



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

**Inspección Técnica de la Presa Santa Marta,
Mediante Medidas de Potencial Espontáneo**

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN GEOLOGÍA

Presentado por:

Vitelia Elizabeth Barragán Galeas

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2013



D- 99447

CIB



DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Proyecto de graduación, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Vitelia Elizabeth Barragán Galeas

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS

Titulación: **INGENIERO GEÓLOGO**

PROYECTO FIN DE CARRERA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

TÍTULO DEL PROYECTO

INSPECCIÓN TÉCNICA DE LA PRESA SANTA MARTA, MEDIANTE
MEDIDAS SUBACUÁTICAS DE POTENCIAL ESPONTÁNEO

VITELIA BARRAGÁN GALEAS

JUNIO DEL 2013



POLITÉCNICA

AUTORIZACIÓN PARA LA PRESENTACIÓN DE PROYECTOS FIN DE CARRERA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE MINAS



DATOS DEL ALUMNO

Titulación:	INGENIERO GEÓLOGO		
Alumno/a D./Dª:	VITELIA BARRAGÁN GALEAS		
NIF / NIE:	Y2588957E		
Datos alumno/a:	Dirección Postal:	Madrid, Fernández de Los Ríos 8, bajo 6, 28015	
	Teléfono:	654661336	Email: viteliabarragan@gmail.com

VISTO BUENO DEL PROFESOR TUTOR

Profesor Tutor D./Dª:	D. Alexander Rozycki
Departamento:	GEOLOGÍA
Título del Proyecto:	Inspección técnica de la Presa Santa Marta, mediante medidas subacuáticas de potencial espontáneo

El profesor tutor, autoriza su presentación.

En Madrid, a 17 de Junio de 2013

EL PROFESOR TUTOR

CONFORMIDAD DEL COORDINADOR DEPARTAMENTAL

El Proyecto cumple la normativa en vigor. Se propone la siguiente composición del Tribunal:

Presidente:	D. / Dª:	José Antonio Espi Rodríguez
Vocal:	D. / Dª:	Alexander Rozycki Bochniewicz
Secretario:	D. / Dª:	Octavio Puche Riart

En Madrid, a 20 de junio de 2013

EL COORDINADOR DEPARTAMENTAL

VISTO BUENO DE SECRETARÍAS DE

El/la alumno/aha presentado el Proyecto Fin de Carrera y cumplimentado la tramitación correspondiente.

En Madrid, a 4 de Julio de

Por Secretaría,

VISTO BUENO DEL SUBDIRECTOR DE ORDENACIÓN ACADÉMICA

El Subdirector de Ordenación Académica y Departamentos ha nombrado el Tribunal formado por los Sres.:

Presidente:	D. / Dª:	
Vocal:	D. / Dª:	
Secretario:	D. / Dª:	

Que se reunirán para el acto de defensa el día: 16 de julio. A las 10:30 horas

En Madrid, a de de

EL SUBDIRECTOR

TITULACIÓN: INGENIERO GEÓLOGO

Autorizo la presentación del proyecto

Inspección técnica de la presa Santa Marta, mediante medidas subacuáticas de potencial espontáneo

Realizado por

Vitelia Elizabeth Barragán Galeas

Dirigido por

D. Alexander Rozycki Bochniewicz

Firmado: **Prof. D. Alexander Rozycki Bochniewicz**

Fecha:

ÍNDICE

RESUMEN Y ABSTRACT.....	VI
DOCUMENTO 1: MEMORIA	
1 OBJETIVOS Y ALCANCE.....	2
2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA TRATADO.....	3
3 ANTECEDENTES.....	7
3.1 PRESAS DE MATERIALES SUELTOS.....	7
3.1.1 Tipología.....	9
3.1.2 Descripción de elementos constitutivos de la presa.....	13
3.1.3 Control de filtraciones.....	13
3.2 ACCIDENTES Y FALLOS.....	16
3.2.1 Estadísticas.....	17
3.2.2 Principales causas.....	19
a) Erosión interna: tubificación.....	19
b) Fisuración de núcleos.....	22
4 METODOLOGÍA UTILIZADA.....	26
4.1 POTENCIAL ESPONTÁNEO (SELF POTENTIAL, SP).....	27
4.1.1 Potencial electrocinético o potencial de flujo.....	27
4.1.2 Anomalías de potencial espontáneo en presencia de filtros horizontales..	32
4.2 INSTRUMENTACIÓN.....	35
4.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO DE CAMPO.....	40
4.3.1 PLANIFICACIÓN DE CAMPAÑA.....	40
4.3.2 CAMPAÑA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	40
4.4 INTERPRETACIÓN DE DATOS.....	44
4.4.1 Interpretación cualitativa.....	44
4.4.2 Interpretación cuantitativa.....	44
5 DESARROLLO DE CASO DE APLICACIÓN.....	49
5.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	49
5.2 TRABAJO DE CAMPO.....	52
5.3 PROCESADO DE DATOS.....	52

6	RESULTADOS	54
7	INTERPRETACIÓN	57
8	CONCLUSIONES.....	57
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
	9.1 LIBROS, ARTÍCULOS Y TESIS	59
	9.2 INTERNET.....	61
	9.3 TEXTOS LEGISLATIVOS	62

DOCUMENTO 2: ESTUDIO ECONÓMICO

1.	ESTUDIO ECONÓMICO	64
1.1	ANÁLISIS DE COSTOS PARCIALES.....	64
a)	Campana de adquisición de datos	64
b)	Interpretación de datos.....	65
1.2	RESUMEN DE COSTO TOTAL DEL PROYECTO	65

DOCUMENTO 3: ANEXOS

A.	DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE P.E.v1	68
B.	ESTADÍSTICAS DE PRESAS EN ESPAÑA	76
C.	MAPA DE ANOMALÍAS DE SP EN LA PRESA SANTA MARTA.....	78

ÍNDICE DE FIGURAS

DOCUMENTO 1: MEMORIA

Figura 2.1: Presa romana Proserpina, situado a 4 km del centro urbano de Mérida-España, forma un pequeño embalse a través del río Aljucén.	4
Figura 2.2: Usos de los embalses a nivel mundial.....	5
Figura 3.1: Plano de una típica presa de materiales sueltos y estructuras asociadas	8
Figura 3.2: Sección tipo de varias presas de materiales homogéneos	10
Figura 3.3: Sección tipo de presas heterogéneas	11
Figura 3.4: Sección tipo de presa con pantalla impermeabilizadora de concreto.....	12
Figura 3.5: Tipología de presas de materiales sueltos en España.....	12
Figura 3.6: Configuración de la red de corriente en una presa homogénea.....	14
Figura 3.7: Drenaje en una presa de materiales sueltos homogénea	15
Figura 3.8: Condiciones de flujo actuando en drenes.....	15
Figura 3.9: Modelo de desarrollo de un fallo por tubificación en una presa de materiales	20
Figura 3.10: Modelo de desarrollo de un fallo por tubificación en la dentro de la base de una presa de materiales sueltos	21
Figura 3.11: Modelo de desarrollo de un fallo por tubificación en la base de una presa de materiales sueltos	22
Figura 3.12: Típicas fracturas transversales debido a asientos diferenciales.....	23
Figura 3.13: Fracturas longitudinales debido a asientos diferenciales sobre cimiento discontinuo.....	24
Figura 3.14: Fracturas longitudinales debido a asientos diferenciales entre las zonas de la presa.....	24
Figura 3.15: Fisuras internas en una presa de materiales sueltos debido a asientos diferenciales	25
Figura 4.1: Representación esquemática del flujo de un electrolito a través de un medio poroso, formación de la doble capa de Helmholtz, origen del potencial electrocinético. ..	28
Figura 4.2: Potencial de flujo como función de la diferencia de presión para seis tamaños de grano usando una solución de NaCl de 10^{-3}	29

Figura 4.3: $V/\Delta P$ como función de la permeabilidad	30
Figura 4.4: $V/\Delta P$ como función de la concentración de NaCl en agua destilada	31
Figura 4.5: Mapa de isovalores de SP en la cara aguas debajo de la presa Karkidan ...	33
Figura 4.6: Campo de electro-filtración cerca de un filtro horizontal en un medio homogéneo con una infiltración uniforme	34
Figura 4.7: Mapa de isovalores de SP cerca del dren de en la ladera de la colina Blinovsky	34
Figura 4.8: Electrodo no polarizable de sulfato de cobre	35
Figura 4.9: Cable multiconductor	36
Figura 4.10: Bote, para llevar el cable con los electrodos desde la orilla hasta una distancia deseada dentro del embalse	37
Figura 4.11: Equipo de testificación geofísica adaptado a las medidas de potencial espontáneo	38
Figura 4.12: Detalle del equipo de testificación para medidas subacuáticas de potencial espontáneo	39
Figura 4.13: Esquema medidas de SP, método del gradiente	41
Figura 4.14: Esquema de medida de SP, método de base fija	41
Figura 4.15: Esquema de medidas subacuáticas de potencial espontáneo usando equipo de testificación geofísica.....	42
Figura 4.16: Modelización geométrica de la anomalía producida por un cilindro finito (tubificación).....	46
Figura 4.17: Perfil de potencial espontáneo para la presa El Tejo	47
Figura 4.18: Perfil de potencial espontáneo para la presa CBH	48
Figura 5.1: Plano de la presa Santa Marta.	50
Figura 5.2: Sección tipo del cuerpo de presa Santa Marta.....	51
Figura 5.3: Sección del cuerpo de presa Santa Marta en base a los datos procedentes de los sondeos mecánicos	51
Figura 6.1: Potencial espontáneo subacuático medido en la Presa Santa Marta	54
Figura 6.2: Componente regional del campo de potencial espontáneo subacuático medido en la Presa Santa Marta.....	55

Figura 6.3: Componente residual del campo de potencial espontáneo subacuático medido en la Presa Santa Marta.....	56
Figura7.1: Representación en 3D de la componente residual del potencial espontáneo subacuático medido en la presa Santa Marta. (Construido con SURFER).....	57

ÍNDICE DE TABLAS

DOCUMENTO 1: MEMORIA

Tabla 1: Descripción de los elementos de una presa de materiales sueltos	9
Tabla 2: Estadísticas de fallos de grandes presas de materiales sueltos construidas a partir de 1986.....	17
Tabla 3: Estadísticas de fallos y accidentes por erosión interna y tubificación en presas de materiales sueltos construidas a partir de 1986.....	18
Tabla 4: Tiempo de fallos por erosión interna y tubificación en relación a la edad de la presa	19

DOCUMENTO 2: ESTUDIO ECONÓMICO

Tabla 1: Costos de campaña de adquisición de datos	64
Tabla 2: Costos de campaña de interpretación de datos	65
Tabla 3: Costo total del proyecto	65

RESUMEN

Las filtraciones de agua, con la consecuente erosión interna en presas de materiales sueltos, es una de las causas principales de fallos y accidentes. Las consecuencias del fallo de estas estructuras, pueden ser, pérdidas tanto económicas como de vidas humanas. Por lo cual en este proyecto se describe la aplicación de un método de prospección geofísica no invasiva, medidas de potencial espontáneo, para detectar posibles filtraciones de agua en el cuerpo de la presa.

El flujo de agua a través de un material poroso y permeable crea un campo de potencial eléctrico de una magnitud de decenas o centenas de milivoltios, el cual puede ser medido y así detectar infiltraciones de agua en presas de materiales sueltos. Se ha aplicado esta técnica en la Presa Santa Marta, y mediante una interpretación cualitativa de los datos medidos, tomados en la cara aguas arriba de la presa (medidas subacuáticas), se logró identificar un flujo de agua vertical y otro subhorizontal, que estaban ingresando en el cuerpo de la presa, los cuales estaban causando erosión interna y la formación de una tubificación.

ABSTRACT

Water leakages and internal erosion in embankment dams is one of the main causes of failures and accidents. The consequences of the failure of these structures may cause losses both, economical and of human lives. Therefore, this project describes the application of a noninvasive geophysical prospecting method, self potential measurements, to detect water leakages in the body of the dam.

Water flow through a porous and pervious medium creates an electric potential field with a magnitude of tens or hundreds of millivolts, which can be measured and thus detect water leakage in embankment dams. This technique has been applied to the Santa Marta dam, and through a qualitative self potential data interpretation, of the measurements obtained in an upstream direction (underwater measurements), a vertical and sub horizontal water flows entering in the body dam were identified, which were causing internal erosion and developing a piping.

**INSPECCIÓN TÉCNICA DE LA PRESA SANTA MARTA,
MEDIANTE MEDIDAS SUBACUÁTICAS DE POTENCIAL
ESPONTÁNEO**

DOCUMENTO 1: MEMORIA

1 OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo de este proyecto es aplicar una técnica de prospección geofísica no invasiva (potencial espontáneo, PE), para realizar una inspección técnica en la presa de materiales sueltos Santa Marta y así detectar posibles filtraciones de agua en el cuerpo de la presa.

Las filtraciones de agua en este tipo de presas pueden erosionar sus materiales y producir una rotura en la presa, lo cual llevaría al colapso de la estructura, ocasionando grandes pérdidas tanto económicas como de vidas humanas, de allí la gran importancia de prevenir estos accidentes mediante inspecciones regulares, con el fin de detectar a tiempo estas filtraciones y tomar las medidas correctivas correspondientes.

La metodología de trabajo en cada presa es diferente, depende del tipo de presa, pero generalmente para una interpretación más precisa de los resultados de las medidas de potencial espontáneo, se requiere datos hidrogeológicos y de resistividad del agua del embalse.

Además se suelen tomar medidas de potencial espontáneo tanto en la cara aguas arriba como aguas abajo de la presa y en los alrededores de la misma.

En este proyecto solo se evaluará los resultados de los datos obtenidos en la cara aguas arriba de la presa (medidas subacuáticas).

El contenido de este documento empieza con una revisión de las características de las presas de materiales sueltos, las causas principales de fallos, accidentes y sus consecuencias. Después se detalla brevemente los fundamentos físicos y teóricos que gobiernan el fenómeno de potencial espontáneo, la metodología de campo para la toma de medias subacuáticas de potencial espontáneo, y se finaliza con la aplicación de esta técnica en un caso en particular, llegando solo a una interpretación cualitativa de los datos medidos en la presa Santa Marta.

2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA TRATADO

El agua, es un elemento esencial para la vida. A más de satisfacer las necesidades básicas del ser humano, es un recurso necesario para el desarrollo económico de una sociedad, actividades como la agricultura, pesca, generación de energía, industrias, dependen en gran medida de este recurso.

Aunque las tres cuartas partes de la superficie de la Tierra se encuentran cubiertas de agua, solo un 3% de su volumen es dulce, y casi el 2% se encuentra formando casquetes de hielo en los polos, dejando así tan solo un 1% en estado líquido que se encuentra en ríos y lagos, y puede ser aprovechado por el ser humano.

Generalmente las fuentes de agua se encuentran lejos de los asentamientos humanos, por lo que el acceso a este recurso para su aprovechamiento se ha convertido en una problemática. Las aguas subterráneas son, con mucho, la fuente más abundante y fácilmente disponible de agua dulce, seguido de lagos, embalses, ríos y humedales.

Si bien en Europa, actualmente no hay una carencia general de agua, la contaminación de las fuentes superficiales y la sobreexplotación de acuíferos, están afectando su calidad. Según el Global Innovation Outlook (GIO), cada vez que interactuamos con el agua cambiamos su flujo natural, su estado, su utilidad o disponibilidad. Así, aunque la cantidad total de agua en el planeta no ha variado, la naturaleza del agua sí está cambiando.

Además de esto, la situación se ha visto agravada por el aumento de la demanda de agua a nivel mundial, debido principalmente al crecimiento acelerado de la población, durante el siglo veinte la población mundial se triplicó, en tanto que la utilización del agua para fines humanos se multiplicó por seis.

Por lo expuesto anteriormente, la gestión eficiente los recursos hídricos, es decir, garantizar su calidad, cantidad y acceso, es de vital importancia.

Para tratar de afrontar este problema, la Comisión Europea ha creado la “Directiva Marco relativa al agua, 2000”, un organismo regulador para el uso sostenible del agua. Además de esto se han desarrollado algunas técnicas no convencionales como la desalinización de agua de mar y la recarga de los acuíferos.

La desalinización de agua de mar es una técnica que se ha venido desarrollando con éxito en algunos países, entre ellos España. En 2006, en España existían más de 700 desaladoras, La primera desaladora de agua de mar se instaló en Lanzarote (Canarias) en el año 1964. Pero hasta ahora no parece ser muy rentable debido a la gran inversión de energía que requiere este proceso.

En cuanto a garantizar el abastecimiento de agua durante todo el año, los embalses han sido la mejor alternativa. Los embalses son el único modo de abastecer y satisfacer las demandas de agua, acumulando agua en épocas de abundancia para transferirla hacia las épocas de sequía o mayor consumo y baja disponibilidad. De esta manera los embalses son un aporte significativo para la regulación y gestión eficiente de los recursos hídricos.

La creación de embalses artificiales, es una técnica muy antigua, se han venido construyendo embalses desde hace más de 5000 años, en España se conocen presas del período romano, entre ellas las de Proserpina (19m de altura) y Cornalvo (24m de altura) que aún están en funcionamiento. (Figura 2.1)



Figura 2.1: Presa romana Proserpina, situado a 4 km del centro urbano de Mérida-España, forma un pequeño embalse a través del río Aljucén. Fuente: Murias Arturo, 2005. Disponible en: http://www.godesalco.com/imagen/plata/proserpina_presa

El régimen hidrológico de España se caracteriza por una gran irregularidad. El tránsito continuo de la sequía a la inundación ha sido un estímulo histórico para la construcción de infraestructuras hidráulicas.

Actualmente en España el número de grandes presas supera las 1.200 con una capacidad aproximada de 56.000 hm³. De éstas, unas 450 son anteriores a 1960 y más de 100 ya existían en el año 1915.

A nivel mundial hay más de 50000 grandes presas, y se calcula que hay más de un millón de pequeñas presas, con lo cual se estima un volumen total en embalses artificiales de 7000 km³.

La importancia de los embalses radica en sus múltiples fines, siendo además un factor importante para el desarrollo económico-social de un país; se aprovecha el agua almacenada para regadío, generación de energía eléctrica, suministro para uso doméstico e industrial, permiten controlar las inundaciones al contener los caudales extremos de las avenidas o crecidas (laminación de avenidas), creación de espacios para esparcimiento y deportes acuáticos.

En la figura 2.2, se presenta un gráfico que muestra los diferentes usos que tienen los embalses a nivel mundial:

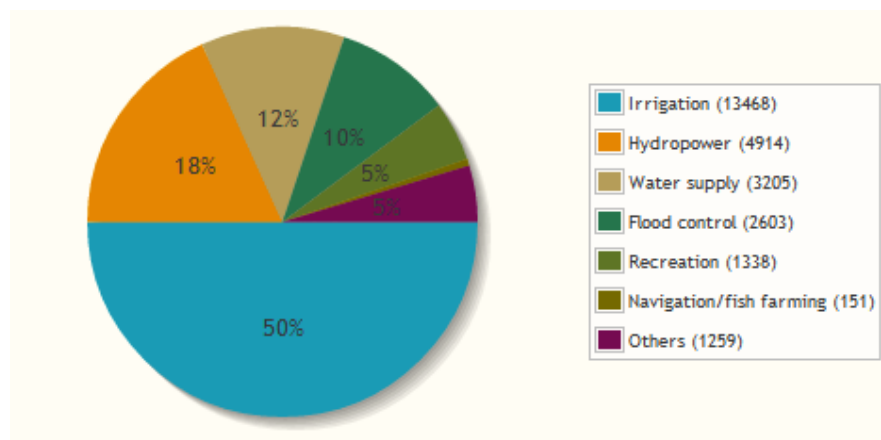


Figura 2.2: Usos de los embalses a nivel mundial

Fuente: ICOLD, 2013

Siendo las presas, obras tan importantes, requieren una alta garantía de seguridad, para evitar las graves consecuencias que se derivarían de un eventual fallo: la misma pérdida de la inversión efectuada en ella, la cesación del servicio (riegos, abastecimientos, regulación, etc.) y, sobre todo los daños directos producidos por el vaciado rápido del agua retenida, normalmente muy superiores al coste de la presa, con la posible afección de vidas humanas. La rotura de la presa de Teton (USA) en 1976, causó unos daños diez veces superiores al coste de la construcción de la presa.

Una presa se encuentra sometida a agentes naturales deteriorantes y peligrosos: lluvia, hielo, temperaturas extremas, acción del agua vertiendo sobre ellas, asentos del cimiento, etc. De allí que es indispensable observar su comportamiento ante estas acciones para detectar a tiempo posibles fallos.

Las presas de materiales sueltos, al estar construidas con materiales naturales, tales como escollera y tierra, son mucho más vulnerables a la acción erosiva del agua.

Según estadísticas de la Comisión Internacional de Grandes Presas (siglas en inglés, ICOLD), realizadas en los años 1974-1995, una de las principales causas de fallos en las presas es debida a la erosión interna producida por filtraciones de agua a través del cuerpo de la presa.

Pequeñas filtraciones de agua pueden erosionar los materiales de las presas creando canales preferenciales de agua, llamado tubificaciones, que pueden llevar al colapso de la estructura.

Estas pequeñas filtraciones pueden ser detectadas usando la técnica de prospección geofísica de potencial espontáneo. La ventaja de este método radica en su capacidad de detectar estas filtraciones en su estado muy inicial, dando así tiempo para corregir estas infiltraciones y así evitar futuros accidentes en la presa.

3 ANTECEDENTES

Antes de explicar la aplicación del método de potencial espontáneo, se describirá brevemente en este capítulo, algunas características importantes de las presas de materiales sueltos, su configuración, tipología, y principales causas de fallos, conocimientos generales que son importantes conocer al momento de aplicar el método de potencial espontáneo en este tipo de presas.

3.1 PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

Las presas de materiales sueltos, son terraplenes artificiales construidos con varios fines: contener el agua y formar un embalse que almacenará el agua para su posterior aprovechamiento, elevar el nivel del agua y así poder derivarse por una conducción (creación de altura), o para amortiguar (laminar) las puntas de las crecidas.

En la denominación genérica de presas de materiales sueltos se incluyen todas las que se construyen con elementos naturales, tales como, escollera, gravas, arenas, limos, arcillas y suelo en general.

Cuando el material predominante (>50%) es la piedra gruesa se denominan presa de escollera, y cuando más del 50% de los materiales son térreos o mezclados con gravas o arenas, se denominan presas o diques de tierras. En general, la denominación genérica es más apropiada, puesto que las presas suelen estar formadas por varios materiales.

Los materiales de estas presas se emplean casi tal y como se encuentran en la naturaleza, sin más elaboración artificial que una elemental clasificación y un apisonado. Por lo que resulta en principio más económico que las de hormigón; como además son más adaptables a todo tipo de terrenos, pues la falta de rigidez de sus materiales los hace adaptables a una cimentación térrea similar a ellos. Motivo por el cual, este tipo de presas fueron las primeras en construirse y las más utilizadas en la antigüedad.

