Cenomaniense superior Turoniense inferior, con 100 m de potencia, mientras que el nivel impermeable de techo son los 200 m de margas dolomíticas del Cretácico Terminal Paleoceno; este último nivel, sin embargo,



está muy desmantelado por la erosión por lo que en ciertas zonas se produce una comunicación con el acuífero detrítico neógeno.

Acuífero Detrítico del Neógeno.

Como se mencionó anteriormente, este acuífero forma parte del acuífero del Terciario detrítico de la Cuenca del Duero, constituido por las formaciones lenticulares de arenas y gravillas englobadas en una matriz limo-arcillosa. Su permeabilidad tipo consiguiente no es muy grande.

Este acuífero aflora al Sur del área estudiada y tiene una potencia máxima de unos 250 a 300 m y su impermeable de muro puede ser tanto el Precámbrico y Paleozoico. En gran parte de su extensión este acuífero está conectado con los acuíferos mesozoicos sobre los que en muchas ocasiones se apoya directamente.

Techo impermeable del acuífero.

El techo impermeable del acuífero superior del Mesozoico está constituido por las margas dolomíticas, calizas y dolomías del Maestrichtiense medio-Paleógeno.

Esta unidad se apoya en concordancia estratigráfica aparente sobre los materiales cretácicos definidos como calizas y dolomías masivas.

El resto de la unidad, hasta su techo visible marcado por la discordancia angular y erosiva de la base del Neógeno, suele presentar un carácter totalmente carbonatado. A techo del tramo aparece una brecha carniolar, calizas con nodulos blanqueados silex y caliza con yeso, que podrían corresponder, o al menos equivaler sedimentológicamente, a un nivel de yeso alabastrino, de varios metros de espesor que se ha explotado mediante labores de interior en el margen septentrional del propio Valle del Tabladillo, que en superficie se manifiesta como una banda de silicificación (30 m).

La frecuencia de las intercalaciones margosas, el carácter micrítico de los niveles dolomíticos y la presencia de yesos en algunas áreas hacen que este conjunto presente escasa permeabilidad que constituye el techo del acuífero del Mesozoico y el muro del acuífero Terciario.

3.3.4.- Trabajos realizados

Los trabajos realizados se iniciaron con el reconocimiento fotogeológico y geológico de la zona como fase previa al planteamiento de la campaña de prospección geofísica.

La campaña de prospección geofísica, como se ha dicho ha consistido en la aplicación de varios métodos prospectivos, complementarios, con la finalidad de obtener la mayor información de las diferentes litologías en profundidad, morfología de las estructuras, fracturas, etc., dichas técnicas de exploración fueron:



Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (S.E.D.T.)

Tomografía Eléctrica (T.E.)

Calicatas electromagnéticas, método V.L.F.

3.3.4.1.- Sondeos Electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT)

Con la finalidad de obtener una idea general de los materiales del subsuelo en el área investigada se realizaron 5 Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (SEDT), distribuidos por la zona investigada.

Los SEDT se midieron con bucles de 50 x 50 metros de lado en la modalidad de bucle coincidente,

Los SEDT se georeferenciados en coordenadas U.T.M (European 1950).

Para cada SEDT se ha obtenido al menos 1 registro, utilizando un staking de 1000 repeticiones de la medida por cada canal.

En cada registro se ha medido un total de 73 canales, aunque es evidente que, para este tamaño de bucle, a partir del canal 35-40 las medidas estén afectadas por el ruido de fondo, superior a la señal a medir. También los primeros canales están afectados por la rampa, por lo que tanto los primeros canales como los últimos son desechados en el procesado.

