

## ***CAPITULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL***

***Definición y objetivos generales de los ensayos de bombeo***

***Tipos de acuíferos y su comportamiento***

***Parámetros hidrogeológicos***

***Teoría para la realización de los ensayos de bombeo***  
***Ecuación general***

***Tipos de ensayos***

## CAPITULO I

### INTRODUCCION GENERAL

#### **Definición y objetivos generales de los ensayos de bombeo**

Un ensayo de bombeo es, en esencia, un método de análisis de los pozos de captación de aguas subterráneas y del acuífero en que se encuentran.

La metodología de su realización es simple. Consiste en bombear los pozos y sondeos, bien a caudal constante o bien a caudal variable, siguiendo la evolución del nivel del agua, debida al bombeo, tanto en el mismo pozo de bombeo como en otros pozos cercanos, cuando los hubiere.

El estudio de las variaciones de los niveles es precisamente en lo que consiste el ensayo de bombeo y lo que permite obtener información, tanto sobre el pozo en sí como sobre las características y circunstancias del acuífero. Estas pruebas, respecto al pozo, pueden suministrar información sobre la calidad de construcción, pérdidas de carga por rozamiento del agua en las inmediaciones del mismo, e incluso sobre el caudal de bombeo más aconsejable y lugar donde debe colocarse la bomba para un caudal determinado de explotación.

Respecto al acuífero, pueden suministrar datos sobre su transmisividad, almacenamiento, grado de comunicación entre la zona acuífera inmediata al pozo y otras más lejanas; existencia de barreras o bordes impermeables cercanos, zonas de recarga, etc. Incluso, en determinadas circunstancias, es posible calcular con los ensayos de bombeo el área de embalse subterráneo.

Conviene ya desde aquí desmitificar la validez y exactitud de los resultados de los ensayos. Muchas veces la interpretación es tan sencilla, que podría constituir lo que ha dado en llamarse «un caso de libro». Otras veces, sin embargo, la naturaleza e incluso las obras de captación resultan tan complejas y heterogéneas que no hay que extrañarse de encontrar los resultados de algunos ensayos como absolutamente ininterpretables.

En cualquier caso, siempre podrá obtenerse un orden de magnitud en los parámetros buscados y tener una idea del error con que se mueven los cálculos frente a la realidad de las circunstancias naturales.

## Tipos de acuíferos y su comportamiento

Ante todo, conviene indicar, que cuando se bombea un pozo, baja el nivel de agua en el mismo, y en toda la porción de acuífero circundante a él. El descenso de nivel es más pronunciado en el pozo, y aminora a medida que aumenta la distancia al mismo.

La distancia existente entre el pozo de bombeo y la zona del acuífero, en la que la influencia puede considerarse nula, es el llamado radio de influencia. En la figura 1 se esquematiza gráficamente.

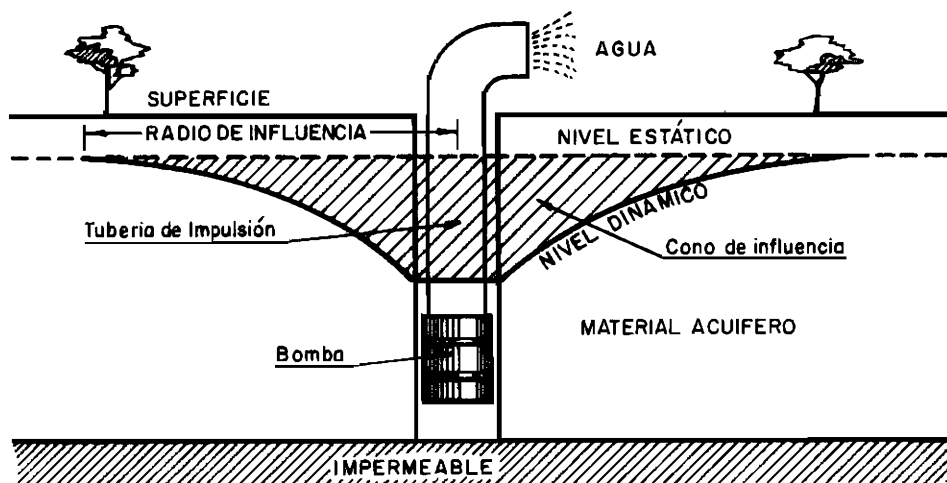


Fig. 1.—Cono de influencia al bombear un pozo de captación.