Estas presas suelen tener componentes permeables en alto grado (gravas, arena, escollera) por lo que necesitan un elemento para cumplir la función de impermeabilidad. El elemento impermeabilizante es fundamental en cuanto al funcionamiento hidráulico

interno, esencial en estas presas, y puede ser natural (arcilla, limo) o artificial (hormigón, betún, plástico o acero).

Según las estadísticas del registro de ICOLD de 2003, con datos hasta 2002, las presas de materiales sueltos a nivel mundial representan la mayoría con 71%, de las cuales el 88% son de tierra. En España las presas de materiales sueltos representan el 27%, del cual el 55% son presas homogéneas de tierra.

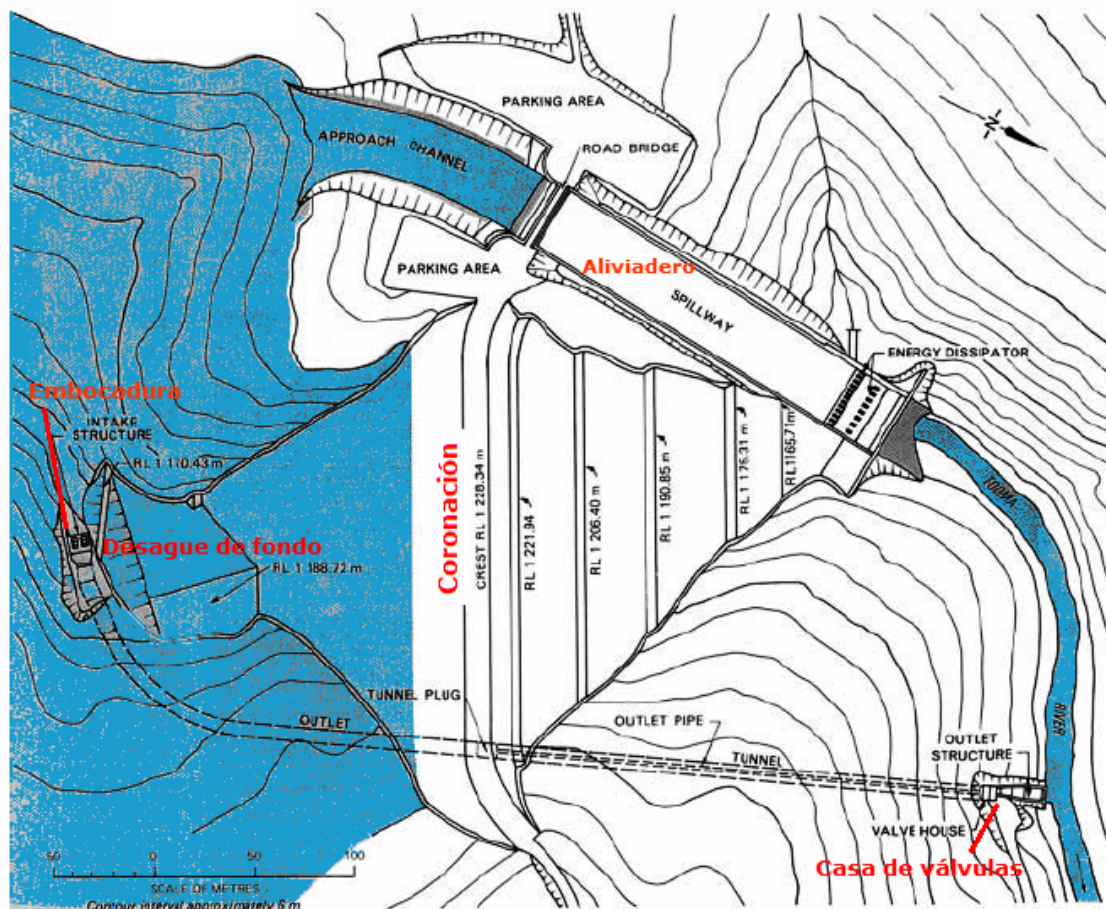


Figura 3.1: Plano de una típica presa de materiales sueltos y estructuras asociadas.

Fuente: Adaptada de Fell, 2005

3.1.1 Tipología

Según el material de construcción de la presa se clasifica en: presas homogéneas, presas heterogéneas, y presas con pantalla o diafragma.

A continuación se muestra la sección tipo de los diferentes tipos de presas, y en la tabla 1 se detalla la función de los elementos que forman la presa y están enumerados en las figuras.

Tabla 1: Descripción de los elementos de una presa de materiales sueltos

ZONA	DESCRIPCIÓN	FUNCIÓN
1	Núcleo de tierra	Controla la filtración en la presa
2 ^a	Filtro fino (o dren)	Controla erosión de la zona 1 por filtración de agua Controla erosión de la base de la presa (dren horizontal) Controla la formación de presión de poros en la cara río abajo cuando se usa como un drenaje vertical
2B	Filtro grueso (o dren)	Controla la erosión de la zona 2A Descarga el agua filtrada recogida en el dren vertical u horizontal
2C	Filtro río arriba	Controla la erosión de la zona 1
2C	Filtro bajo escollera	Controla la erosión de la zona 1
2D	Capa fina de amortiguación	Provee de soporte uniforme para la cara de concreto, limita fugas en caso de fisuras en la cara de cemento.
2E	Capa gruesa de amortiguación	Provee una capa uniforme para soportar la cara de concreto. Previene erosión de la zona 2D en caso de fugas en las caras.
1-3	Tierra-relleno de roca	Provee estabilidad y tiene alguna capacidad para controlar la erosión.
3 ^a	Relleno de roca	Provee estabilidad, comúnmente drena libremente para permitir la descarga de filtraciones bajo la presa. Previene erosión de la zona 2B
3B	Relleno de roca gruesa	Provee estabilidad, generalmente drena libremente para permitir la descarga de filtraciones bajo la presa.
4	Escollera (rip rap)	Controla la erosión causada por las olas en la cara río arriba de la presa, y puede ser usada para controlar la erosión en la punta de la base río abajo.

Fuente: Fell, 2005

a) **Presas de material uniforme impermeable, o presas homogéneas.**

El material resistente que le da peso a la estructura, es también impermeable; arcillas o limos, o mezcla de arenas o gravas con alta proporción de finos. Se dan diferentes variaciones, dependiendo de la forma de controlar las filtraciones y la ubicación de los drenes en la presa.

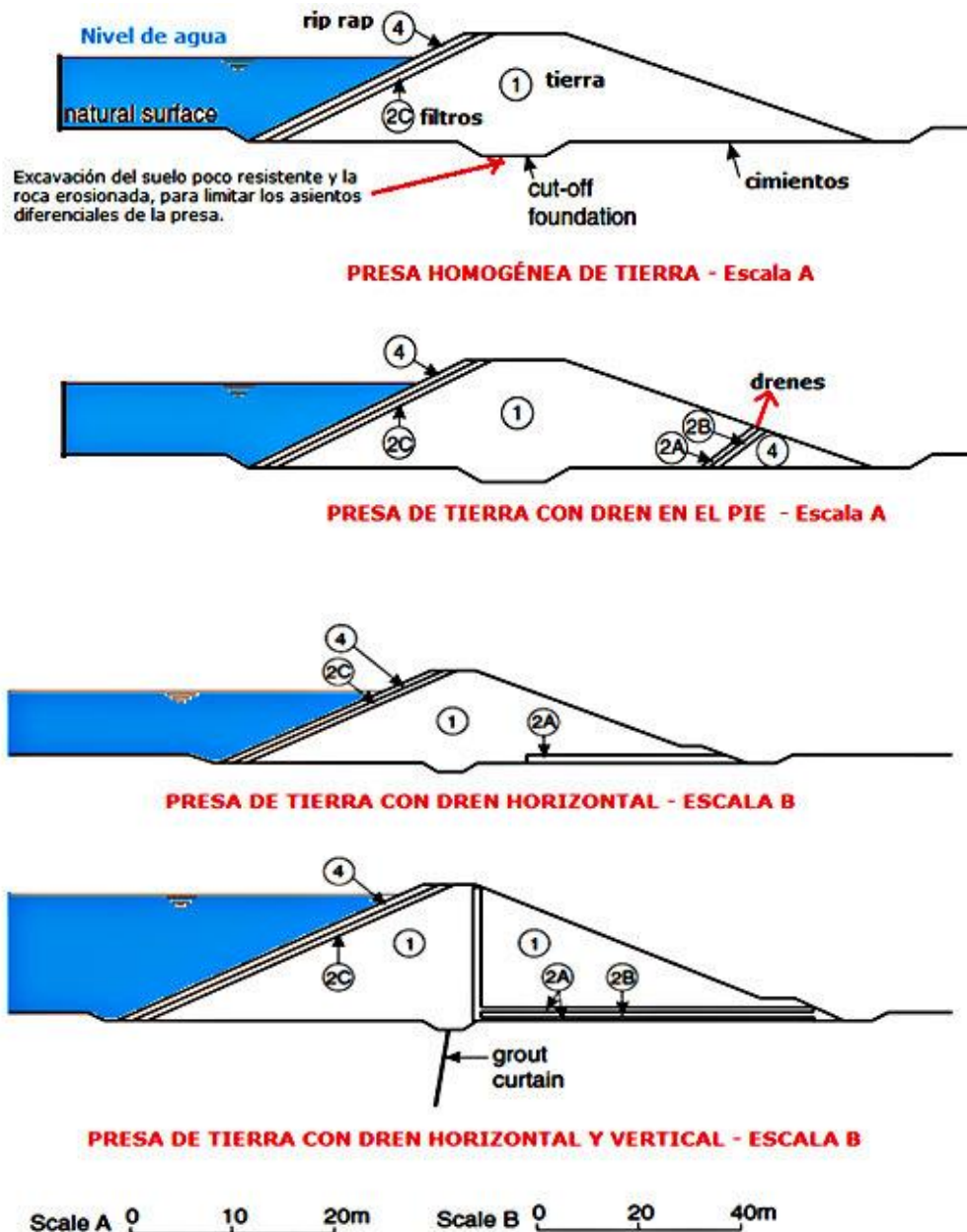


Figura 3.2: Sección tipo de varias presas de materiales sueltos, homogéneas.

Fuente: Adaptada de Fell, 2005

a) Presas de materiales heterogéneos

Son las más frecuentes, y tienen la ventaja de emplear óptimamente los materiales próximos disponibles, distribuyéndolos según sus características. Los materiales más permeables se usan como elementos estabilizadores, por su peso, los más finos se usan para lograr un núcleo impermeable, otros se utilizan como elementos drenantes o para establecer capas de transición. El núcleo suele estar en el centro, en posición vertical o inclinada aguas arriba.

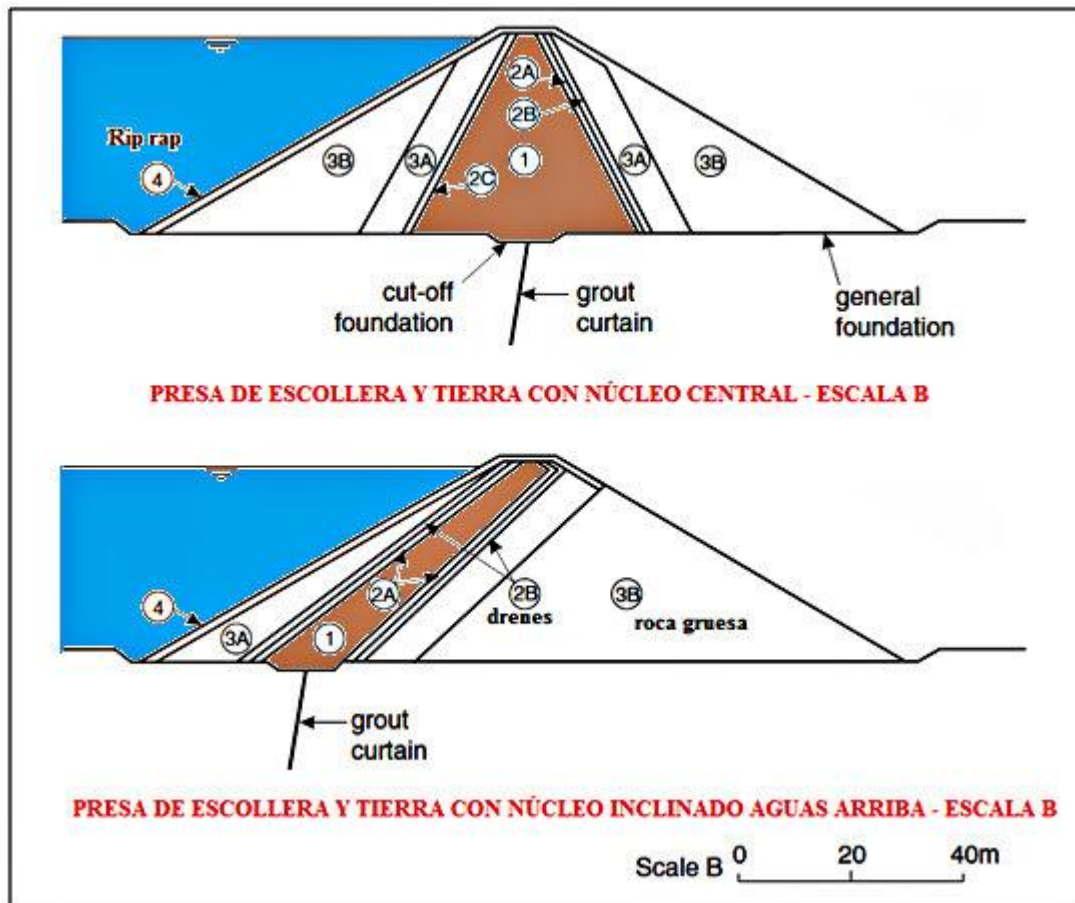


Figura 3.3: Sección tipo de presas de materiales sueltos, heterogéneas.

Fuente: Adaptada de Fell, 2005

b) Presas con pantalla o diafragma

Cuando no se encuentra cerca de la presa material impermeable natural (arcillas o limos) hay que acudir a una pantalla artificial impermeabilizadora que se coloca sobre el talud aguas arriba o en el centro del dique (diafragma).

Las pantallas más usadas son las de hormigón armado y hormigón bituminoso. También se han empleado pantallas de acero y material polimérico.

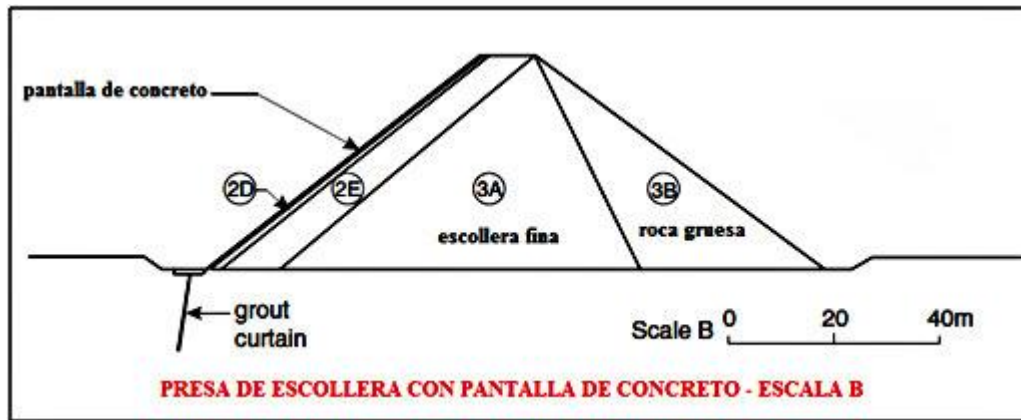


Figura 3.4: Sección tipo de presa con pantalla impermeabilizadora de concreto.

Fuente: Adaptada de Fell, 2005

En la figura 3.5 se representa la proporción de los diferentes tipos de presas de materiales sueltos que existen en España.

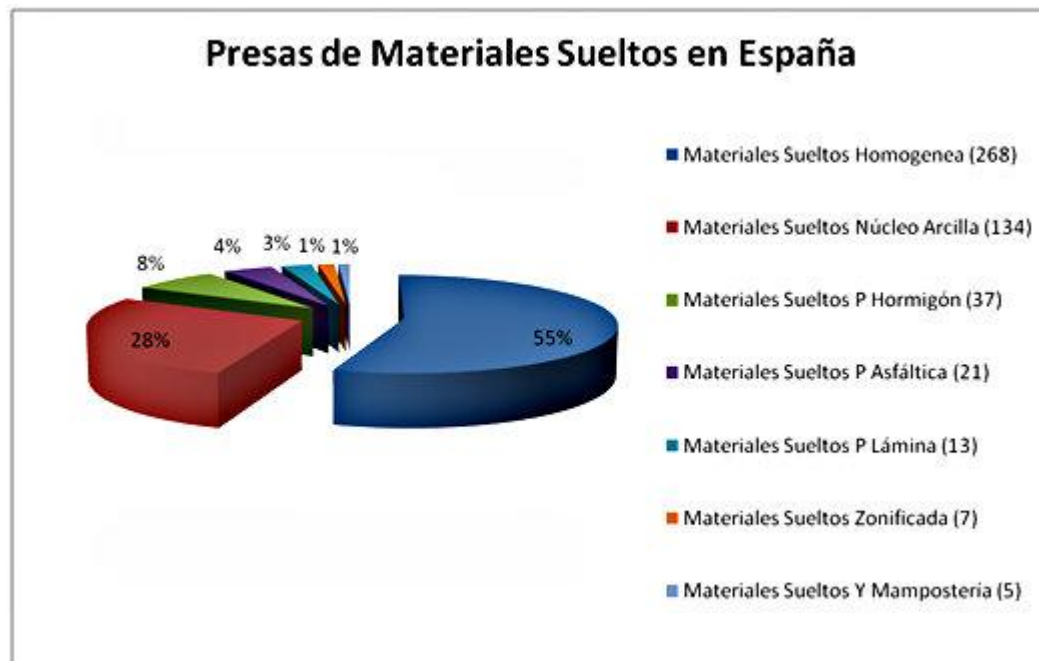


Figura 3.5: Tipología de presas de materiales sueltos en España

Fuente: Estadísticas SPANCOLD, 2012

3.1.2 Descripción de elementos constitutivos de la presa

a) Aliviadero

El aliviadero es un órgano de desagüe, su principal función es derivar y transportar el agua sobrante, anulando o reduciendo su energía al reintegrarla nuevamente al cauce del río, para evitar perjuicios a la propia presa y a los bienes y personas situados aguas abajo. En las presas de materiales sueltos el aliviadero es una estructura aparte, en principio, debido a la debilidad de los materiales, que no son capaces de resistir la acción erosiva del agua en movimiento. (Ver Figura 3.1)

b) Tomas de explotación

Las tomas son las estructuras hidráulicas que permiten retirar el agua del embalse para conducirla por gravedad a la planta de tratamiento, estación de bombeo, abastecimiento o salto hidroeléctrico.

c) Desagüe de fondo

Además del aliviadero de superficie, la presa debe tener otros desagües a ciertas profundidades. El desagüe de fondo es aquel situado por debajo de las tomas de explotación, tiene la función de evacuar el agua sobrante de las avenidas, y permite bajar el nivel de agua del embalse cuando se requiere alguna reparación en la presa.

3.1.3 Control de filtraciones

El flujo de agua infiltrada a través de una presa de materiales sueltos o de su cimiento produce los siguientes efectos:

- Pérdida de agua, que suele ser el menos importante y más fácil de controlar.
- Crea presiones internas desestabilizadoras. Disminuye la cohesión y resistencia al rozamiento de los materiales.
- Lavado de materiales finos, el agua tiende a arrastrarlos, con el consiguiente peligro de erosión interna progresiva. Este fenómeno se llama tubificación (piping).

La tubificación es, después del vertido sobre la presa, la causa más importante de accidentes o roturas de este tipo de presas. Además, el más difícil de controlar de los tres enunciados.

Estas filtraciones se controlan mediante drenes y piezómetros.

a) Dren

El dren es un dispositivo formado de material permeable cuya función principal es conducir hacia afuera del cuerpo de la presa, el agua que se infiltra en ella. Ya que caso contrario esta agua infiltrada podría aumentar las presiones intersticiales, erosionar el pie del talud aguas abajo o ir erosionando progresivamente el interior de la presa formando tubificaciones. Los drenes son esenciales para la seguridad de la presa.

En la figura 3.6 se muestra la configuración de la red de corriente de agua a través del cuerpo de una presa homogénea cuando no hay una estructura drenante dentro de ella.

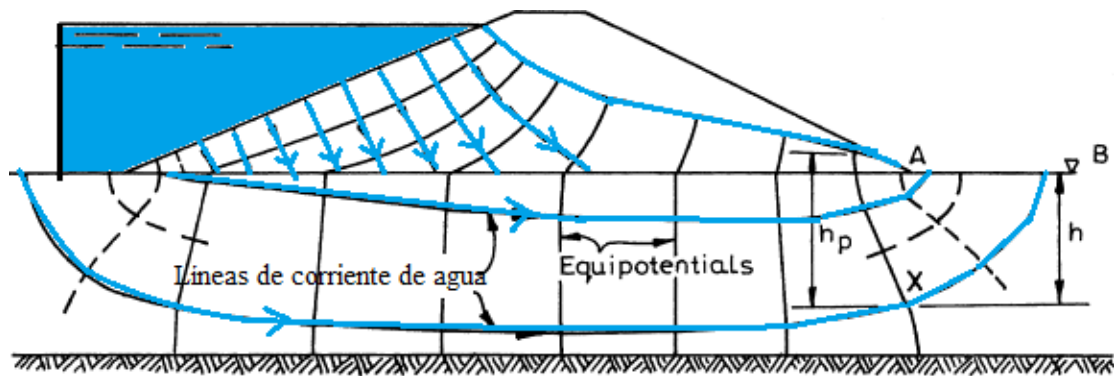


Figura 3.6: Configuración de la red de corriente en una presa homogénea.

Fuente: Adaptada de Fell, 2005

Y a continuación en la figura 3.7, se muestra el efecto que causa un dren ubicado en diferentes posiciones dentro del cuerpo de una presa homogénea. Baja el nivel freático, lo aleja del talud aguas abajo, disminuyendo el gradiente de presión en esa zona evitando la erosión y reduciendo las presiones intersticiales.

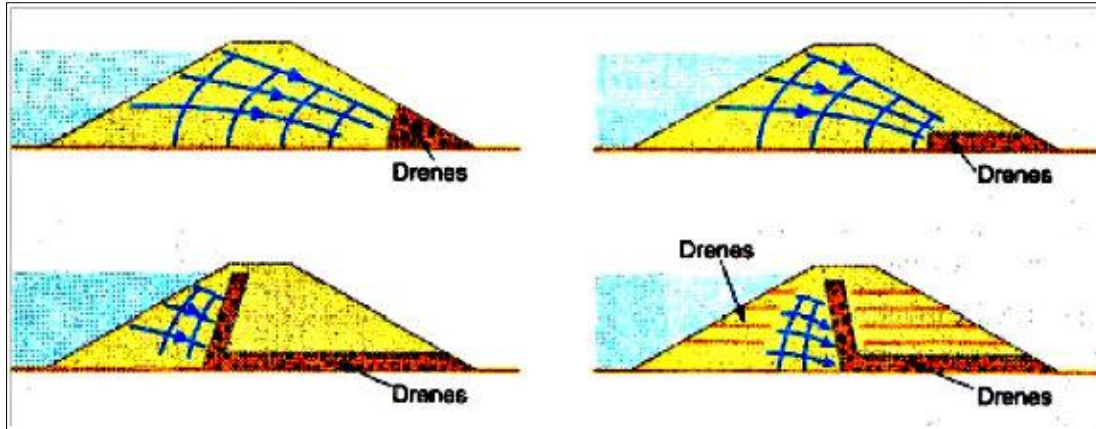


Figura 3.7: Drenaje en una presa de materiales sueltos homogénea

Fuente: Villarino, 2013

En la figura 3.8, se muestra el cambio de las condiciones de flujo dentro de la presa debido a la presencia de diferentes drenes en un presa heterogénea.

