

CAPITULO VII. METODO DE BOMBEO ESCALONADOS

Metodología general

Escalones con recuperación

Escalones sin recuperación

Métodos de resolución para el cálculo de los coeficientes

Método del tanteo del valor de "n"

Método del tanteo del valor de "A"

Método analítico

Método gráfico (Custodio)

Métodos informáticos

Análisis de resultados

Valor de n

Valor de A

Valor de B

Campo de aplicación y reflexiones generales

CAPITULO VII

METODO DE BOMBEO ESCALONADOS

Metodología general

El método de bombeos escalonados es el más usual para el cálculo de los coeficientes de la fórmula general de descensos: $d = AQ + BQ^n$. La aplicación del método no precisa de pozos auxiliares de observación, lo que representa una gran ventaja sobre los procedimientos anteriores, ya que, por lo general, no se dispone de piezómetros que permitan conocer las características del acuífero.

Introducidos los valores de un bombeo (Q y d) en la fórmula general, son tres las incógnitas a conocer: A , B y n , siendo necesario, al menos, una terna de valores para poder resolver el sistema:

[1]

$$d_1 = AQ_1 + BQ_1^n$$

$$d_2 = AQ_2 + BQ_2^n$$

$$d_3 = AQ_3 + BQ_3^n$$

Esta terna de valores se obtendrá a partir de tres bombeos realizados con diferentes caudales y, a ser posible, de la misma duración.

Para mayor seguridad conviene realizar cuatro o más bombeos ante la posibilidad de producirse anomalías en alguno de ellos, eliminando aquellos resultados que no se ajustan a la alineación definida por los demás.

Los caudales de bombeo serán crecientes, guardando una cierta relación entre ellos. No conviene realizar escalones con caudales muy dispares, ya que puede pasarse de un régimen laminar a otro turbulento al aumentar excesivamente el caudal entre los mismos, haciendo inviable la aplicación del método por variar el valor de n entre un escalón y el siguiente.

La duración de los bombeos escalonados puede ser distinta según el comportamiento de cada pozo. Generalmente, el tiempo que suele darse a cada escalón oscila entre 0,5 y 3 h.

El mecanismo operativo consistiría en lograr la estabilización de niveles para cada uno de los caudales. Sin embargo, este régimen estacionario no suele conseguirse con facilidad en la mayoría de las ocasiones, y su intento puede conducir a bombeos muy largos con costos no justificados, ya que puede llegarse a los mismos resultados con escalones de una o dos horas.

Conviene deducir las dimensiones de los coeficientes A y B para hacer homogéneas las unidades a utilizar en posteriores cálculos.

En la ecuación: $d = AQ + BQ^n$, haciendo $AQ = d_1$ y $BQ^n = d_2$, tiene:

$$|A| = \frac{d_1}{Q} = \frac{L}{L^3/\dot{T}} = \frac{\dot{T}}{L^2} = \dot{T} \cdot L^{-2}$$

$$B = \frac{d_2}{Q^n} = \frac{L}{L^{3n}/\dot{T}^n} = \frac{\dot{T}^n}{L^{3n-1}} = \dot{T}^n \cdot L^{-3n+1}$$

\dot{T} = dimensión tiempo

El valor de n puede variar entre 1 y 3,5 (Lennox).

Antes de proceder a ningún tipo de pruebas, es necesario realizar una limpieza a fondo del sondeo para que los resultados obtenidos no estén enmascarados por una falta de desarrollo de la captación

Escalones con recuperación

El modo operativo consiste en efectuar unos bombeos escalonados a caudales crecientes y constantes para cada escalón, tomándose el valor del descenso en cada uno de ellos, y dejando recuperar total o casi totalmente el nivel inicial al término de cada bombeo (gráficos 49 y 50).

El método tiene el inconveniente de que las recuperaciones suelen ser lentas, y requiere de largos períodos de tiempo, sobre todo si se desea una recuperación total de niveles. Por el contrario, presenta la ventaja de evitar extrapolaciones que pueden conducir a errores, ya que todos los descensos medidos se refieren al mismo nivel de partida.

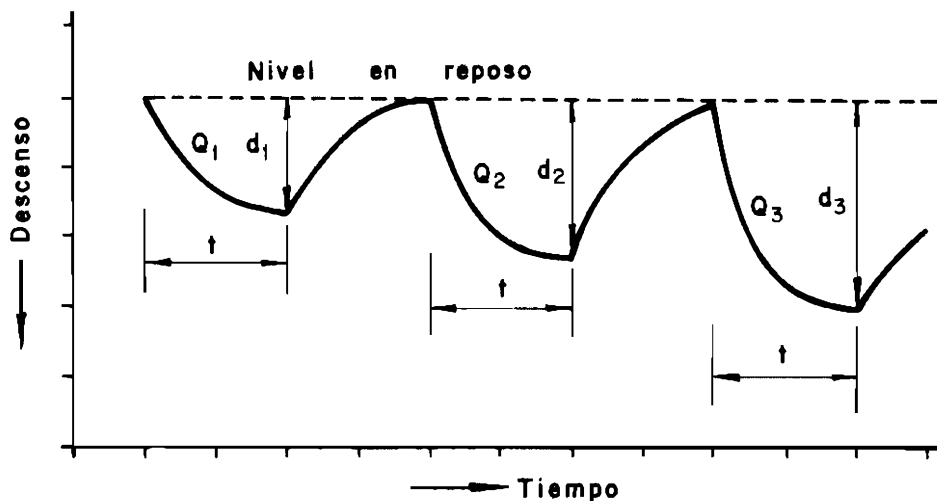


Gráfico 49.—Bombeos escalonados con recuperación total.

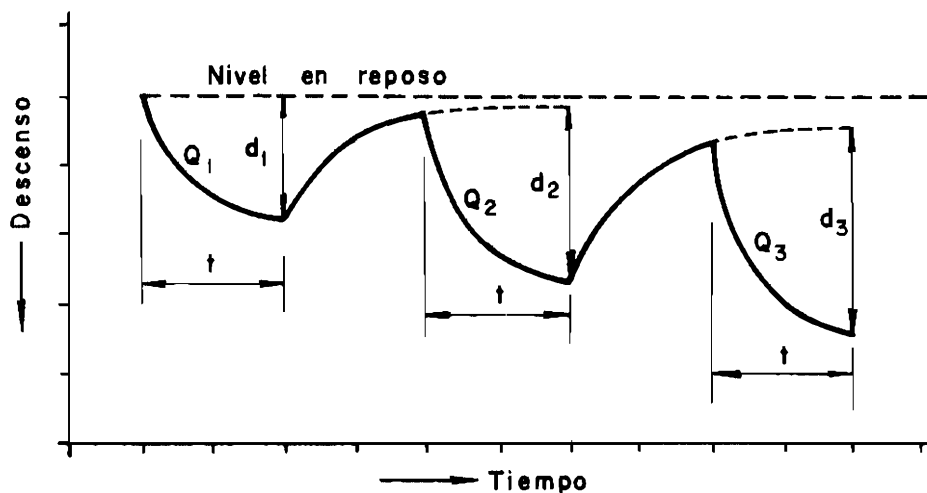


Gráfico 50.—Bombeos escalonados con recuperación parcial.

El tiempo de duración de cada bombeo (t) es el mismo para todos ellos. Los pares de valores (Q, d) obtenidos, se sustituirán en el sistema de ecuaciones [1] para su resolución.

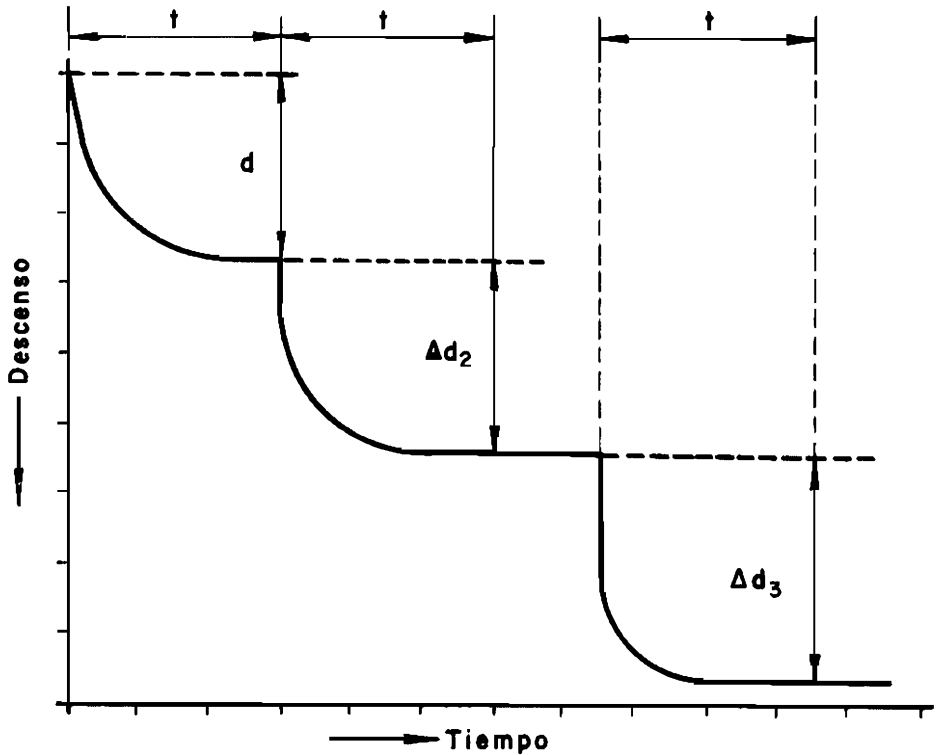


Gráfico 51.—Bombeos escalonados con distinta duración y niveles totalmente estabilizados.