En definitiva, se forma en torno al pozo un gran cono de bombeo, cuya superficie es la superficie piezométrica dinámica, y el valor del nivel de agua en un punto de dicha superficie es el llamado nivel dinámico. El nivel estático es el que existía en el acuífero antes de empezar el bombeo.

Hechas estas consideraciones iniciales, se pasa a comentar los tipos de acuíferos que existen en la naturaleza, su modo de reaccionar en los diferentes casos hidráulicos y estructurales, y su comportamiento frente al bombeo.

Desde el punto de vista de su textura, existen fundamentalmente tres tipos de materiales acuíferos:

- a) Aquellos cuya permeabilidad es debida a grietas y fisuras, tanto de origen mecánico como de disolución. Forman en conjunto los acuíferos kársticos y fisurados, y se encuentran entre ellos, las calizas, dolomías, granitos y basaltos, etc., siendo los dos primeros los tipos más importantes.
- b) Aquellos cuya permeabilidad es debida a su porosidad intergranular. Son los denominados acuíferos porosos y se encuentran entre ellos, las gravas, arenas, arcosas, etc., y, en general, todos los materiales detríticos con tamaño de grano de arena como mínimo.
- c) Por último, están los acuíferos, cuya permeabilidad es debida a un conjunto de las dos anteriores causas, y se tienen así los acuíferos kársticos y porosos. Son típicas las calcarenitas.

En general, los porosos son más homogéneos, aun dentro de la heterogeneidad que hay que admitir a todos los acuíferos. Tanto éstos como los kárstico-porosos son capaces de almacenar gran cantidad de agua por unidad de volumen de acuífero y, por tanto, son en general acuíferos lentos que reaccionan con inercia a los bombeos. Los radios de influencia suelen ser más cortos que en los kársticos.

Los kársticos, sin embargo, son menos homogéneos y suelen ser más dispares los resultados de los ensayos. Tienen menor capacidad para almacenar agua y pueden ser considerados, por ello, acuíferos rápidos, en los que los radios de influencia son más altos que en los restantes acuíferos.

De otra parte, estos acuíferos, según sus circunstancias hidráulicas y estructurales, pueden reaccionar de tres distintas formas:

- a) Acuíferos libres. Son aquellos en los que el nivel de agua se encuentra por debajo del techo de la formación permeable. El agua que ceden es el agua que tienen almacenada en sus poros. Este volumen de agua es alto en comparación con los acuíferos que se comentan a continuación, y por ello tienen bastante inercia. Los conos de bombeos suelen ser esbeltos, es decir, con elevados descensos de nivel en el pozo y corto radio de influencia.
- b) Acuíferos cautivos o confinados. Son aquellos que están absolutamente aislados en el subsuelo, es decir, rodeados de materiales impermeables por todos sus lados. El nivel de agua en los acuíferos cautivos está por encima del techo de dicho material acuífero. En realidad, están a presión o en carga, debido al peso de los materiales superiores. El agua que ceden procede de la descompresión de estas capas superiores, cuando se produce la depresión en el acuífero. En rigor, no existen en la naturaleza acuíferos cautivos puros, dado que no existen materiales absolutamente impermeables capaces de aislarlos, aunque a efectos prácticos muchos podrán considerarse como tales, entre otros, aquellas formaciones permeables que permanecen cautivas en una gran exten-

sión y afloran en superficie por alguno de sus extremos. Se consultará más adelante este caso.