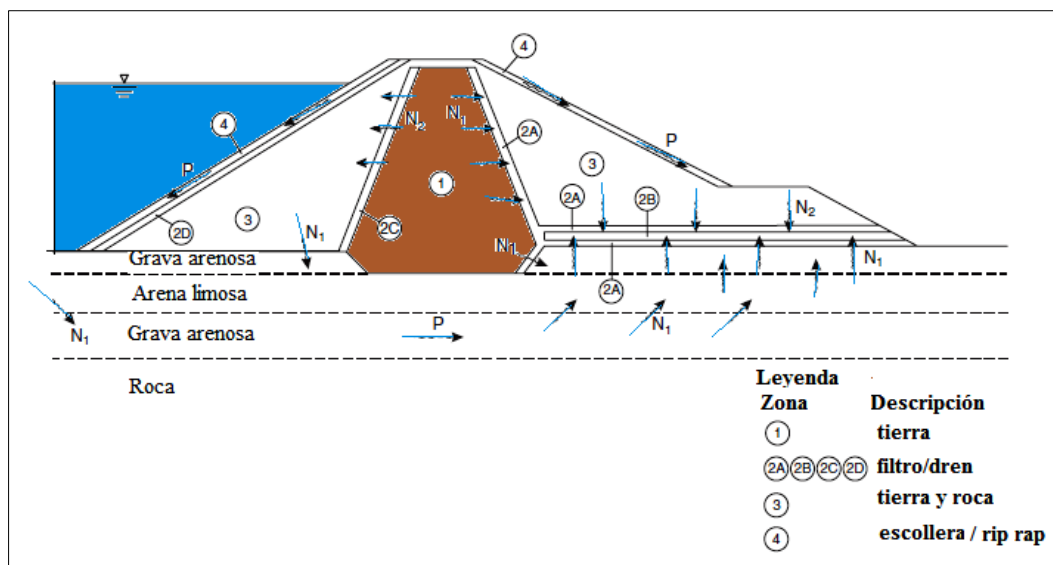


Figura 3.8: Condiciones de flujo actuando en drenes, P = flujo paralelo a la interface; N1 = flujo normal a la interface, condiciones de alto gradiente; N2 = flujo normal a la interface, condiciones de bajo gradiente.

Fuente: Adaptada de Fell, 2005

b) Piezómetros

Los piezómetros son dispositivos que se utilizan para medir la presión del agua y el nivel de la superficie freática causada por la infiltración del agua a través de porciones relativamente permeables del terraplén y la base.

Dichas mediciones pueden llegar a ser críticas debido a posible tubificación u otras condiciones de inestabilidad o infiltración inducida, tales como elevaciones excesivas de la presión hidrostática. Los piezómetros nos dan información de la eficacia de la red de drenaje dentro de la presa.

3.2 ACCIDENTES Y FALLOS

La Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD), distingue entre accidentes, fallos, e incidentes.

Accidente: Se han definido tres categorías.

- Accidente Tipo 1 (A1): Suceso ocurrido en una presa que ha estado en uso durante algún tiempo pero el cual ha sido evitado hasta convertirse en un fallo.
- Accidente Tipo 2 (A2): Suceso ocurrido durante el relleno inicial del reservorio del reservorio y el cual ha sido evitado hasta convertirse en fallo.
- Accidente Tipo 3 (A3): Un accidente en una presa durante construcción, asentamientos de los cimientos, deslizamientos de taludes.

Fallo: Colapso o movimiento de una parte de la presa o sus cimientos. En general, un fallo resulta en de la liberación de grandes cantidades de agua, imponiendo riesgos en las personas o propiedades rio abajo (ICOLD, 1995). Dos categorías de fallos son listadas por ICOLD (1974):

- Fallo Tipo 1 (F1): Un mayor fallo que implica el abandono completo de la presa.
- Fallo Tipo 2 (F2): Un fallo el cual en con el tiempo se ha convertido en severo, pero que a pesar de la extensión del daño se ha podido reparar exitosamente, y la presa es puesta en servicio nuevamente.

Incidente: Cualquier fallo o accidente, requiriendo mayores reparaciones.

3.2.1 Estadísticas

ICOLD (1974, 1995), llevo a cabo un extensivo estudio de incidentes en presas, y en base a estos datos, Foster, Fell and Spannagle (1998, 2000a, 2000b), desarrollaron algunas estadísticas sobre el rendimiento histórico de las presas construidas a partir de 1986.

En la tabla 2 se resumen las estadísticas de fallos de las presas de materiales sueltos, durante operación (excluyendo fallos durante construcción), mostrando que después del desbordamiento del agua de la presa (overtopping), la erosión interna y la tubificación (piping) son los más importantes modos de fallos.

Sus datos mostraron que para presas de Australia, Estados Unidos, Canadá y Nueva Zelanda, diseñadas y construidas después de 1930, alrededor del 90% de fallos están relacionados con erosión interna y tubificación.

Tabla 2: Estadísticas de fallos de grandes presas de materiales sueltos construidas a partir de 1986 (Foster et al., 1998, 2000a)

Mode of failure	% Total failures ⁽¹⁾	% Failures pre 1950 ⁽²⁾	% Failures post 1950 ⁽³⁾
Overtopping	34.2	36.2	32.2
Spillway/gate (appurtenant works)	12.8	17.2	8.5
Piping through embankment	32.5	29.3	35.5
Piping from embankment into foundation	1.7	0	3.4
Piping through foundation	15.4	15.5	15.3
Downstream slide	3.4	6.9	0
Upstream slide	0.9	0	1.7
Earthquake	1.7	0	3.4
Totals ⁽³⁾	102.6	105.1	100
Total overtopping and appurtenant works	48.4	53.4	40.7
Total piping	46.9	43.1	54.2
Total slides	5.5	6.9	1.6
Total no. of embankment dam failures	124	61	63

(1) Percentages based on the % of cases where the mode of failure is known.
(2) Percentages are for failures of embankment dams in operation only, i.e. excluding failures during construction.
(3) Percentages do not necessarily sum to 100% as some dams were classified as multiple modes of failure.

Fuente: Fell, 2005

La tabla 3, nos indica que las presas homogéneas son más probables a experimentar fallos que un accidente, lo cual está casi indudablemente relacionado con la ausencia de filtros o ninguna zona de control de erosión y tubificación desde el inicio.

Alrededor del 0.3% de las presas de materiales sueltos tienen fallos por tubificación en el terraplén. Y el 2.5% de las presas de materiales sueltos han experimentado un accidente por tubificación en el terraplén.

Los accidentes por tubificación en el terraplén son más probables en presas con núcleo central y en las que tienen pantalla de concreto.

Por contraste, mientras ha habido algunos accidentes en el núcleo central de presas de tierra y heterogéneas, solamente ha habido uno falló. Esto se debe a que las presas mencionadas, tienen filtros o zonas de transición y alta capacidad de descarga río abajo, así mientras la erosión interna y la tubificación pueden iniciar y progresar hasta formar una fuga, un fallo es improbable.

Tabla 3: Estadísticas de fallos y accidentes por erosión interna y tubificación en presas de materiales sueltos construidas a partir de 1986 (Adaptada de Foster et al., 1998)

Zoning category	Average probability during life of dam ($\times 10^{-3}$)			
	Piping in embankment		Piping in foundation	
	Failures	Accidents	Failures	Accidents
Homogeneous earthfill	16.0	9.2	3.0	11.2
Earthfill with horizontal filter	1.5	0.6	–	3.9
Earthfill with rock toe	8.9	8.0	7.0	3.9
Zoned earthfill	1.2	2.4	0.4	4.6
Zoned earth and rockfill	1.2	7.3	–	7.6
Central core earth and rockfill	<1.1	22.0	–	9.8
Concrete face earthfill	5.3	2.4	10.4	5.8
Concrete face rockfill	<1	3.5	–	–
Puddle core earthfill	9.3	20.7	–	–
Concrete core wall earthfill	<1	8.1	11.8	4.9
Concrete core wall rockfill	<1	21.6	–	–
Hydraulic fill	<1	32.4	15.7	91.8
Zoning unknown	–	–	–	–
All embankment types	3.5	26.8	1.7	6.2

En la tabla 4, podemos observar que un gran porcentaje de presas en las que han ocurrido fallos por tubificación en el terraplén, se han producido después de los 5 años de operación o en durante el primer llenado de la presa.

Tabla 4: Tiempo de fallos por erosión interna y tubificación en relación a la edad de la presa

Time of failure	Piping in embankment (%)	Piping in foundation (%)
During first filling	49	25
During first 5 years operation	16	50
After 5 years operation	35	25

Fuente: Fell, 2005

Esta historia de fracasos y accidentes debido a la erosión interna y la tubificación, fue lo que dio lugar a la incorporación de filtros y las zonas de alta permeabilidad en presas a partir de 1950 y más particularmente en la década de 1970. Sin embargo los filtros y las zonas de drenaje libre son a menudo costosos, por lo que se suele optar por utilizar diseños más simples, tales como presas de tierra homogéneas, particularmente cuando las consecuencias del fracaso son pequeñas.

3.2.2 Principales causas

a) Erosión interna: tubificación

Cuando la circulación de agua a través de la presa o del terreno ocasionan arrastre incontrolado total o parcial de partículas (en general el fenómeno comienza por las finas), se dice que se produce la erosión interna. Ante esta erosión interna, que constituye una gran amenaza para las presas de materiales sueltos, la mejor defensa parece ser los filtros.

Tubificación: es la formación, por erosión progresiva, de un conducto a través de la presa o de su cimiento. De ahí su nombre en inglés (piping).

Al paso de agua a través de la presa o del terreno subyacente se producen fuerzas opuestas de acción y reacción: los granos de áridos se oponen al flujo y hacen perder la energía al agua, y ésta, a su vez, actúa sobre las partículas, tendiendo a moverlas.

Cuando la fuerza actuante es mayor que la resistente, el árido es arrastrado. Las fuerzas resistentes son el peso, la cohesión, el rozamiento y el bloqueo de los granos. Los elementos más finos son menos pesados, cuando están saturados, disminuye su rozamiento y cohesión, todo lo cual les hace más fácilmente arrastrables, y su menor tamaño les permite pasar por los huecos de otros materiales.

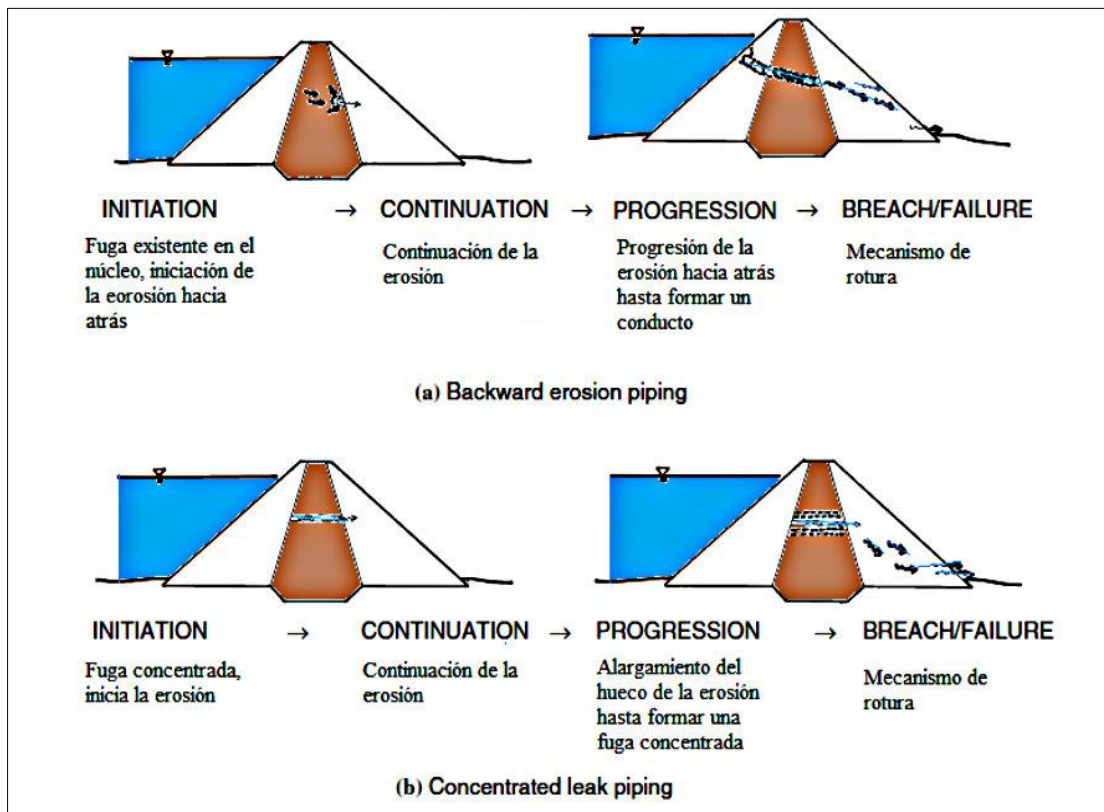


Figura 3.9: Modelo de desarrollo de un fallo por tubificación en una presa de materiales sueltos, a) tubificación por erosión hacia atrás, b) tubificación por fuga concentrada

(Foster, 1999)

Fuente: Adaptada de Fell, 2005

Las causas más importantes que originan la tubificación son las siguientes:

- Ausencia de un filtro aguas abajo
- Madrigueras y túneles de roedores otros animales
- Mal contacto con estructuras de cemento o metálicas
- Fugas desde un conducto situado bajo el terraplén

- Presencia de fracturación o de huecos geológicos en la cimentación
- Fracturación hidráulica
- Flotación de zonas arenosas por la velocidad creada por el incremento de presiones intersticiales
- Licuefacción

Hay zonas más propensas a la iniciación de tubificación: masas mal compactadas, contactos de la presa con obras de hormigón (tomas, conductos, etc.), bordes del núcleo, paramentos de las presas homogéneas no drenadas y zonas débiles o anómalas del sustrato. Estas últimas son más frecuentes, porque la presa puede tener algún defecto de construcción, pero en general no será importante, mientras que el terreno sea en principio heterogéneo y anisótropo, y por ello más propicio a presentar ciertas zonas críticas.

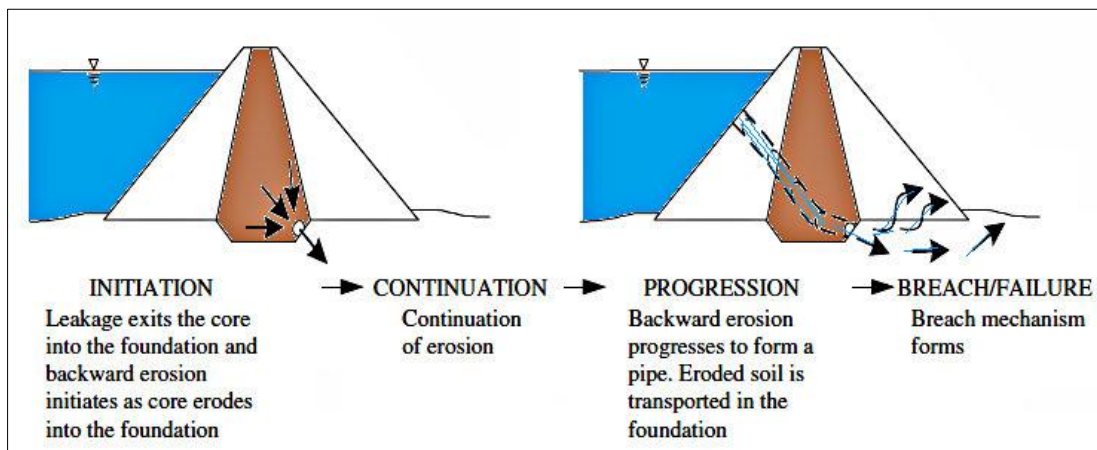


Figura 3.10: Modelo de desarrollo de un fallo por tubificación en la dentro de la base de una presa de materiales sueltos (Foster, 1999)

Fuente: Fell, 2005

La salida de agua borrosa por algún punto suele ser indicio de tubificación (salvo en el primer embalsado, en el que el barro puede proceder de la misma obra).

Cuando el material erosionado es arena fina, es frecuente que se forme una especie de cráter en la salida aguas abajo de la presa, normalmente de 0.5 a 1.0m de altura, con orificio del orden de 1 decímetro o menos, y pueden ser varios o uno solo.

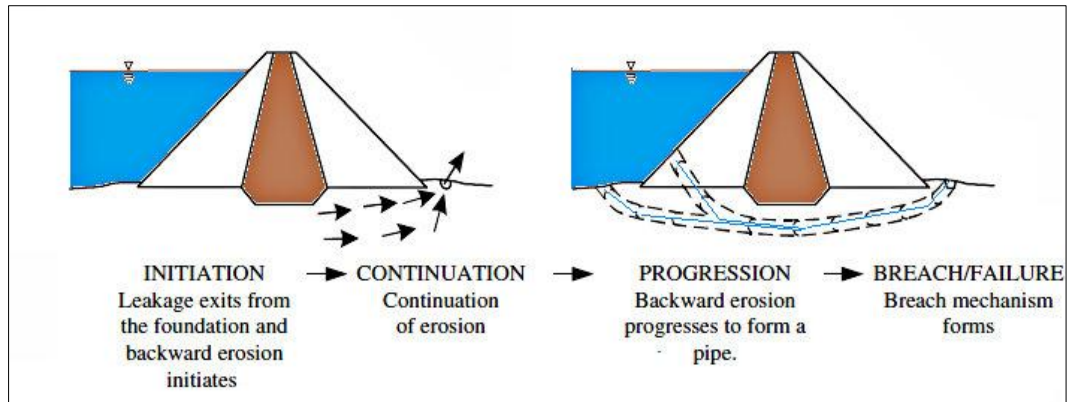


Figura 3.11: Modelo de desarrollo de un fallo por tubificación en la base de una presa de materiales sueltos (Foster, 1999)

Fuente: Fell, 2005

b) Fisuración de núcleos

El núcleo, al que se fía la impermeabilidad de la presa y la liberación de presiones en el espaldón aguas abajo, es un elemento delicado, pues sus características no solo dependen del material, sino de la humedad y otras circunstancias; y su diferencia con el resto de los materiales de la presa da lugar a deformaciones diferenciales, origen de tensiones y consiguientes fisuras que, erosionadas por el paso del agua, pueden llevar a la tubificación. De hecho, es posible que un gran número de las tubificaciones hayan tenido su origen en fisuras del núcleo.

Las fisuras se producen sobre todo en presas simples, de pequeña altura (menos de 30m), pero también se dan en las grandes y bien construidas.

Las fisuras pueden ser exteriores (visibles) o interiores, estas últimas más peligrosas por ignoradas o solo discernibles por observaciones indirectas. Sus orientaciones y dimensiones pueden ser muy variadas, y pueden presentarse dispersas o concentradas en una sola. Normalmente se producen en la parte superior de la presa, a partir de una cierta altura.

- **Fisuras transversales**

Pueden ser verticales o inclinadas, en planos transversales a la coronación. Son las más peligrosas, porque pueden llegar a poner en comunicación el embalse con el paramento aguas abajo.

Este tipo de grietas se forman en la coronación por asientos diferenciales en diferentes secciones a lo ancho de la cerrada. Si las grietas transversales son profundas, pueden crear un camino directo de filtración.

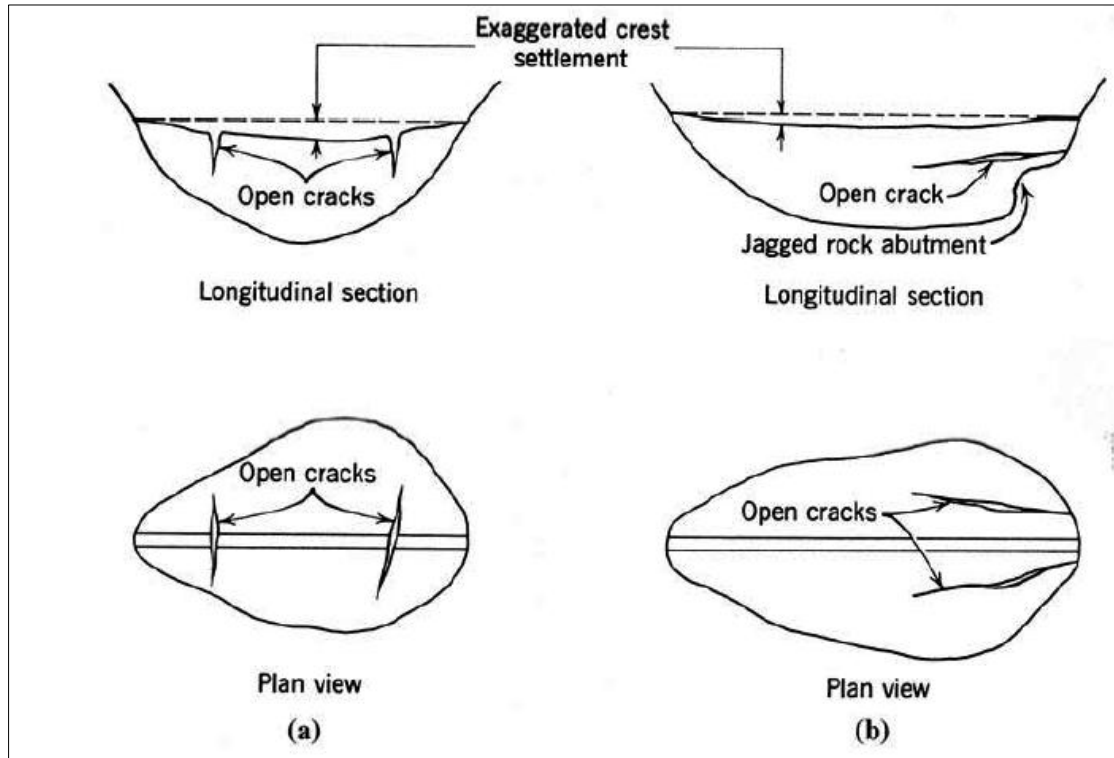


Figura 3.12: Típicas fracturas transversales debido a asientos diferenciales
(Sheard et al., 1963)

Fuente: Fell, 2005

- **Fisuras longitudinales, verticales o sub-verticales**

Son más o menos paralelas a la coronación, en planos verticales o cercanos a esa posición. En principio son menos peligrosas que las transversales, puesto que no ponen en comunicación el agua del embalse con el exterior; sí pueden serlo si inducen deslizamientos parciales que debiliten la zona o si cortan otras grietas transversales.

