



Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

Manual de fugas en embalses

Antonio Plata Bedmar

Incluido en el Programa Editorial del Ministerio de Fomento
para 1999, aprobado por la Secretaría General Técnica

Edita:
Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
c/. Alfonso XII, 3 - 28014 Madrid.

NIPO: 163-99-003-X

ISSN: 0211-6502

ISBN: 84-7790-335-2

Depósito Legal: M-13.360-1999

Imprime: **ARTEGRAF, S.A.**

Sebastián Gómez, 5

28026 MADRID

ÍNDICE DE MATERIAS

CAPÍTULO I. Consideraciones generales

1.1. Introducción	9
1.2. Naturaleza y objetivos de los estudios	10
1.3. Técnicas utilizadas	12

CAPÍTULO II. Balance hídrico, ley de filtraciones y piezometría

2.1. Balance hídrico del embalse	15
2.2. Relación entre nivel del agua en el embalse y caudal de las surgencias (ley de filtraciones)	16
2.3. Estudios piezométricos	21
Bibliografía	24

CAPÍTULO III. Ensayos de permeabilidad en sondeos

3.1. Generalidades	25
3.2. Ensayos del tipo Gilg-Gavard	26
3.2.1. Método de nivel constante	26
3.2.1.1. <i>Método tradicional</i>	26
3.2.1.2. <i>Método basado en la medida del flujo vertical descendente</i>	27
3.2.2. Método de nivel variable	29
3.3. Ensayo de Lungeon	32
3.4. Ensayo Lefranc	32
3.5. Método basado en la inducción de un flujo vertical ascendente mediante bombeo	34
3.5.1. Fundamento teórico	34
3.5.2. Medidores de flujos verticales	35
3.7. Ensayo para la medida de la porosidad eficaz	37
Bibliografía	38

CAPÍTULO IV. Ensayos geofísicos

4.1. Generalidades	41
4.2. Técnicas geofísicas de superficie	42

4.2.1. Potencial espontáneo	42
4.2.1.1. <i>Consideraciones teóricas</i>	42
4.2.1.2. <i>Método experimental</i>	43
4.2.2. Resistividad	45
4.2.3. Sísmica de refracción	46
4.2.4. Microgravedad	46
4.2.5. Radar penetrante	47
4.3. Testificación geofísica de sondeos	48
4.3.1. Testificación gamma natural	48
4.3.2. Potencial espontáneo y resistividad	54
4.3.3. Método de inducción electromagnética	56
4.3.4. Testificación gamma-gamma ($\gamma\text{-}\gamma$)	56
4.3.4.1. <i>Consideraciones teóricas</i>	56
4.3.4.2. <i>Usos sugeridos</i>	58
4.3.5. Testificación neutrón-neutrón (n-n)	59
4.3.5.1. <i>Consideraciones teóricas</i>	59
4.3.5.2. <i>Usos sugeridos</i>	60
4.3.6. Transmisión de sonido	60
4.3.7. Calibre	60
Bibliografía	62
CAPITULO V. Trazadores naturales del agua:	
A) Temperatura, conductividad y composición química	
5.1. Introducción	65
5.2. Temperatura del agua	67
5.2.1. Consideraciones generales	67
5.2.2. Información que puede obtenerse	70
5.3. Conductividad	75
5.3.1. Consideraciones teóricas	75
5.3.2. Aplicaciones	77
5.4. Caso del embalse Joumine, Túnez	86
5.5. Composición química del agua	91
5.5.1. Consideraciones generales	91
5.5.2. Componentes químicos mayoritarios del agua	92
5.5.3. Evaluación de la calidad de los análisis	94
5.5.4. Concentraciones y origen de los componentes salinos	94
5.5.5. Solubilidad de los minerales	95
5.5.6. Aplicaciones	97
Bibliografía	102

CAPITULO VI. Trazadores naturales del agua:

B) Isótopos estables del agua, tritio y carbono-13

6.1. Conceptos básicos	103
6.2. Isótopos estables del agua	105
6.2.1. Especies moleculares del agua	105
6.2.2. Desviación isotópica, δ	106
6.2.3. Fraccionamiento isotópico	106
6.2.4. Fraccionamiento isotópico en condiciones de equilibrio y de no equilibrio	107
6.2.5. Proceso Rayleigh como modelo de fraccionamiento isotópico	108
6.2.6. Relación entre δD y $\delta^{18}O$ en las precipitaciones	109
6.2.7. Variación de la composición isotópica de las aguas meteóricas con la temperatura	110
6.2.8. Otros factores que afectan a la composición isotópica de las precipitaciones	111
6.2.8.1. <i>Condiciones de formación de las nubes o masas de aire húmedo</i>	111
6.2.8.2. <i>Mezcla del vapor atmosférico de origen oceánico con vapor de agua de procedencia local</i>	111
6.2.8.3. <i>Efecto de altitud</i>	111
6.2.8.4. <i>Evaporación durante la caída del agua de la nube al suelo</i>	111
6.2.8.5. <i>Evaporación sobre la superficie</i>	112
6.2.8.6. <i>Efecto de continentalidad</i>	112
6.2.8.7. <i>Efecto de cantidad</i>	112
6.2.9. Posibilidades ofrecidas por la técnica	114
6.3. Tritio	116
6.3.1. Generalidades	116
6.3.2. Aplicaciones	119
6.4. Carbono-13	122
6.4.1. Fundamentos de la técnica	122
6.4.2. Casos de estudio	124
Bibliografía	128

CAPÍTULO VII. Trazadores artificiales

A: Generalidades. experiencias de interconexión

7.1. Introducción	131
7.2. Sólidos en suspensión	132
7.3. Trazadores químicos iónicos	132
7.4. Trazadores fluorescentes	134
7.4.1. Generalidades	134
7.4.2. Técnicas de medida	134
7.4.3. Uso del carbón activo	136
7.4.4. Tipos de trazadores	138

7.5. Trazadores radiactivos artificiales	142
7.5.1. Generalidades	142
7.5.2. Bromo-82	142
7.5.3. Yodo-131	143
7.5.4. Oro-198	145
7.5.5. Tritio	145
7.5.6. Consideraciones sobre riesgos sanitarios	147
7.6. Experiencias de interconexión hidráulica	149
7.6.1. Consideraciones generales	149
7.6.2. Inyección en el vaso del embalse	150
7.6.3. Inyección dentro de un sondeo	151
7.6.4. Método experimental	152
7.6.5. Casos de estudio	155
Bibliografía	161

CAPÍTULO VIII. Trazadores artificiales

B: Localización y medida de flujos en sondeos

8.1. Introducción	163
8.2. Trazadores utilizados	164
8.3. Medida de flujos horizontales	165
8.3.1. Velocidad de filtración	165
8.3.2. Teoría del método de dilución puntual	165
8.3.2.1. <i>Principio del método</i>	165
8.3.2.2. <i>Coefficiente de perturbación hidrodinámica α</i>	166
8.3.3. Técnica experimental	169
8.3.4. Inconvenientes	171
8.3.5. Método basado en el marcado de toda la columna	172
8.3.5.1. <i>Técnica experimental</i>	172
8.3.5.2. <i>Interpretación de los resultados</i>	176
8.3.5.3. <i>Ventajas del método</i>	178
8.4. Medida de flujos verticales	182
8.4.1. Generalidades	182
8.4.2. Técnicas de medida	183
8.4.2.1. <i>Técnicas basadas en el uso de trazadores</i>	183
8.4.2.2. <i>Empleo de medidores de flujo</i>	189
8.4.3. Interpretación de los resultados	190
Bibliografía	190

CAPÍTULO IX. Ensayos realizados en el vaso

9.1. Introducción	193
9.2. Uso de biplanos	194

9.3. Multitrazado del agua del embalse	195
9.4. Migración libre de la nube de trazador	198
9.5. Método de los tubos filtrantes	199
9.6. Marcado de la zona de infiltración	200
9.7. Medidores de infiltración (infiltrómetros)	204
9.7.1. Generalidades	204
9.7.2. Medidor DWICA	204
9.7.3. Método de Zuber	204
9.7.4. Método de Easey	207
9.7.5. Método de Gaillard et al. (1991)	207
9.7.6. Método de dilución puntual	209
9.7.7. Otras posibilidades	209
9.7.7.1. Sistema de dilución puntual deslizable	209
9.7.7.2. Dilución puntual a lo largo de un tubo filtrante de gran longitud	213
9.7.7.3. Medida de la componente vertical descendente del flujo profundo con trazadores	213
9.7.7.4. Medida de la componente vertical con medidores de flujo	215
9.7.7.5. Sistemas de tipo péndulo o veleta	217
Bibliografía	221

CAPÍTULO X. Estrategia general de los estudios

10.1. Introducción	223
10.2. Estudios previos a la construcción de la presa	223
10.2.1. Generalidades	223
10.2.2. Recomendaciones generales	224
10.2.3. Riesgos de fugas	225
10.2.4. Técnicas utilizadas	226
10.2.5. Casos de estudio	228
10.2.5.1. Embalse de Cuyaguajeje, Cuba	228
10.2.5.2. Embalse de Pangué, Chile	229
10.2.5.3. Laguna San Marcos, Ecuador	229
10.2.5.5. Embalse de Poçeme, Albania	231
10.2.5.6. Embalse de Atance, Guadalajara	234
10.2.5.7. Embalse de Rules, Granada	239
10.2.5.8. Embalse de Bellús, Alicante	242
10.3. Estudios durante el primer llenado del embalse	244
10.3.1. Introducción	244
10.3.2. Balance hídrico	244
10.3.3. Seguimiento de niveles	245
10.3.4. Seguimiento de flujos en sondeos	246
10.3.5. Seguimiento de caudales de manantiales o surgencias	246
10.3.6. Estudio de la infiltración a través de accidentes estructurales de la roca	246