Son acuíferos rápidos con muy poca inercia, debido a su baja capacidad de almacenar agua, que reaccionan, o transmiten en seguida las influencias de un bombeo puntual. Los conos de bombeo suelen ser de menor altura que en los libres, pero con radios de influencia largos.

- c) Acuíferos semiconfinados. En ellos los materiales que los rodean no son todos impermeables. Así, el paquete superior o semiconfinante lo constituyen formaciones semipermeables, que permiten el paso del agua de otros acuíferos superiores al inferior semiconfinado. Consecuentemente, la velocidad de reacción de estos acuíferos ante un bombeo es más moderada que en los cautivos y los radios de influencia tienen valores medios entre libres y cautivos.

De acuerdo con esto, se puede tener una idea cualitativa de la forma de los conos de influencia y de la velocidad de reacción de los diversos acuíferos ante un bombeo.

Por ejemplo, los acuíferos más lentos, es decir, los que transmiten con menor velocidad las influencias de los bombeos y que además tendrán conos de influencia profundos, pero de radios cortos, serán aquellos de textura porosa granular cuando trabajan como libres.

Recíprocamente, los acuíferos que acusarán con mayor velocidad los efectos de un bombeo puntual, con conos de bombeo poco profundos y radios de influencia largos, serán los kársticos, cuando trabajan como cautivos.

## Parámetros hidrogeológicos

Los parámetros hidrogeológicos de un acuífero son:

- Permeabilidad (K).
- Transmisividad (T).
- Coeficiente de almacenamiento (S).

La permeabilidad es el flujo de agua que atraviesa una sección unitaria de acuífero, bajo la influencia de un gradiente unitario, a temperatura de campo.

$$K = \frac{c d^2 \gamma}{\mu}$$

donde:

- $c$  = constante adimensional.
- $d^2$  = factor que depende de la superficie intergranular.
- $\gamma$  = peso específico del líquido.
- $\mu$  = viscosidad del líquido a la temperatura  $t^\circ$ .

El término  $cd^2 = k$ , se conoce como permeabilidad específica o intrínseca, y depende únicamente de las características del terreno.

$$K = LT^{-1}$$

La transmisividad es el volumen de agua que atraviesa una banda de acuífero de ancho unitario en la unidad de tiempo y bajo la carga de un metro. Es representativa de la capacidad que tiene el acuífero para ceder agua. Partiendo de la definición, sus dimensiones son las siguientes:

$$T = (L^3/T)/L = L^2 T^{-1}$$

T = dimensión tiempo. L = dimensión longitud.

Lo más común es que la transmisividad se mida en m<sup>2</sup>/día, m<sup>2</sup>/hora o m<sup>2</sup>/segundo. Sin embargo, la unidad que da cifras más manejables es el m<sup>2</sup>/día, por lo que se aconseja sea usada en todos los ensayos.

A efectos de irse familiarizando con esta unidad, se dan los valores de la tabla 1.

TABLA 1  
VALORES DE LA TRANSMISIVIDAD (según autores)

T (m <sup>2</sup> /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica.
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica.
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 10 y 50 l/s con 10 m de depresión teórica.
500 < T < 1.000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica.
T > 1.000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica.

La permeabilidad K se obtiene como cociente entre la transmisividad T y el espesor del acuífero *b*.

$$K = T/b$$

Sus dimensiones, por tanto, serán:

$$K = T/b = (L^2/T)/L = L/T$$

Y se usa como unidad el m/día.

La permeabilidad es una medida muy característica de la textura del acuífero; pero no representa como la transmisividad las posibilidades de ceder agua. Un acuífero muy permeable, pero de poco espesor, puede ser poco transmisor y, como consecuencia, los pozos que en el mismo se construyan, no serán muy caudalosos.

Una calificación cualitativa de los valores de la permeabilidad puede verse en la tabla 2.