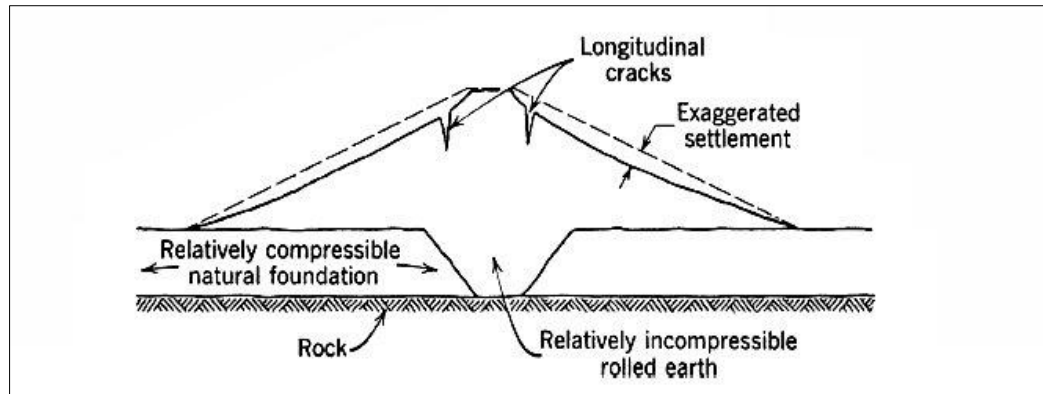


Figura 3.13: Fracturas longitudinales debido a asientos diferenciales sobre cimentación discontinua (Sheard et al., 1963)

Fuente: Fell, 2005

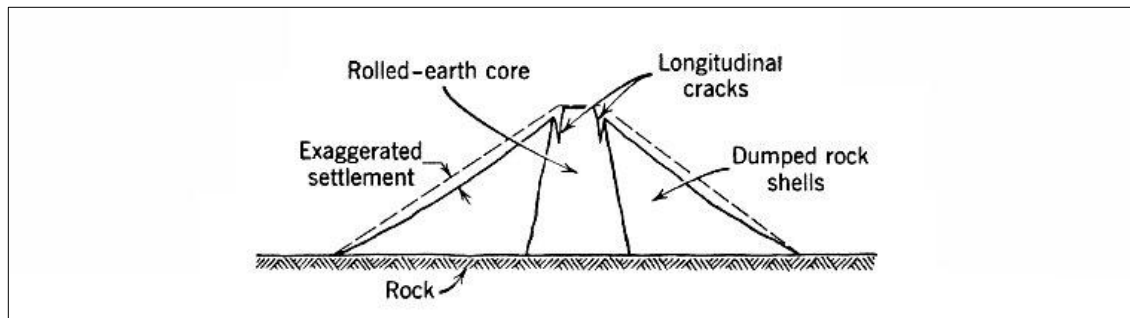


Figura 3.14: Fracturas longitudinales debido a asientos diferenciales entre las zonas de la presa (Sheard et al., 1963)

Fuente: Fell, 2005

- **Fisuras interiores**

Este tipo de fisuras son peligrosas, porque, al no ser visibles exteriormente, son difíciles de detectar. Su aparición suele deducirse por la aparición de fugas de agua que no tienen otra explicación, o por un asiento del núcleo extrañamente reducido, que hace pensar que está colgado y despegado del resto inferior. Su comprobación sólo puede lograrse por medio de sondeos.

Estas grietas internas se pueden formar en varias direcciones, se originan en cualquier contacto de materiales con una estructura más rígida.

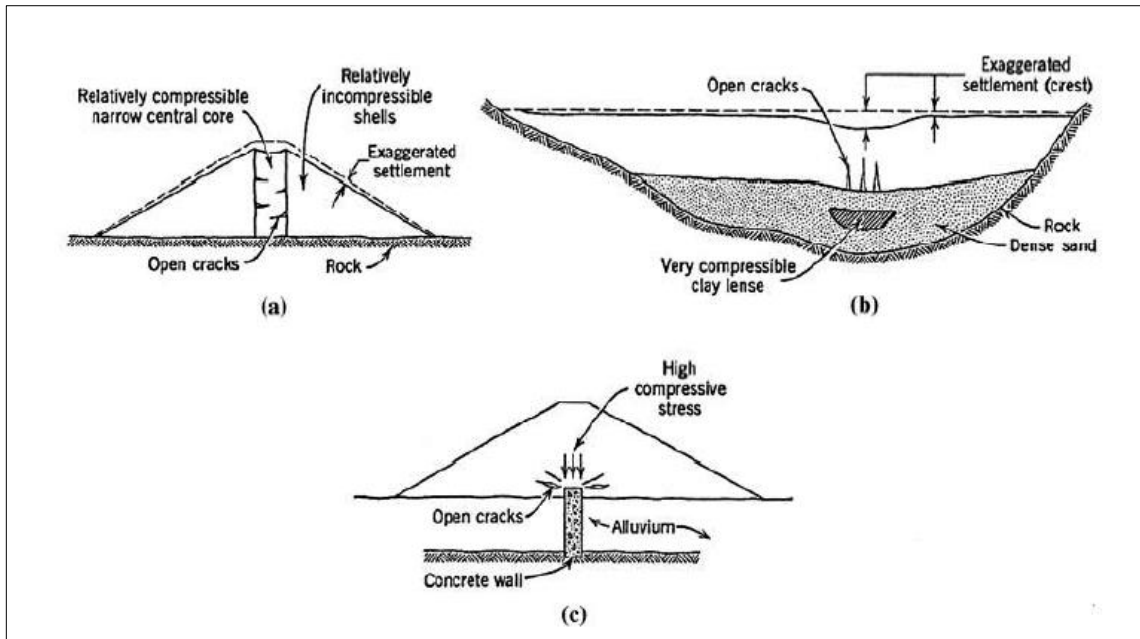


Figura 3.15: Fisuras internas en una presa de materiales sueltos debido a asientos diferenciales, a) fisuras horizontales en el núcleo, b) fisuras verticales (poco comunes) debido a la presencia de un lentejón, c) fisuras oblicuas (Sherard et al., 1963)

Fuente: Fell, 2005

4 METODOLOGÍA UTILIZADA

Como se ha explicado en el capítulo anterior, las filtraciones de agua en una presa de materiales sueltos pueden causar graves problemas en su estructura, pudiendo llegar a producir una rotura en el cuerpo de la presa, con el consecuente vaciado violento del agua, inundando la zona río abajo de la misma.

Los filtros, son estructuras permeables que tienen como objetivo interceptar las filtraciones de agua en el cuerpo de la presa, pero cuando el flujo de agua a través de ellos aumenta y alcanza valores críticos, puede dar lugar a la erosión dando riesgo a tubificación y subsidencia lo cual conduciría al colapso de la estructura. Las filtraciones y el fallo de los filtros son una de las causas principales de accidentes en presas de materiales sueltos, es por esto que es importante detectar estas fugas de agua a tiempo y su posible ubicación para tomar medidas correctivas.

Por lo expuesto anteriormente, resulta de vital importancia, realizar una inspección regular para comprobar la eficiencia del drenaje de las aguas infiltradas en la presa, con el fin de prevenir pérdidas económicas mayores.

El método de potencial espontáneo, que es una técnica de prospección geofísica no invasiva, puede utilizarse para ayudar a resolver el problema de las filtraciones de agua en la presa. Esta técnica geofísica nos proporciona información sobre la dirección del flujo dentro de la presa y la ubicación de posibles fugas de agua en las paredes de la presa, conociendo esto se puede tomar medidas correctivas para sellar las fisuras por donde se infiltra el agua.

A continuación se describirá las bases teóricas del método de potencial espontáneo, los factores de los que depende, la instrumentación necesaria y la metodología de trabajo de campo.

4.1 POTENCIAL ESPONTÁNEO (SELF POTENTIAL, SP)

El método de potencial espontáneo es un método de prospección eléctrica, usado en sus inicios para la prospección minera, principalmente para búsqueda de yacimientos de sulfuros.

Actualmente su uso se ha extendido, y se aplica para la búsqueda de fuentes geotermales, localización de filtraciones de fluidos contaminantes en vertederos, y localización de filtraciones de agua en presas de materiales sueltos.

Este método mide la diferencia de potencial eléctrico en el terreno generado por campos eléctricos naturales. El origen de estos campos eléctricos naturales está asociado con la presencia de materiales metálicos (mineralizaciones de sulfuros), variación de las propiedades químicas del terreno, humedad, actividad bioeléctrica de la vegetación, corrientes telúricas, variación en la concentración electrolítica del agua subterránea, y el paso de fluido a través de un medio poroso denominado potencial electrocinético o potencial de flujo (electrokinetic potential o streaming potential).

La posibilidad de localizar las fugas de agua en las paredes de las presas se basa en el fenómeno de potencial electrocinético formado por el flujo de agua a través de un medio poroso.

4.1.1 Potencial electrocinético o potencial de flujo

El paso de una solución de resistividad eléctrica ρ y viscosidad η a través de un medio capilar o poroso, puede generar un gradiente de potencial eléctrico a lo largo de la trayectoria del flujo. Este potencial es lo que se conoce como potencial electrocinético.

La génesis de este potencial se debe a la adsorción preferencial de iones de la misma polaridad (en general aniones) en la superficie de los granos, formando una capa fija. Como respuesta a este fenómeno, se produce un enriquecimiento por parte del fluido intersticial de iones de polaridad opuesta formando otra capa (en este caso móvil), de forma que en presencia de un gradiente hidráulico, el movimiento del agua intersticial y por tanto de la capa móvil, genera una carga neta de separación en la dirección del movimiento. Estas dos capas es lo que se conoce como la doble capa de Helmholtz.

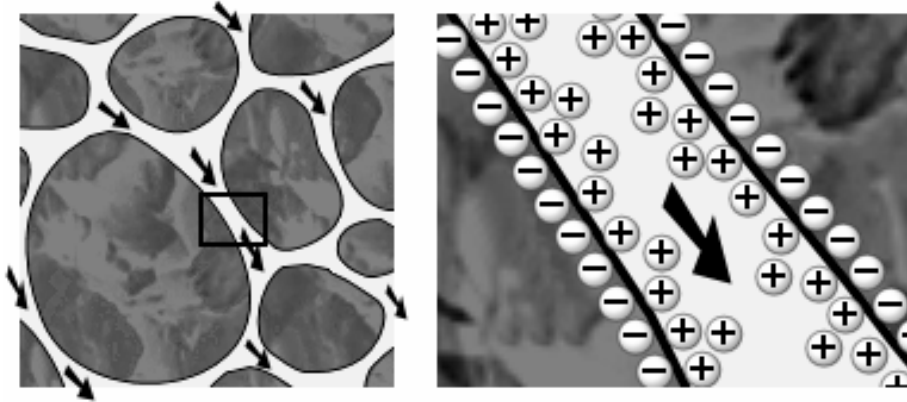


Figura 4.1: Representación esquemática del flujo de un electrolito a través de un medio poroso, formación de la doble capa de Helmholtz, origen del potencial electrocinético.

Fuente: Bérubé, 2004

Las bases teóricas del potencial electrocinético fueron desarrolladas por Helmholtz. El consideró el flujo de un líquido por un tubo capilar de lo cual obtuvo la siguiente ecuación:

$$V = \frac{\rho \varepsilon \zeta}{4\pi \eta} \Delta P$$

Donde,

V: potencial de corriente

ε : constante dieléctrica del líquido

ζ : potencial Z, o electro-cinético de la doble capa de Helmholtz

ρ : resistividad del líquido

ΔP : diferencia de presión

η : viscosidad del líquido

Esta ecuación muestra que para una solución en un tubo capilar, la relación $V/\Delta P$ es una constante, es decir que el potencial electrocinético es directamente proporcional a la diferencia de presión e independiente de la longitud o del área de la sección transversal del tubo capilar. Al cociente $V/\Delta P$ se le denomina “coeficiente de acoplamiento electrocinético”.

Las investigaciones de laboratorio presentadas en los estudios realizados por Ogilvy, Ayed y Bogoslovsky, (1968), confirman la dependencia del potencial de flujo con el gradiente hidráulico, y además muestran la relación que tiene el potencial de flujo con la porosidad, permeabilidad, y concentración electrolítica del agua infiltrada.

Ellos realizaron un experimento en el cual utilizaron arenas de cuarzo limpias y bajo la hipótesis de régimen laminar, en donde la ley de Darcy tiene validez, y obtuvieron las siguientes conclusiones:

- A medida que aumenta el gradiente de presión del fluido, la amplitud del potencial también incrementa su valor, es decir que el potencial de flujo es proporcional al gradiente hidráulico. (Figura 4.2)

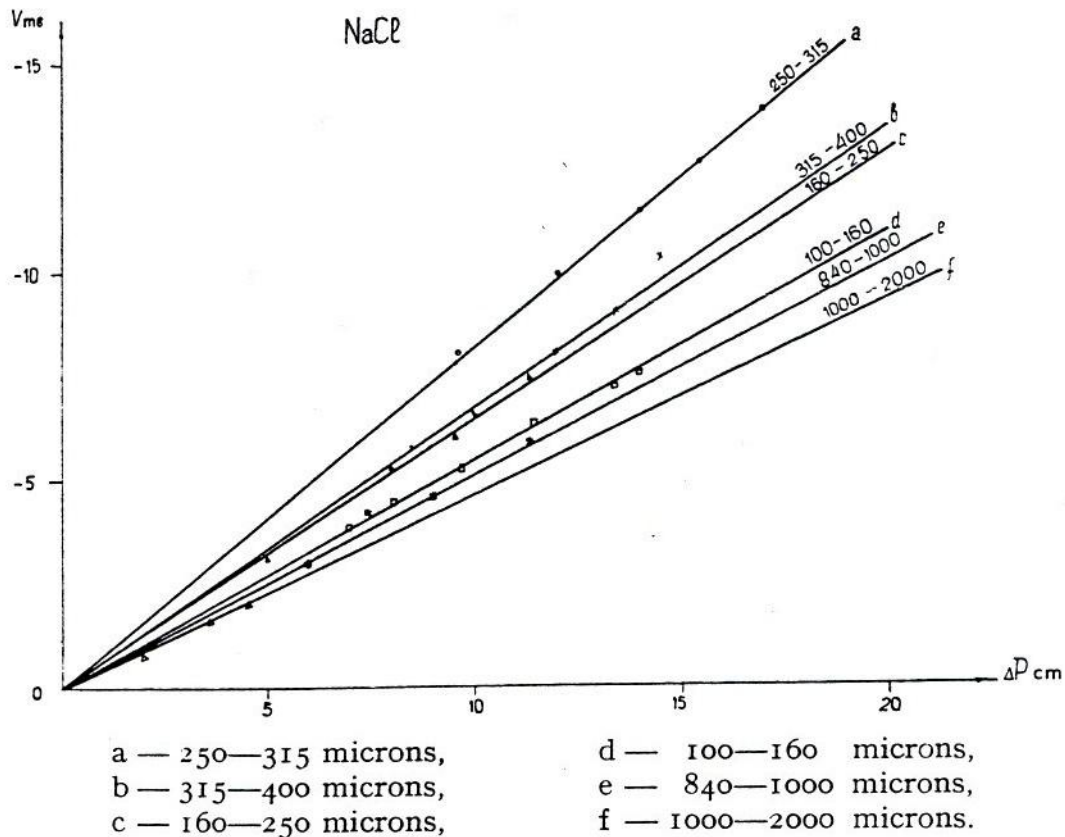


Figura 4.2: Potencial de flujo como función de la diferencia de presión para seis tamaños de grano usando una solución de NaCl de 10^{-3}

Fuente; Ogilvy, Ayed, and Bogoloslovsky, 1968

- El valor del potencial de corriente es considerablemente afectado por la permeabilidad del terreno. Las anomalías máximas de potencial de flujo se observan cuando el flujo de agua tiene lugar en materiales con una permeabilidad del orden de 60-70 darcy, el cual corresponde a la permeabilidad de arenas de grano medio. Para bajos valores de permeabilidad los valores de potencial de flujo caen abruptamente. (Figura 4.3)

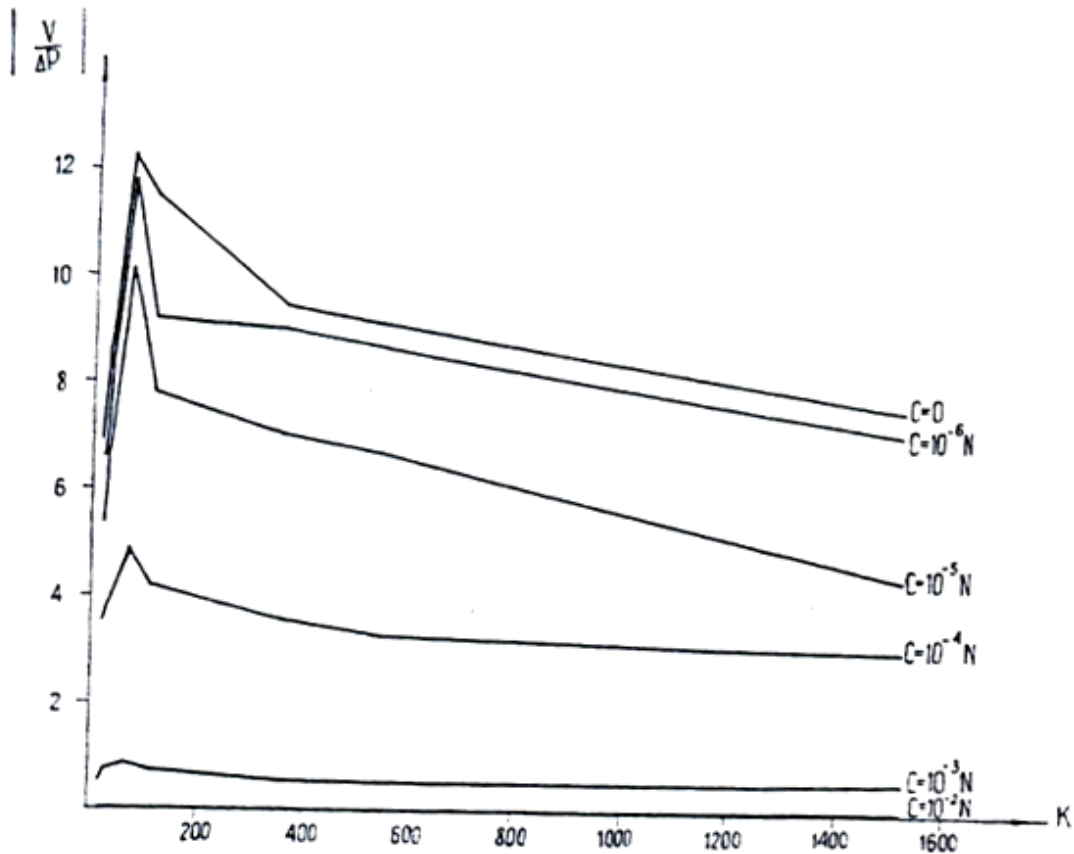


Figura 4.3: $V/\Delta P$ como función de la permeabilidad expresada en darcy

Fuente: Ogilvy, Ayed, and Bogoloslovsky, 1968

- Para un gradiente hidráulico y permeabilidad constante, un aumento de la concentración de sal del fluido conlleva una disminución significativa del valor del potencial, llegando incluso a valores casi imperceptibles. Este aspecto limitará el uso del método del potencial espontáneo en problemas en donde el agua presente elevada salinidad, el campo de potencial de corriente es casi inmedible con una concentración que exceda los 5 gramos/litro. (Figura 4.4)

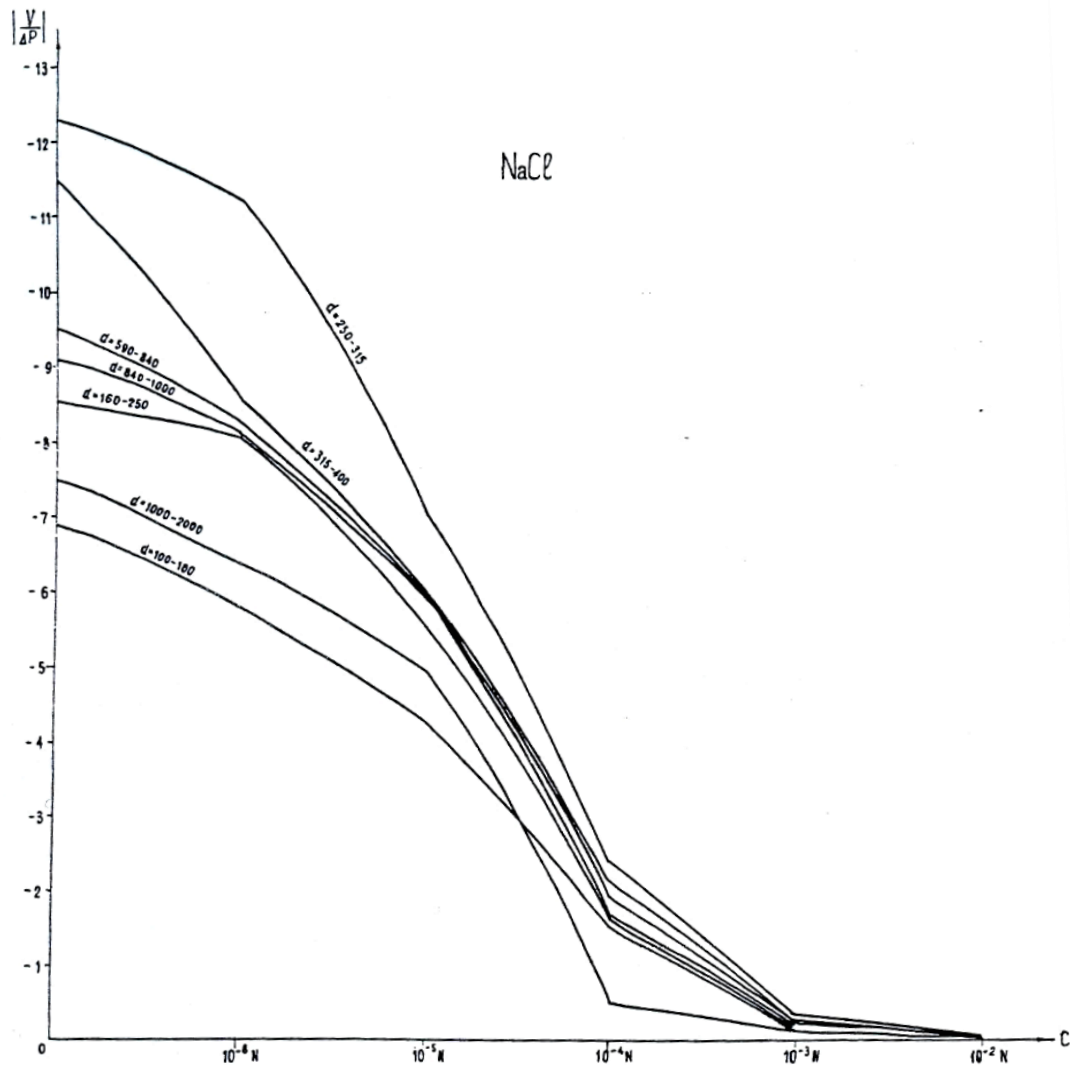


Figura 4.4: $V/\Delta P$ como función de la concentración de NaCl en agua destilada

Fuente: Ogilvy, Ayed, and Bogoloslovsky, 1968

Por otro lado, el flujo de agua en fisuras abiertas esta caracterizado por pequeños valores de potencial de flujo que decrecen a medida que aumenta la apertura de la fisura. Si la fisura tiene una apertura grande el fluido adquirirá un flujo de régimen turbulento por lo que dejarían de ser válidas las relaciones con el potencial de flujo, y no se podría medir.