Cuando la duración de un bombeo no es igual al anterior o al siguiente, deben tomarse siempre las medidas de nivel en el momento correspondiente al tiempo (t) (gráfico 51).

Escalones sin recuperación

Este método consiste en efectuar bombeos con caudal creciente e igual tiempo de duración, sin necesidad de interrumpir la prueba al término de cada uno. Los descensos que se toman son los originados por cada uno de los caudales (gráficos 52 y 53).

El primer descenso, d_1 , creado por el caudal Q_1 , es la diferencia entre el nivel final, al cabo del tiempo t , y el inicial en reposo. En el segundo escalón existe un incremento del caudal ($Q_2 - Q_1$), lo que produce un descenso adicional Δd_2 . Al caudal Q_2 corresponderá, por tanto, un descenso: $d_2 = d_1 + \Delta d_2$. El descenso correspondiente al tercer caudal Q_3 será: $d_3 = d_1 + \Delta d_2 + \Delta d_3$.

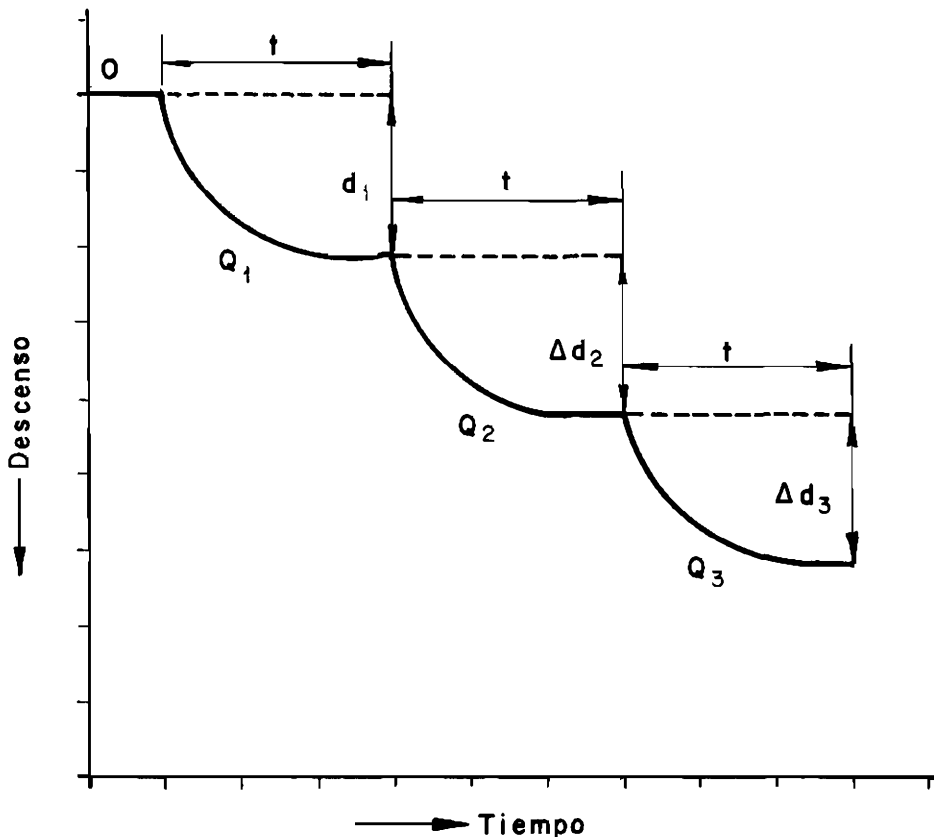


Gráfico 52.—Bombeos escalonados sin recuperación con estabilización de niveles.

Si al final de cada escalón los niveles están totalmente estabilizados, los incrementos de descensos se obtienen directamente por diferencia entre un nivel y el siguiente. No es frecuente encontrarse con acuíferos que tengan este tipo de comportamiento, a no ser que existan barreras positivas próximas que estabilicen de modo rápido los descensos producidos por los bombeos.

Las extrapolaciones, en aquellos casos que no se consiga estabilizar los niveles, deben hacerse con el mayor cuidado para no cometer errores importantes que distorsionen los verdaderos valores de cada descenso.

Como ya se ha indicado, no conviene que los caudales elegidos para este tipo de pruebas, tengan una variación excesiva. En el apartado de campo de aplicación y reflexiones generales se efectúa un análisis que permite la selección de caudales para lograr la adecuada estabilidad del método. También deben evitarse bombeos con caudales que superen la capacidad productiva de la captación o que provoquen descensos por debajo del techo del primer acuífero explotado, en un sistema multicapa.

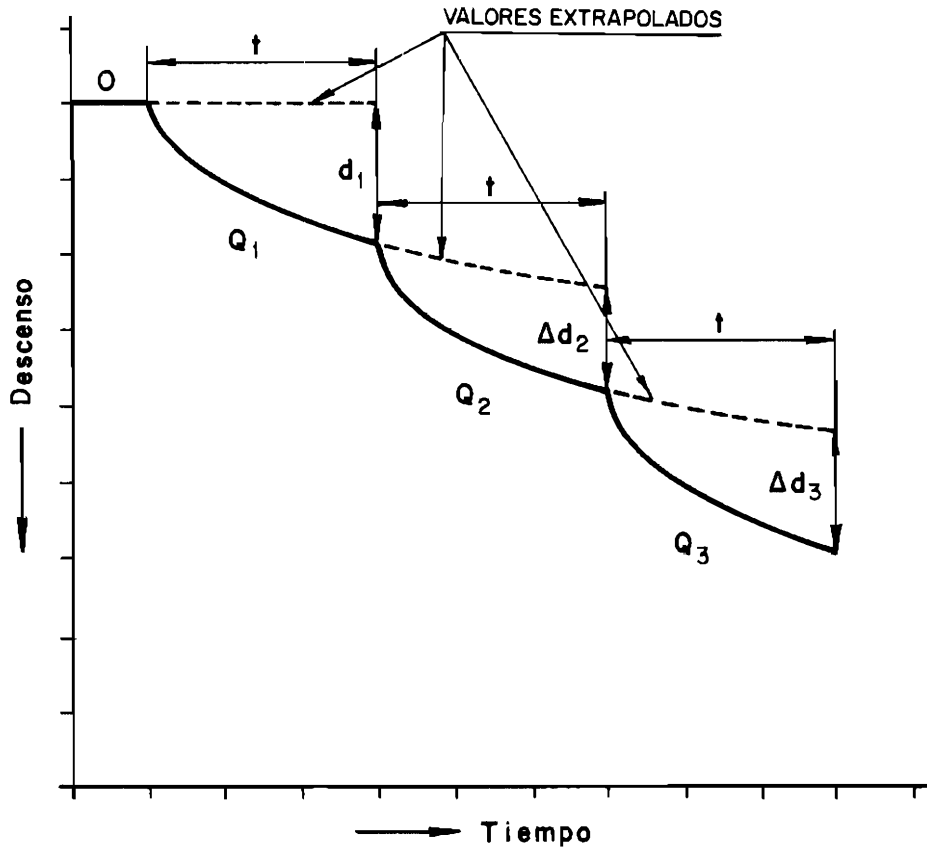


Gráfico 53.—Bombes escalonados sin recuperación y con niveles no estabilizados.

Por último, conviene indicar la necesidad de un riguroso control de cada uno de los caudales, evitando oscilaciones en los mismos, así como extremar el cuidado para que las mediciones de niveles sean lo más correctas posibles.

Métodos de resolución para el cálculo de los coeficientes

Conocidos los caudales de bombeo y los respectivos descensos producidos, se puede resolver el sistema de ecuaciones:

$$d_1 = AQ_1 + BQ_1^n$$

$$d_2 = AQ_2 + BQ_2^n$$

$$d_3 = AQ_3 + BQ_3^n$$

por varios procedimientos.

Es fácil observar que supuesto el valor de $n = 2$, no sería necesario más que un par de valores (Q, d) para la rápida resolución analítica de los coeficientes A y B ; pero no es acertado fijar el valor de n , puesto que son muchos los casos en los que n es distinto de 2.

Los métodos gráficos más corrientes consisten en proceder a tanteos de « n » y « A ».

Método de tanteo del valor de « n »

Dividiendo por Q cada una de las ecuaciones planteadas, el sistema anterior queda transformado en:

$$\begin{aligned}d_1/Q_1 &= A + BQ_1^{n-1} \\d_2/Q_2 &= A + BQ_2^{n-1} \\d_3/Q_3 &= A + BQ_3^{n-1}\end{aligned}$$

Dando a n el valor 2 y representando d/Q en ordenadas y Q^{n-1} en abscisas, en un sistema de ejes métricos, pueden ocurrir dos cosas:

- 1) Que se obtenga una línea recta con los pares de valores ($d/Q, Q^{n-1}$), lo cual implica necesariamente que la n vale realmente 2; pudiendo medirse sobre el gráfico (dado que es una recta) el valor de A (ordenada en el origen) y el de B (pendiente de la recta).
- 2) Que no se obtenga una línea recta, con lo cual $n \neq 2$ y hay que proceder a tantear su valor.