TABLA 2  
VALORES DE LA PERMEABILIDAD  
(según autores)

K (m/día)	Calificación estimativa
$K < 10^{-2}$	Muy baja
$10^{-2} < K < 1$	Baja
$1 < K < 10$	Media
$10 < K < 100$	Alta
$K > 100$	Muy alta

A efectos de trabajar con acuíferos semiconfinados, conviene tener en cuenta los valores de la permeabilidad de los materiales semipermeables (limo arenoso, limo, arcilla limosa, y arcillas algo arenosas). En estos, la K suele estar comprendida entre  $10^{-4}$  y  $10^{-2}$  m/día, siendo  $10^{-3}$  un valor medio representativo que se suele usar con mucha frecuencia. Los terrenos impermeables tienen valores de K inferiores a los  $10^{-4}$  m/día.

Por último, el coeficiente de almacenamiento S puede definirse como la cantidad de agua que cede un prisma de acuífero de base cuadrada unitaria cuando se le deprime la unidad. Consecuentemente, no tiene dimensiones. En el caso de que el acuífero trabaje como libre, el coeficiente de almacenamiento representa el volumen de agua que puede ceder un volumen unitario de acuífero; se puede representar en tanto por ciento y coincide con la porosidad eficaz.

Los valores más significativos de coeficientes de almacenamiento, a efectos prácticos y según datos obtenidos de más de 500 ensayos de bombeo realizados por el Instituto Geológico y Minero de España, se resumen en la tabla 3.

TABLA 3  
VALORES DEL COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (según autores)

Tipo de material permeable	Forma del funcionamiento del acuífero	Valores de S (medio)
<i>Kárstico:</i>		
Caliza y dolomías jurásicas	Libre	$2 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$5 \times 10^{-4}$
	Confinado	$5 \times 10^{-5}$
Calizas y dolomías cretácicas y terciarias	Libre	$2 \times 10^{-2} - 6 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$
	Confinado	$10^{-4} - 5 \times 10^{-5}$
<i>Poroso intergranular:</i>		
Gravas y arenas	Libre	$5 \times 10^{-2} - 15 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3}$
	Confinado	$10^{-4}$
<i>Kársticos y porosos:</i>		
Calcarenitas marinas terciarias	Libre	$15 \times 10^{-2} - 18 \times 10^{-2}$

Estos valores son los que parecen ser más adecuados para introducir por tanteo en los ensayos de bombeo, cuando las circunstancias particulares de la prueba no hayan permitido el cálculo directo.

Los valores de S que no guarden un orden de magnitud con los reseñados deben, en principio, ser tomados con recelo.

Queda, por último, indicar que para el caso de la permeabilidad en acuíferos detríticos existe la posibilidad de tantearla con las muestras de los terrenos, comparando sus curvas granulométricas con otras estandarizadas en los ábacos debidos a Bredding (consúltese bibliografía). Sin embargo, la experiencia de los autores es que los valores que se obtienen no son representativos de la realidad práctica, seguramente debido al grado de compactación que existe en el acuífero y a las matrices arcillosas que a veces, incluso en muy pequeña proporción, llevan las arenas, lo que les hace bajar sensiblemente su permeabilidad real.

### **Teoría para la realización de los ensayos de bombeo. Ecuación general**

La teoría de los ensayos de bombeo está basada en las leyes fundamentales de la hidráulica en medios porosos.

Estas leyes resultan de la aplicación de la Ley de Darcy de los medios porosos, al teorema de la continuidad.



La ecuación fundamental es:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + \frac{F}{K} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

donde:

- $h$  = potencial hidráulico (nivel piezométrico).
- $F$  = recargas exteriores (verticales, lluvias, etc.).
- $K$  = permeabilidad del acuífero.
- $S$  = coeficiente de almacenamiento.
- $T$  = transmisividad del acuífero.
- $t$  = tiempo.

Dicha ecuación, tiene una deducción larga y difícil, que puede verse en los textos que se citan en la bibliografía.

Los términos de la expresión en estudio tienen, sin embargo, una interpretación física sencilla.

En efecto:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \text{ ó } \nabla^2 h \text{ ó } \Delta h$$

representa la suma de entradas y salidas de agua en un cubo poroso elemental por razones de la diferencia de nivel piezométrico entre este cubo y las zonas de acuífero inmediatas.