4.1.2 Anomalías de potencial espontáneo en presencia de filtros horizontales

Los filtros, son estructuras permeables que tienen como objetivo interceptar las filtraciones de agua en el cuerpo de la presa. Al aumentar el flujo de agua en los filtros también aumenta el potencial de flujo original.

Bogoslovsky y Ogilvy (1973), estudiaron la deformación de los campos potenciales naturales cerca de los filtros horizontales ubicados en la cara aguas abajo de las presas de materiales sueltos, y observaron que para un flujo de agua a través de un filtro, el potencial de flujo crece en dirección del flujo de agua y su intensidad es proporcional al gradiente hidráulico.

De este modo mediante la construcción de mapas de isovalores de SP, se puede obtener información de la dirección e intensidad del flujo de agua a través de un material permeable. (Figura 4.5)

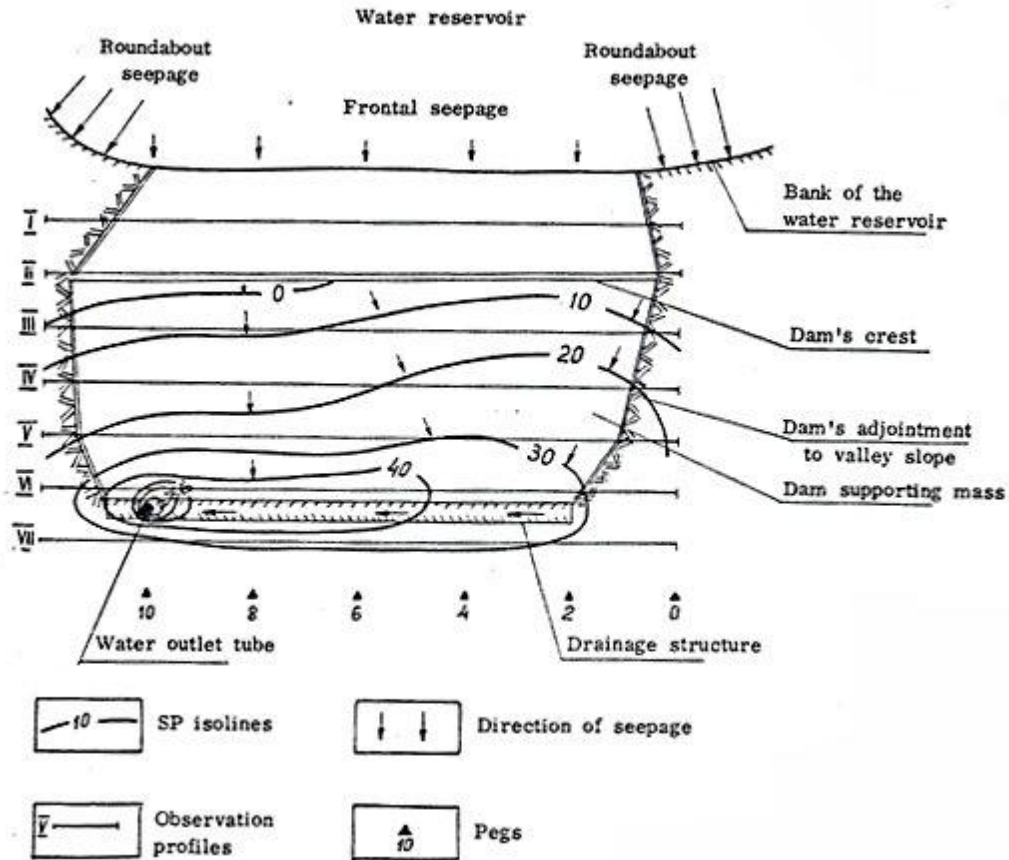


Figura 4.5: Mapa de isovalores de SP en la cara aguas debajo de la presa Karkidan

Fuente; Bogoloslovsky, and Ogilvy, 1973

En la figura 4.5, se muestra un mapa de isolíneas de SP, correspondientes al talud aguas abajo, de la presa de tierra Karkidan de Asia Central. En este caso se observa que los valores de SP crecen en dirección de la estructura de drenaje, con lo cual se concluye que el filtro trabaja eficientemente en la intercepción de las aguas filtradas. Este es un ejemplo de cómo las medidas de potencial espontáneo evidencian la dirección de las filtraciones de agua.

En la figura 4.6, se muestra, la forma de las líneas equipotenciales en un dren que trabaja correctamente en la intercepción de las aguas filtradas. Vemos que los valores de SP crecen hacia el lado derecho del dren, hacia el tubo de salida de agua.

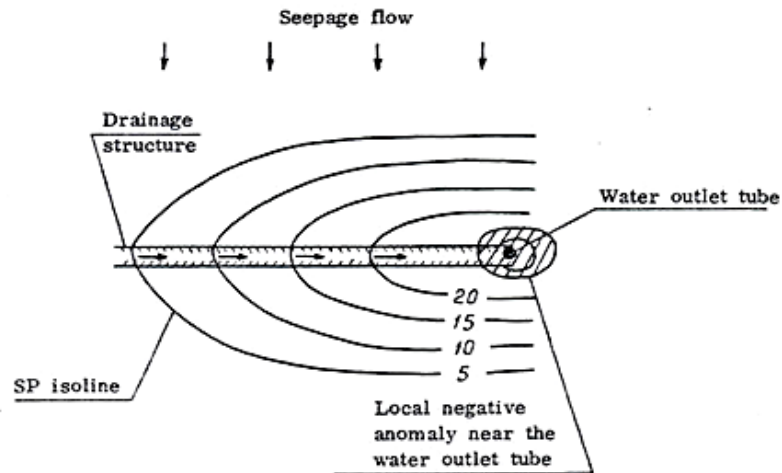


Figura 4.6: Campo de electro-filtración cerca de un filtro horizontal en un medio homogéneo con una infiltración uniforme

Fuente: Bogoloslovsky, and Ogilvy, 1973

Por el contrario en la figura 4.7 se muestra un mapa de isolíneas de SP en un filtro que no funciona correctamente, se puede notar que el valor de potencial espontáneo en el centro del filtro no cambia, por lo que esta parte del filtro no está interceptando las aguas filtradas, además vemos que el lado derecho e izquierdo del dren interceptan el agua de una manera diferente, en el lado izquierdo se nota una menor intensidad de drenaje.

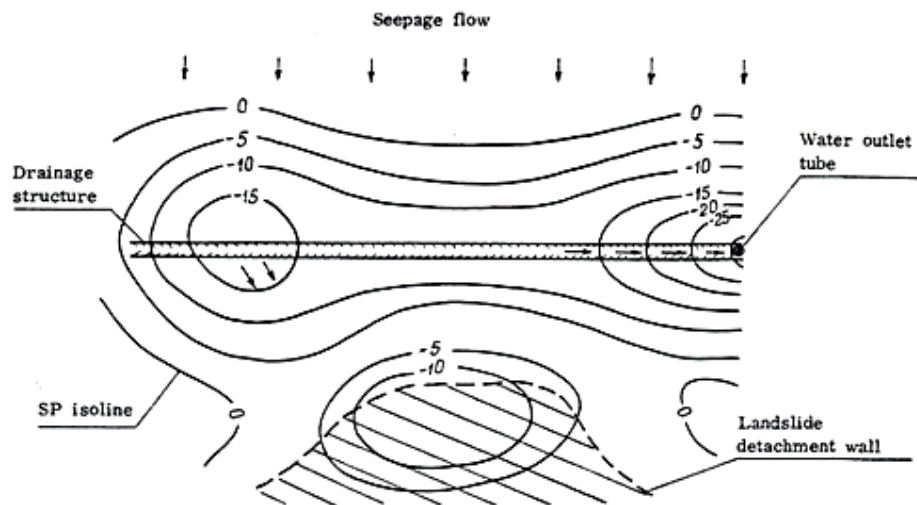


Figura 4.7: Mapa de isovalores de SP cerca del dren de en la ladera de Blinovskiy

Fuente: Bogoloslovsky, and Ogilvy, 1973

4.2 INSTRUMENTACIÓN

Una inspección completa de una presa, requiere medidas de potencial espontáneo en el fondo del embalse, en la cara aguas arriba, aguas abajo, a lo largo de la coronación y en los alrededores de la presa.

El equipo básico para realizar estas medidas en los diferentes sitios, es prácticamente el mismo, aunque dependiendo de las condiciones de la zona se puede requerir equipo adicional de apoyo para facilitar el trabajo de campo.

El presente trabajo se enfoca en las medidas en la cara aguas arriba del embalse, es decir medidas subacuáticas. Para realizar estas medidas, la instrumentación básica consta de electrodos no polarizables, cables y carrete, voltímetro de alta impedancia, y un bote.

- **Electrodos**

Se usa electrodos no polarizables, ya que este tipo de electrodos son muy estables y reducen los fenómenos de polarización y de deriva, son menos sensibles a cambios de los parámetros ambientales tales como la temperatura o el contenido de humedad del suelo. Estas respuestas son del orden de unos pocos mV, en comparación con las típicas anomalías de potencial de flujo en los sitios de la presa de unas pocas decenas de mV, en consecuencia con este tipo de electrodos se tiene una buena relación señal-ruido. [Corwin, 1989]



Figura 4.8: Electrodos no polarizables de sulfato de cobre

Fuente: Milsom, 1989

Los electrodos no polarizables están formados por una barra de metal inmersa en una solución saturada de sal de su propio metal, y todo ello dentro de un tubo de porcelana porosa que permite poner en contacto la solución con el terreno.

Existen diferentes tipos de electrodos no polarizables, entre ellos están los de sulfato de cobre, cloruro de plata, cloruro de cadmio, cloruro de plomo.

Para las medidas sub acuáticas, estos electrodos son puestos dentro de tubos de polietileno, y como resultado de esto, solo queda en contacto con el medio exterior la base del cilindro de cerámica, disminuyendo así el lavado de las soluciones salinas del electrodo y protegiéndolo de golpes contra las irregularidades del fondo del embalse.

El número de electrodos necesarios depende del diseño de la campaña.

- **Cable**

El cable que se usa en este tipo de trabajo es un cable multiconductor, revestido con cables de acero y en su interior posee un núcleo de cobre. Se conectan varios electrodos al cable como se muestra en la figura 4.9.



Figura 4.9: Cable multiconductor

Fuente: Cortesía de Rozycki Alexander, 2008

- **Voltímetro**

En cuanto al voltímetro utilizado, debe tener sensibilidad de milivoltios y muy alta impedancia mayor que 10^8 ohm ya que las corrientes generadas por las filtraciones de agua son muy pequeñas.

- **Bote**

Es necesario pequeño bote, para llevar los electrodos o el electrodo a una distancia deseada desde la orilla del embalse.



Figura 4.10: Bote, para llevar el cable con los electrodos desde la orilla hasta una distancia deseada dentro del embalse

Fuente: Cortesía de Rozycki Alexander, 2008

- **Equipo de testificación**

En ocasiones se suele adaptar un equipo de testificación para realizar las medidas subacuáticas, el procedimiento se detalla más adelante.

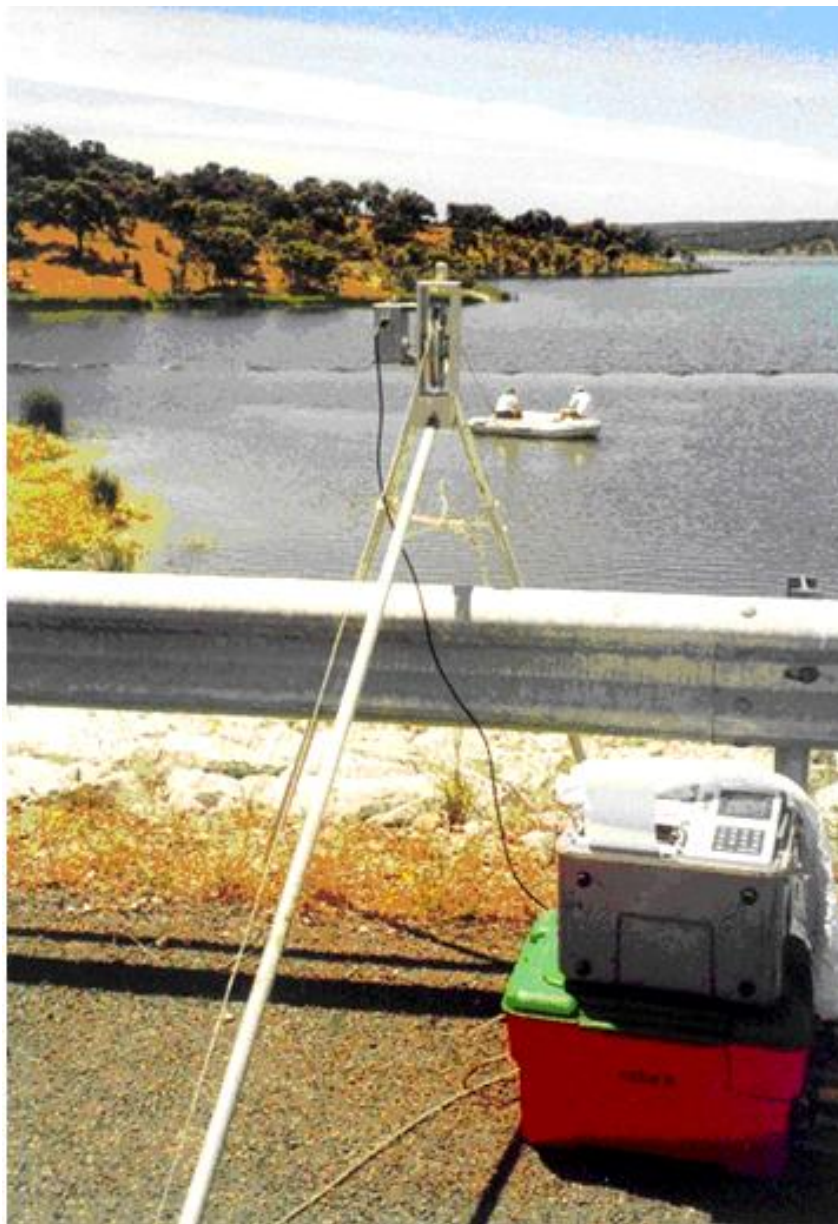


Figura 4.11 Equipo de testificación geofísica adaptado a las medidas de potencial espontáneo

Fuente: Cortesía de Rozycki Alexander, 2008



Figura 4.12 Detalle del equipo de testificación para medidas subacuáticas de potencial espontáneo

Fuente: Cortesía de Rozycki Alexander, 2008

4.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO DE CAMPO

4.3.1 PLANIFICACIÓN DE CAMPAÑA

La planificación de la campaña geofísica, consiste en el planteamiento del problema, describirlo y analizarlo. Además se recopila toda la información de trabajos previos en la zona de estudio, con el fin de elegir los parámetros de medida más adecuados para cada caso.

En esta etapa de la investigación, se debe definir la dirección de los perfiles, distancia entre ellos y distancia entre electrodos. La distancia entre medidas depende del objetivo de la investigación y de las características de las fugas de agua que se están buscando.

La distancia entre las medidas es un compromiso entre un máximo número de datos que es beneficioso para la interpretación y los medios económicos disponibles para las medidas. La distancia no debería ser más grande que 1/4 de la dimensión de la anomalía esperada. Una anomalía esperada es producto de la modelización previa de los cuerpos a buscar.

4.3.2 CAMPAÑA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Los procedimientos indicados son necesariamente de carácter general, y pueden tener que ser modificados ligeramente para ciertas condiciones geológicas de la región, situaciones especiales de condiciones climáticas extremas, suelo congelado, zonas muy rocosas, presencia de altos niveles de ruido por corrientes telúricas o fuentes industriales.

a) Métodos

Se puede proceder de dos maneras, una consiste en medir el gradiente del campo potencial y la otra mide el campo total (método de base fija).

- **Método del gradiente**

Consiste en medir la caída de potencial a lo largo de un perfil, las medidas se llevan a cabo mediante dos electrodos separados por una pequeña distancia constante, conectados a un milivoltímetro. En primer lugar se define quien es el electrodo M y N y se los une a la terminal positiva y negativa del milivoltímetro respectivamente. Realizada la primera medida, ahora sin cambiar la polaridad del dispositivo ni la distancia eléctrica, se

procede a tomar el resto de medidas a lo largo del perfil, de forma que el electrodo M ocupe siempre la posición que ocupaba el N en la anterior medida.

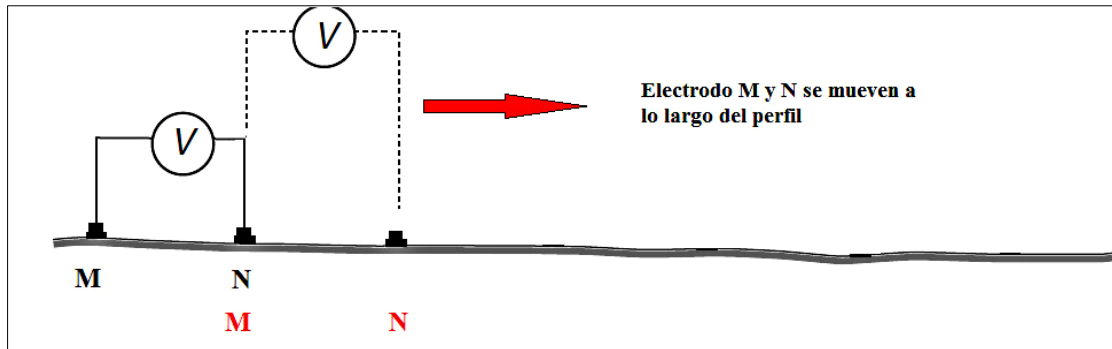


Figura 4.13: Esquema medidas de SP, método del gradiente

Fuente: Elaboración propia

El método es útil si el cable es limitado, pero los errores tienden a acumularse y la cobertura es lenta debido a que el voltímetro y ambos electrodos se deben mover para cada lectura.

- **Método de base fija**

Este método consiste en medir el potencial espontáneo entre un electrodo que permanece fijo (electrodo de referencia) en un sitio denominado base, y un electrodo móvil que se irá desplazando a lo largo de un perfil, en el cual se han establecido estaciones fijas de medida. El electrodo M se sitúa en un lugar donde se pueda considerar el potencial espontáneo como cero. En la figura 4.14 se muestra un esquema del procedimiento.

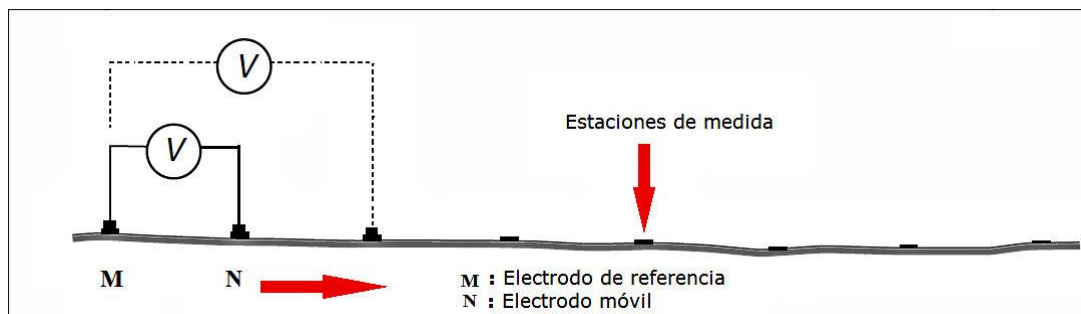


Figura 4.14: Esquema de medida de SP, método de base fija

Fuente: Elaboración propia

b) Metodología comúnmente usadas para medidas subacuáticas

Los estudios mediante SP para evaluación de filtraciones de agua en presas de materiales sueltos, se llevan a cabo normalmente por el método de base fija en lugar del posible método de gradiente.

- **Medidas con equipo de testificación**

En ocasiones se suele utilizar adaptar un equipo de testificación, al que se conecta un cable con un electrodo en su extremo.

Con ayuda del bote se lleva el cable con los electrodo hasta una distancia deseada dentro del embalse, y se deja caer los electrodos al fondo del embalse, luego se arrastra el electrodo por el fondo del embalse a medida que se va recogiendo el cable con ayuda del malacate se va midiendo la diferencia de potencial entre el electrodo móvil y un electrodo estacionario que se encuentra en el fondo del embalse y que está alineado con el cable. Las medidas de potencial espontáneo se van tomando automáticamente desde la estación de testificación eléctrica.

En la figura 4.15 se muestra un esquema del equipo.

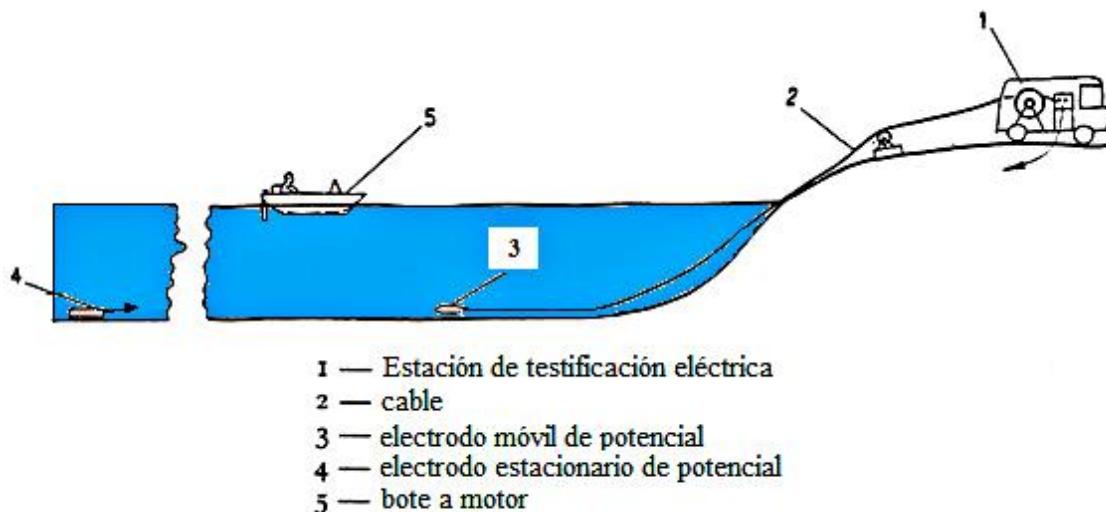


Figura 4.15: Esquema de medidas subacuáticas de potencial espontáneo usando equipo de testificación geofísica

Fuente: Adaptado de Ogilvy, Ayed, Bogolovsky, 1968

- **Configuración Multielectrónica**

Esta configuración es similar a la de base fija, con la diferencia que en esta configuración, disponemos de un gran número de electrodos, los cuales ya están todos conectados a la base de referencia por un cable multiconductor. Mediante un sistema multicanal de adquisición de datos, se va realizando de forma automática toda la secuencia de medidas.