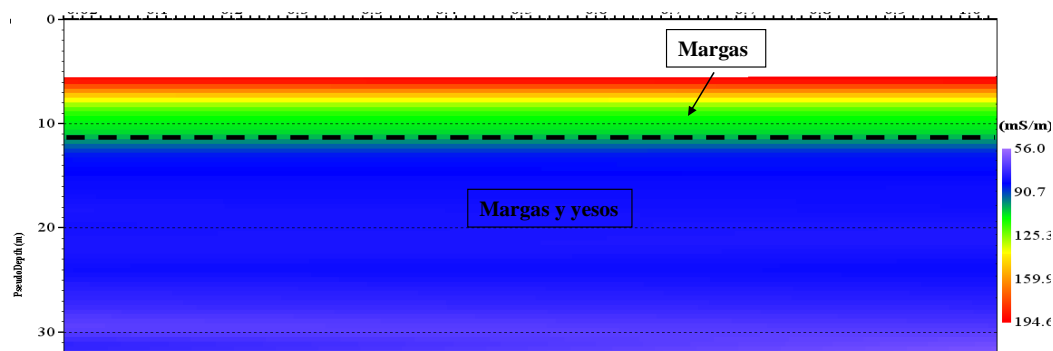


Figura 108. Ejemplo de SEDT realizado

En los estudios electromagnéticos, en su modalidad de SEDT, los cortes resultantes constituyen unas secciones que muestran en profundidad las variaciones de conductividad eléctrica mS/m. Estas variaciones obedecen fundamentalmente a cambios litológicos, aunque puede darse el caso de que dentro de la misma formación geológica aparezcan tramos de diferentes conductividades, debido a otro tipo de factores.

Las interpretaciones de los diferentes SEDT ponen de relieve la distribución de las diferentes litologías en profundidades, permitiendo diferenciar entre formaciones de margas, margas y yesos o yesos y margas



3.1.4.2.- Tomografía Eléctrica

Con esta modalidad prospectiva se han llevada a cabo la medición de 2188 metros de tomografía eléctrica, distribuidos en 7 perfiles por la zona de estudio.

Los dispositivos de medida utilizados fueron el Polo – Dipolo y Schlumberger con una separación de electrodos de 6 metros.

Los perfiles quedaron georeferenciados en coordenadas UTM (European 1050), con objeto de ser introducidos en un Modelo 3D realizado con SketchUp.

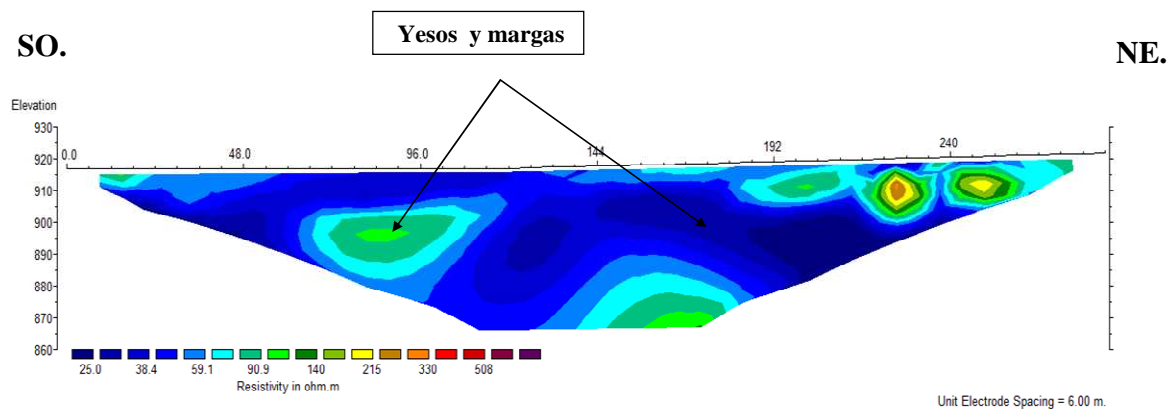


Figura 109. Ejemplo de perfil de Tomografía eléctrica realizado

En los estudios de Tomografía eléctrica, los resultados de campo son procesados para construir las secciones geoelectricas 2D (secciones de resistividad específicas y profundidades), relativas a los diferentes perfiles medidos. Las variaciones de resistividades obedecen a cambios litológicos en sentido lateral y en profundidad.

Los criterios de correlación establecidos en la zona con la finalidad de pasar de datos geofísicos (resistividades) a litológicos se han basado en reconocimientos geológicos de campo y experiencias de trabajos en contextos geológicos similares.

3.3.4.3.- Método electromagnético V.L.F

Con este método de reconocimiento se han medido un total de 3.095 metros de calicatero electromagnético, distribuidos en 15 perfiles, distribuidos por la zona de estudio.

Los perfiles quedaron georeferenciados en coordenadas UTM (European 1050), para su inserción del modelo 3D.



SE.