Para el tanteo de n , se comenzará por darle un valor cualquiera, comprendido, como se ha visto, entre 1 y 3,5, y se representan nuevamente los pares de valores ($d/Q, Q^{n-1}$) sobre el mismo gráfico con el oportuno cambio de escala en el eje de abscisas. La nueva escala debe elegirse, por razones representativas, de manera que la amplitud del abanico de valores en el sentido del eje de abscisas sea similar al que se tenía para $n = 2$. Si la nueva curva obtenida es en realidad una recta, el valor arbitrario que se le ha dado a n es el real. A partir de esta última recta se obtienen A y B .

Si por el contrario la nueva curva obtenida no es una recta se procederá a tantear con nuevos valores de n .

La n no debe tantearse de una manera totalmente arbitraria, sino que puede sujetarse a ciertas reglas:

Si con $n = 2$ la curva presenta concavidad hacia el eje OY positivo se prueba $n = 2,5$. Si la nueva curva presenta concavidad hacia el eje OY negativo, n está entre 2 y 2,5, y si continuara presentando la concavidad en el mismo sentido (eje OY positivo) se tanteará para $n = 3$. Así sucesivamente.

Para mayor claridad de lo expuesto, veáanse los ejemplos correspondientes.

Pudiera haber ocurrido que para $n = 2$ la curva presentara concavidad hacia el eje OY negativo. En este caso empieza a tantearse con $n = 1,5$ y se procede de un modo totalmente análogo al caso anterior.

Para la más clara comprensión del método expuesto, se aconseja la lectura del apartado de problema característico que se incluye al final de este capítulo.

Método de tanteo del valor de «A»

La ecuación general de descenso $d = AQ + BQ^n$, se puede transformar en la siguiente:

$$d/Q - A = BQ^{n-1}$$

Tomando logaritmos, se tiene:

$$\lg [d/(Q - A)] = (n - 1) \lg Q + \lg B$$

que, representada en papel doble logarítmico es la ecuación de una recta. Por tanto, llevando en el eje de ordenadas los valores de $\lg (d/Q - A)$, y en abscisas los de $\lg Q$, se deberá obtener una recta de pendiente $n - 1$.

El valor de A es, naturalmente, desconocido y debe ir dándose valores a dicho coeficiente hasta obtener la línea recta que necesariamente debe salir.

Dado que no es posible introducir arbitrariamente valores de A dentro de la escala natural de los números, debe tenerse una idea previa de dicho valor.

Por ello lo más aconsejable es combinar el «método de tanteo de A» con el anteriormente expuesto «método de tanteo de n».

Cuando se tiene la n acotada entre valores de 0,5 (por ejemplo, $2 < n < 2.5$) puede hacerse una primera estimación de A, con la que hacer el primer tanteo por este segundo método.

Como $\lg (d/Q - A)$ tiene valores negativos, la representación suele hacerse considerando valores absolutos crecientes en el sentido positivo del eje de ordenadas. Los valores reales irán decreciendo en este sentido.

Si la curva obtenida con el primer tanteo de A presenta su concavidad hacia abajo, se deberán tantear con valores más pequeños para dicho coeficiente (mayores en valor absoluto) y viceversa. Se recomienda una vez más la lectura de los problemas característicos del final de este capítulo.

Método analítico

En el sistema de ecuaciones:

$$d_1/Q_1 = A + BQ_1^{n-1}$$

$$d_2/Q_2 = A + BQ_2^{n-1}$$

$$d_3/Q_3 = A + BQ_3^{n-1}$$

eliminando A y B, se tiene:

$$\frac{\frac{d_2}{Q_2} - \frac{d_1}{Q_1}}{\frac{d_3}{Q_3} - \frac{d_2}{Q_2}} = \frac{Q_2^{n-1} - Q_1^{n-1}}{Q_3^{n-1} - Q_2^{n-1}}$$

Bastará ensayar con distintos valores de n , hasta encontrar el que mejor cumpla la igualdad establecida anteriormente. Con el valor de n obtenido pueden calcularse, por sustitución, A y B.

Este procedimiento, aun siendo el más inmediato, suele ser largo y complicada, si no se dispone de computadoras.

Método gráfico (Custodio)

Otro procedimiento para resolver la ecuación $d = AQ + BQ^n$, es el expuesto por Custodio.

La ecuación general se transforma en la siguiente:

$$d/Q = A \left(1 + \frac{B}{A} Q^{n-1} \right) = A \cdot F(\alpha) \quad [1]$$

siendo:

$$\alpha = Q \left(\frac{B}{A} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad [2]$$

luego:

$$F(\alpha) = 1 + \alpha^{n-1}$$

Tomando logaritmos en las ecuaciones [1 y 2] se tiene:

$$\lg d/Q = \lg F(\alpha) + \lg A \quad [3]$$

$$\lg Q = \lg \alpha + \frac{1}{n-1} \lg \left(\frac{A}{B} \right) \quad [4]$$

Representados en papel bilogarítmico los valores de $F(\alpha)$ en función de (α) , se obtienen las curvas patrón del gráfico 54.

En la tabla 11 se dan los valores de $F(\alpha) = 1 + \alpha^{n-1}$, en función de (α) y n .

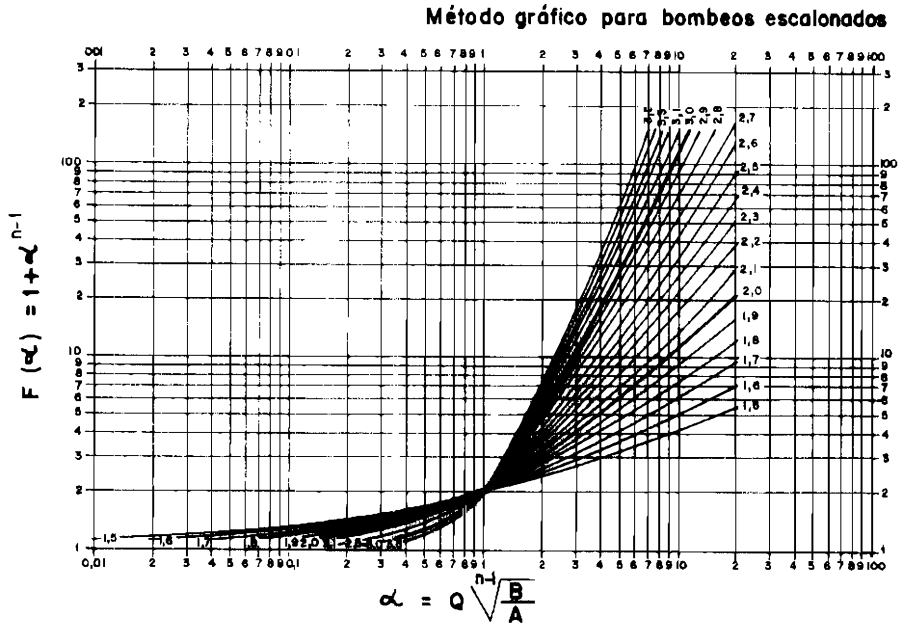


Gráfico 54.—Curvas patrón para análisis de bombeos escalonados.

De la observación de las ecuaciones [3] y [4] se deduce fácilmente que representados los datos obtenidos en los bombeos (d/Q , Q) en papel bilogarítmico, se encontrará una desviación de magnitud $\lg A$ en el eje de ordenadas, y $[1/(n - 1)] \lg A/B$ en abscisas, con relación de las curvas del gráfico 54.

Dibujados los valores obtenidos en el ensayo (d/Q , Q) en papel doble logarítmico del mismo módulo que el utilizado para las curvas tipo, se hará coincidir, mediante una traslación manteniendo los ejes paralelos, la curva del ensayo con alguna de las curvas patrón dibujadas en papel transparente. En esta coincidencia se puede leer el valor de n directamente. Tomando un punto común para ambas curvas, se obtienen los valores (d/Q , Q), en la curva experimental, y $[F(\alpha)$, $(\alpha)]$ en la curva patrón.

De las ecuaciones [1] y [2] se deduce que:

$$A = \frac{d/Q}{F(\alpha)} ; \quad B = A \left(\frac{\alpha}{Q} \right)^{n-1}$$

En la contraportada de este trabajo se incluyen las curvas patrón, en papel transparente, con escala bilogarítmica de 62,5 mm de módulo.

Este método no es lo suficientemente preciso, y sólo es útil para establecer una primera aproximación.