Con la ayuda del bote se llevan el cable con los electrodos a una distancia deseada dentro del embalse y luego se bajan los electrodos en el fondo del embalse, como se muestra en la figura 4.10, el cable está conectado al equipo de medida que se encuentra en el bote. La gran ventaja de este dispositivo es la capacidad de realizar un gran número de medidas en poco tiempo, pero es un equipo mucho más costoso.

c) Ruido en las medidas de SP

El registro de campo de potencial espontáneo se vea afectado por una gran variedad de potenciales espontáneos, que perturbarán y enmascararán el potencial de nuestro interés: el potencial de flujo. El orden de magnitud de estos potenciales en muchas ocasiones es similar al del propio potencial de flujo, que suele ser de algunas decenas de mV.

En consecuencia es necesario reconocer cada uno de estos fenómenos perturbadores, para posteriormente poder filtrarlos de nuestro registro, y quedarnos simplemente con las variaciones espaciales del potencial del flujo.

Generalmente se llama ruido a todas aquellas anomalías de potencial que no son de nuestro interés, como por ejemplo las generadas por corrientes telúricas, actividad humana, y cuya génesis no está ligada al movimiento del agua en el terreno.

Las corrientes telúricas, son aquellos cambios de potencial debidos a las variaciones temporales del campo magnético terrestre, y pueden dar variaciones de decenas o cientos de milivoltios por kilómetro en una zona conductora, lo cual se puede confundir con anomalías espaciales. La mejor manera de eliminar este tipo de ruido eléctrico es registrar esta variabilidad del campo eléctrico en el tiempo, usando una grabadora digital conectada a un par de electrodos estacionario.

Las zonas industrializadas son fuente de grandes variaciones de potencial, en los que la amplitud de las anomalías puede ser de decenas a centenares de mV /Km. [Corwin, 1989]

4.4 INTERPRETACIÓN DE DATOS

El resultado final de la investigación de SP, son unos perfiles en los que queda representada la variación espacial del SP.

Los datos de SP, pueden interpretarse cualitativamente, o cuantitativamente. El procedimiento de interpretación seleccionado dependerá de los objetivos de la investigación, la calidad de los datos de campo, la cantidad de datos geológicos, geofísicos, e hidrológicos adicionales disponibles, y el tiempo y recursos del equipo para la fase de interpretación de la investigación.

4.4.1 Interpretación cualitativa

La interpretación cualitativa consiste en, mediante la representación gráfica de los datos medidos, en perfiles o mapas de isolíneas, identificar visualmente ciertas tendencias de los datos, y asociarlos con estructuras (fisuras, tubificaciones, filtraciones) que han sido las responsables de crear esta anomalía.

Para lo cual es necesario previamente conocer qué tipo de anomalía produce cierta estructura.

4.4.2 Interpretación cuantitativa

La interpretación cuantitativa consiste en obtener parámetros como; profundidad, volumen, resistividad verdadera, carga eléctrica verdadera, de la estructura que crea la anomalía. Para lo cual se utiliza fórmulas analíticas que han sido obtenidas de la modelización del potencial espontáneo producido por una estructura conocida.

Una de las técnicas de modelización es la interpretación geométrica.

- **Interpretación geométrica**

Consiste calcular mediante fórmulas analíticas la anomalía de SP que producirían ciertas estructuras como fracturas o tubificaciones, las cuales se modelizan por medio de

cuerpos geométricos simples, así por ejemplo una tubificación puede ser modelada por un cilindro.

Basandose en las ecuaciones de Fitterman (1979) y Roy y Chowdhury (1959), quienes encontraron una solución analítica para la respuesta de SP en un contacto vertical y a lo largo de un contacto horizontal, respectivamente. Rozycki, Cuadra, Monte, Ruíz Fonticiella, Martínez Santamaría (2005), desarrollaron una expresión analítica para calcular el potencial espontáneo generado por el flujo de agua a través de un cilindro finito. Estas ecuaciones pueden ser usadas para modelizar el SP generado por tubificaciones, fisuras y drenes horizontales que se suelen ubicar en el pie de la presa en la cara aguas abajo.

$$V(x, y, 0) = M \frac{x \cos \theta - z \sin \theta}{\sqrt{x^2 + z^2}} \left[\arctan \left(\frac{y_2 - y}{\sqrt{x^2 + z^2}} \right) - \arctan \left(\frac{y_1 - y}{\sqrt{x^2 + z^2}} \right) \right]$$

Donde,

$V(x, y, 0)$: Potencial eléctrico generado por un cilindro finito, cuyo eje está orientado a lo largo de la coordenada y .

M : es el momento de polarización, usada como condición de contorno en la resolución de la ecuación de Laplace.

En la figura 4.16, se muestra la modelización de una anomalía generada por un cilindro finito (tubificación), que ha sido obtenida usando la ecuación anterior. El eje x está orientado a lo largo de la coronación de la presa y situado en el nivel del agua del embalse. El cilindro se define por su profundidad D , la longitud L y centro X_0 .

Se ha calculado el campo de SP originado por un cilindro situado en $X_0 = 15$ m, $L = 15$ m, y $D = 3$ m, $D = 15$ m, y $D = 9$ m. Sus posiciones están marcadas por líneas continuas. En el cilindro de poca profundidad ($D = 3$ m) las isolíneas muestran una forma alargada, pero su campo tiende hacia una forma circular con la profundidad. [Rozycki, 2008]

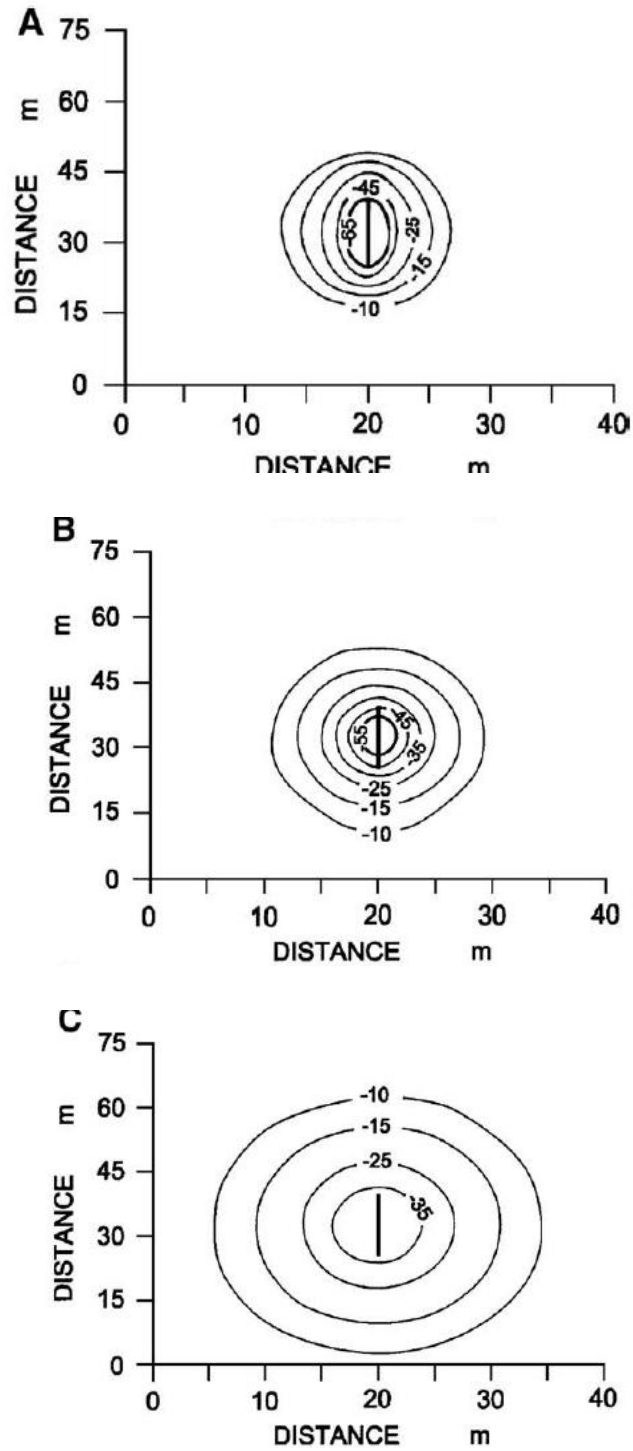


Figura 4.16: Modelización geométrica de la anomalía producida por un cilindro finito (tubificación) centrado en $X_0=15\text{m}$, con $L=15\text{m}$. A) $D=3\text{m}$; B) $D=6\text{m}$; C) $D=9\text{m}$

Isolíneas equidistantes mV.

Fuente: Rozicky, 2008

Otra aplicación de la fórmula analítica anteriormente mencionada, se presenta en trabajos desarrollados por (Rozycki, Ruiz Fonticiella, Cuadra, 2005), estudios que se llevaron a cabo en reservorios de España, el Tejo, y uno cerca de Córdoba llamado CBH, los resultados muestran una buena aproximación entre la curva teórica calculada por medio de la fórmula analítica y los datos de campo.

Los datos de campo se ajustan al modelo mediante un proceso de inversión de datos, y de esta manera se obtiene la profundidad y longitud de la estructura que crea la anomalía.

En el embalse El Tejo, se investigaron fracturas en la pantalla de concreto de la presa y los datos de campo se ajustaron al modelo con un error r.m.s de 2.1%. Los valores estimados de la profundidad y extensión de la fractura coincidían exactamente con los datos de una fractura observada cuando se bajo el nivel de agua del embalse.

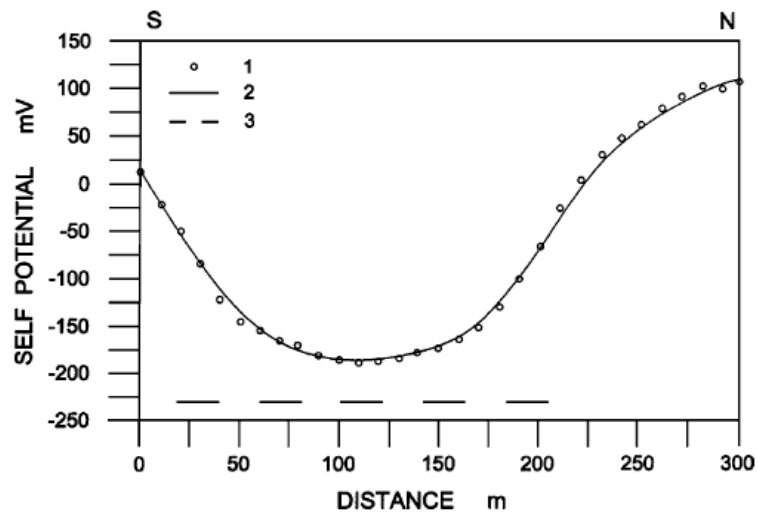


Figura 4.17 : Perfil de potencial espontáneo para la presa El Tejo: 1-datos medidos, 2 - modelo ajustado, 3 - posición de la fractura interpretada

Fuente: Rozycki, Ruiz Fonticiella, Cuadra, 2005

En la presa CBH, se analizó la respuesta de un filtro de drenaje horizontal, y la curva en general se ajustó bastante bien al modelo teórico, excepto en la parte central, esta anomalía se debía a una distribución no homogénea del flujo de agua dentro del filtro,

desarrollándose así caminos preferenciales de las filtraciones, que podrían dar como resultado el fallo del filtro.

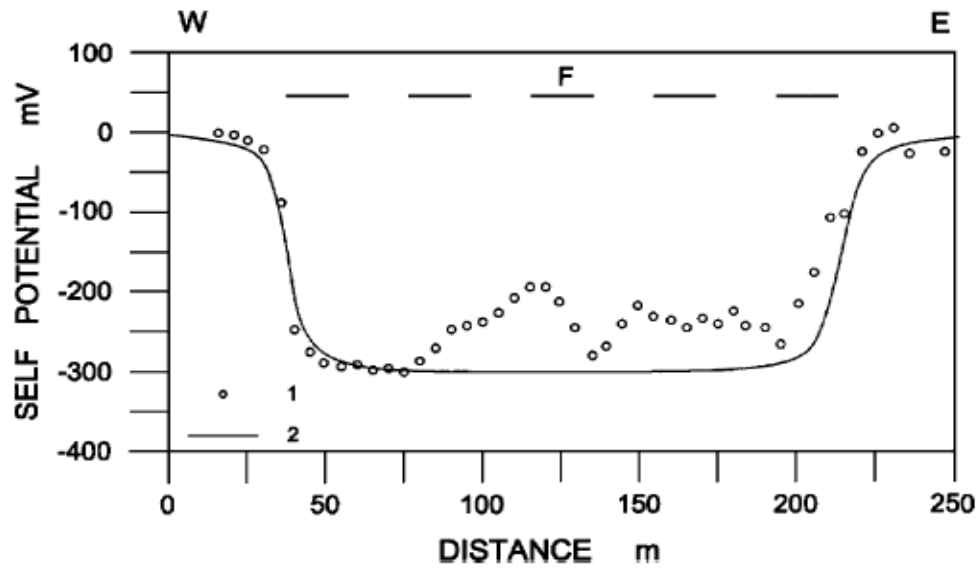


Figura 4.18: Perfil de potencial espontáneo para la presa CBH: 1-datos medidos, 2 - modelo ajustado, F - posición del filtro de drenaje

Fuente: Rozycki, Ruiz Fonticiella, Cuadra, 2005

5 DESARROLLO DE CASO DE APLICACIÓN

5.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La presa Santa Marta, situada en la provincia de Ávila, es una presa de materiales sueltos construida entre 1989 y 1990. La longitud de coronación es de 192 m y la altura máxima de la presa es de 27 m (1164 m s. n. m.). A poco tiempo de terminarse las obras se observaron surgencias de agua en la cara aguas abajo del cuerpo de presa y en la galería de acceso. Dichas surgencias estaban teñidas de color rojo debido a la arcilla llevada en suspensión por el agua que rezumaba. Este hecho parecía suficientemente alarmantes para que a lo largo de más de una década de años, varias comisiones se desplazasen al lugar para determinar las acciones a realizar con el fin de proteger la integridad del cuerpo de la presa. En el mes de Septiembre del 2009, un equipo investigador procedente del Laboratorio de Geotecnia (C. E. D. E. X.) realizó una serie de medidas geofísicas para determinar los posibles caminos de filtraciones de agua a través del cuerpo de la presa.

Las surgencias de agua, mencionadas anteriormente, están situadas alrededor de la arqueta A (figura 5.1). Dicho fenómeno no puede ser analizado, ya que no están disponibles, o no se conocen, los volúmenes de agua emanada y su evolución temporal.

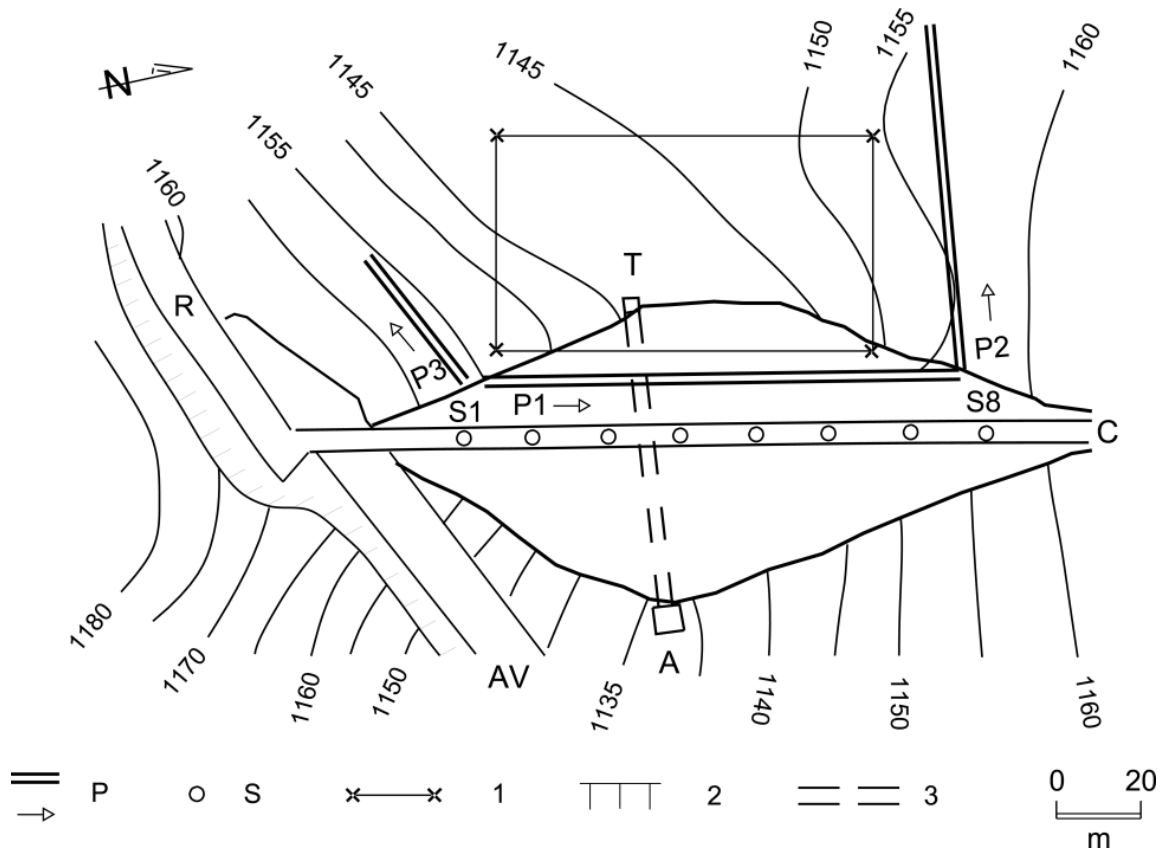


Figura 5.1: Plano de la presa Santa Marta, P – perfiles de resistividad (la flecha indica la dirección de las medidas realizadas), S – sondeos mecánicos perforados en el cuerpo de presa, 1 – área de las medidas de Potencial Espontáneo subacuático, 2 – talud muy escarpado, 3 – tubería de desagüe y galería de acceso, AV – aliviadero, T – toma de agua, A – arqueta, C – coronación, R – camino.

Fuente: Cortesía de Alexander Rozycki, 2008

En la figura 5.2 se muestra la sección tipo del cuerpo de presa tomada de su proyecto de construcción.

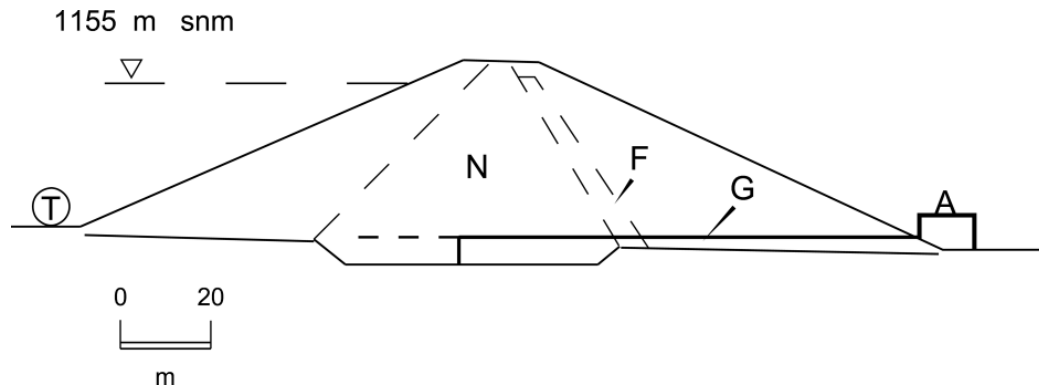


Figura 5.2: Sección tipo del cuerpo de presa Santa Marta, N – núcleo, F – filtro, G – galería de acceso, T – toma de agua, el nivel de agua indicado corresponde al llenado de la presa durante la campaña de medidas.

Fuente: Cortesía de Alexander Rozycki, 2008

Se puede observar que el cuerpo de presa debería estar constituido por un núcleo arcilloso protegido por espaldones de gravas y bolos (es decir: gravas redondeadas y fragmentos de roca de gran tamaño), filtro y galería de acceso que termina en la arqueta. Sin embargo, una serie de los sondeos mecánicos realizados en el cuerpo de presa desde su coronación, revelan una sección muy diferente de la planificada. Dicha sección se muestra en la figura 5.3.

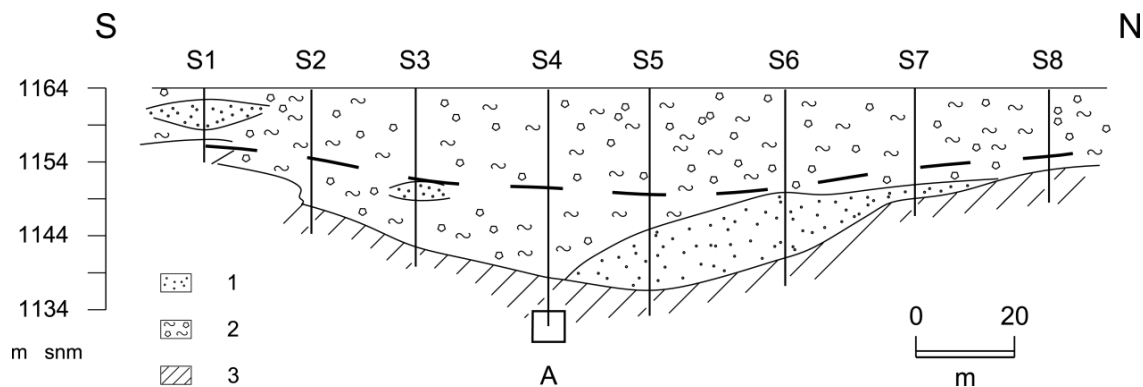


Figura 5.3: Sección del cuerpo de presa en base a los datos procedentes de los sondeos mecánicos: S1 – S8, 1 – arenas arcillosas, 2 – gravas con una matriz arcillosa, 3 – rocas graníticas, la línea discontinua indica el nivel de agua medido en los sondeos durante la campaña de medidas geofísicas.

Fuente: Cortesía de Alexander Rozycki, 2008

Llama la atención no solo la heterogeneidad de la estructura del cuerpo de presa, donde en las gravas con matriz arcillosa aparecen incrustados lentejones de arenas arcillosas, sino también su composición. Según la figura 5.3, parece ser que no existe un núcleo de baja permeabilidad y los materiales del cuerpo de presa permiten la filtración de agua, probablemente, en toda su extensión. Los datos proporcionados por los sondeos mecánicos explican la presencia de arcillas en el agua, que traspasa el cuerpo de presa desde hace muchos años, sin que se produjera su colapso. Por la misma razón se puede entender que el nivel de agua en la mitad del cuerpo de presa sea prácticamente igual a la del embalse.