10.3.7. Estudio de la infiltración por debajo de la presa	248
10.3.8. Estudio del asentamiento de la presa	249
10.4. Investigación de fugas una vez producidas	249
10.5. Relación del embalse con los acuíferos de la zona	252
Bibliografía	253

CAPÍTULO XI. Casos de estudio

11.1. Generalidades	255
11.2. Embalse de Arquillo de San Blas, Teruel	255
11.3. Lago de Managua, Nicaragua	261
11.4. Embalse de Sabaneta, República Dominicana	267
11.5. Lago Laja, Chile	273
11.6. Embalse de Colbún, Chile	284
Bibliografía	294

ANEXO I. Método de calculo de las filtraciones por debajo de la presa en el caso de un medio granular isótropo	295
ANEXO II. Método de aforo de corrientes abiertas utilizando trazadores ..	299
ANEXO III. Dispersión longitudinal del trazador	315
ANEXO IV. Balance isotópico de lagos y embalse	319
ANEXO V. Cálculo de la permeabilidad de tubos filtrantes	325

CAPÍTULO I. CONSIDERACIONES GENERALES

1.1. INTRODUCCIÓN

La mayor parte de los embalses que se construyen en el mundo presentan pérdidas de agua de mayor o menor importancia. A pesar de los estudios que suelen realizarse antes y durante la construcción de las presas, no siempre es posible prever el comportamiento de las formaciones geológicas sobre las que estas se apoyan. Por tanto, puede decirse que siempre que se construye una presa existe un determinado riesgo de producirse fugas de agua. En ocasiones, este riesgo se conoce de antemano y es asumido en toda su magnitud debido a la ausencia de otras alternativas para la construcción de la presa. Los problemas derivados de las fugas pueden variar entre aquéllos que afectan a la estabilidad de la propia obra o de las formaciones en las que ésta se apoya y los que se refieren al simple valor material del agua que escapa del embalse.

Con frecuencia, las fugas de agua son de tal importancia que exigen la realización de costosas obras de reparación. En la mayor parte de los casos, estas obras se ejecutan sin un estudio previo suficientemente detallado y los resultados de las mismas no son los esperados. Son frecuentes los casos en los que se han realizado grandes inversiones en obras de reparación sin haberse obtenido un resultado positivo. En muchos casos, la razón de la falta de este estudio previo deriva del desconocimiento por parte de los técnicos que se ocupan de este tipo de obras de las posibilidades de investigación que ofrecen las técnicas modernas desarrolladas con esta finalidad. El presente tratado pretende cubrir, precisamente, esta falta de información.

La planificación de las obras de reparación de las filtraciones de embalses con suficientes garantías de éxito exige un conocimiento detallado del comportamiento hidráulico de las formaciones involucradas, que no puede obtenerse sólo a partir de las informaciones disponibles a una escala regional. Los parámetros hidráulicos de las formaciones geológicas y, por tanto, los flujos de agua en las proximidades de la presa pueden variar drásticamente dentro de distancias muy cortas, sobre todo cuando se trata de rocas consolidadas fracturadas. Por tanto, es absolutamente necesario disponer de datos obtenidos a través de técnicas directas de investigación, que informan sobre el esquema real de los flujos de agua existentes en la zona afectada y no de datos inferidos, exclusivamente, de consideraciones geológicas e hidrogeológicas de carácter general. Estas técnicas directas incluyen, entre otras muchas, el uso de trazadores naturales y artificiales del agua.

Los problemas hidrológicos derivados de la presencia de fugas de agua son siempre complicados cuando se trata de identificar con detalle los flujos subterráneos responsables de las mismas. Generalmente, es necesario recurrir para ello al uso de técnicas muy diversas, que se complementan entre sí. Por razones obvias, el punto de partida para este tipo de estudios es siempre la geología e hidrogeología de la zona afectada.

Una característica general de los estudios que se realizan para la localización de fugas de embalses es su bajo costo en comparación con las obras de reparación. Ello hace que la relación de costo a beneficio resulte insignificante en la mayor parte de los casos.

Son escasas las publicaciones conocidas sobre estudios de fugas de embalses y más aún las que abordan el problema de una forma completa. El presente Manual se basa, principalmente, en la experiencia adquirida por el autor a través de los estudios realizados en los siguientes embalses:

Canelles, Atazár, Contreras, Montanejos, Tous, Escalona, Rules, Bellús, Guadalhorce, El Tejo, Arquillo de San Blas, Beninar, lagunas de Ruidera y embalse de Peñarroya, La Cenia, Vertedero de residuos de Cetransa, Balsa minera de Aznalcóllar y Buenas Yervas en España.

Herradura, Cautillo y Cuyaguatije en Cuba.

La Honda en Venezuela.

Sabaneta, Maguaca, Chacuey y Aguacate en República Dominicana.

Chingaza en Colombia.

Colbún, Yeso y lago Laja en Chile.

Oanob en Namibia.

Aoulouz en Marruecos.

Takna en Chipre.

Arenal en Costa Rica.

Tapacurá, Botafojo y Poços de Caldas (balsa de residuos mineros) en Brasil.

Agoyán y laguna de San Marcos en Ecuador.

Lago de Managua en Nicaragua.

La Sierpe de Panamá.

Joumine en Túnez

Foum el Gherza en Argelia

1.2. NATURALEZA Y OBJETIVOS DE LOS ESTUDIOS

En principio, los estudios relacionados con las fugas de embalses pueden ser realizados en tres fases diferentes:

- 1) Antes de la construcción de la presa, es decir, como parte de los estudios de factibilidad y de reconocimiento que suelen realizarse de una forma general.
- 2) Durante la fase de construcción de la presa, cuando algunas estructuras geológicas involucradas quedan al descubierto o se hacen accesibles a través de galerías o sondeos perforados con fines diversos.
- 3) Con posterioridad a la construcción de la presa, una vez que el problema de filtraciones de agua se ha hecho patente y hay que tratar de solucionarlo.

Lo ideal es que los problemas de filtraciones de agua queden totalmente resueltos a través de los estudios realizados en las dos fases primeras. Por lo general, los costos de las obras de impermeabilización del terreno son mucho menores cuando se realizan durante la construcción de la presa. Sin embargo, esto no siempre es posible, porque, en esta fase, las estructuras geológicas más superiores se encuentran en seco y es difícil prever con la debida precisión cual será su comportamiento una vez que se encuentren inundadas y sean sometidas a la carga hidráulica del embalse. Esto es cierto, sobre todo, cuando se trata de rocas fracturadas.

Los estudios que se realizan antes y durante la construcción de la presa deben tener como objetivo principal la obtención de las informaciones siguientes:

- 1) Identificación de la posible existencia en la zona de la cerrada de estructuras, formaciones o estratos geológicos permeables a través de los cuales pueda infiltrarse el agua una vez que el embalse se encuentre lleno. Especialmente importante es investigar la posible existencia de un eventual paleocauce en la zona de la cerrada, que pueda actuar como «by-pass» entre el embalse y la zona de aguas abajo de la presa. Las técnicas recomendadas para ello se describen más adelante.
- 2) Particularmente importante es comprobar la posible existencia de manantiales situados en la zona de la cerrada o aguas abajo de la misma. Si estos manantiales existen, aunque sean de muy pequeño caudal, es necesario investigar el origen del agua que los alimenta. Puede tratarse de aguas infiltradas dentro de la zona que quedará inundada por el futuro embalse, en cuyo caso, los caudales de las surgencias se incrementarían de forma drástica una vez que éste se encuentre en carga. Esto ocurre con cierta frecuencia en el caso de manantiales cársticos, que, frecuentemente, son alimentados por el agua del propio río infiltrada aguas arriba del punto donde se encuentra el manantial.
- 3) Inventario completo de todos los puntos de agua que puedan tener alguna relación con el futuro embalse, en un entorno de la cerrada de unos 10 a 20 kilómetros, según los casos y de acuerdo con la geología local. Debe realizarse una caracterización química e isotópica (en Capítulos posteriores se explica en que consisten) de todos estos puntos de agua con el objeto de establecer las condiciones iniciales y estudiar los cambios producidos por el embalse una vez que se encuentre lleno, es decir, el posible desplazamiento del agua del acuífero por el agua del embalse. Incluso, si esta caracterización no fuera posible debido a la falta de medios, resulta recomendable guardar muestras de los principales puntos de agua en recipientes herméticos, de forma que ésta pueda realizarse en el futuro, sobre todo, en el caso de presentarse algún tipo de problema sobre filtraciones. El conocimiento de las condiciones existentes antes de construir la presa será de gran utilidad para el análisis del problema.

Lógicamente, los estudios que se realizan con el embalse en carga tienen como finalidad principal la localización de los flujos de agua responsables de eventuales surgencias aparecidas aguas abajo de la presa o del incremento de niveles piezométricos de los acuíferos circundantes. Las filtraciones pueden tener lugar en las siguientes zonas:

- 1) En las formaciones geológicas que constituyen la cerrada, en cuyo caso, la presencia de posibles fallas u otro tipo de accidentes estructurales, tales como diaclasas, dolinas, etc., juegan un papel primordial. En ocasiones, las filtraciones ocurren a través de estratos arenosos permeables colgados, relacionados con antiguas terrazas aluviales. Este es el caso del embalse de Chacuey en República Dominicana.
- 2) En las formaciones donde se encuentra la cimentación de la presa, que suelen corresponder a restos de materiales aluviales no extraídos durante los trabajos de excavación o que fueron impropriamente impermeabilizados (caso de la presa de Maguaca en República Dominicana).