Tabla 11

VALORES DE LA FUNCION $1 + \alpha^{n-1}$ PARA EL ANALISIS DE DATOS DE ENSAYOS DE BOMBEO ESCALONADOS. LOS VALORES DE $n \geq 2,0$ HAN SIDO OBTENIDOS CON ORDENADOR (SEGUN CUSTODIO, 1972, INFORME INTERNO)

| $\alpha \backslash n$ | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 |
|-----------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,01 | 1,100 | 1,063 | 1,040 | 1,025 | 1,016 | 1,010 | 1,006 | 1,004 | 1,003 | 1,002 |
| 0,02 | 1,141 | 1,096 | 1,065 | 1,044 | 1,030 | 1,020 | 1,014 | 1,009 | 1,006 | 1,004 |
| 0,03 | 1,200 | 1,145 | 1,105 | 1,076 | 1,055 | 1,040 | 1,029 | 1,021 | 1,015 | 1,011 |
| 0,04 | 1,265 | 1,203 | 1,155 | 1,119 | 1,091 | 1,070 | 1,054 | 1,041 | 1,032 | 1,024 |
| 0,1 | 1,316 | 1,251 | 1,200 | 1,158 | 1,126 | 1,100 | 1,079 | 1,063 | 1,050 | 1,040 |
| 0,2 | 1,447 | 1,381 | 1,324 | 1,276 | 1,235 | 1,200 | 1,170 | 1,145 | 1,123 | 1,105 |
| 0,4 | 1,632 | 1,577 | 1,527 | 1,480 | 1,438 | 1,400 | 1,365 | 1,333 | 1,304 | 1,277 |
| 0,7 | 1,837 | 1,807 | 1,779 | 1,752 | 1,725 | 1,700 | 1,675 | 1,652 | 1,629 | 1,607 |
| 1 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 |
| 2 | 2,414 | 2,516 | 2,625 | 2,741 | 2,866 | 3,000 | 3,144 | 3,297 | 3,462 | 3,639 |
| 4 | 3,000 | 3,297 | 3,639 | 4,031 | 4,482 | 5,000 | 5,595 | 6,278 | 7,063 | 7,964 |
| 7 | 3,646 | 4,214 | 4,905 | 5,743 | 6,762 | 8,000 | 9,504 | 11,330 | 13,549 | 16,245 |
| 10 | 4,162 | 4,981 | 6,012 | 7,310 | 8,943 | 11,000 | 12,589 | 16,849 | 20,953 | 25,114 |
| 20 | 5,472 | 7,034 | 9,142 | 11,968 | 15,823 | 21,000 | 27,986 | 37,411 | 50,129 | 67,289 |

(Continuación)

| | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,2 | 3,3 | 3,4 | 3,5 |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| 1,001 | 1,001 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 1,003 | 1,002 | 1,001 | 1,001 | 1,001 | 1,001 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 1,008 | 1,006 | 1,004 | 1,003 | 1,002 | 1,002 | 1,001 | 1,001 | 1,001 | 1,001 | 1,000 | 1,000 |
| 1,019 | 1,014 | 1,011 | 1,008 | 1,006 | 1,005 | 1,004 | 1,004 | 1,003 | 1,002 | 1,002 | 1,001 |
| 1,032 | 1,025 | 1,020 | 1,016 | 1,013 | 1,010 | 1,008 | 1,006 | 1,005 | 1,004 | 1,003 | 1,003 |
| 1,089 | 1,076 | 1,065 | 1,055 | 1,047 | 1,040 | 1,034 | 1,029 | 1,025 | 1,021 | 1,018 | 1,018 |
| 1,253 | 1,231 | 1,211 | 1,192 | 1,175 | 1,160 | 1,146 | 1,133 | 1,122 | 1,111 | 1,101 | 1,101 |
| 1,586 | 1,565 | 1,545 | 1,526 | 1,508 | 1,490 | 1,473 | 1,456 | 1,440 | 1,425 | 1,410 | 1,410 |
| 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 |
| 3,828 | 4,031 | 4,249 | 4,482 | 4,732 | 5,000 | 5,287 | 5,595 | 5,925 | 6,278 | 6,657 | 6,657 |
| 9,000 | 10,190 | 11,556 | 13,126 | 14,929 | 17,000 | 19,379 | 22,112 | 25,251 | 28,858 | 33,000 | 33,000 |
| 19,520 | 23,409 | 28,332 | 34,203 | 41,335 | 50,000 | 60,526 | 73,313 | 88,846 | 107,717 | 130,642 | 130,642 |
| 32,623 | 40,811 | 51,119 | 64,096 | 80,438 | 101,000 | 126,892 | 159,489 | 200,526 | 252,188 | 317,227 | 317,227 |
| 90,443 | 120,683 | 164,836 | 220,712 | 297,453 | 401,000 | 540,712 | 729,225 | 983,580 | 1326,780 | 1789,854 | 1789,854 |

Métodos informáticos

Los métodos expuestos anteriormente son de elaboración larga y complicada, teniendo en su contra, además de la posibilidad de error en el cálculo, su poca exactitud como consecuencia de la imprecisión que puede tener el trazado de los gráficos para las escalas de trabajo normalmente utilizadas.

Disponer de medios mecanizados de cálculo equivale a eliminar los inconvenientes que pueden presentarse en el cálculo de gabinete.

El volumen de trabajo para la resolución de este tipo de problemas es muy bajo para la utilización de ordenadores, incluso de pequeña capacidad. Por ello, el uso de calculadoras manuales programables puede ser un adecuado sistema para el tratamiento de los datos aportados por los bombeos de ensayo a caudales escalonados.

En el apéndice «C» de este libro se incluyen algunos programas simplificados para calculadoras científicas programables que serán útiles al lector, bien para su aplicación inmediata o sirviéndole de guía para la confección de sus propios programas.

Análisis de resultados

Valor de n

El valor de la n suele estar comprendido entre 1 y 3,5. Fue Jacob quien supuso $n = 2$ para un régimen intermedio, pero existen otros factores, como la disminución del espesor saturado en acuíferos libres que pueden incrementar el valor de n .

Cuando n está comprendido entre 1 y 2, el régimen de circulación en las proximidades del pozo es sensiblemente laminar, tanto más cuanto menor sea n . A pesar de que exista régimen laminar, si el número de Reynolds es elevado, aparecen pérdidas de carga proporcionales a Q^n , siendo $n > 1$. No se cumple, por tanto, la ley de Darcy.

Si $n = 1$, de la ecuación general de descensos $d = AQ + BQ^n$, se desprende que el descenso es proporcional al caudal, pero no es posible separar cada uno de los sumandos que integran dicha ecuación. En este caso el régimen es laminar y las pérdidas de carga, aunque es posible que existan, son a efectos prácticos despreciables, téngase en cuenta que A suele ser mucho mayor que B .

Cuando n es mayor de 2, deben analizarse las causas adicionales que se suman al aparecer una circulación de régimen turbulento.

El valor de n puede variar en función de los caudales del ensayo. Si estos caudales son pequeños respecto de la capacidad productiva del sondeo, el régimen de circulación será de tipo laminar, pudiendo pasar a turbulento si se incrementan de modo importante dichos caudales. Por este motivo, sucede con frecuencia que, al representar los datos de un ensayo, se definan alineaciones

perfectas para una serie de valores, quedando fuera de esta recta los puntos conseguidos a partir de un determinado caudal, por originarse el citado cambio de régimen.

Conviene, por tanto, que los caudales elegidos para el ensayo estén acotando al caudal de explotación, para que las valoraciones de los descensos por pérdidas de carga sean representativas a la hora de plantear la ecuación general del descenso.

El valor del coeficiente n varía en función de la construcción y equipado del pozo y de las características del acuífero en que se ubica.

Valor de A

El coeficiente A corresponde a las pérdidas de circulación en la formación y depende de las características específicas del acuífero (T y S), así como del tiempo de bombeo, cuando se realiza un ensayo en régimen variable.

Siendo:

$$A = \frac{0.183}{T} \lg \frac{2.25 Tt}{r_p^2 S},$$

la influencia del radio del pozo tiene poca importancia al estar bajo forma logarítmica. La diferencia entre el radio del entubado y el radio equivalente o efectivo r_e , puede indicar el grado de desarrollo del sondeo. Así, si $r_e > r_p$ puede pensarse que el pozo está, en principio, bien construido, aunque este tipo de valoraciones deben usarse con prudencia.

El valor de «A», aunque puede ser un indicador del descenso teórico, no está bien definido, ya que suele estar sujeto a variaciones de permeabilidad o cambios anómalos del acuífero, a una cierta distancia del punto de bombeo. En ocasiones, el coeficiente A incluye pérdidas en el pozo proporcionales a Q, que no es posible cuantificar.

Valor de B

El coeficiente B es un indicador del grado de eficacia del sondeo y depende de las características propias de su construcción y acabado. Influye, por tanto, el tipo de macizo de grava y su colocación, la abertura y disposición de los filtros, el sistema de perforación empleado y el grado de desarrollo y limpieza obtenido.

Según Walton, el valor de B, para pozos bien construidos, es menor de $2,5 \times 10^{-7}$ días²/m⁵, y valores superiores a 5×10^{-6} indican obstrucciones importantes. Estas estimaciones se establecen bajo la condición de que $n = 2$, no siendo válidas cuando $n > 2$.

Mogg discrepa en que el valor de B defina correctamente la mejor o peor construcción del pozo, debido a que este parámetro puede experimentar variaciones importantes en función de las características del acuífero, siendo normalmente menor en aquellos casos en que la transmisividad es más elevada.

La experiencia de los autores de este trabajo sobre este tema está dentro de la línea expuesta por Mogg, abundando en los puntos siguientes:

- El coeficiente B no debe considerarse como indicador de la eficacia de un sondeo si no se cuenta con distintos valores deducidos de otros ensayos en pozos del mismo sistema acuífero, que permitan establecer comparaciones entre los resultados obtenidos.
- No es aconsejable hacer juicios de valor sobre la eficacia de un sondeo comparando valores de B correspondientes a formaciones acuíferas de características diferentes. Los pozos perforados en materiales detríticos que precisan de acondicionamientos especiales, presentan mayores pérdidas de carga que los realizados en formaciones consolidadas, equipados con simples tuberías ranuradas. Por lo general, el valor de B suele estar comprendido entre 10^{-6} y 10^{-7} para los primeros casos, pudiendo llegar a ser de 10^{-8} , en pozos con tubería simple y acuíferos de elevada transmisividad.
- Es posible que pozos que atraviesan varios horizontes acuíferos, con alternancias de materiales impermeables, presenten colmataciones totales en alguno de estos acuíferos, quedando completamente anulados. En estas condiciones se pueden obtener valores de B que indiquen una buena eficacia, si los acuíferos en producción están correctamente acondicionados y limpios, cuando la realidad es muy distinta, dado que se han desperdiciado, tal vez, importantes tramos permeables.