NO.

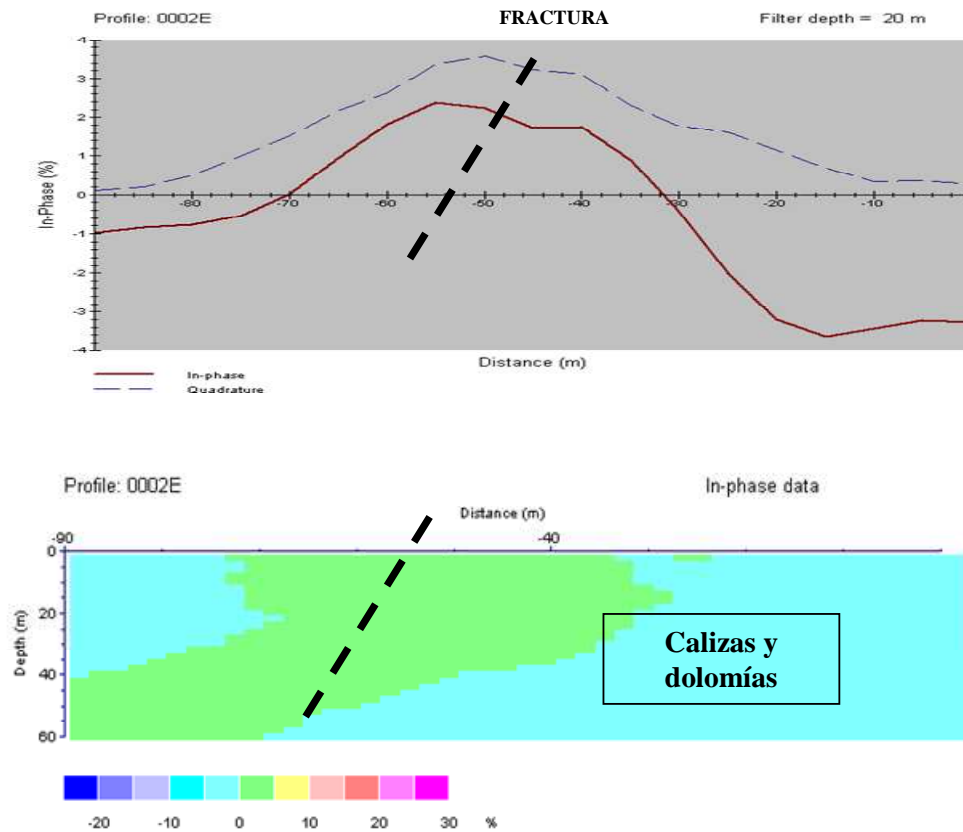


Figura 110. Ejemplo de perfil de VLF

Los datos de campo obtenidos en los perfiles de calicatas electromagnéticas se han sometido a un proceso de filtrado, con la finalidad de ubicar la anomalías con precisión y mostrar una sección hasta 60 metros de profundidad con la distribución de las densidades aparentes de corriente, es decir, diferenciar entre materiales de mayor o menor conductividad eléctrica.

3.3.4.4.- Creación de Modelo 3D mediante el programa SketchUP

Con los perfiles de tomografía eléctrica y VLF se realizó un modelo 3D del subsuelo con el programa SketchUp. El objetivo fue el de localizar el accidente tectónico que generaba el flujo de agua y que daba lugar a la surgencia de la Fuente de Los Aguachines