$\frac{F}{K}$  = representa las recargas de agua, exteriores al sistema.

$\frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$  = representa la variación del almacenamiento del agua en dicho cubo poroso elemental.

Por consiguiente, la ecuación fundamental representa matemáticamente una conclusión lógica:

- La diferencia entre la cantidad de agua que entra y sale por las caras de un cubo poroso ideal (por razones de las diferencias de nivel piezométrico entre este cubo y las zonas del acuífero inmediatas), más las entradas de agua exteriores al sistema, tiene que ser igual a la variación del almacenamiento, es decir, a lo que se llena o vacía dicho cubo.

Es evidente que se expresa de una manera muy simple, pero puede ser útil para dejar claras las ideas.

La ecuación puede resultar de difícil o imposible solución, según sean las condiciones de contorno, y es aplicable a los problemas generales del movimiento del agua en los acuíferos.

En el caso concreto de los ensayos de bombeo, se estudia el movimiento del agua en el acuífero, como consecuencia de una depresión del nivel piezométrico en un punto, motivada por un bombeo en un pozo situado en dicho punto.

Para la resolución de la ecuación pueden admitirse muchas simplificaciones, siempre y cuando que la realidad física del ensayo las respete.

Por ejemplo:

— Si no existen recargas exteriores:  $\frac{F}{K} = 0$

— Si el flujo es radial y no existe componente respecto al eje OZ

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

— Si el régimen es permanente, es decir, no varía el nivel piezométrico con el tiempo:

$$\frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} = 0$$

La ecuación habría quedado reducida a:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

que pasándola a coordenadas polares, tiene una resolución más sencilla.

Atendiendo a las diversas simplificaciones que puedan admitirse dentro de la realidad física, se llega a los diversos casos particulares de la metodología de interpretación de ensayos de bombeo.

## Tipos de ensayos

Los diversos tipos de ensayos de bombeo, se resumen en el siguiente cuadro.

Tipos de ensayos de bombeo	{	A caudal constante	{	Régimen permanente	{	Prueba en bombeo
				Régimen variable		
		A caudal variable	{	Bombeo a caudal crítico		
				Bombeos escalonados		

Cuando se realiza el ensayo a caudal constante es preciso mantenerlo sin variación a lo largo de toda la prueba.

Se denomina régimen permanente a aquel en el cual los niveles no varían con el tiempo, mientras que en el régimen variable sí se produce esta variación.

Desde el punto de vista práctico: Antes de empezar el ensayo se mide la profundidad del nivel del agua en el pozo de bombeo y en los de observación, si los hubiere. Como consecuencia de un bombeo a caudal constante  $Q$ , los niveles descenderán durante un cierto tiempo. Si se interpretan los resultados de la variación de niveles en función del tiempo de bombeo, se estaría en un caso de régimen variable.

Transcurrido un tiempo, los niveles se estabilizan o varían tan poco, que pueden considerarse estabilizados. Interpretando los descensos totales habidos, con niveles estabilizados en el pozo de bombeo y en los piezómetros de observación, se estaría en un caso de régimen permanente.

Cuando se para el bombeo, los niveles comienzan a ascender, tratando de alcanzar la cota inicial en reposo. Si se interpreta la evolución de éstos niveles después de la parada, se está en el caso de régimen variable en recuperación.

Por último, en el caso de bombeos a caudal variable pueden existir dos modalidades.

La primera consiste en mantener la depresión fija al nivel de la bomba y medir cómo va variando el caudal con el tiempo. Se la denomina prueba a caudal crítico y se utiliza exclusivamente para ensayos en acuíferos colgados que reúnan determinadas características.

La segunda modalidad es la de caudales escalonados. En ésta se fijan a voluntad distintos caudales, midiéndose la depresión producida por cada uno de ellos. Se utilizan para calcular las pérdidas de carga en el pozo, como consecuencia de una construcción defectuosa.