- 3) En los contactos entre las estructuras de hormigón de la presa con el terreno (caso de la presa de Sabaneta en República Dominicana, zona del aliviadero de servicio).
- 4) Filtraciones a través del cuerpo de la presa en el caso de presas de materiales sueltos. Estas filtraciones pueden derivarse de la mala calidad de los materiales utilizados para la construcción de los elementos impermeables de la presa o de una deficiente compactación de los mismos. Este último fue el caso de la presa de La Herradura en Cuba.
- 5) Deficiencias en la construcción de estructuras de hormigón derivadas, por ejemplo, de la falta de vibración de este material durante su tendido (caso de la presa de Tapacurá en Brasil) o de la eventual presencia de flujos de agua que arrastran los materiales finos durante el tendido en masa del hormigón. Esto último ocurrió en la presa de Sabaneta (República Dominicana) durante la construcción del túnel de desagüe de fondo. La presencia de un manantial de carácter permanente localizado en la base del cuerpo de la presa fue, en este caso, la causa del arrastre del cemento durante el tendido del hormigón. El hormigón pobre así formado no resistió la carga hidráulica del embalse una vez que éste se llenó.
- 6) Filtraciones a través del cuerpo de la presa, en caso de presas de hormigón, derivadas del fracturamiento de éste como consecuencia de un asentamiento diferencial. Este fue el caso de la presa del Atazar, situada en las proximidades de Madrid.

Una conclusión que se deduce de lo expuesto anteriormente es que cada caso de filtraciones de agua es distinto de los otros. Por tanto, no existe una receta general que pueda aplicarse en todos los casos para el estudio de las filtraciones, sino que, más bien, cada caso requiere una planificación específica sobre los estudios a realizar de acuerdo con sus características. Incluso, esta planificación no puede ser rígida, sino que los resultados que se vayan obteniendo sobre la marcha deben servir de base para definir la continuación de los estudios.

1.3. TÉCNICAS UTILIZADAS

Como se ha mencionado anteriormente, las informaciones geológicas e hidrogeológicas de la zona afectada por las filtraciones son siempre el punto de partida para cualquier estudio de fugas de embalses. Por lo general, estas informaciones proporcionan una hipótesis de partida sobre la cual ha de basarse el programa experimental a llevar a cabo durante la fase inicial de los estudios. La práctica demuestra que este tipo de estudios exige el uso combinado de técnicas diversas, sin que deba excluirse «a priori» ninguna de ellas. A veces, la solución del problema se encuentra donde menos se espera.

Se indican a continuación las técnicas más importantes que se utilizan para la investigación de fugas en embalses. Estas son las siguientes:

- 1) Balance hídrico del embalse.
- 2) Relación entre el nivel del agua en el embalse y los caudales de las surgencias existentes aguas abajo de la presa, es decir, lo que se llama ley de filtraciones.

- 3) Técnicas basadas en la medida de niveles piezométricos en los sondeos existentes en la zona de la presa y en las laderas del embalse.
- 4) Ensayos de permeabilidad en sondeos y calicatas.
- 5) Ensayos de testificación geofísica realizados en sondeos, tales como:
 - a) Testificación gamma natural.
 - b) Medidas de flujos verticales utilizando sondas comerciales.
 - c) Potencial espontáneo y resistividad en el caso de sondeos no entubados.
 - d) En algunos casos, ultrasonidos, inducción magnética, etc.
- 6) Ensayos geofísicos realizados en superficie, entre los cuales los de resistividad y potencial espontáneo ofrecen las mayores posibilidades.
- 7) Uso de la temperatura del agua como trazador natural para determinar la cota a la cual se produce la infiltración del agua que aflora por las surgencias.
- 8) Técnicas basadas en la medida de parámetros químicos y físico-químicos en sondeos y surgencias, incluyendo:
 - a) Medida de perfiles de temperatura y conductividad en sondeos y su relación con los mismos perfiles obtenidos en el embalse.
 - b) Distribución de la temperatura, conductividad y otros parámetros químicos en las diferentes surgencias de la zona.
 - c) Análisis químicos de los componentes mayoritarios del agua, es decir, de los iones Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3H^- , NO_3^- , Na^+ , K^+ , Ca^{++} y Mg^{++} . En ocasiones, puede resultar de interés el análisis de SiO_2 , hierro y otros componentes minoritarios, que, eventualmente, puedan encontrarse en el agua del embalse, por ejemplo, como consecuencia del vertido de aguas residuales.
- 9) Técnicas basadas en la medida de los isótopos naturales contenidos en el agua, concretamente, de los isótopos estables deuterio, oxígeno-18 y carbono-13 y del isótopo radiactivo tritio.
- 10) Técnicas basadas en el uso de trazadores artificiales, incluyendo las siguientes:
 - a) Medida de flujos en el interior de sondeos.
 - b) Experiencias de interconexión entre el embalse (o sondeos) y las surgencias (o sondeos) situadas aguas abajo.
 - c) Ensayos dentro del vaso para localizar la zona del mismo donde se produce la infiltración del agua.
- 11) Detección y medida de flujos dentro del vaso usando flotadores del tipo biplano.
- 12) Localización de zonas de infiltración preferencial usando dispositivos de tipo hidráulico denominados infiltrómetros.

En los Capítulos que siguen, se presentan los fundamentos teóricos, así como las posibilidades y limitaciones de estas técnicas. A juicio del autor de este Manual, no existe en el mundo un Instituto o Centro de Investigación que disponga de una estructura suficiente para aplicar la totalidad de las técnicas indicadas, ni siquiera del personal técnico preparado para la ejecución de las mismas. Muchos de los estudios sobre fugas de embalses se realizan utilizando un número muy limitado de técnicas (a veces, sólo una o dos técnicas), que, además, no siempre son las más idóneas para resolver el problema planteado. Cuando sucede esto, las posibilidades de éxito son muy reducidas. El presente Manual pretende cubrir esta deficiencia, informando

al lector sobre las posibilidades ofrecidas por las diferentes técnicas disponibles en el momento presente, de forma que le permita elaborar el programa de estudios más apropiado de acuerdo con las características particulares del problema planteado.

CAPÍTULO II. BALANCE HÍDRICO, LEY DE FILTRACIONES Y PIEZOMETRÍA

2.1. BALANCE HÍDRICO DEL EMBALSE

Se presentan casos en los cuales se sospecha la existencia de filtraciones sin que éstas puedan cuantificarse en los afloramientos de aguas abajo, bien porque estos afloramientos no existen, bien porque los afloramientos existentes no representan la totalidad de las pérdidas de agua (parte del agua que escapa del embalse puede incorporarse a un flujo subterráneo sin llegar a aflorar) o bien porque todos o parte de los afloramientos se producen en el vaso de otro embalse situado aguas abajo (caso del embalse de Canelles, Lérida, antes de su reparación).

En tales casos, puede resultar útil llevar a cabo la cuantificación de las pérdidas de agua mediante la realización del balance del embalse referido a un período de tiempo determinado. Obviamente, este balance implica controlar todas las entradas y salidas de agua del embalse durante dicho período de tiempo. Las pérdidas por infiltración vienen dadas por la diferencia entre las entradas y salidas totales, la cual se reflejará, lógicamente, en la variación del nivel del agua del embalse. La ecuación de balance puede expresarse de la forma siguiente:

$$[V_{asup} + V_{asub} + V_{prec}] - [V_{dsup} + V_{evap}] - \text{Fugas} = \text{Cambio de volumen}; \quad (2.1)$$

donde V representa el volumen de agua aportado o descargado durante el período de tiempo a que se refiere el balance y los subíndices representan, respectivamente, los aportes por flujos superficiales, aportes por flujos subterráneos, aportes por precipitación sobre el propio embalse, descarga superficial y pérdidas por evaporación.

Obviamente, la determinación de todos estos parámetros lleva inherente un error determinado, cuyo valor depende de las circunstancias particulares de cada caso. El balance hídrico sólo será posible si este error es pequeño comparado con la magnitud de las pérdidas de agua. Esta condición no se cumple en la mayoría de los casos, sobre todo, cuando las pérdidas son pequeñas comparadas con los valores de las entradas y de las otras salidas. La elección apropiada del período de tiempo durante el cual se realiza el balance puede ayudar al respecto. Por ejemplo, puede elegirse el período de mayor estiaje con el objeto de que los componentes relacionados con las precipitaciones tengan una influencia nula o muy pequeña.

En algunos casos, pueden plantearse ecuaciones de balance similares a la ecuación (2.1) para determinados componentes químicos o isotópicos contenidos en el agua, los cuales llegan al embalse en forma de un impulso estacional o relacionado con vertidos de aguas residuales. Por ejemplo, pueden usarse las concentraciones de determinados iones conservativos, tales como los iones Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- ; la desviación isotópica de oxígeno-18 o la concentración de tritio. La ecuación de balance se plantea multiplicando los volúmenes que intervienen en la ecuación (2.1) por las concentraciones respectivas del componente de que se trate, las cuales se deter-

minan experimentalmente. Esta ecuación (o ecuaciones, si son más de una) forma con la (2.1) un sistema de ecuaciones, que permite eliminar alguno de los parámetros, cuya determinación sea difícil o imposible.

En el Anexo IV, se describen los fundamentos teóricos del balance de los isótopos estables deuterio y oxígeno-18 en lagos y embalses. Para mayor información sobre este tema se remite al lector a las referencias MERLIVAT, L. (1970), NIR, A. (1973), HUTCHINSON, G.E. (1975) y ZUBER, A. (1983).

