

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

INSPECCIÓN PROFUNDA Y CARACTERIZACIÓN DE CUERPOS DE PRESAS DE MATERIALES SUELTOS MEDIANTE TÉCNICAS GEOFÍSICAS.

Javier Gras Treviño¹

Enrique Aracil Ávila²

Mario Losañez Tejedor³

RESUMEN: Durante los procesos de inspección llevados a cabo para las Primeras Revisiones de Seguridad de Presas es frecuente la inexistencia de datos e información suficiente sobre los elementos constitutivos de las presas de materiales sueltos. La presencia de filtraciones importantes a través del cuerpo de presa pueden hacer aconsejar reconocimientos profundos no destructivos para los que la prospección geofísica (en concreto, la técnica de la Tomografía Eléctrica) aporta, con un coste reducido, una información cualitativa que puede resultar muy valiosa, tanto en cuanto a la posible caracterización de los materiales existentes como en la localización de vías preferentes de circulación, aspectos ambos importantes para la definición de posibles soluciones. En la presente comunicación se exponen dos ejemplos concretos de aplicación de estas técnicas, en España y en Chile, y se comentan las conclusiones obtenidas en cada caso.

¹ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. AQUAPLAN, S.A

² Doctor en Ciencias Geológicas, ANÁLISIS Y GESTIÓN DEL SUBSUELO, S.L. Universidad de Burgos

³ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. AQUAPLAN, S.A

1. INTRODUCCIÓN

Las presas de materiales sueltos son estructuras que suelen presentar gran heterogeneidad en su constitución interna y aún mayor en su comportamiento frente al agua y a otras acciones exteriores.

Aunque los proyectos constructivos de estas presas suelen definir y caracterizar bastante bien el tipo de materiales a disponer en cada una de las zonas de la presa, la realidad es que durante su construcción se producen variaciones importantes en cuanto a las características de los materiales finalmente empleados y en cuanto a la disposición de los mismos dentro de la estructura, sin que estos cambios queden debidamente documentados en un proyecto “*as built*” o de liquidación.

Si a esta circunstancia unimos la antigüedad de alguna de nuestras presas y la falta de documentación (proyecto original, modificados, reparaciones, etc.), que se produce en bastantes ocasiones, resulta que es frecuente que el *Equipo Revisor* que ha de realizar las inspecciones de este tipo de presas suele encontrarse con un alto grado de desconocimiento, de la composición interna real de los diques, cimientos y estribos y de las posibles heterogeneidades existentes.

Si además de este desconocimiento, se producen filtraciones importantes, como es el caso de los ejemplos mostrados en este artículo, resulta imprescindible realizar algún tipo de reconocimiento profundo que aporte información fidedigna de la composición de la presa y sus cimientos.

Los sondeos han sido y siguen siendo un instrumento fundamental para tratar de conocer las características de los materiales existentes, si bien aportan una información discontinua que no siempre pueden explicar el comportamiento de la estructura frente al agua y el resto de acciones exteriores (sismos, inestabilidades, etc.)

Es necesario, por tanto, disponer de algún instrumento que permita obtener una “*fotografía instantánea*” del interior de la presa o “*radiografía*”, que permita juzgar sobre las causas del comportamiento observado y definir las posibles soluciones.

La técnica de Tomografía eléctrica, permite a un coste razonable obtener esta “*radiografía*” en términos de resistividad eléctrica, que como veremos puede asociarse en determinadas circunstancias a otras características de los materiales (densidades, composición, grado de compactación, etc) y sobretodo a la presencia de agua en su interior, por lo que permite descubrir las vías preferentes de circulación en el interior de la presa.

2. ANTECEDENTES

En este apartado se introducen algunos aspectos previos de la problemática asociada a las presas analizadas y los objetivos que trataron de alcanzarse a través de estas técnicas.

En el primer caso se trataba de una presa de materiales sueltos de escollera con núcleo impermeable arcilloso central y vertical, flanqueado por filtros

aguas arriba y aguas abajo que realizan la transición hacia los espaldones. El espesor del filtro monocapa de aguas arriba es de 2,5 m, y el espesor del filtro monocapa de aguas abajo de $K \geq 10^{-2}$ cm/s, de 3,5 m.