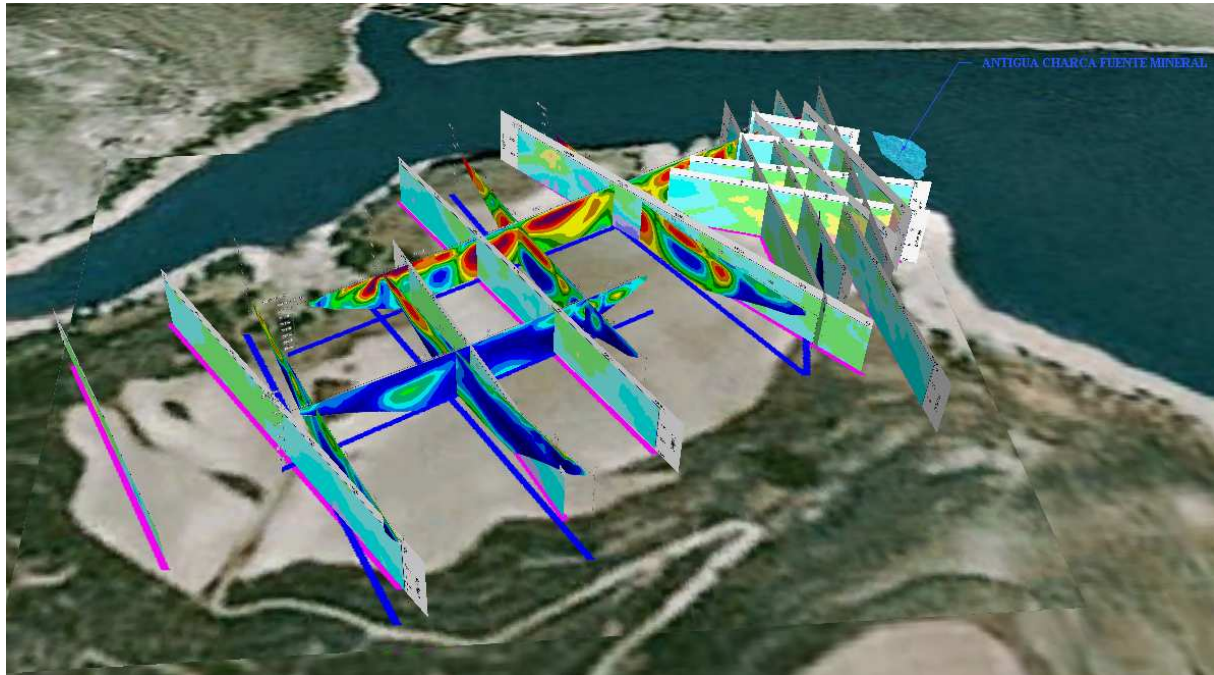


Figura 111. Modelo 3D (SketchUp)

3.3.5.- Resultados

En relación con la investigación realizada se llega a los siguientes resultados:

La zona de Maderuelo está encuadrada en el sector suroriental de la Cuenca del Duero. Aunque la cuenca del Duero está rellena por materiales terciarios, más o menos afectados por la orogenia alpina, y por materiales cuaternarios. A nivel del área investigada en el Pantano de Linares las formaciones aflorantes pertenecen al Cretácico y al Terciario.

Las formaciones Cretácicas se dividen en dos grupos:

Unidad de dolomías masivas. Calizas y margas.
Dolomías margas y yesos.

Respecto a las unidades terciarias pertenecen al Paleógeno y Neógeno y están constituidas de muro a techo por limos y arcillas con niveles de areniscas y conglomerados.

Según el informe hidrogeológico relativo a la hoja de Maderuelo, los materiales que se encuentran en el área investigada están catalogados de baja permeabilidad, debido a la presencia de margas y yesos. No obstante, las formaciones de dolomías masivas y calizas pueden presentar karstificaciones aumentando notablemente sus permeabilidades. Este hecho se pone de manifiesto en propia fuente de Los Aguachines que, según los planos constructivos del pantano (C. H. Duero), la ubican sobre formaciones de calizas y dolomías.



La prospección geofísica realizada en sus diferentes métodos aplicados ha permitido obtener la morfología de las formaciones en profundidad, así como, caracterizar litológica los materiales existentes en profundidad. La interpretación conjunta de los perfiles y su representación en 3D, permite obtener una visión global de la zona. Dicha interpretación destaca netamente dos dominios litológicos.

Margas y yesos o yesos y margas
Calizas y dolomías

Según la interpretación realizada se detectó un cabalgamiento (falla inversa) de las formaciones calizas-dolomías sobre las margas-yesos. De acuerdo con las características, situación y dirección de la fractura, entendemos que este accidente tectónico guarda una estrecha relación con la antigua fuente de Los Aguachines, siendo la responsable de la surgencia. De esta forma, esta discontinuidad (falla inversa) permitiría la ascensión de aguas más profundas con una temperatura alta y un alto contenido en sales, dando origen a las aguas minero-medicinales de la fuente de los Aguachines.