2.2. RELACIÓN ENTRE NIVEL DEL AGUA EN EL EMBALSE Y CAUDAL DE LAS SURGENCIAS (LEY DE FILTRACIONES)

La importancia de establecer la relación existente entre el nivel del agua embalsada y el caudal de las surgencias existentes aguas abajo resulta obvia. A través de esta relación, puede llegar a determinarse la cota o intervalo de cota en la cual se produce la infiltración del agua que alimenta a las surgencias. Esta relación es denominada por algunos autores ley de filtraciones. Como se verá en el apartado próximo, igualmente importante resulta estudiar la relación existente entre dicho nivel y los correspondientes a los sondeos que puedan existir en la zona, es decir, la respuesta de los acuíferos de la zona a los cambios de nivel del embalse.

El método exige la medida periódica del caudal de las surgencias en función de la variación de nivel del agua del embalse. Lógicamente, la frecuencia de las medidas dependerá de la rapidez que se modifique el nivel del agua del embalse. Cuando existen varias surgencias, que se encuentran alimentadas por flujos de agua independientes, resulta de gran interés realizar el control de las mismas por separado. La velocidad de respuesta de estas surgencias a los cambios de nivel del agua del embalse puede ser muy distinta de unas a otras. La composición química y, a veces también, la temperatura del agua pueden ser de gran ayuda para diferenciar entre sí surgencias alimentadas por diferentes flujos subterráneos. Incluso, surgencias alimentadas por el mismo flujo subterráneo, pero con diferentes tiempos de tránsito del agua entre el embalse y el punto de afloramiento, pueden mostrar cambios significativos de composición química debido a las diferencias en la cantidad de materiales del terreno, que son solubilizados entre el embalse y el punto de afloramiento.

Los resultados obtenidos pueden representarse en forma de diagramas, tales como los indicado en la figura 2.1 para dos casos concretos. Cuando toda el agua que aflora por las surgencias procede de una misma cota del embalse, los puntos que reflejan los cambios de caudal con el nivel de éste se sitúan a lo largo de una línea recta. El caudal de la surgencia varía proporcionalmente con el nivel del agua, es decir, con la carga hidráulica. La extrapolación de la línea recta hasta un caudal cero proporciona la cota media aproximada a la cual se produce la infiltración del agua en el embalse. En el caso de la figura 2.1A, que corresponde al embalse de Oanob (Namibia), esta intersección se produce para una cota de 1437 metros, la cual es unos 12 metros más baja que la cota máxima. Por tanto, las filtraciones ocurren en la capa más superficial del embalse (véanse fotografías 2.1 y 2.2).

Cuando se produce un cambio de pendiente, tal como el observado en la figura 2.1B, que corresponde al embalse de Sabaneta (República Dominicana), ello significa la activación de una segunda zona de infiltración situada a la cota media a la cual se produce el cambio de pendiente. En el caso de la figura, esta segunda zona de infiltración estaba formada por el contacto del terreno con la estructura de hormigón del



Fotografía 2.1. Vista general de la presa Oanob, Namibia.



Fotografía 2.2. Zona de filtraciones del embalse de Oanob, Namibia. El agua procede de los niveles más superiores del embalse.

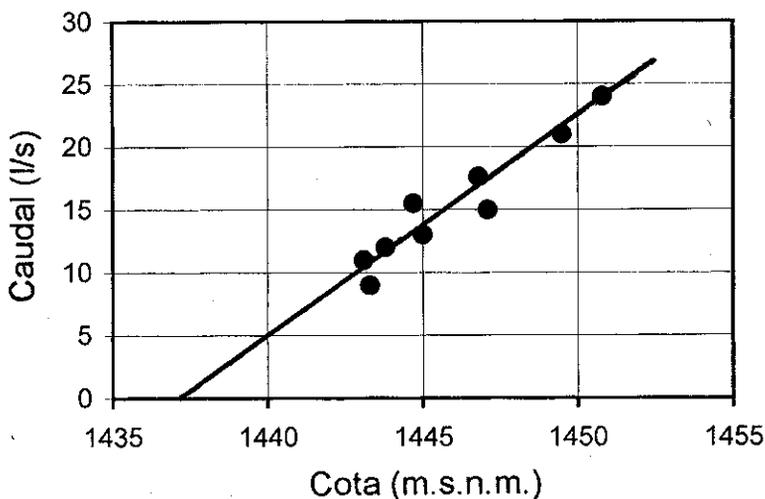
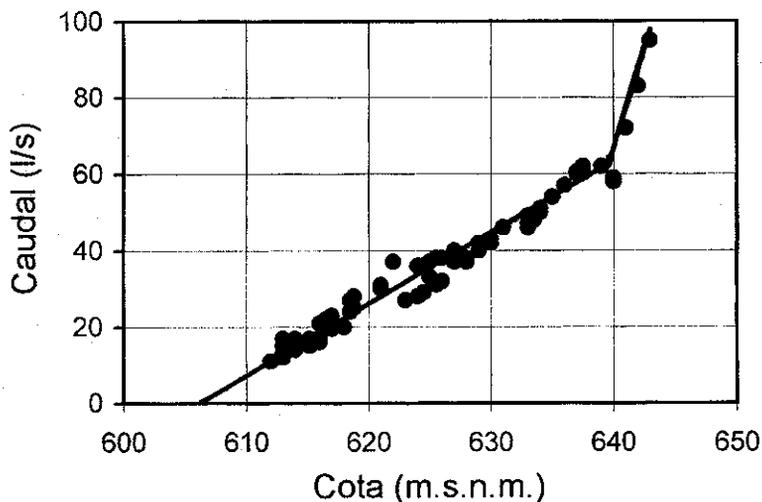
A**Embalse de Oanob****B****Embalse de Sabaneta**

Figura 2.1. Ley de filtraciones obtenidas para los embalses de Oanob (Namibia) y Sabaneta (República Dominicana).

aliviadero de servicio, también denominado «morning glory». El aumento de caudal se producía cuando el nivel del agua alcanzaba la cota 640, que correspondía a una terraza que permitía la llegada del agua del embalse al contacto antes mencionado.

Lógicamente, en casos de una infiltración difusa a cotas diferentes, no se obtiene para la ley de filtraciones una línea recta sino una línea curva, cuya pendiente aumenta con el nivel del agua, debido a aumentar paralelamente el área de la zona de infiltración.

Por otra parte, la rapidez con que varía el caudal de la surgencia en función del nivel del agua en el embalse proporciona información sobre las características de la conexión hidráulica existente entre ambos. La rapidez de respuesta depende, por una parte, de la permeabilidad media de los materiales involucrados en las filtraciones y, por otra, del volumen del almacenamiento subterráneo a través del cual llega a la surgencia el agua procedente del embalse. Como es obvio, dicho almacenamiento produce una amortiguación y retraso en la onda de caudal que llega a la surgencia. Las condiciones hidráulicas de esta transmisión de la onda de caudal son distintas cuando el embalse aumenta de nivel que cuando dicho nivel disminuye. En el primer caso, una parte del agua que se infiltra en el embalse se destina a rellenar cavidades del terreno, que estaban vacías, y la salida del agua por la surgencia se produce con un cierto retraso, el cual depende de la relación entre la tasa de infiltración y del volumen de estas cavidades. A medida que este volumen va disminuyendo, la fracción del agua infiltrada que llega a la surgencia aumenta. En el segundo caso, el agua que se encuentra rellenando estas cavidades tiene que ser drenada a través de la surgencia a medida que el nivel del embalse desciende. Como consecuencia de ello, la disminución del caudal que aflora por esta última experimenta, asimismo, un cierto retraso.

La influencia de la velocidad de llenado del embalse se aprecia de forma clara en la figura 2.2, que corresponde a los resultados obtenidos por el autor de este Manual en un embalse, cuyo nombre no es posible revelar por falta de autorización. Durante el proceso de llenado del embalse, se obtuvo la ley de filtraciones dada por la línea A. Sin embargo, debido a que el llenado del embalse se produjo de forma muy rápida, por causa de unas condiciones meteorológicas muy favorables, el caudal de las surgencias continuó aumentando aún después de alcanzarse la cota máxima de 761,3 metros, pasando de 180 l/s a 287 l/s (línea B). El caudal de los afloramientos se estabilizó una vez que todas las cavidades se encontraron llenas. Durante el vaciado del embalse, que se realizó asimismo de forma rápida, se obtuvo la línea C, donde se aprecia el retraso en la disminución del caudal antes mencionado. En el caso haberse efectuado un llenado o vaciado muy lento, se habría obtenido una línea recta similar a la línea D. El desfase entre esta línea y la línea C se debe ahora al vaciado de las cavidades de la roca.

Lo anterior indica que el caudal que aflora por una determinada surgencia, para un mismo nivel del agua del embalse, puede ser muy diferente dependiendo de que la medida se haga con un régimen de variación del nivel ascendente o descendente. Pero, además, la diferencia entre los caudales obtenidos en ambas condiciones depende en gran medida de la rapidez con que se produce el cambio de nivel en el embalse, así como del volumen de las cavidades de la roca en el tramo afectado por el cambio de nivel.

De acuerdo con esto, resulta clara la conveniencia de introducir el tiempo como parámetro en los estudios que se realizan sobre la ley de filtraciones del embalse. Esto se hace a través de la representación de diagramas del tipo mostrado en la figura 2.3, en los que se analiza la variación con el tiempo, tanto del nivel del agua del embalse, como del caudal de la surgencia. El caso de dicha figura corresponde al mismo embalse de la figura 2.2.