5.2 TRABAJO DE CAMPO

Se tomaron medidas de potencial espontáneo subacuáticas, para lo cual se realizaron 10 perfiles de medidas, cada una de ellas de 75 m de longitud. Entre los perfiles había una distancia de separación de 10 m y la distancia entre electrodos fue de 3m. El área medida se muestra en la figura 5.1, encerrada por un rectángulo.

Para la toma de medidas se uso la configuración multielectrónica, siguiendo el procedimiento explicado en el capítulo anterior.

Adicionalmente a las medidas de nivel de agua en los sondeos mecánicos, se evaluaron sus conductividades eléctricas, que oscilan alrededor de 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que es una magnitud cercana a la que posee el agua destilada e idéntica a los valores obtenidos en el vaso de presa.

5.3 PROCESADO DE DATOS

Para procesar los datos se utilizó el programa PE_v1, el cual es un software que ha sido diseñado para automatizar la interpretación de los datos medidos de potencial espontáneo.

Este programa permite construir el mapa de isovalores de SP medidos en campo, y descomponer dichos valores en dos partes. La primera, denominada la componente regional, la cual refleja una tendencia que muestra el potencial espontáneo subacuático medido. La segunda, llamada el campo residual o anómalo, que destaca valores locales.

La descomposición se realiza aplicando una superficie de bajo grados a los valores medidos. El ruido se corrigió usando un filtro gaussiano de 5 mili voltios.

En el anexo A se detalla el funcionamiento de este programa.

El eje x en los mapas está orientado paralelo a la coronación de la presa y está situado en el nivel del agua del embalse. Se encuentra indicada la dirección del norte en cada mapa.

6 RESULTADOS

Mapa de isolíneas de las medidas subacuáticas del campo total de potencial espontáneo en la presa “Santa Marta”.

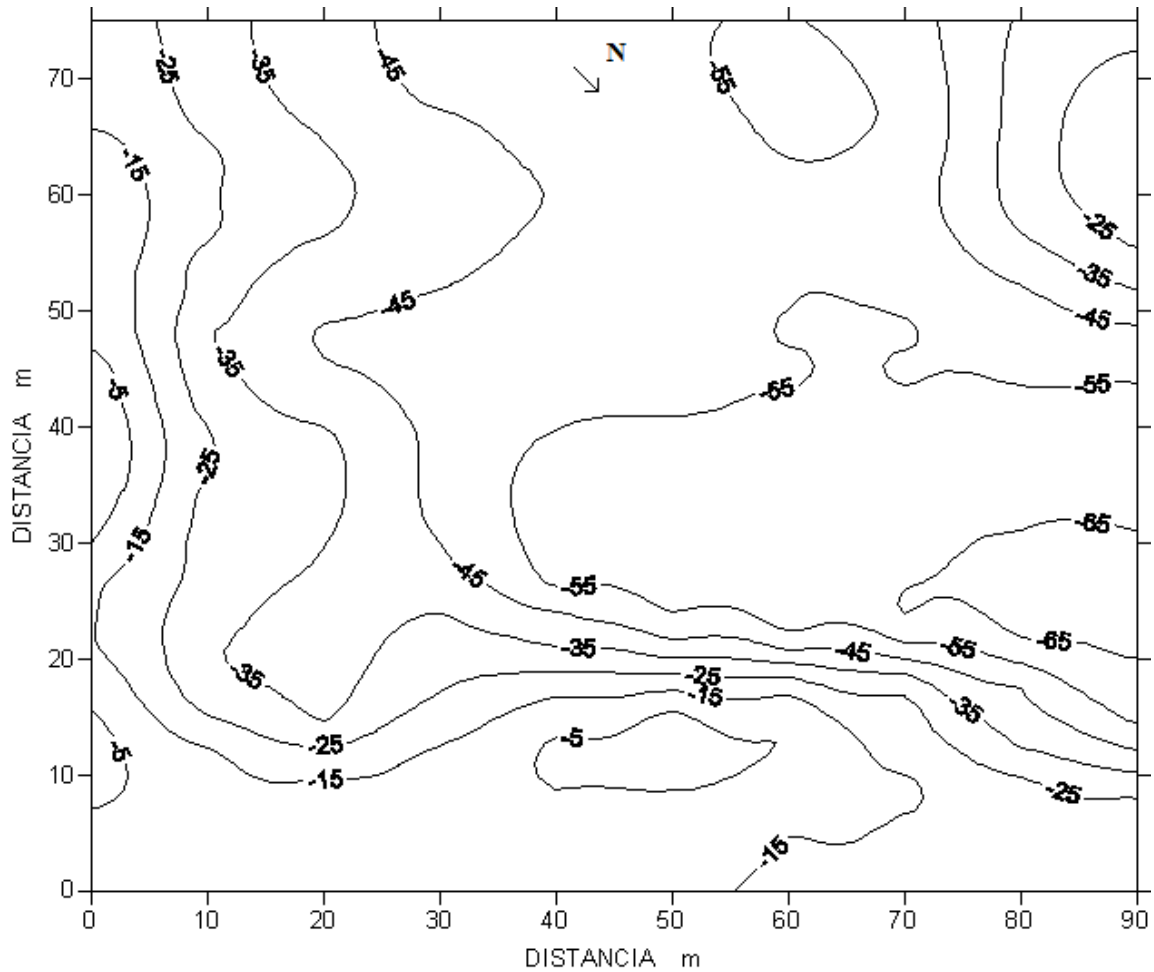


Figura 6.1: Potencial espontáneo subacuático medido sobre el cuerpo de presa y su entorno, aislíneas en mV.

Fuente: Elaboración propia

Mapa de la componente regional del campo potencial

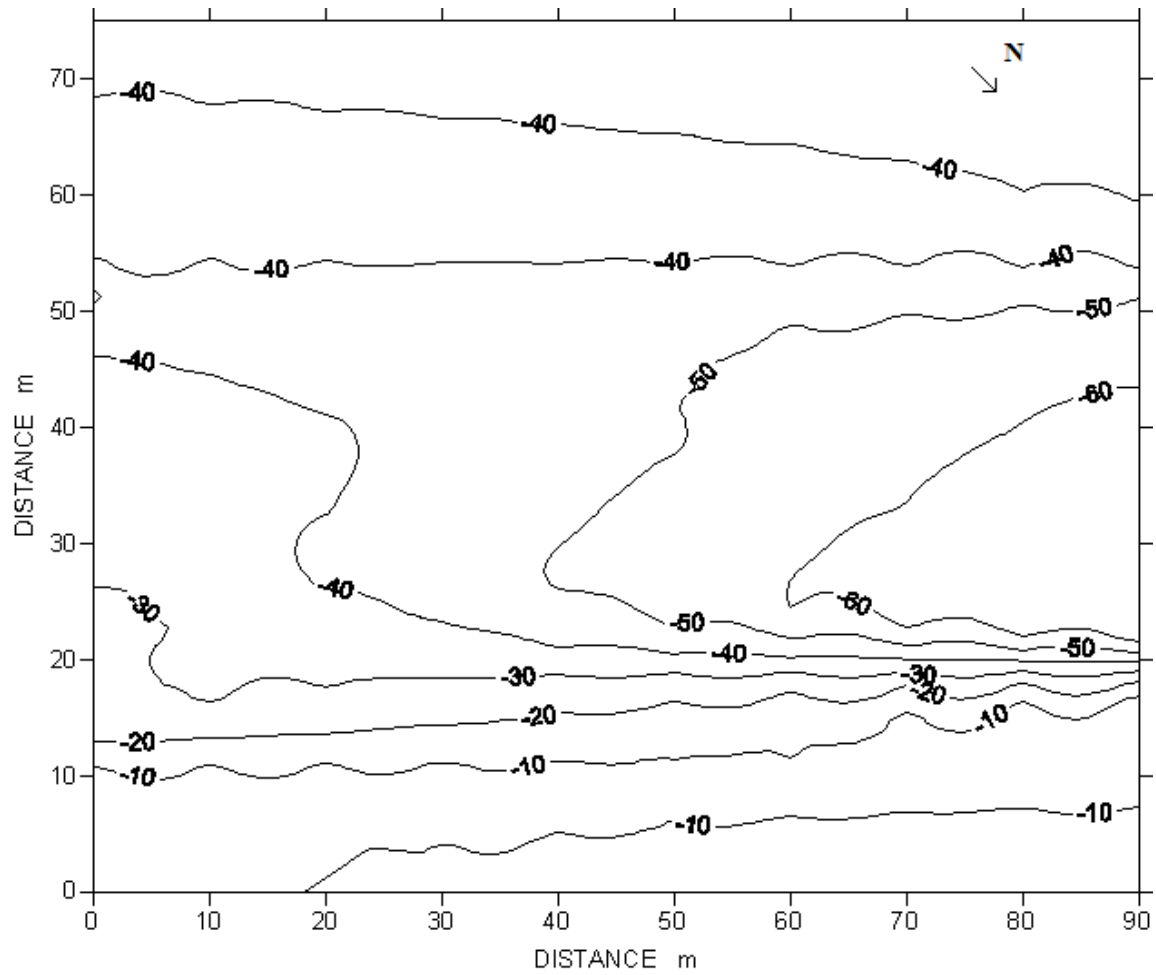


Figura 6.2: Componente regional del campo de potencial espontáneo subacuático medido, isolíneas en mV.

Fuente: Elaboración propia

Mapa de la componente residual del campo potencial. Las flechas de color celeste indican el sentido del flujo de agua.

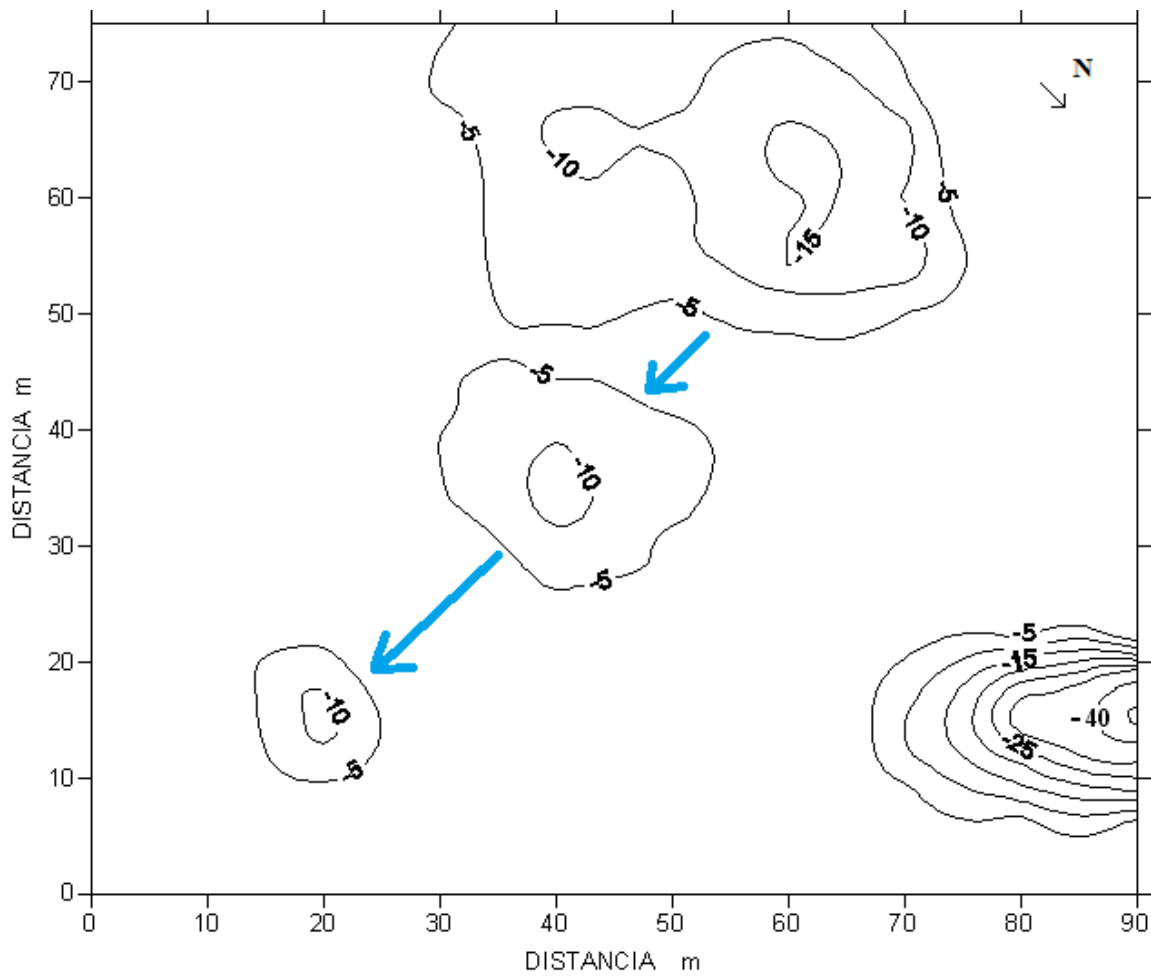


Figura 6.3 : Componente residual del campo de potencial espontáneo subacuático medido, isolíneas en mV.

Fuente: Elaboración propia

7 INTERPRETACIÓN

En la figura 7.1, se muestra una representación en 3D de la componente residual, en la que se ha dibujado con una flecha de color celeste la dirección del flujo de agua. Esta imagen un poco más ampliada de tamaño se encuentra en el anexo C.

Analizando la figura 6.3 y 7.1, se puede notar en el centro del mapa, diagonalmente tres anomalías, cuyas isolíneas aumentan en valores negativos. El tamaño de las anomalías disminuyen en dirección de la flecha marcada en el mapa de color celeste, la anomalía más grande representa un mayor flujo de agua, entonces vemos que el flujo de agua va disminuyendo en dirección de la flecha. Estas anomalías son típicas del desarrollo de una tubificación. En este caso se podría interpretar como el desarrollo de un camino preferencial de agua a través del cuerpo de la presa, producido por un flujo de agua subhorizontal que ingresa por la parte inferior de la cara aguas arriba de la presa.

Por otro lado, en la esquina derecha del mapa vemos una anomalía con una variación mucho más intensa, las isolíneas están muy juntas, tiene una forma algo alargada, con lo cual podríamos interpretarla como un flujo vertical.

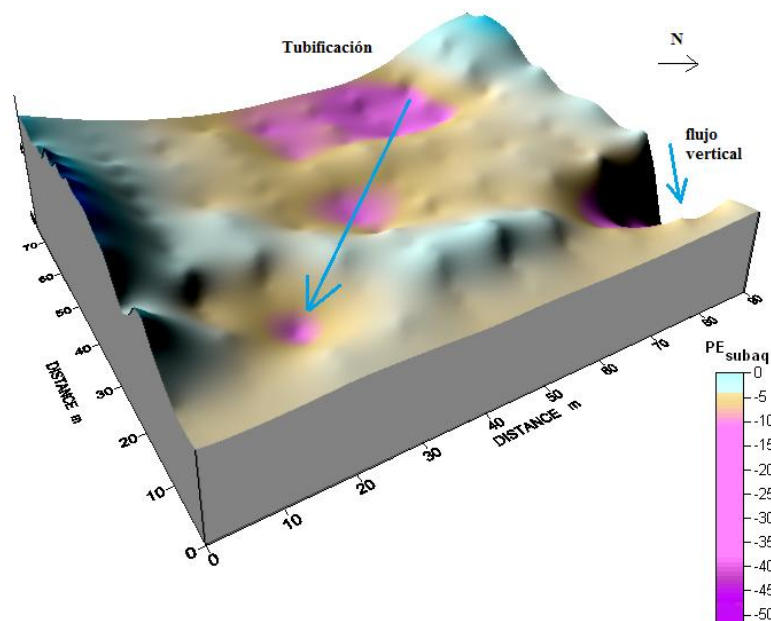


Figura 7.1: Representación en 3D de la componente residual del potencial espontáneo medido en la presa Santa Marta. (Construido con SURFER)

Fuente: Elaboración propia

8 CONCLUSIONES

Para la realización de este proyecto se revisó varios trabajos realizados en los que se ha aplicado la técnica de potencial espontáneo para la evaluación de filtraciones en las presas de materiales sueltos, y se realizó el procesado de datos de SP tomados en un caso particular (Presa Santa Marta), de lo cual se concluye que las medidas de potencial espontáneo es una técnica eficaz para la evaluación de filtraciones en presas de materiales sueltos, tiene la ventaja de ser un método, rápido, y económico, por la facilidad de la adquisición de datos en el campo.

A diferencia de las técnicas convencionales (piezómetros, balance hídrico) usadas para la evaluación de filtraciones, ésta es una técnica no invasiva lo cual es muy importante en este tipo de presas, para evitar daños en su estructura.

Otro aspecto importante es que mediante esta técnica podemos obtener información del flujo de agua dentro de la presa en su estado muy inicial, lo que nos permite tomar medidas correctivas a tiempo. Nos permite identificar la ubicación de fisuras en la cara aguas arriba de la presa por donde se esté infiltrando el agua en el cuerpo de la presa, entonces se podrá bajar el nivel del agua de la presa y sellar estas fisuras.

Las medidas de potencial espontáneo nos dan información de la trayectoria del agua dentro de la presa, con lo cual se puede usar esta técnica para evaluar el drenado eficaz del agua dentro de la presa, y así verificar el correcto funcionamiento de los drenes.

En este caso en particular se encontró una tubificación y un flujo vertical, con la ayuda de las medidas de potencial espontáneo.

Se puede ampliar la aplicación de esta técnica para la inspección de presas de gravedad, ya que en estas presas también se pueden producir fisuras o disolución de los materiales que se usa como pantalla impermeable.

Al ser España, el país con mayor número de presas de Europa, constituye un gran campo de aplicación para ésta técnica, la misma que contribuiría a reducir el riesgo de pérdidas económicas, mediante inspecciones regulares, donde se podrían detectar a tiempo posibles fugas evitando así el fallo de estas estructuras.

9 REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

9.1 ARTÍCULOS, LIBROS Y TESIS

BÉRUBÉ, A. (2004): “Investigating the streaming potential phenomenon using electric measurements and numerical modelling with special reference to seepage monitoring in embankment dams”. Doctoral Thesis. Luleå University of Technology (LTU). Division of Ore Geology and Applied Geophysics. Luleå, Suecia. Disponible en LTU Publications Database, Research: <https://pure.ltu.se/portal>

BOGOSLOVSKY, V., and OGILVY, A. (1973): “Deformation of natural electric fields near drainage structures”, in *Geophysical prospecting* N° 21, pp. 716-723

BOLÈVE, A., et al. (2011): “Localization and quantification of leakages in dams using time-lapse self-potential measurements associated with salt tracer injection”, in *Journal of Hydrology* N° 403 (2011) pp. 242–252

BOLÈVE, A., VANDEMEULEBROUCK, J., and GRANGEON, J. (2012): “Dyke leakage localization and hydraulic permeability estimation through self-potential and hydro-acoustic measurements: Self-potential ‘abacus’ diagram for hydraulic permeability estimation and uncertainty computation”, in *Journal of Applied Geophysics* N° 86 (2012) pp.17–28

BOLÈVE, A., et al. (2008): “Preferential fluid flow pathways in embankment dams imaged by self-potential tomography”, in *Near Surface Geophysics*, N° 7 (2009) pp. 447-462

FELL, R. et al. (2005): *Geotechnical Engineering of Dams*. Taylor & Francis Group, London, UK.

HILLER, T., KAUFMANN, G., and ROMANOV, D. (2011): “Karstification beneath dam-sites: From conceptual models to realistic scenarios”, in *Journal of Hydrology*, N° 398, (2011) pp. 201-211

KOFOED, V., et al. (2011): “Unique applications of MMR to track preferential groundwater flow paths in dams, mines, environmental sites, and leach fields”, in *The Leading Edge*, Vol. 30, N° 2 (February 2011) pp. 935-948

MILSOM, J. (1989): SP and IP: SP Surveys. In: *Field Geophysics* (3rd ed.). John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 2003. (pp. 17-20)

OGILVY, A., AYED, M., and BOGOSLOVSKY, V. (1968): “Geophysical studies of water leakages from reservoirs”. Paper presented at the Thirtieth Meeting of the European Association of Exploration Geophysicists, held in Salzburg, June 1968. Faculty of Geology, Moscow State University, Moscow.

PANTHULU, T., KRISHNAIAH, C., and SHIRKE, J.M. (2000): “Detection of seepage paths in earth dams using self-potential and electrical resistivity methods”, in *Engineering Geology* N° 59 (2001) pp. 281-295

REYNOLDS, J.M. (1997): Electrical Methods: Spontaneous (self) potential methods. In: *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons, Chichester, England, 2003. (pp. 491-521)

ROBERT, T. (2012): “Geophysical identification, characterization, and monitoring of preferential groundwater flow paths in fractured media”. Thesis (Doctor of Philosophy). University of Liège. Faculty of Applied Sciences. Architectural, Geological, Environmental and Civil Engineering Department. Liege, Bélgica. Disponible en el repositorio de University of Liège: <http://orbi.ulg.ac.be>

ROZYCKI, A. (2008): “Evaluation of the streaming potential effect of piping phenomena using a finite cylinder model”, in *Engineering Geology* N° 104 (2009) pp. 98–108

ROZYCKI, A. et al. (2008): “Resultados preliminares de los experimentos del efecto de polarización originado por un flujo de agua confinado en una estructura cilíndrica”, en *Ingeniería Civil* N° 151 (2008)

ROZYCKI, A., RUIZ FONTICIELLA, J., and CUADRA, A. (2005): “Detection and evaluation of horizontal fractures in earth dams using the self-potential method”, in Engineering Geology N° 82 (2006) pp.145– 153

SHEFFER, M. (2002): “Response of the self-potential method to changing seepage conditions in embankment dams”. Thesis (Master of Applied Science). The University Of British Columbia. Department of Civil Engineering. Vancouver, Canadá. Disponible en el repositorio digital de The University Of British Columbia: <https://circle.ubc.ca>

SHEFFER, M. (2007): “Forward modeling and inversion of streaming potential for the interpretation of hydraulic conditions from self-potential data”. Thesis (Doctor of Philosophy). The University Of British Columbia. Department of Geological Engineering. Vancouver, Canadá. Disponible en el repositorio digital de The University of British Columbia: <https://circle.ubc.ca>

TELFORD, W., GELDART, L., and SHERIFF, R. (1990): Methods Employing Natural Electrical Source: Self-Potential Method. In: Applied Geophysics (2nd ed.). Cambridge University Press, Cambridge. (pp. 293-302)

VALLARINO CÁNOVAS DEL CASTILLO, E. (2006): Tratado Básico de Presas, Tomo I (6^a edición). Publicaciones del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.

9.2 INTERNET

ABDEL G., et al. (2003): “Geophysical investigation of seepage from an earth fill dam, Washington County, MO”: Conference: Session 14: Unique Case Histories. In The International Conference on Applied Geophysics - Geophysics (3^o: 2003: Orlando, Florida) Florida Department of Transportation. Consulta realizada en Marzo 2013. Disponible en:

<http://www.dot.state.fl.us/statematerialsoffice/geotechnical/conference/materials/aal-ismail-anderson-atekwana.pdf>.

CORWIN, R. (1989): “Development of self-potential interpretation techniques for seepage detection”. Report 3, Geotechnical Applications of the self potential method.