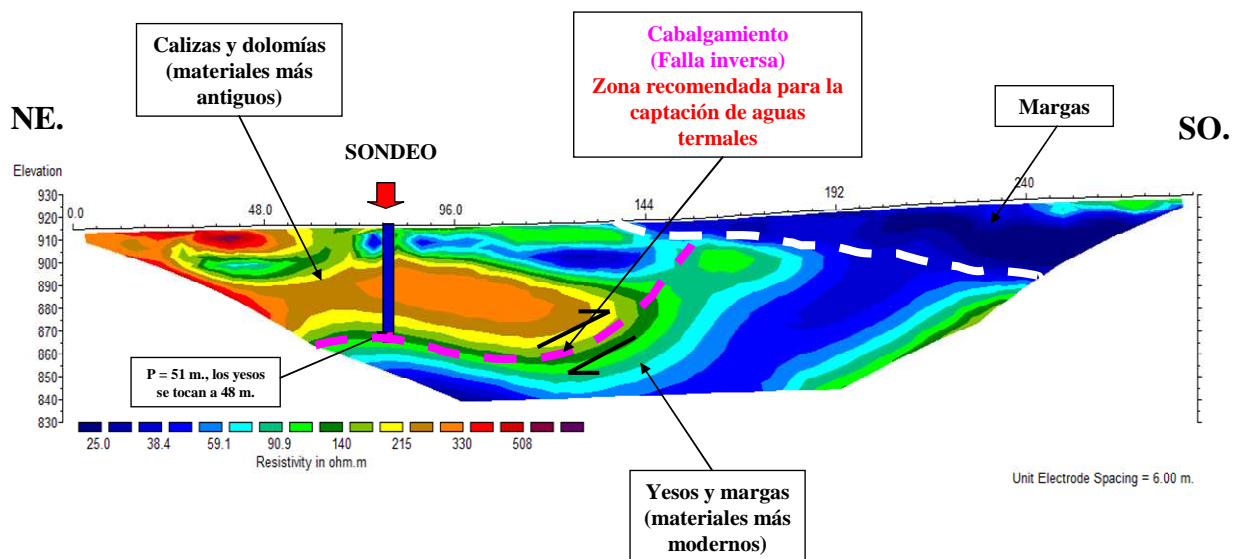


Figura 112. Imagen mediante Tomografía Eléctrica de la estructura geológica y propuesta de sondeo

Al objeto de tratar de captar el flujo de agua que daba lugar a la fuente de Los Aguachines, se realizó un sondeo de reconocimiento de 60m (en el área reflejada en la figura 112), al objeto de alcanzar la falla inversa.

Las características técnicas de los sondeos fueron las siguientes:

Profundidad: 60 metros.
Sistema de perforación: Rotoperación.
Diámetro de perforación mínimo: 180 mm
Entubación: PVC



Los resultados de la investigación fueron positivos ya que al alcanzar la falla inversa a los 48m de profundidad se produjo un surgencia de agua que recordaba a la surgencia de petróleo de las antiguas perforaciones petrolíferas. Esta importante surgencia de agua era esperada debido a que el caudal de la fuente de los aguachines era importante (100 -150 l/s). Se recogieron muestras y se certifico su autenticidad mediante un análisis químico de las aguas.



Figura 113.Fotografía que capta el momento en que se alcanza la falla (a 48m de profundidad) y se recupera la fuente de los Aguachines.



IV.- CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

4.1.- Conclusiones

En relación con lo expuesto en los diferentes apartados de este proyecto se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Las herramientas de gestión de información espacial son capaces de recopilar, organizar y estudiar convenientemente datos geofísicos de manera sistemática, esto permite acceder eficientemente y de manera organizada a datos con la finalidad de poder hacer una interpretación integrada con mayor facilidad. Esta forma de almacenamiento y visualización de datos es una herramienta clave para el estudio geológico, hidrológico, minero, geotécnico y medioambiental ya que permite crear bases de datos fácilmente manipulables y modificables, resolviendo problemas de localización, almacenamiento, sistemas de coordenadas, mapas, etc.