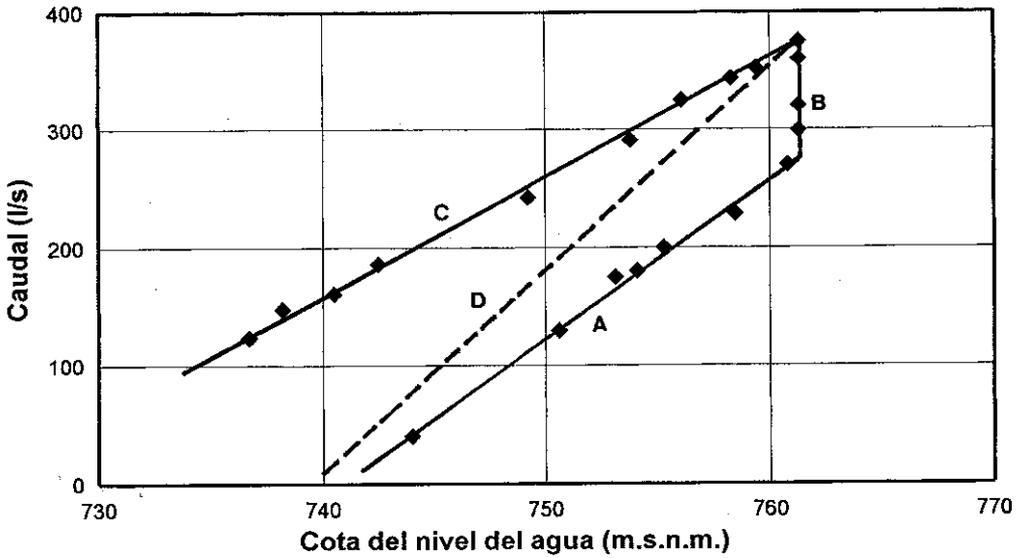


Figura 2.2. Variación del caudal de las surgencias en función del nivel del agua del embalse durante llenado (línea A) y vaciado (línea C) del embalse. La línea B refleja el aumento de caudal producido a medida que se rellenan las cavidades de la roca. La línea D corresponde a la situación aproximada que se tendría en el caso de haberse realizado un llenado o vaciado muy lento. Los datos corresponden a un embalse estudiado por el autor de este Manual, cuyo nombre no es posible revelar por falta de autorización.

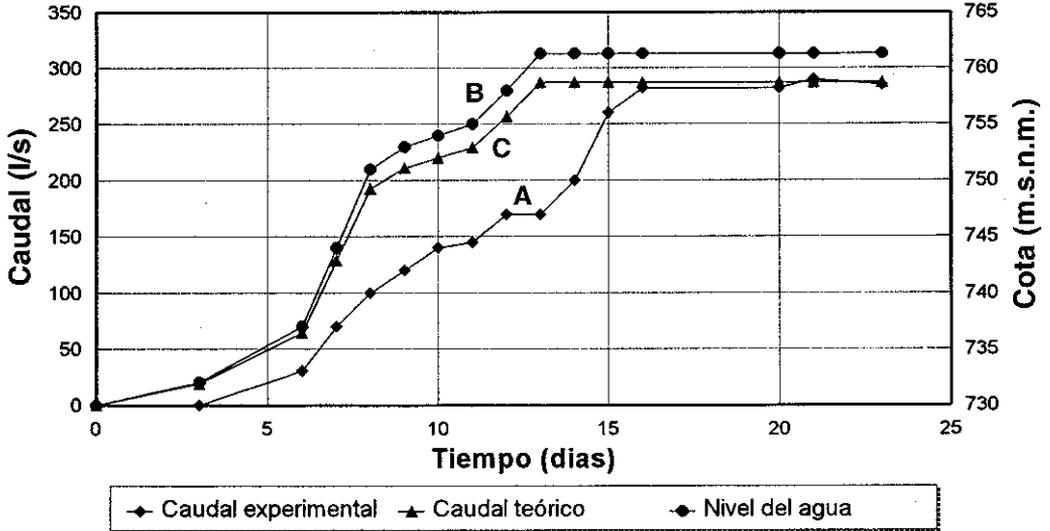


Figura 2.3. Correlación entre la variación del nivel del agua del embalse (línea A) y del caudal de las surgencias (línea B) en función del tiempo para el mismo embalse de la figura 2.2. La línea C corresponde al caudal teórico que deberían haber tenido las surgencias para el caso de un llenado muy lento del embalse. La diferencia entre los caudales reflejados por las líneas C y B permite estimar el volumen total mínimo de las cavidades existentes en la masa de roca involucrada en las filtraciones.

En una situación como la anterior de rápido ascenso o descenso del nivel, los resultados del estudio pueden permitir la estimación del volumen mínimo de las cavidades que forman el almacenamiento subterráneo, a través del cual se conecta la surgencia con el embalse. Ello se hace comparando el caudal que aflora por la surgencia en condiciones de llenado rápido con el que se tendría en condiciones de llenado muy lento con equilibrio permanente entre embalse y surgencia. Para este último, pueden usarse datos experimentales, si son conocidos, o bien pueden calcularse a partir del caudal máximo de la surgencia medido cuando el nivel del embalse ha permanecido a la cota máxima de llenado (o bien a otra cota diferente) durante un tiempo lo bastante largo para que se alcance un caudal estable.

Por ejemplo, en el caso del embalse de la figura 2.2, se sabe que los afloramientos de la galería de la margen derecha se inician cuando el agua del embalse alcanza la cota 732 y toman un valor máximo de 287 l/s cuando el embalse permanece en la cota máxima de llenado (761,3 m) durante un tiempo largo. Por tanto, suponiendo que existe una proporcionalidad entre el caudal Q del agua infiltrada en el embalse y la cota de llenado de éste h , dicho caudal puede calcularse analíticamente por medio de la ecuación de la recta que pasa por los puntos $Q=0$ para $h=730$ metros y $Q=287$ l/s para $h=761,3$ metros. La ecuación de esta recta es $Q=9,169h-6693$. Usando dicha ecuación, se han calculado los valores de Q correspondientes a los niveles del agua en el embalse obtenidos experimentalmente. Se obtiene así la curva C mostrada en la figura 2.3. El volumen del agua infiltrada que se destina a rellenar cavidades se obtiene a través de la diferencia entre las áreas de las curvas C y B, la cual puede obtenerse de una forma gráfica. El valor obtenido en este caso fue próximo a 70000 m³. Lógicamente, este valor corresponde a un volumen mínimo de las cavidades, puesto que muchas de ellas se rellenan total o parcialmente durante el período de llenado, aunque éste sea muy corto. La formación geológica donde se encuentran estas cavidades consistía en dolomías fracturadas, para la cual puede suponerse una porosidad comprendida entre 2 y 5%. Por tanto, el volumen de roca afectado por el flujo que alimenta a las filtraciones estaría comprendido entre 1,4 y 3,5 millones de metros cúbicos. Este volumen tan elevado excluye la posibilidad de que la infiltración del agua en el embalse tenga lugar en una zona muy próxima a la presa. En el caso del estudio, la existencia de galerías mineras dentro de la zona inundada por el embalse fue la causa responsable del elevado volumen de cavidades de la formación dolomítica y, por tanto, de las filtraciones existentes. Esto se comprobó mediante la realización de experiencias de interconexión con trazadores artificiales fluorescentes inyectados en diferentes puntos del embalse.

El ejemplo anterior ilustra sobre la utilidad del estudio descrito. La determinación de la velocidad de respuesta de las surgencias a los cambios de nivel del agua del embalse permite obtener información sobre el volumen del almacenamiento subterráneo que alimenta a las mismas y, por tanto, sobre la posibilidad de que la zona de infiltración del agua dentro del vaso pueda encontrarse o no en las proximidades de la presa.

2.3. ESTUDIOS PIEZOMÉTRICOS

Los estudios basados en la medida de niveles piezométricos en las perforaciones de todo tipo existentes en las proximidades de la presa son, sin duda, los más comunes que se realizan para la localización de los flujos de agua derivados de las filtraciones que ocurren en el embalse. Estos estudios incluyen:

- a) Determinación de la superficie piezométrica a través de la representación de mapas de isopiezas que informan sobre los flujos de agua existentes en la zona.
- b) Estudio de la relación existente entre los cambios de nivel del agua producidos en el embalse y los observados en los niveles piezométricos o freáticos de los sondeos.
- c) Variaciones de los niveles piezométricos de los sondeos producidos durante la perforación de los mismos. Estas variaciones de nivel informan sobre la conexión hidráulica existente entre el sondeo y el embalse o bien entre el sondeo y las surgencias, según los casos.

Sin embargo, es preciso indicar que los resultados obtenidos en este tipo de estudios no siempre son interpretados de forma correcta a pesar de su aparente simplicidad. La razón es que los niveles piezométricos, por sí solos, no proporcionan siempre informaciones inequívocas. Los mismos resultados pueden interpretarse de formas diferentes. Esto es cierto, sobre todo, en el caso de rocas fracturadas, donde los flujos de agua pueden experimentar cambios drásticos en distancias muy cortas. Por ejemplo, pueden tenerse niveles piezométricos más elevados que el nivel del embalse con flujos subterráneos procedentes de éste circulando a escasos metros de los sondeos donde se observa esta circunstancia. Igualmente, sondeos con niveles piezométricos más bajos que el del embalse no siempre indican la existencia de una conexión hidráulica con éste, ni tampoco que los sondeos con niveles más bajos intercepten los flujos que alimentan a las surgencias. Al contrario, estos niveles tan bajos pueden ser debidos a que los sondeos se encuentran en zonas de muy baja permeabilidad. Incluso, el hecho de que un sondeo responda con relativa rapidez a los cambios de nivel del agua del embalse no significa, necesariamente, que se encuentre interceptando la vía de flujo preferencial que alimenta a las surgencias. La carga hidráulica puede transmitirse de forma casi instantánea, pero no así el agua que viaja desde el embalse a las surgencias.