Prepared for Department of the Army, Waterways Experiment Station, US Corps of Engineers. Washington, DC, February 1989. Tomado de: The Defense Technical Information Center (DTIC). <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a207704.pdf>

ICOLD (en línea): “Dams”. International Commission on Large Dams. Consulta realizada en febrero 2013. <http://www.icold-cigb.net>

ICOLD (en línea): “Register of Dams: General Synthesis”. International Commission on Large Dams. Consulta realizada en febrero 2013. <http://www.icold-cigb.net>

INE: “Estadísticas e indicadores del agua, 2008”. Cifras INE, Boletín informativo del Instituto Nacional de Estadísticas de España. Consulta realizada en, febrero 2013. <http://www.ine.es/revistas/cifraine/0108.pdf>

MINISTERIO DE AGRICULTURA ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE DE ESPAÑA (en línea): “Inventario de presas en España”. Consulta realizada en, febrero 2013. <http://sig.marm.es/snczi/visor.html?herramienta=EstadisticasPresas>

SPANCOLD (en línea): “Presas en España”. Spanish Committe on Large Dams. Consulta realizada en, febrero 2013. <http://www.spancold.es>

VALLARINO, A. (2012): “Tema 5: Presas”. Tomado de Open Course Ware de la Universidad de Salamanca. Enseñanzas técnicas, Ingeniería Cívil. Consulta realizada en marzo 2013.

<http://ocw.usal.es/enseñanzas-tecnicas/ingenieria-civil/contenido/TEMA%205%20-%20PRESAS.pdf>

9.3 TEXTOS LEGISLATIVOS

Directiva Marco Relativa al Agua 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, entró en vigor el 22 de diciembre del 2000, establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

**INSPECCIÓN TÉCNICA DE LA PRESA SANTA MARTA,
MEDIANTE MEDIDAS SUBACUÁTICAS DE POTENCIAL
ESPONTÁNEO**

DOCUMENTO 2: ESTUDIO ECONÓMICO

1. ESTUDIO ECONÓMICO

En este apartado se describe el estudio económico del proyecto, se debe tomar en cuenta que un trabajo completo de evaluación de filtraciones en una presa de materiales sueltos requiere algunos estudios complementarios para obtener resultados más confiables, pero en este proyecto solo se analizan las medidas subacuáticas de potencial espontáneo, y es por eso que solo se detallan los costos de la campaña de adquisición e interpretación de estas medidas.

1.1. ANÁLISIS DE COSTOS PARCIALES

Los costos de la campaña geofísica para este tipo de trabajos, se dividen en costos de la campaña de adquisición de datos y costos de la interpretación de los datos medidos.

a) Campaña de adquisición de datos

La toma de medidas en campo se realizó en un día, y los gastos necesarios para llevar a cabo este trabajo fueron; transporte, alquiler de equipos geofísicos, tres operarios y un geofísico. El concepto y costos se detallan en la tabla 1.

Tabla 1: Costos de campaña de adquisición de datos

CAMPAÑA DE ADQUISICIÓN DE DATOS				
CONCEPTO	Costo/día	Días	No. Personas	TOTAL
TRANSPORTE	100,00 EUR	1		100,00 EUR
ALQUILER DE EQUIPO	500,00 EUR	1		500,00 EUR
OPERARIOS	80,00 EUR	1	3	240,00 EUR
TÉCNICO GEOFÍSICO	300,00 EUR	1	1	300,00 EUR
TOTAL				1.140,00 EUR

b) Interpretación de datos

Luego de la adquisición de los datos se procede a la interpretación de los mismos y la redacción del informe final, para lo cual fueron necesarios tres días.

El concepto y costos se detallan en la tabla 2.

Tabla 2: Costos de campaña de interpretación de datos

INTERPRETACIÓN			
CONCEPTO	Costo/día	Días	TOTAL
ALQUILER DEL PROGRAMA	100,00 EUR	2	200,00 EUR
TÉCNICO GEOFÍSICO	150,00 EUR	3	450,00 EUR
REDACCIÓN DEL INFORME	100,00 EUR	1	100,00 EUR
TOTAL			750,00 EUR

1.2. RESUMEN DE COSTO TOTAL DEL PROYECTO

En la tabla 3, se resume el costo total del proyecto, que asciende a 1.890,00 EUR.

Tabla 3: Costo total del proyecto

COSTO TOTAL DEL PROYECTO	
CONCEPTO	COSTO
ADQUISICIÓN DE DATOS	1.140,00 EUR
INTERPRETACIÓN	750,00 EUR
TOTAL	1.890,00 EUR

**INSPECCIÓN TÉCNICA DE LA PRESA SANTA MARTA,
MEDIANTE MEDIDAS SUBACUÁTICAS DE POTENCIAL
ESPONTÁNEO**

DOCUMENTO 3: ANEXOS

ANEXO A

DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DE INTERPRETACIÓN P.E.v1

A. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE P.E.v1

El programa P.E., cuyas siglas se refiere a potencial espontáneo, es un software que ha sido diseñado para automatizar la interpretación de los datos medidos de potencial espontáneo.

El programa usa lenguaje de programación M, que es el lenguaje propio de MATLAB, y está compuesto por varios módulos. Muchos de los módulos son prácticamente independientes entre sí, lo que permite una libre elección en su uso durante el proceso de interpretación, sin necesidad de seguir un camino lineal y predeterminado.

Descripción de los Módulos

- **Módulo 0**

Este módulo está destinado para la lectura y procesado del fichero original de datos medidos. Dicho fichero debe tener el formato de una hoja de cálculo de Excel, en el cual deben estar representadas las coordenadas X, Y, Z de los valores medidos, donde Z representa la magnitud del potencial espontáneo. Este módulo tiene el aspecto mostrado en la figura.A1.

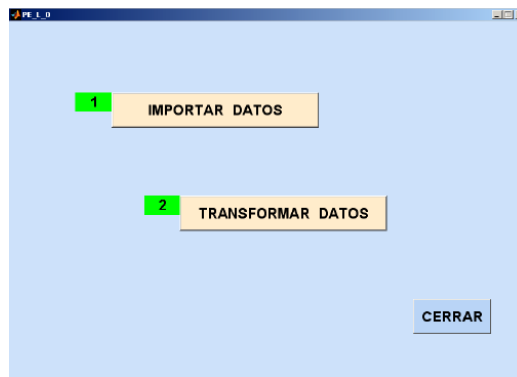


Figura A1: Módulo 0

El botón **IMPORTAR DATOS**, permite abrir cualquier fichero de datos en todas las carpetas existentes en el disco duro del computador, y mediante un asistente de importación de valores se guía al usuario en este proceso.

El botón **TRANSFORMAR DATOS**, sirve para adecuar los datos del formato Excel a la estructura exigida por las subrutinas de MATLAB.

- **Módulo 1**

El objetivo del Módulo 1 es presentar el mapa de isolíneas de los valores del potencial espontáneo. Al inicializarse este módulo se muestra en la pantalla la siguiente imagen. (Figura A2).

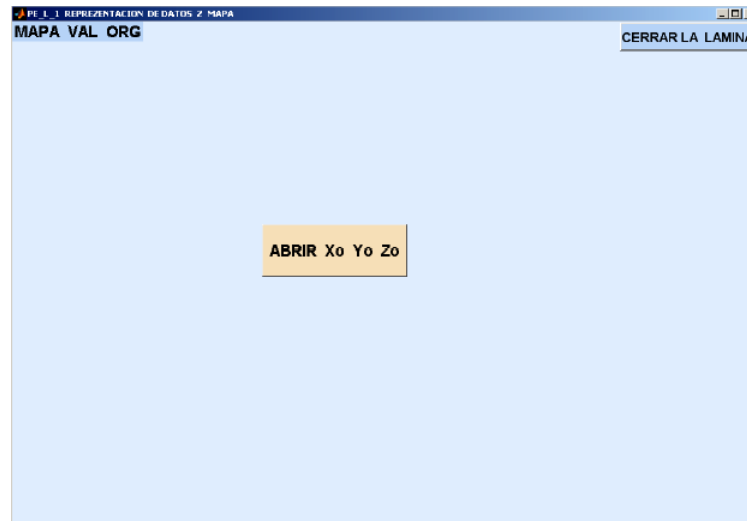


Figura A2: Módulo 1

El botón **ABRIR Xo, Yo, Zo** permite importar estos datos y una vez finalizada dicha tarea aparece en el monitor el correspondiente mapa, tal como se muestra en la figura A3.

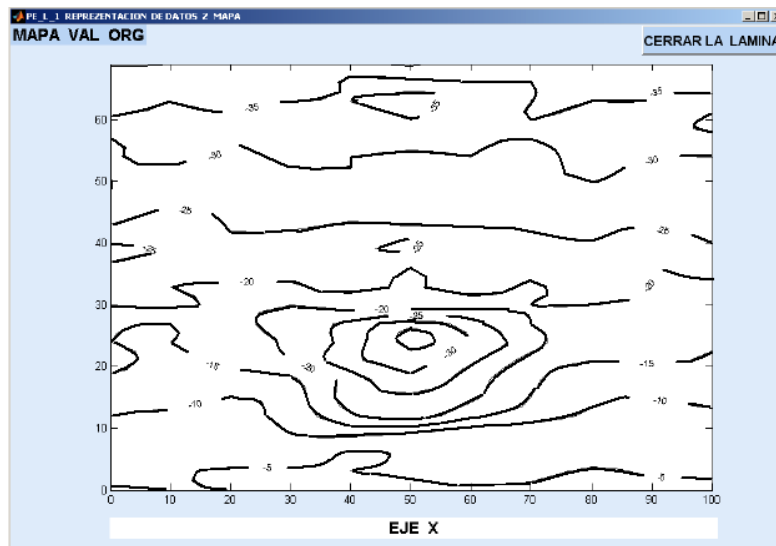


Figura A3: Mapa de isolíneas de potencial espontáneo

- **Módulo 2**

El módulo 2 cumple un papel parecido al módulo anterior, con la diferencia que en este módulo se representan los datos en forma de relieve.

Al inicializarse el Módulo dos se solicita la importación de los datos. (Figura A4)



Figura A4: Módulo 2

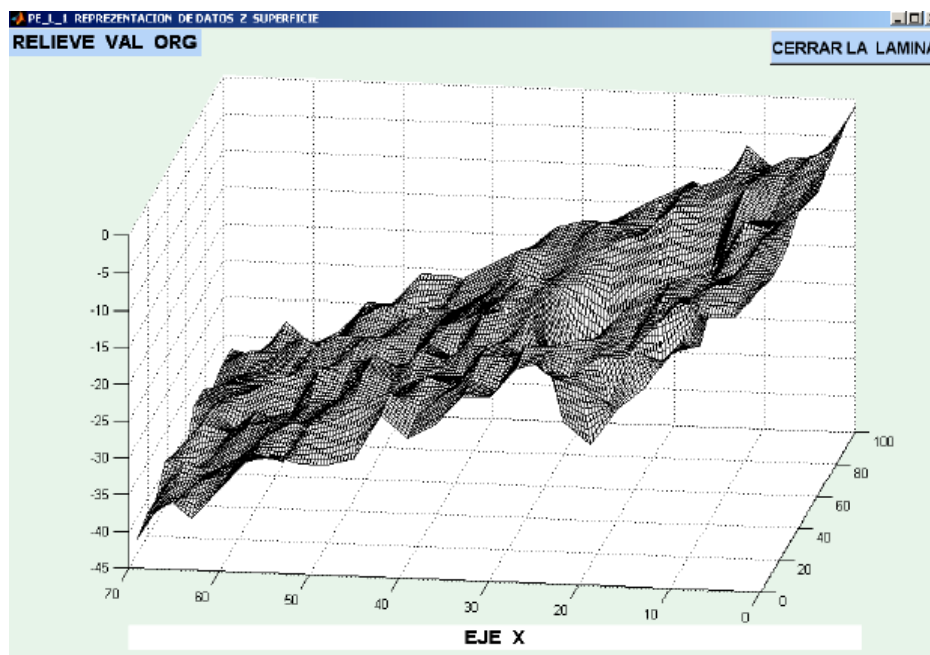


Figura A5: Representación de los datos en forma de relieve

- **Módulo 3X**

El Módulo 3X permite realizar un filtrado de datos basado en una ventana deslizante de tres puntos ponderados. Este tipo de filtraje corresponde a una acción de pasa baja. La letra X en el nombre del módulo recuerda que los perfiles que se procesan están representados según el eje X, paralelo a la coronación del cuerpo de presa. Al inicializarse el Módulo 3X se puede observar la siguiente imagen. (Figura A6)

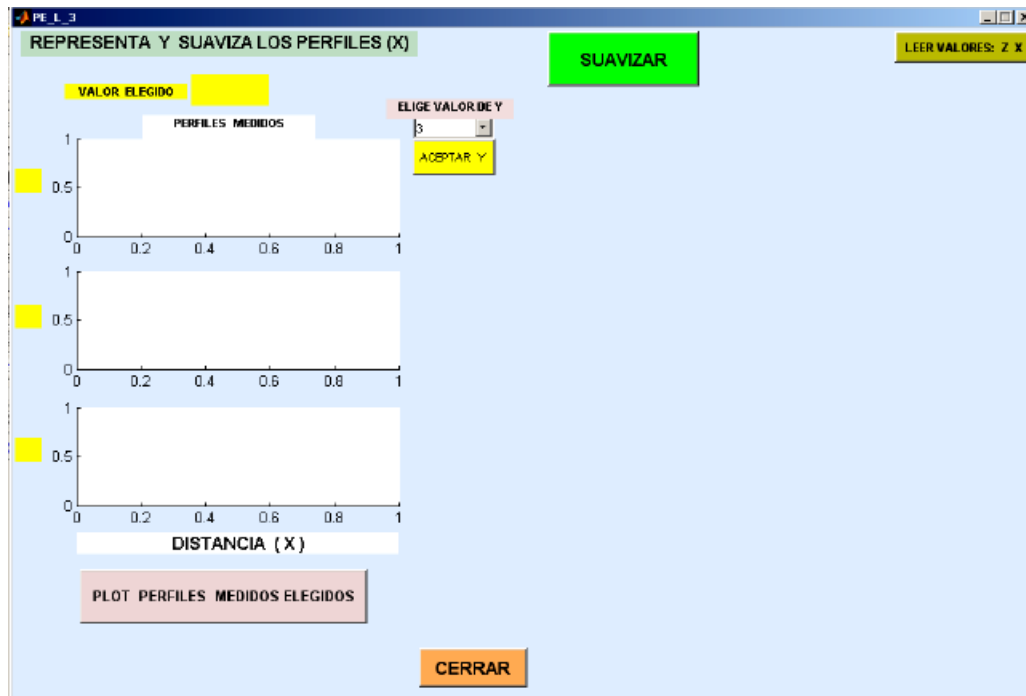


Figura A6: Módulo 3

El botón de la elección del valor de Y permite escoger la ubicación del perfil analizado entre las posibles distancias comprendidas entre el valor 0 y 69 m, con el paso de 3 m.

El perfil seleccionado se representa en la ventana central de los ejes.

El botón **PLOT PERFILES MEDIDOS ELEGIDOS** dibuja los valores del perfil seleccionado. A su vez, los perfiles, anterior y posterior se pueden observar en las ventanas adyacentes.

El botón **SUAVIZAR** aplica el filtro mencionado anteriormente, y se presenta los resultados como se muestra en la figura A7.

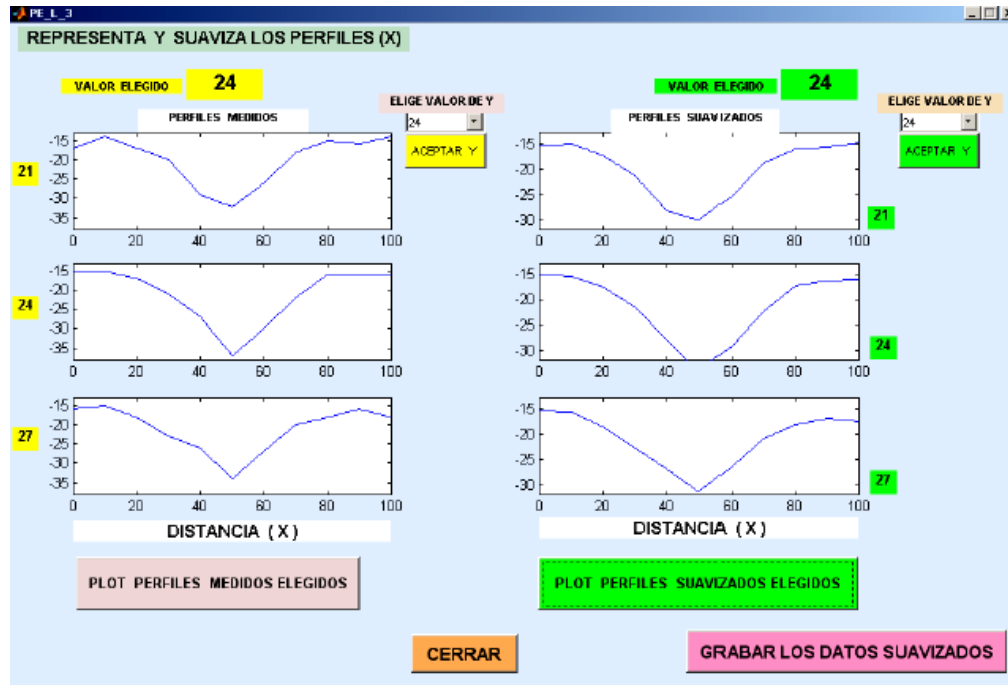


Figura A7: Perfiles medidos y perfiles suavizados mediante un filtro pasa baja

- **Módulo 4X**

El módulo 4XP permite calcular las componentes: regional y residual de los datos medidos.

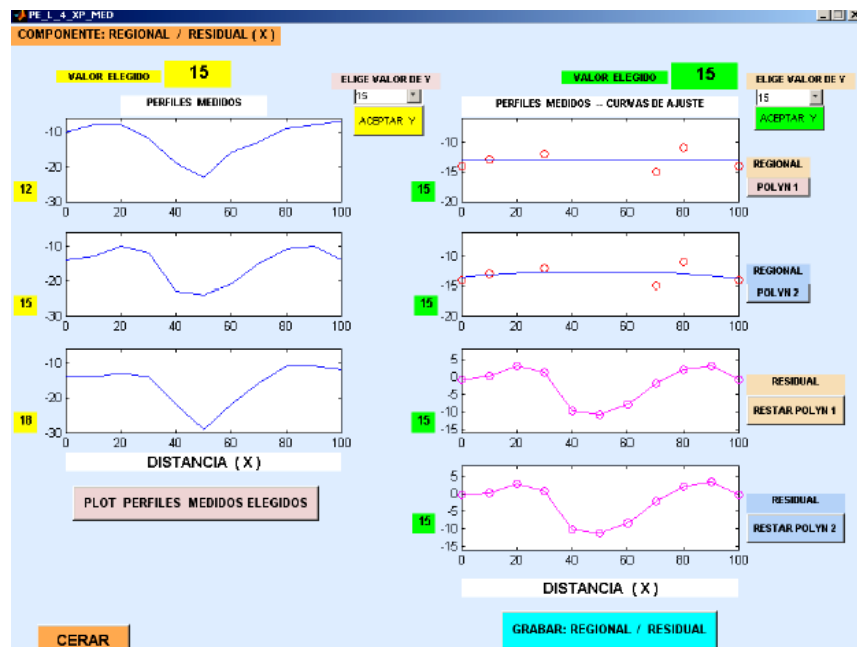


Figura A8: Módulo 4X, Componente Regional/Residual

Luego del procesado de datos, se presenta en la pantalla; a la izquierda, los perfiles medidos en las tres ventanas y a la derecha los datos filtrados según sus valores de la desviación estándar con los correspondientes polinomios de ajuste de grado 1 o 2. También se pueden observar los valores anómalos, que son el producto de las correspondientes restas. (Figura A8)

- **Módulos VX_1 y VX_2**

La función de los módulos VX_1 y VX_2 es representar en la pantalla los mapas de los valores procesados en los módulos anteriores. La imagen inicial de este módulo se representa en la figura A9.



Figura A9: Módulo VX_1

Se puede elegir el tipo de datos a representar: medidos solo o medidos y suavizados, y luego se puede escoger entre las componentes regional o residual.

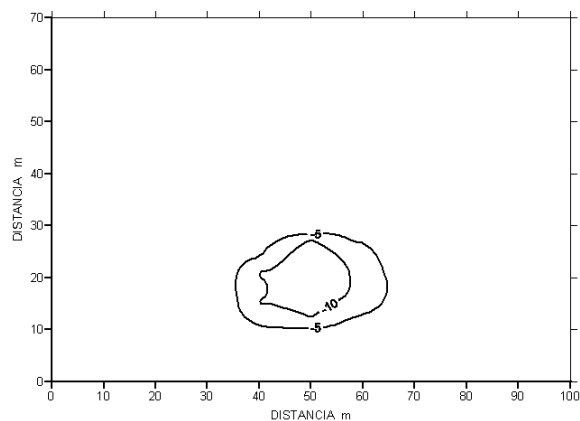


Figura A10: Representación de los valores procesados de potencial espontáneo

- **Módulo MAT_a_EXCEL**

El objetivo del módulo "MAT_a_EXCEL" es cambiar la estructura de los datos del entorno de MATLAB al protocolo de "Excel". De esta manera se pueden representar empleando los datos procesados por el Programa P. E. con el software comercial.

La imagen inicial de este módulo se representa en la figura A11.




Figura A11: Módulo MAT-EXCEL

ANEXO B

ESTADÍSTICAS DE PRESAS EN ESPAÑA

B. PRESAS DE ESPAÑA SEGÚN SU TIPOLOGÍA



Tipología	Número de Presas	Porcentaje
Arco gravedad	48	3,12 %
Bóveda	56	3,64 %
Bóvedas múltiples	1	0,07 %
Contrafuertes	31	2,02 %
Gravedad	814	52,93 %
Gravedad y contrafuertes	6	0,39 %
Gravedad y mampostería	17	1,11 %
Gravedad y materiales sueltos homogénea	17	1,11 %
Gravedad y materiales sueltos P asfáltica	3	0,20 %
Gravedad y materiales sueltos pantalla	4	0,26 %
Hormigón armado	4	0,26 %
Hormigón compactado	22	1,43 %
Mampostería	23	1,50 %
Materiales sueltos homogénea	268	17,43 %
Materiales sueltos núcleo arcilla	134	8,71 %
Materiales sueltos P asfáltica	21	1,37 %
Materiales sueltos P hormigón	37	2,41 %
Materiales Suelos P lámina	13	0,85 %
Materiales Suelos y mampostería	5	0,33 %
Materiales sueltos zonificada	7	0,46 %
Presas móviles	1	0,07 %
Otras	6	0,39 %
TOTAL	1538	

ANEXO C

MAPA DE ANOMALÍAS DE SP EN LA PRESA SANTA MARTA

C. COMPONENTE RESIDUAL DEL POTENCIAL ESPONTÁNEO SUBACUÁTICO DE LA PRESA SANTA MARTA

Mapa elaborado con SURFER

Flechas de color celeste indica la dirección del flujo de agua

Los valores de la escala de colores están en mV.