El espaldón de aguas arriba es de escollera, piedras y gravas de aluvial, y el de aguas abajo de todo uno del coluvial según puede apreciarse en la figura adjunta:

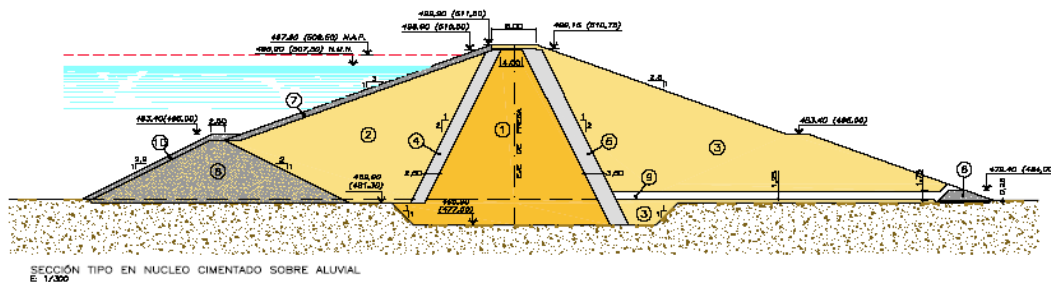


Figura 1: Sección tipo Presa 1 (Barcelona -España)

De las inspecciones realizadas y del análisis del último periodo de explotación se desprendía un comportamiento general satisfactorio, si bien preocupaban las altas filtraciones producidas, (que llegaban incluso a impedir el llenado de la presa dadas las escasas aportaciones existentes) y unas presiones intersticiales muy elevadas en el espaldón de aguas abajo, de lo que podía deducirse un mal funcionamiento del manto drenante.

La posible existencia de fugas de agua por la cimentación y estribo izquierdo, deducidas al detectarse presiones intersticiales anormalmente bajas en algunas zonas del interior de la presa y el exceso de filtraciones localizadas a través de un manantial existente aguas abajo de la presa, se relacionaba con una posible alteración de unos yesos existentes en la cimentación ante la presencia de flujo de agua.

En el segundo caso analizado se trata de una presa de materiales sueltos, prácticamente homogénea, construida sobre una morrena de origen glaciar en la cordillera de los Andes (Chile) procedente de un antiguo deslizamiento en masa producido hace unos 3000 años que obturó parcialmente el cauce del río Yeso, formando varias lagunas naturales. Sobre uno de los diques que interceptaron el cauce se procedió a realizar un recrecimiento del mismo con materiales algo seleccionados procedentes de la misma morrena.

Se trata por tanto de una presa sin núcleo impermeable y que presenta una alta heterogeneidad en las propiedades los materiales constitutivos tanto del dique como de la morrena en la que se asienta, con zonas por las que se infiltra el agua con mucha mayor facilidad que en el resto, como se aprecia en la figura 2.

Desde el principio de su construcción esta presa presentó elevadas filtraciones (superiores a los 500 l/s en el primer llenado), habiéndose realizado posteriormente obras de impermeabilización y de estabilización a través de nuevos rellenos, al producirse surgencias y cotas piezométricas elevadas en las proximidades del espaldón de aguas abajo.

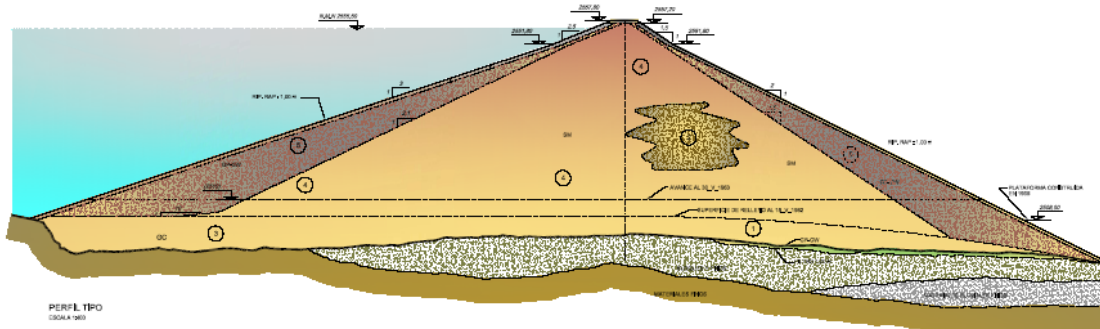


Figura 2: Sección tipo Presa 2 (Chile)