Se exponen seguidamente algunas normas recomendables para la buena práctica de los bombeos, así como para la mejor valoración de los resultados:

- En mantos cautivos no deben ensayarse con caudales que produzcan descensos que rebasen el techo del acuífero, o que dejen alguno de ellos colgado, cuando se trate de un sistema multicapa.
- En los sondeos que capten acuíferos libres, los descensos creados deben ser pequeños con relación al espesor saturado, para no introducir excesivas pérdidas de carga por aumento de la velocidad de circulación dentro de la formación en las inmediaciones del pozo, consecuencia de una reducción importante del espesor saturado en el entorno del punto de bombeo.
- A partir del valor de B , es conveniente calcular el descenso producido por pérdidas de carga (BQ^*) para valores de Q próximos al caudal de explotación. Comparando este descenso con el total medido al final del ensayo, se puede determinar el tanto por ciento que, sobre el descenso total, representan las pérdidas de carga.
- Como norma general, puede admitirse que los pozos que acusan un importante descenso en el primer instante del bombeo, tienen pérdidas de carga elevadas.

Campo de aplicación y reflexiones generales

Realizar unos comentarios sobre el campo de aplicación y posibilidades de análisis que ofrece el método de los bombeos a caudales escalonados, es seguramente uno de los problemas con mayor complejidad con que puede encontrarse el técnico que realiza e interpreta ensayos de bombeo. Si se desea usar este método será preciso hacerlo con un riguroso control de las desviaciones y errores que sobre el cálculo de los coeficientes de la ecuación característica puedan presentarse.

Si de algún modo sintetizado hubiera que definir la razón de estas afirmaciones, que no hacen sino poner de manifiesto la falta de confianza que ofrece el método, habría que pronunciar, sin duda, la palabra «sensibilidad». Sensibilidad que queda definida por la gran alteración que sufren los coeficientes calculados (A , B y n), frente a mínimas variaciones de los valores de entrada (d_i , Q_i).

El nivel de sensibilidad es muy variable de unos a otros casos y depende tanto de la magnitud de los citados valores de entrada como de la gama de interdependencias relativas entre ellos.

A veces, variaciones de 1 cm en el valor del descenso en un escalón produce variaciones del exponente n superiores a 0,2, y errores de 4 ó 5 cm, fáciles de cometer con una sonda, sobre todo si efectúan las medidas distintos operadores, pueden modificar en varias unidades el valor de dicho coeficiente, llegando a resultados absurdos fuera de toda realidad física. Análogamente, puede ocurrir con pequeñas variaciones porcentuales del caudal del escalón.

Planteada así la realidad del problema, los métodos gráficos pierden todo tipo de garantía cuando la gama de valores de entrada es desfavorable. Si las pequeñas variaciones en los datos conducen a resultados muy desviados, los errores del simple trazado gráfico no permitirán, en estos casos, aceptar con un grado de seguridad suficiente los coeficientes calculados.

Si se dispone de calculadoras científicas programables y se hace uso de programas análogos a los expuestos en el Apéndice C, podrá comprobarse cómo dando ligeras variaciones intencionadas a los valores d_i y Q_i varían fuertemente A , B y n . Es, pues, comprensible que los gráficos que se dibujen, aun con una aparente precisión, conduzcan a errores insalvables, si la gama de valores de entrada no presenta un cuadro favorable para que el sistema sea menos sensible.

Hay que recomendar los métodos informáticos en este tipo de cálculos, por su rapidez, seguridad, eficacia y, sobre todo, porque permite tanteos para comprobar las desviaciones que producen pequeños errores en los datos de entrada.

El siguiente paso deseable sería tratar de acotar la gama de valores de descensos y caudales en los escalones, que permitan que el método tenga menor sensibilidad.

Los errores cometidos en las medidas de niveles (descensos) dependen en gran manera del operario que los realiza, aunque también juega un papel importante la calidad del hidronivel utilizado. Puede admitirse que un error

absoluto de 4 ó 5 cm en la medida, tal y como ya se ha indicado, es el máximo que suele cometerse cuando el material utilizado es el adecuado. Este error absoluto puede no tener importancia en valores altos de la depresión, pero cuando ésta es de pequeña magnitud los errores relativos son altos y ello conduce a desviaciones muy importantes en los cálculos.

A estos errores hay que añadir los propios cometidos en las extrapolaciones de las rectas de descensos, cuando los bombeos se han realizado sin recuperación o sin estabilización total de niveles para cada escalón.

Conviene, de todos modos, insistir en que el hidronivel empleado esté convenientemente graduado en centímetros y sea totalmente inextensible e indeformable.

El otro grupo de datos de entrada lo constituyen los caudales de bombeo de los diversos escalones.

Estos caudales deben mantenerse constantes a lo largo de cada escalón, sufriendo las variaciones mínimas que permita el sistema. Resulta prácticamente imposible anular el error en su medida, y por ello, conviene prestar una especial atención a su control mediante un sistema base de referencia (altura en el tubo de pitot) manteniendo perfectamente equilibrado el caudal de cada escalón respecto al punto referencial elegido para cada uno de ellos durante toda la prueba. De este modo, el posible error que se cometa, se refleja en las oscilaciones de nivel sobre el tubo vertical con escala graduada y se compensa sin que existan errores sistemáticamente desviados en un solo sentido.

El juego de tubería y diafragma que se elija debe dimensionarse para que, a grandes variaciones del nivel en el tubo, correspondan pequeñas variaciones del caudal. Si desean tenerse resultados aceptables en este tipo de pruebas, solamente podrán utilizarse sistemas de aforos cuya garantía en la calidad de los resultados sea suficientemente alta.

Un análisis para el conocimiento de la sensibilidad del método en función de los datos que se utilicen y el error que sobre los mismos se cometa, no resulta fácil ni demasiado esclarecedor, a causa de las muchas variables que intervienen en los cálculos.

De cualquier modo, el análisis requerido debería empezar por estudiar la repercusión que sobre los ejes del gráfico utilizado produce un error en las medidas del caudal y del descenso.

En el gráfico $(d/Q - Q^{n-1})$, un punto de coordenadas $(d/Q, Q^{n-1})$ va a desplazarse en el sentido de ambos ejes ante una variación del caudal medido.

El caudal Q sufre una variación $\pm\Delta Q$, consecuencia de un error en la medida.

Por tanto:

$$\Delta Q = eQ \quad 0 < e < 1$$

El error sobre el eje $OX(Q^{n-1})$ viene definido por la función:

$$F(Q) = Q^{n-1}$$

y, por tanto:

$$\begin{aligned} \Delta F(Q) &= F(Q + \Delta Q) - F(Q) = F(Q + eQ) - F(Q) \\ \Delta F(Q) &= (Q + eQ)^{n-1} - Q^{n-1} = [Q(1 + e)]^{n-1} - Q^{n-1} \\ \Delta F(Q) &= [(1 + e)^{n-1} - 1] Q^{n-1} \end{aligned}$$

Y se define la función de error sobre el eje OX, $F_x(e)$ a consecuencia de un error en la medida del caudal como:

$$F_x(e) = (1 + e)^{n-1} - 1$$

La función $F_x(e)$ se tabula en la tabla 12 y el gráfico 55.

TÁBLA 12

VALORES DE LA FUNCIÓN DE ERROR SOBRE EL EJE OX, $F_x(e)$, EN FUNCIÓN DEL ERROR e , SOBRE LA MEDIDA DEL CAUDAL Y EL VALOR DEL EXPONENTE n

| $n \backslash e$ | 1,3 | 1,5 | 1,8 | 2,0 | 2,2 | 2,5 | 2,8 | 3,0 | 3,3 | 3,5 |
|------------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,01 | 0,003 | 0,005 | 0,008 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,03 |
| 0,03 | 0,009 | 0,015 | 0,024 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,06 | 0,07 | 0,08 |
| 0,05 | 0,015 | 0,025 | 0,040 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,09 | 0,10 | 0,12 | 0,13 |
| 0,08 | 0,023 | 0,039 | 0,063 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,15 | 0,17 | 0,19 | 0,21 |
| 0,10 | 0,029 | 0,049 | 0,079 | 0,10 | 0,12 | 0,15 | 0,19 | 0,21 | 0,24 | 0,27 |
| 0,12 | 0,035 | 0,058 | 0,095 | 0,12 | 0,14 | 0,18 | 0,23 | 0,25 | 0,30 | 0,33 |
| 0,15 | 0,043 | 0,072 | 0,12 | 0,15 | 0,18 | 0,23 | 0,29 | 0,32 | 0,38 | 0,42 |
| 0,18 | 0,051 | 0,086 | 0,14 | 0,18 | 0,22 | 0,28 | 0,35 | 0,39 | 0,46 | 0,51 |