- La utilización de herramientas de gestión de información espacial nos permiten de forma sencilla ampliar campañas geofísica teniendo en cuenta la localización de datos geofísicos previos, además de la accesibilidad, el tamaño y la ubicación de los terrenos. Lo que nos permite aprovechar mejor el tiempo y los recursos de los que se disponen. Una vez hemos obtenido mediante herramientas de gestión de información espacial nuestro modelo de representación global de la zona de estudio, este podrá ser siempre ampliado de forma sencilla introduciéndole nuevos datos de Tomografía eléctrica, Sísmica de Refracción, sondeos... a nuestro modelo, con la finalidad de mejorar nuestro conocimiento de la zona de estudio.

- La prospección geofísica realizada en sus diferentes metodologías en combinación con las herramientas de gestión de información espacial ha permitido obtener la morfología de las formaciones en profundidad, caracterizar litológicamente los materiales existentes en profundidad y resolver los problemas específicos de cada estudio realizado. Por lo que se considera que esta asociación de Geofísica + herramientas SIG forma una potente herramienta (económica y no intrusiva) para la solución de problemas mineros, geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos, geotérmicos y medioambientales.

- Por último, me gustaría mencionar que en este proyecto se ha profundizado en la utilización del Método de Potencial Espontáneo (PE) y el Método de Emisión de Campo Electromagnético (ECE) para la caracterización de un deslizamiento y la detección de futuras zonas de fractura con muy buenos resultados. La literatura existente de la aplicación de estas técnicas a deslizamientos es muy pobre y no se tiene constancia de que en España hayan sido aplicadas a deslizamientos hasta esta investigación. Se continuará con la investigación en una futura Tesis doctoral.



4.2.- Desarrollos futuros

Como se comentó al principio del proyecto, el objetivo principal de este proyecto es el de servir de base a una futura Tesis Doctoral en la que las investigaciones se centrarían en los siguientes puntos:

- La asociación de la Geofísica con herramientas de Gestión de Información espacial ha sido aplicada en solo tres investigaciones geofísicas por lo que se aplicaría esta metodología a nuevas campañas geofísicas para confirmar las conclusiones aportadas en este proyecto.

- Se mejorarían las técnicas geofísicas de Sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT) y Tomografía eléctrica con el objeto de aumentar su penetración máxima de 1km a 3 km y de 0,5km a un 1-2km respectivamente. Este avance sería básico para la aplicación de estas dos técnicas geofísicas en el estudio de formaciones geológicas para el almacenaje y la monitorización del CO₂ que tan en auge están entre las empresas energéticas del nuestro país. Esta innovación, más la utilización de herramientas de gestión de información espacial supondría una forma mucho más económica de investigar el almacenaje y monitorización del CO₂ que los costosísimos sondeos y sísmicas de reflexión que actualmente están realizando en nuestro país empresas extranjeras.

- Se investigará sobre la capacidad de las técnicas geofísicas del potencial espontáneo y puesta a masa para caracterización de deslizamientos y localización de filtraciones en presas principalmente. Estas técnicas han sido desarrolladas y se siguen desarrollando principalmente para la localización y cubicación de yacimientos metálicos dejando un vacío de investigación en otras aplicaciones que se pretende cubrir en una futura tesis doctoral. Además, el uso de programas informáticos SIG permitirá un manejo de los datos que no era posible años a tras.



V.- BIBLIOGRAFÍA

- STEWART, R.R. 1996. Exploration Geophysics Tomography.
- RAFAEL ALEJANDRO NAVARRO LUNA “Aplicación de pruebas electromagnéticas en el dominio del tiempo (TDEM) para caracterización de recursos hídricos en Venezuela”
- J.C. SANTAMARINA AND G.J. RIX 1.998. Near Surface Geophysical Inversion Waves and Geotomography.
- SHARMA, P.V: “Environmental and engineering geophysics”
- Lic.Andres López Hidalgo ; Lic. María Amor Solano de Lucas; Jerónimo Jose Mas Requejo. “La tomografía Eléctrica como Herramienta de Diagnóstico en la Auscultación de Presas de Materiales Suelos”
- Andres López Hidalgo ; meng heng loke; gerardo oscar fanton; ENRIQUE CARA RUBÍ “Técnicas prácticas para investigación en dos y tres dimensiones (Tomografía eléctrica 2D y 3D)
- Informe Hidrogeológico Hoja de Maderuelo (IGME)
- Application of the Self-Potential Method in Hydrogeology. J. R. Moore.