3. LA INVESTIGACIÓN GEOFÍSICA DEL SUBSUELO

3.1. INTRODUCCIÓN AL MÉTODO

La aplicación de métodos de prospección geofísica adecuados a cada objetivo permite conocer cómo se disponen los materiales en el subsuelo con una precisión relativamente buena. Concretamente, el método de prospección geofísica mediante perfiles de tomografía eléctrica, por ejemplo, va a permitir estudiar los materiales del subsuelo a diferentes escalas de profundidad y con distintos grados de resolución y, lo que puede resultar muy interesante, con gran rapidez y presupuestos contenidos (Martínez-Pagán *et al.*, 2005).

La tomografía eléctrica es un método prospectivo geoeléctrico que analiza los materiales del subsuelo en función de su comportamiento eléctrico, es decir, que permite diferenciarlos en función de su valor de resistividad (Aracil *et al.*, 2002 y 2003). La naturaleza y composición de las rocas, la textura más o menos alterada, más o menos compacta o más o menos porosa, unida a la presencia o no de fluidos y su naturaleza, son factores que van a condicionar la existencia de una mayor o menor concentración de iones. Una mayor movilidad de estos iones tiene como consecuencia una mayor conductividad o, lo que es lo mismo, una menor resistividad, que es el parámetro en cuestión con que se trabaja en la prospección geofísica mediante perfiles de tomografía eléctrica.

Las arcillas, las margas y las calizas, por ejemplo, tienen todos unos valores de resistividad diferentes entre sí y característicos. Esto permite prever que podrán ser distinguidos en el subsuelo en base a las diferencias observadas en este parámetro (ver ejemplo en la figura 3). Lo mismo sucede entre las formaciones superficiales, las unidades que forman el cuerpo de presa y la roca que forma el sustrato: sus diferentes naturalezas y texturas les proporcionan unas características que las hace diferentes ante la investigación del subsuelo mediante resistividades.

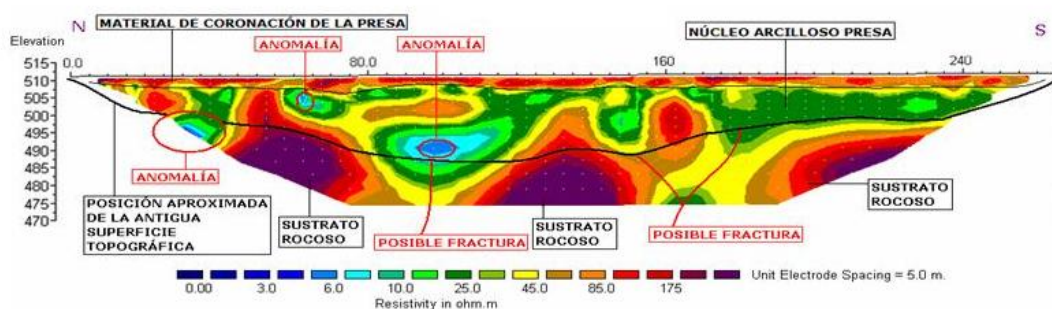


Figura 3: Ejemplo de perfil de tomografía eléctrica realizado en la coronación de la presa 1 (Barcelona).

Y, del mismo modo que sucede con las diferentes rocas y unidades litológicas, la presencia de fugas también es susceptible de identificarse en tanto que son zonas de presencia prioritaria de agua, aspecto éste que va a favorecer unos valores de resistividad diferentes de los del entorno y, consecuentemente, van a poder detectarse.

3.2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Este método se basa en la implantación de numerosos electrodos a lo largo de un perfil, con una separación determinada. Todos los electrodos se conectan a un cable multiconductor especial que, a su vez, va unido al equipo de medida y, mediante un programa secuencial específico que se crea para cada objetivo, el aparato “ordena” a cada electrodo si debe o no emitir o si debe o no recibir corriente en cada momento. Es decir, se programan cuáles deben ser los cuadripolos de todo el perfil que funcionan en cada momento y con qué disposición (Loke, 2000).

Cada uno de estos cuadripolos hace una medida de la resistividad que se atribuye a un determinado punto geométrico del subsuelo cuya posición y profundidad en el perfil depende de la posición de dicho cuadripolo y de la separación entre los electrodos que lo conforman.