Resulta claro que las medidas de nivel del agua en los sondeos es una herramienta de gran valor para el estudio de las filtraciones, pero nunca debe ser utilizada como herramienta única, sino que debe ser complementada con otros estudios tales como los siguientes:

- 1) Medida de perfiles de conductividad y temperatura del agua en la columna de agua del sondeo.
- 2) Medida de flujos en el interior de los sondeos por medio de trazadores artificiales según las técnicas que se describen en el Capítulo VIII.
- 3) Análisis químicos y, si es posible, isotópicos, en muestras de agua tomadas de los mismos. Estos análisis informarán sobre el origen del agua de los sondeos, así como sobre las conexiones hidráulicas existentes entre diferentes sondeos y entre estos y las surgencias.

De una forma general, cuando se perfora un sondeo en las proximidades del embalse, el nivel del agua dentro del mismo suele ser más bajo que el del embalse si éste se encuentra en materiales de muy baja permeabilidad. En cambio, cuando el sondeo penetra un horizonte permeable conectado con el embalse, el nivel del agua dentro del sondeo sube hasta un valor muy próximo al que tiene el agua en éste, a menos que el sondeo se encuentre muy cercano a la zona de afloramiento del agua. Lo indicado en primer lugar fue lo que ocurrió en el caso de la presa de Chacuey (República Dominicana), tal como se aprecia en la figura 2.4. En la coronación de esta presa se perforaron seis sondeos con el objeto de localizar la formación permeable

responsable de las filtraciones de agua existentes a pie de presa. Los sondeos 1, 2, 3 y 6 atraviesan sólo materiales impermeables del cuerpo de la presa y de su cimentación y, por ello, tienen niveles piezométricos mucho más bajos que el del embalse. En cambio, los sondeos 4 y 5 atraviesan un estrato permeable de materiales aluviales y, por ello, su nivel es muy parecido al del embalse. Resulta claro que el agua que alimenta a las surgencias procede de la infiltración que ocurre a través de este estrato permeable. Este hecho se comprobó posteriormente mediante la realización de experiencias de interconexión con trazadores inyectados en estos dos sondeos.

De la misma forma, los cambios de nivel del sondeo que ocurren durante su perforación tienen gran valor para la localización de estratos u horizontes permeables responsables de las filtraciones. Cuando el sondeo penetra sólo materiales impermeables, el nivel del agua suele estar más bajo que el del embalse. Pero, cuando se intercepta un estrato permeable, el nivel del agua dentro del sondeo asciende a un valor próximo a este último. Este fue el caso observado en el embalse de Sabaneta (República Dominicana). La perforación de uno de los sondeos que estaban siendo construidos se paró al llegar a unos 60 metros de profundidad. Se realizaron entonces mediciones del flujo subterráneo por el método de marcado de toda la columna de agua, que se describe en el Capítulo VIII. El flujo existente era despreciable. Entonces se continuó perforando y, cuando se alcanzó una profundidad de unos 90 metros, el nivel del agua dentro del sondeo ascendió unos 10 metros, debido a la intercepción de un tramo fracturado conectado con el embalse. Esta subida de nivel se vio acompañada de la formación de un importante flujo vertical ascendente dentro del sondeo. Los estratos superiores de baja permeabilidad comenzaron a transmitir agua debido al importante aumento de la carga hidráulica a que fueron sometidos por la elevación de nivel.

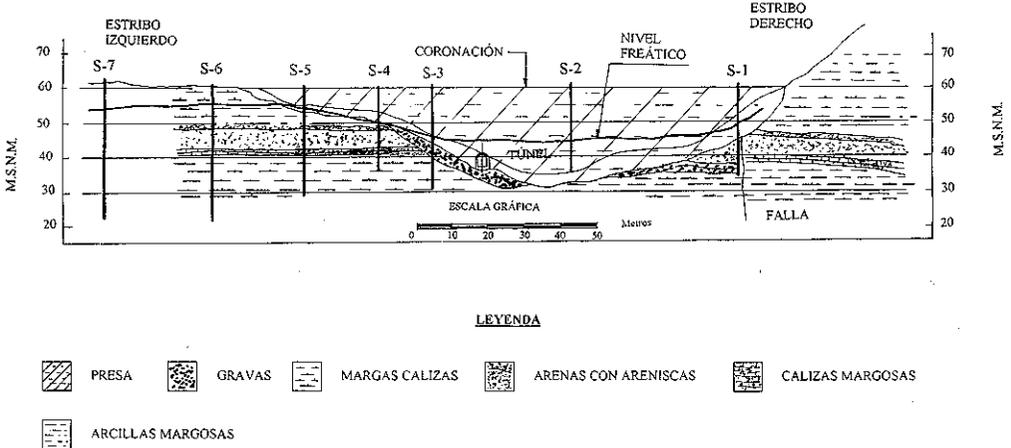


Figura 2.4. Variación del nivel piezométrico a lo largo del eje de la presa de Chacuey (República Dominicana). Los niveles más elevados reflejan la zona del flujo preferencial que escapaba del embalse.

BIBLIOGRAFÍA

- HUTCHINSON, G.E. (1975): «Treatise on Limnology», Vol. I, John Wiley and Sons Ed., New York.
- MERLIVAT, L. (1970): «L'étude quantitative de bilans de lacs à l'aide des concentrations en deuterium et oxygène-18 à l'eau», *Isotope Hydrology 1970* (Proc. Symp. IAEA Vienna) IAEA, 1970, pp. 89-107.
- NIR, A. (1973): «Tracer relations in mixed lakes in non-steady state», *J. Hydrology* 19, pp. 33-41.
- ZUBER, A. (1983): «On the environmental isotope method for determining the water balance components of some lakes», *J. Hydrology* 61, pp. 409-427.

CAPÍTULO III. ENSAYOS DE PERMEABILIDAD EN SONDEOS

3.1. GENERALIDADES

Se describen en el este Capítulo algunas de las técnicas, que son utilizadas frecuentemente para la determinación de la permeabilidad de acuíferos mediante ensayos diversos realizados en sondeos de pequeño diámetro. Estas técnicas son importantes, sobre todo, durante los estudios de factibilidad que se realizan antes de la construcción de una presa así como durante la fase de construcción de la misma para definir los trabajos de impermeabilización del terreno que son necesarios realizar con esta finalidad. Es bien sabido que muchos de los accidentes ocurridos en presas han sido debidos a la falta de estudios suficientemente detallados sobre las características hidráulicas de las formaciones de la cerrada. La mayor parte de los acuíferos existentes en el mundo presentan importantes heterogeneidades, que son detectables, incluso, a una escala pequeña. El desconocimiento o infravaloración de estas heterogeneidades ha sido, en muchos casos, causas generadoras de accidentes. El parámetro más importante para cuantificar la heterogeneidad del acuífero es la conductividad hidráulica o permeabilidad. Muchos estudios han mostrado que este parámetro puede presentar variaciones muy importantes con la profundidad. Diversos autores han descrito las técnicas más apropiadas para obtener perfiles de permeabilidad en sondeos (HALEVY et al., 1991, MOLZ et al., 1988, TAYLOR et al. 1990, CEDER-GREN, 1967, CUSTODIO Y LLAMAS, 1976). En el Capítulo VIII, se describen las técnicas utilizadas por el autor de este Manual basadas en el uso de trazadores.

La mayor parte de los métodos utilizados se basan en la inyección de pequeños volúmenes de agua en el interior de los sondeos. Por lo general, se trata de métodos de escasa precisión, que proporcionan la permeabilidad del acuífero en las proximidades del sondeo. En algunos casos, los ensayos se realizan durante la perforación de los sondeos, mientras que, en otros, se ejecutan en sondeos terminados. En estos últimos casos, las características constructivas de los sondeos pueden jugar un papel importante en la exactitud de los resultados, sobre todo en lo que se refiere a la tubería de revestimiento y a su adaptación al terreno atravesado por el sondeo. Lógicamente, la tubería de revestimiento tiene que encontrarse ranurada en el tramo donde se realizan los ensayos, con el fin de que el agua pueda circular libremente. Es muy importante comprobar que la fracción de superficie ranurada o perforada de esta tubería es suficientemente elevada para que la permeabilidad que se mide no se encuentra afectada por la dificultad del agua para atravesar estas ranuras u orificios. En otras palabras, la permeabilidad de la tubería de revestimiento tiene que ser mucho más elevada que la del acuífero, por ejemplo, unas 10 veces mayor. Dicha permeabilidad puede calcularse de forma aproximada por el método que se describe en el Anexo V. Por lo general, una fracción de superficie ranurada comprendida entre el 1 y el 5% suele ser suficiente en la mayoría de los casos.

Otra causa de error importante de estos métodos puede derivarse del contacto entre la tubería de revestimiento con el terreno. Como resulta obvio, los sondeos son perforados con un diámetro mayor que el de la tubería de revestimiento. Si existen cavidades importantes entre esta tubería y el terreno, el agua inyectada en el sondeo puede circular verticalmente a lo largo de las mismas, incluso colocando obturadores, produciéndose un error, cuya magnitud puede ser muy elevada.

Los métodos para la medida de la permeabilidad basados en ensayos de bombeo proporcionan, sin duda, valores mucho más precisos de este parámetro que los que se describen en este Capítulo. Sin embargo, raramente son utilizados en estudios relacionados con la construcción de presas o con la investigación de fugas de embalses. En general, puede decirse que los ensayos de bombeo no son aconsejables en terrenos de muy baja permeabilidad debido al reducido radio de acción del bombeo. Tampoco son aconsejables estos ensayos en terrenos muy heterogéneos, por ejemplo, en calizas carstificadas, porque, en tales casos, pueden existir zonas de muy alta permeabilidad a cortas distancias de otras zonas de permeabilidad nula, siendo difícil la obtención de valores representativos de este parámetro.