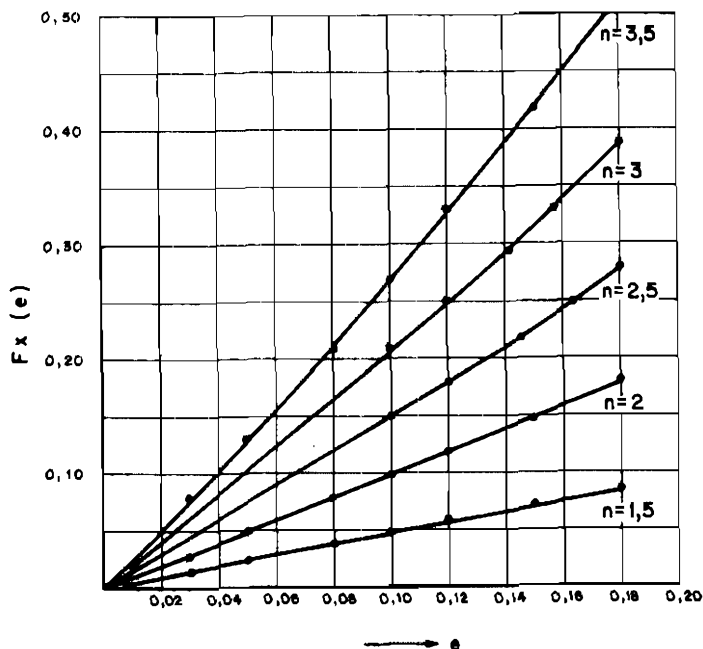


Gráfico 55.—Abacos del error sobre el eje OX en función de los errores sobre la medida del caudal y el valor del exponente n .

Los errores que se cometen sobre el eje OY tienen su origen tanto en los errores cometidos en la medida del caudal como del descenso. Sobre este último debe recordarse que cuando los escalones se realizan sin recuperación total, al error del aparato de medida se le suma el error gráfico cometido, inevitablemente, en la extrapolación.

El error sobre el eje OY viene definido por la función

$$F(d, Q) = \frac{d}{Q}$$

Se efectúa la simplificación pesimista de que el error total sobre el eje OY va a ser la suma de los errores adquiridos en la medida del caudal y del descenso, independientemente.

Si el caudal Q sufre una variación $\pm\Delta Q$ por error de medida:

$$\Delta Q = eQ \quad 0 < e < 1$$

$$F(Q) = \frac{d}{Q}$$

y por tanto

$$\Delta F(Q) = F(Q + \Delta Q) - F(Q) = F(Q + eQ) - F(Q)$$

$$\Delta F(Q) = \frac{d}{Q + eQ} - \frac{d}{Q} = \frac{1}{(1 + e)} \frac{d}{Q} - \frac{d}{Q} = \left[\frac{1}{1 + e} - 1 \right] \frac{d}{Q}$$

$$\Delta F(Q) = \left[\frac{-e}{1 + e} \right] \frac{d}{Q}$$

Y se define la función de error sobre el eje OY a consecuencia de un error en la medida del caudal como:

$$F_{yq}(e) = \left[\frac{-e}{1 + e} \right]$$

Esta función se tabula en la tabla 13 y en el gráfico 56.

TABLA 13

DE $F_{yq}(e)$ EN FUNCION DE e

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| e | 0,01 | 0,03 | 0,05 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,15 | 0,18 | 0,20 | 0,30 |
| $F_{yq}(e)$ | -0,01 | -0,03 | -0,05 | -0,07 | -0,09 | -0,11 | -0,13 | -0,15 | -0,17 | -0,23 |

Análogamente, si el descenso sufre una variación en $\pm\Delta d$, consecuencia de un error e en la medida, se tiene:

$$\Delta d = ed \quad 0 < e < 1$$

El error sobre el eje OY(d/Q) vendrá definido por la función:

$$\begin{aligned} F(d) &= d/Q \\ \Delta F &= F(d + \Delta d) - F(d) = \frac{d + \Delta d}{Q} - \frac{d}{Q} = \frac{d + ed}{Q} - \frac{d}{Q} = \\ &= (1 + e) \frac{d}{Q} - \frac{d}{Q} = \frac{ed}{Q} \\ \Delta F(d) &= e \frac{d}{Q} \end{aligned}$$

La función de error sobre el eje OY, a consecuencia de un error en la medida del descenso, viene dada por:

$$F_{yd}(e) = e$$

cuya representación gráfica, lineal y simétrica se incluye en el gráfico 56, junto con $F_{yq}(e)$.

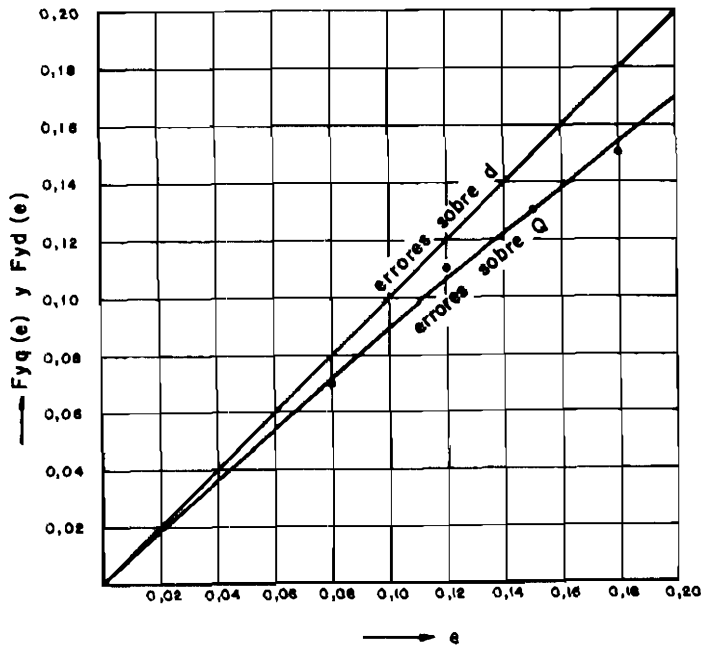


Gráfico 56.—Gráficos del error sobre el eje OY en función de los errores en la medida del caudal y del descenso independientemente.

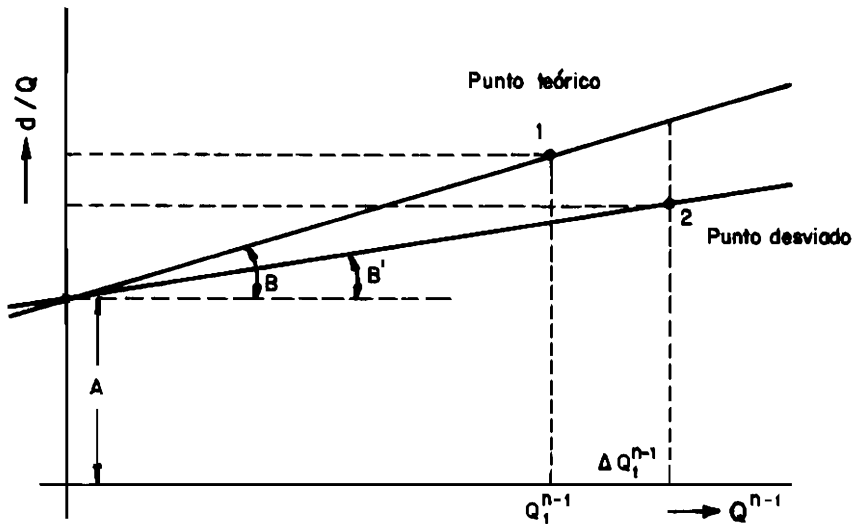


Fig. 18.—Esquema explicativo para la deducción de la función de desviación FD.

Para efectuar una valoración sobre las desviaciones que sobre el método en general producen los errores sobre los ejes $OX(Q^{n-1})$ y $OY(d/Q)$ puede estudiarse la relación entre las pendientes de las rectas conformadas por los puntos teóricos correctos, y los puntos desviados después de asumir el error en las medidas.

En efecto, en la figura 18 puede considerarse

Punto 1 (punto teórico): $(Q^{n-1}, d/Q)$

Punto 2 (punto desviado): $[(1 + F_x) Q^{n-1}, (1 - F_y) d/Q]$

Donde F_x y F_y son las funciones de error total sobre los ejes OX y OY .

$$F_x = F_x$$

$$F_y = F_{yd} + F_{yq}$$

Para el caso de los errores sobre el eje OY se ha considerado que las desviaciones a causa de los errores cometidos en las medidas de caudal y descenso son aditivos independientemente, que es la hipótesis más pesimista ya comentada y que permite seguir haciendo los cálculos del lado de la seguridad.

Por ello, se toma F_{yq} en valor absoluto y se suma a F_{yd} , y esta suma se la integra con signo menos. F_{yq} es negativa para errores positivos del caudal y F_{yd} negativa para errores negativos del descenso.

En definitiva:

$$(d/Q)_2 = (d/Q)_1 - F_y \left(\frac{d}{Q} \right)_1 = (1 - F_y) (d/Q)_1$$

$$(Q)_2^{n-1} = (Q)_1^{n-1} + F_x (Q)_1^{n-1} = (1 + F_x) (Q)_1^{n-1}$$

En la figura 18, la recta teórica no desviada sería la que pasa por los puntos A y 1. A es la ordenada en el origen, equivalente al descenso específico en ausencia de pérdidas de carga. La pendiente de la recta es el coeficiente de pérdidas de carga B.

La recta desviada a consecuencia de errores en la toma de los datos pasará por los puntos A y 2 y su pendiente será B'.