Los perfiles de tomografía eléctrica son, por tanto, secciones del terreno que reflejan la distribución de valores de resistividad a distintas profundidades correspondientes a diferentes capas de investigación. La profundidad de investigación depende del espaciado entre electrodos y del dispositivo seleccionado pudiendo alcanzarse profundidades del orden de los 300 m o superiores, si bien menores penetraciones en el subsuelo repercuten positivamente en una mayor resolución, ya que a menor profundidad mayor densidad de datos al utilizarse una malla más cerrada. En principio, la resolución de la investigación disminuye con la profundidad logarítmicamente (Dahlin y Loke, 1998).

4. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Los ejemplos que se mencionan en este artículo corresponden a dos zonas de trabajo diferentes: Por un lado, la Presa 1 situada en Barcelona y, por otro lado, la Presa 2 ubicada en Chile, realizados en los años 2006-2007 y 2008, respectivamente.

4.1. PRESA 1 (BARCELONA)

La presa 1 está formada por materiales sueltos que presenta pérdidas de las reservas acumuladas de agua. El problema principal consistía en identificar, de la manera más acotada posible, los puntos donde se estuvieran produciendo esas fugas principales para actuar con las soluciones requeridas directamente en los puntos de afección. Como aspectos a considerar, es conveniente destacar que en superficie, en la zona de contacto de los materiales de presa con el terreno aguas abajo, existe un manantial permanente que se sospechaba pudiera ser la zona principal de fuga del agua, razón por la cual se intensificaron los esfuerzos en caracterizar el subsuelo de ese sector, si bien se hizo una campaña general en toda la presa y su entorno.

Los perfiles de tomografía eléctrica permitieron diferenciar dos unidades principales en el subsuelo: Una unidad conductora (correspondiente al núcleo arcilloso de la presa y parte del todo-uno saturado), situada por encima, y una unidad resistiva (correspondiente al sustrato rocoso), situada inmediatamente por debajo. Una vez caracterizados los materiales se observó la existencia de una serie de anomalías, que se diferenciaron en discontinuidades y en formas “globulosas”.

Las discontinuidades se atribuyeron a las interrupciones detectadas en niveles del sustrato. La mayor parte de ellas deben de corresponder a acuñamientos laterales de las capas de yeso y/o de arenisca, sin descartar que alguna de ellas pudiera corresponder a una fractura. La denominadas formas globulosas se han atribuido a anomalías de extensión local que suelen tener valores de resistividad bajos o muy bajos y que se han interpretado como posibles “conductos” por donde circularía agua salobre o salinizada.

Una vez identificadas las anomalías en los diferentes perfiles se representaron cartográficamente para ver sus trayectorias y su posible conexión con el vaso. La existencia de esta conexión facilitaría la identificación de los puntos prioritarios de actuación en la fase posterior de reconocimientos adicionales y de reparación.

Como ya se indicó anteriormente, los esfuerzos se centraron más en el sector norte (estribo izquierdo) debido a la presencia de un manantial, que se creía pudiera ser la causa de la principal fuga de agua del vaso. La representación gráfica de las anomalías sobre la fotografía aérea de la presa (ver figura 4) permitió apreciar cómo precisamente una de ellas (la que aparece representada en color amarillo), coincide en su trayectoria hasta el citado manantial presente en la zona Este, procedente desde posiciones más occidentales. El trayecto de esta anomalía es, en gran parte de los casos, cerca del contacto entre el sustrato rocoso y los materiales que forman la estructura de la presa. En algunos puntos,

el trazado de esta anomalía se desvía ligeramente de este contacto sustrato-presa adentrándose en los materiales que forman el terreno natural más que en los que forman el cuerpo de la presa.