Los métodos que se describen a continuación se refieren a la medida de la permeabilidad, exclusivamente, dentro de medios saturados, donde el agua presenta una circulación de tipo laminar, como exige la ley de Darcy. Esto significa una importante limitación para los estudios que se realizan previamente a la construcción de presas. Lógicamente, las zonas elevadas de los macizos rocosos de la cerrada, que posteriormente serán inundadas por el agua del embalse, no se encuentran saturadas en el momento de realizar estos estudios previos, debido a lo cual estos métodos no pueden aplicarse en todos los casos.

3.2. ENSAYOS DEL TIPO GILG-GAVARD

3.2.1. Método de nivel constante

3.2.1.1. Método tradicional

En este método, se inyecta en el sondeo un caudal de agua regulado de forma que se mantenga en el interior del mismo un nivel constante (inyección a caudal constante). En estas condiciones, se cumple la relación siguiente (Custodio y Llamas, 1976):

$$k = \alpha \frac{q}{\pi d \Delta h_f}; \quad (3.1)$$

donde:

k = permeabilidad en m/s.

q = caudal constante de inyección en m³/s.

d = diámetro del sondeo en metros.

Δh_f = altura constante del agua medida sobre el nivel piezométrico inicial en metros.

α = factor de calibrado cuyo valor es igual a 1 para un piezómetro puntual (longitud muy pequeña).

Para un piezómetro que no sea puntual, la ecuación que debe usarse es la siguiente (Vidal, 1962):

$$k = \frac{q}{A\Delta h_f}; \quad (3.2)$$

donde A es un coeficiente cuyo valor depende de la longitud del tramo filtrante del sondeo Δh_f y del diámetro del mismo. Su valor puede calcularse por medio de la expresión empírica siguiente:

$$A = a(1,032\Delta h_f + 30d); \quad (3.3)$$

donde:

$a = 1$ si $\Delta h_f > 6$ metros y

$a = 0,481 + 0,178\Delta h_f - 0,014\Delta h_f^2$ si $\Delta h_f < 6$ metros

Una forma simple de mantener constante el nivel del agua es llenando el tubo del sondeo hasta la boca y midiendo el caudal necesario para que esto se cumpla. No obstante, esto puede no ser posible en casos de formaciones de alta permeabilidad o de sondeos de elevada longitud.

Por lo general, el método se utiliza durante los trabajos de perforación de los sondeos. Para ello, se paraliza temporalmente dicha perforación y el agua se inyecta a través del varillaje no permeable hasta la cámara de infiltración situada en el fondo del sondeo, la cual tiene una longitud pequeña (generalmente, entre 1 y 5 metros). En estas condiciones, una dificultad de la técnica puede consistir en la determinación precisa del nivel piezométrico existente en el momento del ensayo. Si la permeabilidad del terreno es baja, esta determinación puede exigir dejar en reposo el sondeo durante varias horas para que el agua alcance dicho nivel.

3.2.1.2. Método basado en la medida del flujo vertical descendente

Este método ha sido propuesto y utilizado por el autor del presente Manual y se aplica en sondeos ya terminados, que se encuentran revestidos con tubería permeable en toda o parte de su longitud. El método se basa en la medida de la variación del flujo vertical descendente inducido dentro del sondeo por la inyección del agua. La técnica se ilustra en la figura 3.1. La inyección del agua se realiza como se ha indicado en el apartado anterior, es decir, mediante una bomba apropiada que mantiene llena hasta la boca la tubería de revestimiento del sondeo. El tramo superior correspondiente a la zona no saturada debe encontrarse sin ranurar para evitar pérdidas de agua dentro del mismo. En estas condiciones, el agua inyectada se distribuye por los diferentes estratos permeables (o por las fracturas, en el caso de rocas consolidadas) atravesados por el sondeo de forma proporcional a sus transmisibilidades respectivas.

El flujo vertical descendente puede determinarse mediante una técnica basada en el uso de un trazador, la cual se describe con detalle en el Capítulo VIII. Como trazador puede utilizarse, por ejemplo, una solución saturada de sal común, efectuándose su medida por medio de un conductímetro. En el interior del sondeo, se introduce una línea formada por una manguera de plástico de un diámetro interno de unos 8 mm, a la cual se fija el cable de la sonda del conductímetro utilizando una cinta autoadhesiva. El extremo inferior de la manguera se sitúa a una distancia conocida de la sonda, por ejemplo, a 2 metros. La manguera se llena primero de solución saturada o concentrada de sal común por medio de una pequeña bomba peristáltica. Para efectuar una medida del flujo vertical, se inyecta un impulso de trazador de una duración muy corta, por ejemplo, 5 segundos. Si existe dicho flujo vertical, el trazador llega al cabo de un cierto período de tiempo a la posición ocupada por la sonda,

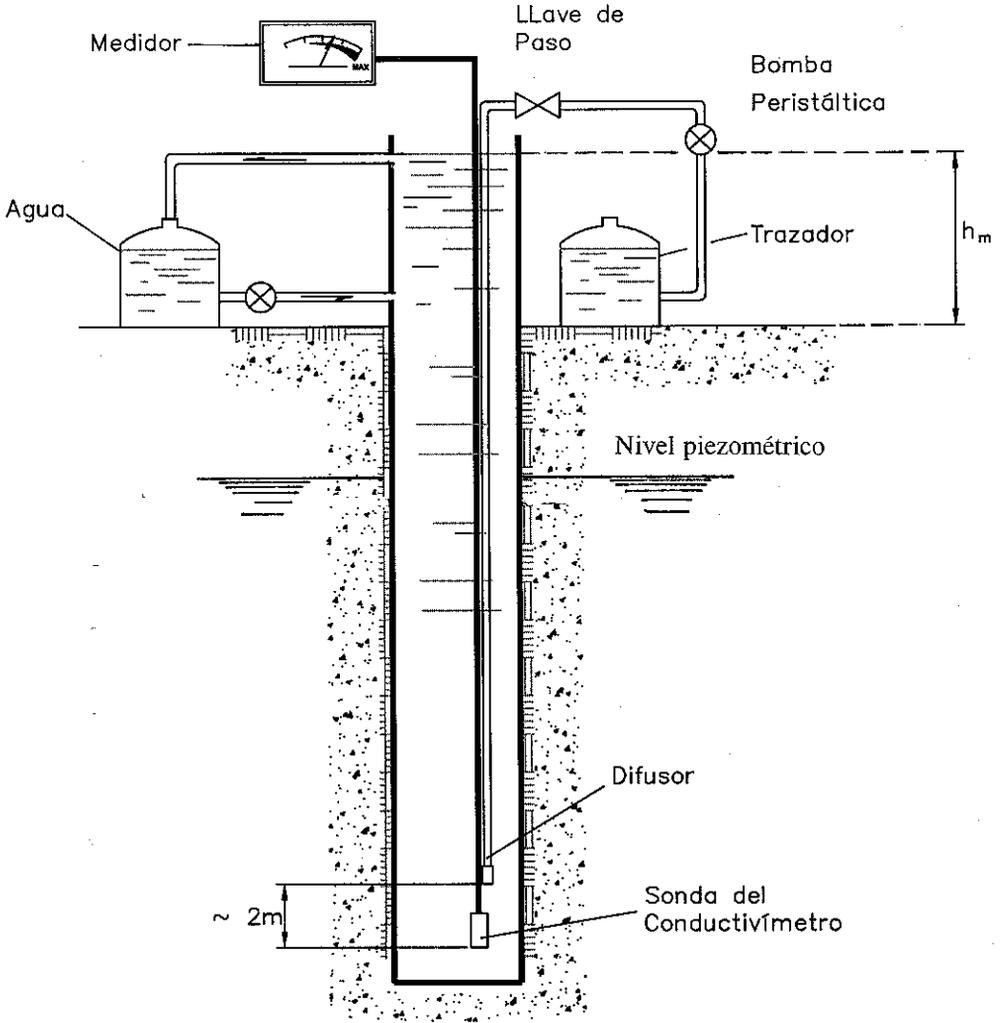


Figura 3.1. Variante del método de Gilg-Gavard para la medida de la permeabilidad basada en la determinación de la velocidad del flujo vertical descendente inducido por la inyección de agua.

la cual detecta una curva de paso de forma de campana. El tiempo medio de llegada del trazador, junto con la distancia conocida entre los puntos de inyección y de medida, proporcionan la velocidad del flujo vertical.

La medida de la velocidad del flujo vertical se repite en diferentes puntos a lo largo de la columna de agua. Con los valores de velocidad así obtenidos y con la sección interior del sondeo, se calculan los caudales de agua que circulan por el interior del mismo en función de la profundidad. Lógicamente, cuando existe un estrato o tramo permeable, una parte del caudal de agua inyectado escapa a través del mismo, la cual se determina por diferencia entre los valores del caudal obtenidos en ambos extremos del tramo considerado. Este caudal equivale al valor de q en la ecua-

ción (3.1). Por tanto, el método no requiere conocer el caudal de agua inyectado por la bomba dentro del sondeo para mantener dentro del mismo un nivel constante.