Se define la función de desviación FD como la relación entre las pendientes teórica (B) y desviada (B').

$$FD = \frac{B'}{B}$$

$$B' = \frac{(1 - F_y) d/Q_1 - A}{(1 + F_x) Q_1^{n-1}}$$

$$B = \frac{d_1/Q_1 - A}{Q_1^{n-1}}$$

$$FD = \frac{B'}{B} = \frac{\frac{(1 - F_y) \frac{d_1}{Q_1} - A}{(1 + F_x) Q_1^{n-1}}}{\frac{d_1/Q_1 - A}{Q_1}} = \frac{(1 - F_y) \frac{d_1}{Q_1} - A}{(1 + F_x)(d_1/Q_1 - A)}$$

A la relación entre el descenso específico real en un punto, d_1/Q_1 , y el descenso específico teórico en ausencia de pérdidas de carga, A, se le puede representar por r , y la función de desviación quedaría simplificada por la expresión:

$$FD = \frac{(1 - F_y)(r - 1)}{(1 + F_x)(r - 1)}$$

En la tabla 14 y en el gráfico 57 se encuentra tabulada esta función según valores de la relación r y de los posibles errores cometidos en las medidas de descensos y caudales.

En la tabla se han estudiado ocho hipótesis de error en las medidas. Cuatro de ellas contemplan errores teóricos nulos en la medida del descenso para hacer posible la interpolación.

En el gráfico 57, para una mayor claridad, sólo se han representado las hipótesis que admiten el mismo error relativo en las medidas de d y de Q .

El análisis de los ábacos pone de manifiesto que la función de desviación tiende a 1, y, por tanto, los errores en los resultados son mínimos cuando la relación r es alta. Es decir, que la relación entre el descenso específico real

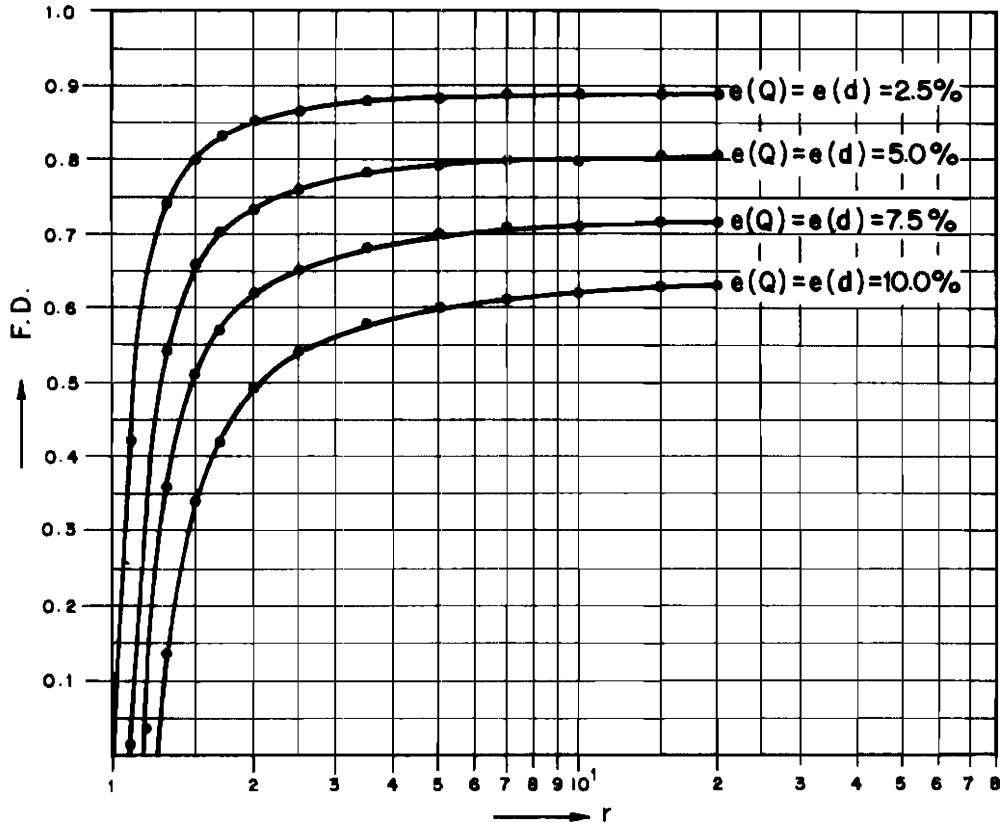


Gráfico 57.—Abacos de la función de desviación FD en función de los errores en las medidas y del valor de la relación r .

para un caudal determinado y el descenso específico que se produciría para ese mismo caudal, si no existieran pérdidas de carga, debe ser alta para que el método sea poco sensible.

Todo el razonamiento anterior, efectuado en base a la figura 18, podría extenderse al caso en que se tuvieran dos puntos definidos por los datos aportados por dos escalones consecutivos, como se indica en la figura 19.

Un desplazamiento de los ejes coordenados al punto $(Q_1^{n-1}, 0)$ sitúa el cálculo de la función de desviación FD en condiciones análogas a la de los supuestos indicados en la figura 18.

Las dos únicas abstracciones que sería preciso hacer consistirían, de una parte, en suponer que la relación « r » se refiere al cociente entre los descensos específicos en los puntos 2 y 1, y no entre éstos y el valor de A ; de otra, que el caudal que entra en el planteamiento es « q », diferencia de los caudales de los dos escalones sucesivos y no el caudal de uno de ellos.

Este último punto implica que los errores sobre el caudal se entiendan co-

TABLA 14

TABLAS DE LA FUNCION DE DESVIACION FD SEGUN VALORES DE LA RELACION r ENTRE EL DESCENSO ESPECIFICO, EN PRESENCIA Y EN AUSENCIA DE PERDIDAS DE CARGA

| | F_x / F_y \ r | 1,1 | 1,3 | 1,5 | 1,7 | 2,0 | 2,5 | 3,5 | 5,0 | 7,0 | 10,0 | 15,0 | 20,0 |
|-----------------------------------|------------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $e(Q) = e(d) = 2,5 \%$ | $F_x = 0,06$ $F_y = 0,05$ | 0,42 | 0,74 | 0,80 | 0,83 | 0,85 | 0,86 | 0,88 | 0,88 | 0,89 | 0,89 | 0,89 | 0,89 |
| $e(Q) = e(d) = 5,0 \%$ | $F_x = 0,12$ $F_y = 0,09$ | 0,01 | 0,54 | 0,65 | 0,70 | 0,73 | 0,76 | 0,78 | 0,79 | 0,80 | 0,80 | 0,81 | 0,81 |
| $e(Q) = e(d) = 7,5 \%$ | $F_x = 0,20$ $F_y = 0,13$ | -0,36 | 0,36 | 0,51 | 0,57 | 0,62 | 0,65 | 0,68 | 0,70 | 0,71 | 0,71 | 0,72 | 0,72 |
| $e(Q) = e(d) = 10,0 \%$ | $F_x = 0,27$ $F_y = 0,19$ | -0,86 | 0,14 | 0,34 | 0,42 | 0,49 | 0,54 | 0,58 | 0,60 | 0,61 | 0,62 | 0,63 | 0,63 |
| $e(Q) = 2,5 \%$ $e(d) \sim 0$ | $F_x = 0,06$ $F_y = 0,03$ | 0,63 | 0,82 | 0,86 | 0,87 | 0,89 | 0,90 | 0,90 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 |
| $e(Q) = 5,0 \%$ $e(d) \sim 0$ | $F_x = 0,12$ $F_y = 0,05$ | 0,40 | 0,70 | 0,76 | 0,78 | 0,80 | 0,82 | 0,83 | 0,84 | 0,84 | 0,84 | 0,85 | 0,85 |
| $e(Q) = 7,5 \%$ $e(d) \sim 0$ | $F_x = 0,20$ $F_y = 0,07$ | 0,19 | 0,58 | 0,66 | 0,69 | 0,72 | 0,74 | 0,75 | 0,76 | 0,77 | 0,77 | 0,77 | 0,77 |
| $e(Q) = 10,0 \%$ $e(d) \sim 0$ | $F_x = 0,27$ $F_y = 0,09$ | 0,01 | 0,48 | 0,57 | 0,62 | 0,65 | 0,67 | 0,69 | 0,70 | 0,70 | 0,71 | 0,71 | 0,71 |

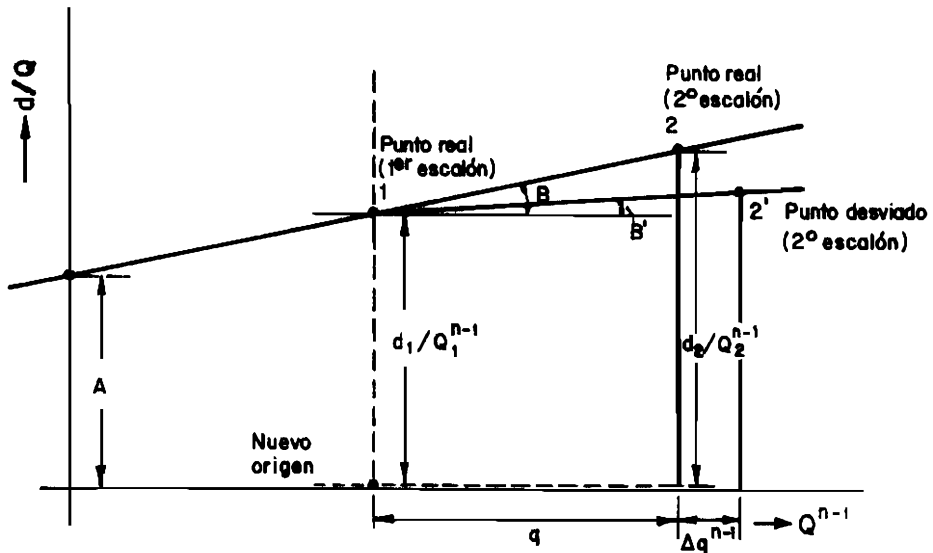


Fig. 19.—Esquema explicativo para la deducción de la función de desviación entre dos escalones consecutivos.

medidos sobre este valor diferencia « q », hipótesis que puede admitirse por tratarse de errores relativos, siempre y cuando q sea lo suficientemente grande para poder apreciarse la variación con los errores citados.