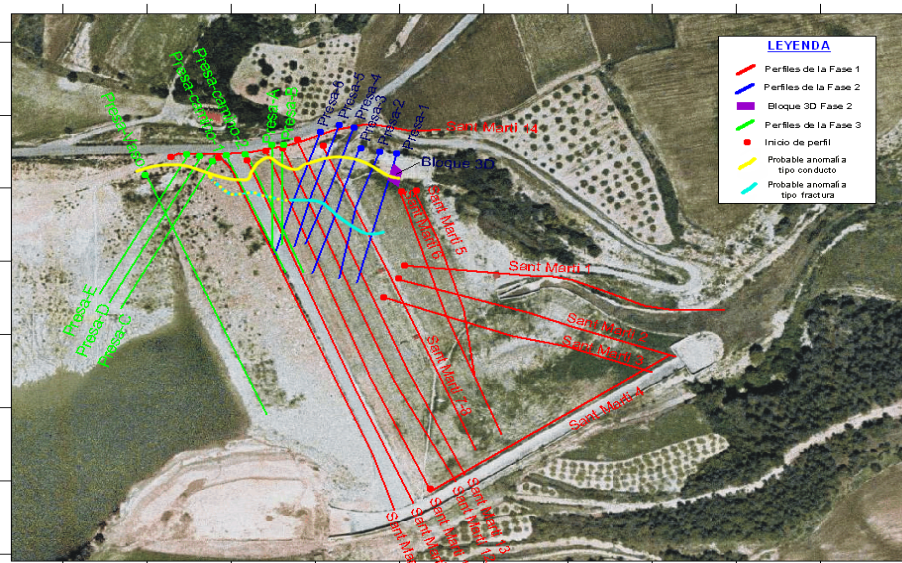


Figura 4: Representación de la trayectoria de las anomalías principales

La investigación mediante perfiles de tomografía eléctrica permite otra ventaja: al obtener información de la posición de cada anomalía y su profundidad (o su cota), se pueden representar posteriormente las anomalías detectadas en diferentes perfiles para ver su trayectoria en alzado. En la figura 5 se ha representado la superficie topográfica de ese trazado y la cota de aparición de la anomalía anteriormente citada en cada uno de los distintos perfiles en los que fue identificada. En el sector occidental de este corte, la anomalía no se ha identificado de forma tan clara como en el sector oriental, pero sí se observa que su trazado comienza a 500 m.s.n.m. (en el oeste) y, tras un ligero ascenso, desciende nuevamente hasta un punto que coincide con la posición del manantial, a 483 m.s.n.m. Es probable que la mitad oriental de la trayectoria se corresponda con flujos que vengan del norte, a tenor de lo observado en uno de los perfiles realizados. A raíz de estos resultados, las actuaciones se centraron más en la investigación de la pérdida de recurso a través del vaso, al descartarse que el manantial tuviera su origen en el vaso.



Figura 5: Perfil que representa la trayectoria de la anomalía principal

4.2. PRESA 2 (CHILE)

En la Presa 2, los perfiles de tomografía eléctrica se han llevado a cabo, al igual que en la Presa 1, para estudiar las características del subsuelo, la identificación de aspectos estructurales y la localización de posibles filtraciones.

Los resultados de los perfiles han permitido establecer una diferenciación de unidades con distintas características. Así, hay una unidad resistiva, situada en la parte superior de los perfiles, formada por los rellenos heterogéneos, que llega a alcanzar los 30 m de espesor; una unidad conductora, situada inmediatamente por debajo, constituida por un conjunto detrítico de gravas y arenas depositado por acción glaciaria (depósitos de la morrena) y, en la parte inferior de algunos perfiles, una unidad resistiva, interpretada por el sustrato rocoso (granitos).

Al igual que sucedía en el ejemplo anterior, una vez caracterizados los materiales se observó la existencia de una serie de anomalías, que se han identificado como discontinuidades y como “formas globulosas”, a las que se les ha dado la misma interpretación que en el caso explicado en el ejemplo anterior.

En el caso de la Presa 2, la existencia de numerosos sondeos ha permitido establecer una buena correlación entre los materiales de la presa y los valores de resistividad. Así, en los puntos donde algún perfil de tomografía eléctrica ha pasado por algún sondeo, se ha realizado un calado del mismo en el perfil lo cual ha facilitado una buena atribución del tipo de material a las distintas unidades diferenciadas. Se puede ver en la figura 7 una correlación entre los valores de resistividad del perfil 1+2 y la columna de materiales del sondeo SG-7, pudiendo observarse que, dentro de los materiales que forman la unidad de relleno, los materiales más resistivos corresponden a las arenas con gravas mientras que los materiales menos resistivos corresponden a las arenas.