Lógicamente, la medida del flujo vertical descendente puede realizarse utilizando otras técnicas diferentes, tales como las que se describen en los apartados 3.5.2 y 8.4.2, dentro de las limitaciones intrínsecas de cada una de ellas. Por ejemplo, el uso de un micromolinete requiere que la velocidad del flujo vertical descendente sea elevada, mientras que la técnica del trazador ilustrada en la figura 3.1 puede usarse con flujos muy lentos, tales como los que se encuentran en formaciones de baja permeabilidad.

La velocidad del flujo vertical descendente puede ser muy baja debido a tratarse de una formación muy poco permeable o al reducido valor del gradiente hidráulico entre el nivel dinámico del agua durante la inyección y el nivel estático. En estos casos, puede utilizarse un método para la medida del flujo vertical aún más simple, consistente en seguir el descenso de un único impulso de trazador, producido por inyección en la boca del sondeo, mediante desplazamientos de la sonda del conductímetro a lo largo de la columna de agua. La posición de la nube de trazador en la columna de agua se determina en función del tiempo y la velocidad del flujo se calcula a partir del descenso de esta nube. El método se describe con más detalle en el Capítulo VIII.

Como se ha indicado anteriormente, cuando existen diferentes estratos o tramos permeables, el caudal de agua que admite el sondeo se distribuye entre los mismos de acuerdo con sus transmisibilidades respectivas. El método proporciona valores precisos de los caudales que escapan del sondeo a través de estos estratos. Por tanto, se obtienen los valores relativos de la transmisibilidad de los estratos. Si, además, se conocen los espesores de estos estratos, pueden calcularse las permeabilidades relativas de los mismos. En el apartado 3.5.1, se profundiza en este punto.

3.2.2. Método de nivel variable

En este caso, se inyecta en el sondeo un determinado volumen de agua suficiente para producir una importante elevación del nivel en el interior del mismo o bien se llena hasta la boca. A continuación se mide el descenso del nivel del agua en función del tiempo utilizando un medidor de nivel. La permeabilidad media de la formación atravesada por el sondeo se obtiene por medio de la expresión empírica siguiente (Vidal, 1962):

$$k = \frac{1,308d^2\Delta h}{Ah_m\Delta t}; \quad (3.4)$$

donde:

k = permeabilidad en cm/s.

d = diámetro del sondeo en metros.

Δh = descenso del nivel en metros producido durante el intervalo Δt , expresado en minutos.

h_m = altura media del nivel del agua durante el intervalo Δt , definida por la diferencia entre el nivel medio medido durante dicho intervalo y el nivel piezométrico inicial.

El valor de A se determina como se ha indicado en el apartado 3.2.1.1. El método exige que la tubería de revestimiento del sondeo se encuentre ranurada solamente en el tramo ocupado por la formación cuya permeabilidad se mide.

Ejemplo

La figura 3.2 muestra los resultados obtenidos en uno de estos ensayos realizado por el autor de este Manual, en colaboración con L. Araguás, en la zona del vertedero de residuos industriales de Cetransa, Valladolid, en un sondeo de diámetro interior igual a 50 mm, profundidad igual a 30 metros y provisto de tubería de revestimiento ranurada en toda su longitud. Los materiales atravesados por el sondeo eran materiales de relleno en un tramo superior de unos 3 metros de espesor y margas en el resto.

Con el objeto de aumentar la definición del método, los resultados obtenidos se presentan en dos escalas de tiempo diferentes, que corresponden a las figuras 3.2A y B. El ensayo se repitió en dos ocasiones distintas. En el primer ensayo, las medidas de nivel se iniciaron de forma inmediata una vez que el sondeo estuvo lleno de agua. En el segundo, antes de comenzar con la medida del descenso del nivel, se mantuvo el sondeo lleno de agua durante media hora a fin de rellenar todas las cavidades del terreno existentes en la zona no saturada. Los resultados obtenidos en este último ensayo corresponden a los puntos sin relleno de la figura 3.2A. La diferencia de los resultados obtenidos en ambos ensayos se explica por el lavado de los conductos del terreno producido por la presión de agua mantenida durante media hora (sondeo lleno de agua) en el caso del segundo ensayo. El sondeo se había terminado de perforar recientemente y contenía todavía grandes cantidades de lodos de perforación.

Los resultados de la figura 3.2A muestran la existencia de un cambio drástico de permeabilidad para una profundidad de unos 6 metros. La elevada permeabilidad del tramo superior se explica, por una parte, por la presencia de materiales de relleno y, por otra, por la descompresión de las margas producida como consecuencia de la excavación realizada en la zona. Esta descompresión provocó una apertura de las fracturas de esta formación en la capa más superficial. Asimismo, el secado del terreno por evaporación de la humedad del mismo contribuyó al aumento de permeabilidad de los mismos.

En la figura 3.2B se aprecia un cambio similar para una profundidad próxima a los 9 metros. Por tanto, estos resultados indican la presencia de tres estratos de diferente permeabilidad. Lógicamente, dichos resultados no permiten la determinación de la permeabilidad, debido a que la mayor parte del agua escapaba a través de la zona no saturada. Sin embargo, se aprecia que la diferencia de permeabilidad entre los estratos superficial y profundo es, sin duda, muy elevada. El cambio de permeabilidad detectado a 6 metros fue, asimismo, identificado a través de un ensayo de sismica de refracción (véase apartado 4.2.3, en Capítulo próximo) realizado unos días antes. La velocidad de transmisión del sonido para el estrato superficial fue de 0,83 km/s, mientras que para el profundo fue 1,6 km/s.

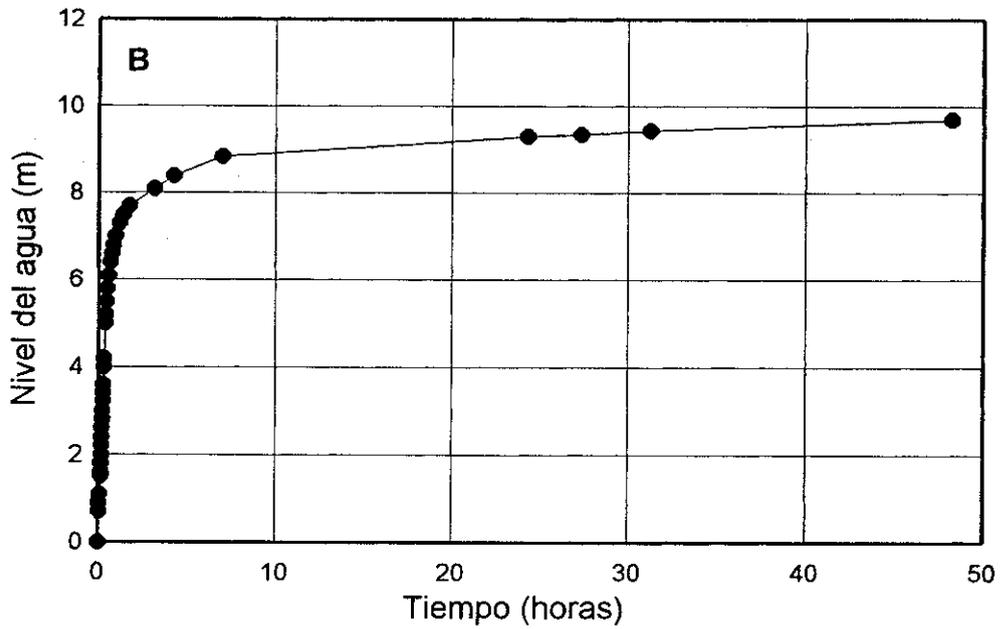
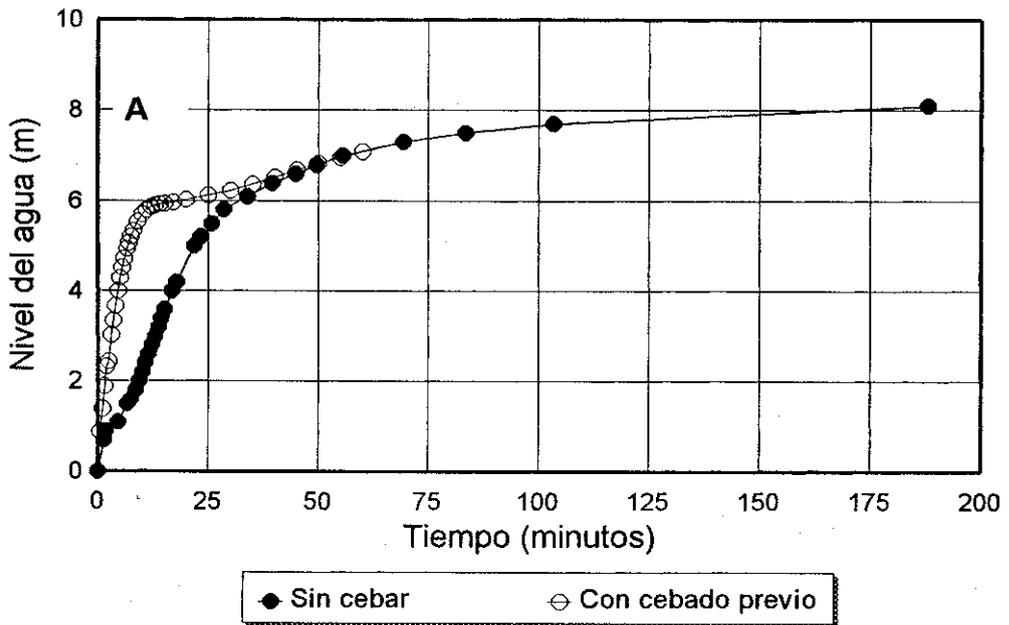


Figura 3.2. Ensayo de Gilg-Gavard realizado en un sondeo del vertedero de residuos industriales de Cetransa, Valladolid, utilizando el método de nivel variable con llenado total de agua.