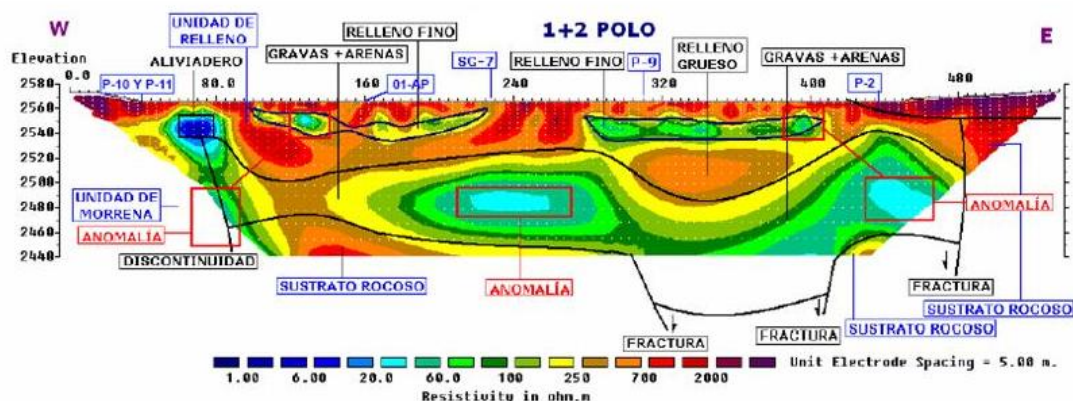


Figura 6: Ejemplo de perfil de tomografía eléctrica realizado en la coronación de la presa 2 (Chile).

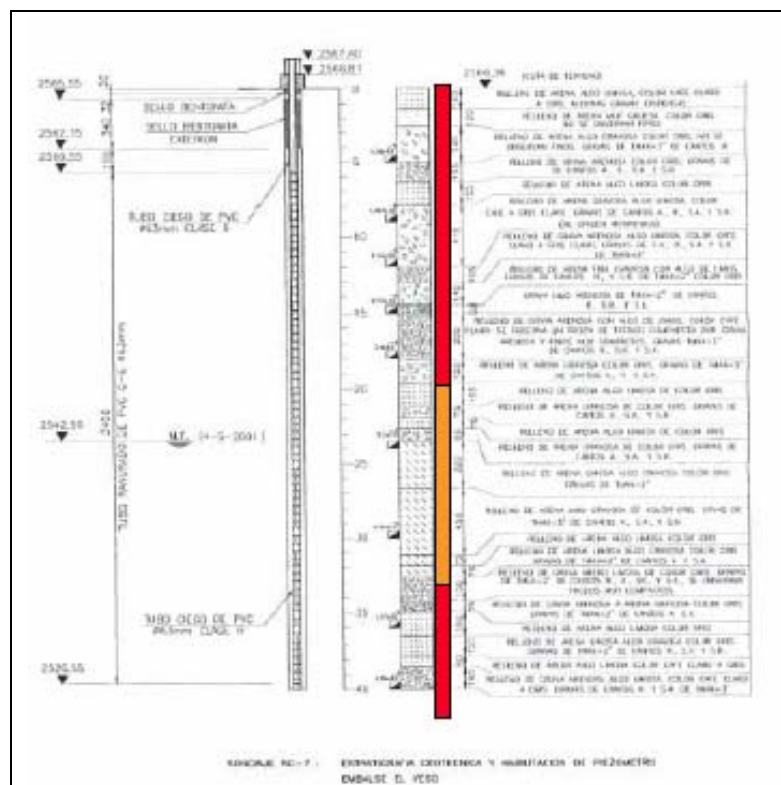


Figura 7: Correlación entre los datos del sondeo SG-7 y de los valores de resistividad del Perfil 1+2 (los materiales más resistivos son las arenas con gravas mientras que los menos resistivos son las arenas).

Esta buena correlación ha facilitado la interpretación de las secciones obtenidas en términos de resistividad, realizando una asociación de las anomalías atribuidas a posibles fugas de agua a la unidad de depósitos de morrena y, concretamente dentro de esta unidad, a las capas de arenas, que son las más permeables.

La representación gráfica sobre el plano de la presa de estas anomalías (ver figura 8) ha permitido apreciar cómo las anomalías atribuidas a filtraciones discurren desde la masa de agua del embalse (al Norte) y se pueden seguir hacia el Sur, es decir, atravesando la presa. El trayecto de estas anomalías transcurriría por los materiales de gravas y arenas de la morrena, localizados por debajo de los rellenos que forman la parte más alta de la presa.

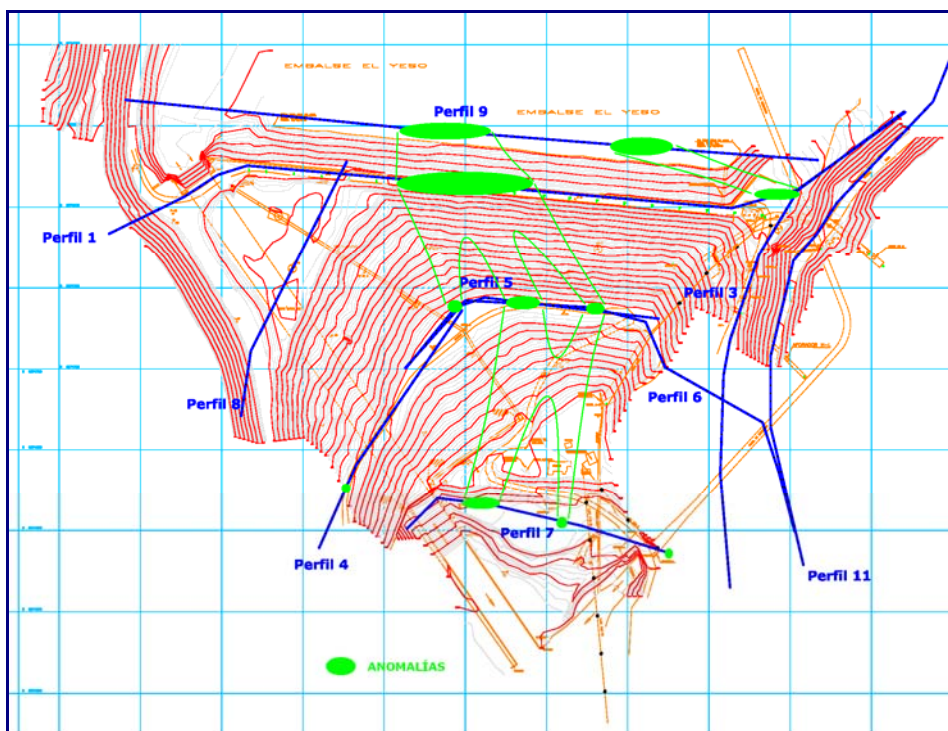


Figura 8: Representación de la trayectoria de las anomalías principales

5. CONCLUSIONES

Como hemos visto en los ejemplos de aplicación comentados, las técnicas de tomografía eléctrica, permiten obtener con un coste contenido una información cualitativa muy valiosa en cuanto a las localizaciones de los flujos preferentes de agua a través de diques de materiales sueltos y en sus cimentaciones.

Por otra parte, y sobretodo si se complementa con otro tipo de reconocimientos (como los sondeos profundos), permiten caracterizar las distintas zonas de materiales constituyentes, permitiendo de alguna manera la “*extrapolación*” de la información aportada por los sondeos a secciones completas donde se han medido solo resistividades.

Estas informaciones han resultado extraordinariamente útiles a la hora de definir nuevos reconocimientos y ensayos de caracterización de materiales y diseñar las soluciones más apropiadas para resolver los problemas detectados.

REFERENCIAS

- Aracil, E.; Maruri, U.; Porres, J.A.; Espinosa, A.B. (2002): "La tomografía eléctrica: una herramienta al servicio de la obra pública". *Rock Máquina*, 76 (30-34).
- Aracil, E.; Maruri, U.; Vallés, J.; Martínez Pagán, P.; Porres, J.A. (2003): "Evaluación de problemas medioambientales mediante tomografía eléctrica". *Ingeopress*, 122 (34-39).

- Dahlin, T., Loke, M.H.* (1998): Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. *Journal of Applied Geophysics*, 38. 237-249 pp.
- Loke, M.H.* (2000): Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys. University of Birmingham web site, Downloads: www.bham.ac.uk/EarthSciences/people/staff/loke_m.html.
- Martínez Pagán, P.; Aracil, E.; Maruri, U.; Faz, Á. (2005): "Tomografía eléctrica 2D/3D sobre depósitos de estériles mineros". *Ingeopress*, 138 (34-36).