Así pues, las curvas del gráfico 57 podrían ser útiles, sin más que dar a « r » un concepto distinto y considerar que los errores « e » se refieren al incremento de caudal o descenso entre cada dos escalones.

De hecho se va buscando una norma que permita conocer los incrementos que debe tener el caudal específico en cada escalón, para mantener estable el cálculo.

Para poder entrar en los ábacos del gráfico 57 se requiere conocer el valor admisible de la función de desviación o, mejor dicho, el intervalo de valores admisibles en torno al valor 1, que optimiza la función, minimizando la desviación por errores en los datos tomados de los bombeos escalonados.

Las pérdidas de carga para un caudal dado vienen definidas por:

$$P_c = BQ^n$$

Si se comete un error en el valor de B , pasando a valer B^* , las mismas pérdidas de carga para ese caudal se representarán según:

$$P_c = B^* Q^n$$

Por tanto:

$$BQ^n = \overset{*}{B} Q^{\overset{*}{n}}$$

$$(\text{FD}) = Q^{n-\overset{*}{n}}$$

Si es menor $\overset{*}{B}$ que B , $\overset{*}{n}$ debe ser mayor que n y, recíprocamente, si $\overset{*}{B}$ es mayor que B , $\overset{*}{n}$ debe ser menor que n .

De cualquier modo, un incremento de la diferencia $n-\overset{*}{n}$, en el sentido de aumento, aleja paulatinamente a la función de desviación (FD) de un valor óptimo.

Para el cálculo de la función FD, se ha considerado que la pendiente definida por los puntos representativos de dos escalones sea B . Al desviarse uno de los puntos, la pendiente tomaba un valor B' cometándose un error $(B-B')$.

En rigor:

$$\text{FD} = \frac{B - (B - B')}{B} = \frac{B'}{B}$$

Si se tiene en cuenta la hipótesis desfavorable de que el primer punto también se había desviado hacia una región del plano distinta, separada por la recta teórica de referencia, el error sería doble $2(B - B')$ y la función de desviación corregida:

$$(\text{FD})_c = \frac{B - 2(B - B')}{B} = \frac{-B + 2B'}{B} = 2 \frac{B'}{B} - 1$$

Conceptualmente: $(\text{FD})_c = (\overset{*}{\text{FD}})$

$$(\overset{*}{\text{FD}}) = 2(\text{FD}) - 1$$

$$\text{FD} = \frac{1 + (\overset{*}{\text{FD}})}{2} = \frac{1 + \overset{*}{B}/B}{2} = \frac{1 + Q^{n-\overset{*}{n}}}{2}$$

Si se quiere admitir un error máximo de 0,1 en el valor de n , se tiene:

$$\text{FD} = \frac{1 + Q^{-0.1}}{2}$$

o bien:

$$\text{FD} = \frac{1 + Q^{-0.2}}{2}$$

si se admite un error mayor de 0,2 en el valor de n .

Según los valores que se obtuvieron de FD, para los diversos valores de Q se obtendrían de la tabla 14 o del gráfico 57 los valores de r necesarios para hacer estable el método. Es decir, se obtiene la relación que debe conseguirse entre los descensos específicos de los sucesivos escalones para que los resultados de los cálculos sean fiables, teniendo en cuenta posibles tipos de error que se cometen en los datos de entrada.

La tabla 15 recoge los valores de r en función de los errores que se pueden cometer en la toma de datos y del caudal del escalón.

TABLA 15

VALORES DE LA RELACION r ENTRE LOS DESCENSOS ESPECIFICOS DE ESCALONES SUCESIVOS, NECESARIOS PARA SER APLICABLE EL METODO DE BOMBEO ESCALONADOS

| Caudal del escalón (m ³ /día) | 100 | 500 | 1.000 | 5.000 | 10.000 |
|---------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| FD Admisible | 0,81-0,70 | 0,77-0,64 | 0,75-0,62 | 0,71-0,59 | 0,70-0,58 |
| $e(Q) = e(d) = 2,5 \%$ | 1,2-1,5 | 1,2-1,4 | 1,15-1,3 | 1,15-1,2 | 1,15-1,2 |
| $e(Q) = e(d) = 5 \%$ | 1,7-5 | 1,5-2,7 | 1,4-2,2 | 1,4-1,7 | 1,4-1,7 |
| $e(Q) = e(d) = 7,5 \%$ | > 5,0 | > 2,5 | > 2 | 1,9-5 | 1,9-5 |
| $e(Q) = e(d) = 10 \%$ | 1 | 1 | > 6 | > 5 | > 5 |
| $e(Q) = 2,5 \%$ $e(d) \sim 0$ | 1,15-1,3 | 1,1-1,25 | 1,1-1,25 | 1,1-1,15 | 1,1-1,15 |
| $e(Q) = 5 \%$ $e(d) \sim 0$ | 1,3-2,2 | 1,2-1,6 | 1,2-1,5 | 1,15-1,3 | 1,15-1,3 |
| $e(Q) = 7,5 \%$ $e(d) \sim 0$ | > 1,9 | 1,5-5 | 1,4-3,4 | 1,3-1,9 | 1,3-1,9 |
| $e(Q) = 10 \%$ $e(d) \sim 0$ | > 5 | > 2 | > 1,7 | 1,5-5 | 1,5-5 |

$e(Q)$ = error en la medida del caudal

$e(d)$ = error en la medida del nivel

1 = inadmisibile

Los resultados arrojados por esta tabla son la síntesis de todos los desarrollos matemáticos efectuados en el presente apartado, en el cual se ha seguido una línea distinta a la utilizada a lo largo de este libro. Ante la falta de trabajos sobre el tema de la validez de los bombeos a caudales escalonados para determinar el valor de los coeficientes que definen la eficiencia de las captaciones, ha parecido oportuno efectuar un análisis completo, tratando de conjugar el rigor matemático con la realidad práctica.

El mecanismo del análisis será probablemente de gran utilidad para el lector y le permitirá tener una idea del error con que puede moverse en cada momento.

La conclusión del análisis puede sintetizarse estableciendo que la estabilidad del método se logra cuando entre escalón y escalón el descenso específico crece de una manera importante. Este crecimiento se logra con incrementos bajos de caudal en casos de pozos con altas pérdidas de carga, siendo preciso, en el caso contrario, separar convenientemente los caudales de los escalones.

La tabla 15 ofrece la gama de posibilidades de crecimiento necesario del descenso específico para las diversas hipótesis de error en los datos de entrada.

Desde el punto de vista práctico, se puede sacar una consecuencia general. Si los errores en la medida del caudal se mantienen entre el 2,5 por 100 y 7,5 por 100 y los errores en la medida del descenso no superan el 2-3 por 100, la relación que debe buscarse entre los descensos específicos de dos escalones sucesivos puede cifrarse en 1,5.

Consecuentemente, en la realización de los ensayos se iniciará el primer escalón con un caudal lo más bajo posible. En el segundo escalón se dará el caudal necesario para que la depresión específica sea 1,5 veces la primera, y en el tercero deberá lograrse, asimismo, una depresión específica equivalente a 1,5 veces la segunda.

La relación entre los caudales de los escalones para lograr el adecuado incremento de las depresiones específicas, no tiene una forma fácil de ser conocida «a priori», depende lógicamente del valor de A, es decir, del descenso específico en ausencia de pérdidas de carga y del valor de n.

Sin embargo, en la figura 19 puede establecerse:

$$\frac{d_2/Q_2 - A}{d_1/Q_1 - A} = \frac{Q_2^{n-1}}{Q_1^{n-1}}$$

como $d_2/Q_2 = 1,5 d_1/Q_1$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \sqrt[n-1]{\frac{1,5(d_1/Q_1)/A - 1}{(d_1/Q_1)/A - 1}}$$

Con esta fórmula, se ve claramente cómo la variación que debe tener el incremento de caudal entre escalones depende del caso concreto que se esté tratando.

Con hipótesis medianamente desfavorables, en las que $n = 2$, y suponiendo que el descenso específico del primer escalón es al menos 1,5 veces superior al descenso específico en ausencia de pérdidas de carga, pueden darse las cifras siguientes para la relación sucesiva de incremento del caudal de un escalón sobre el anterior inmediato:

$$2,5 \quad 1,9 \quad 1,7$$

Visto esto, la recomendación de ensayar los caudales que se encuentren en progresión geométrica de razón 2, aun con grandes limitaciones, puede ser aceptada.

Sin embargo, y como colofón de este análisis, se tendrá que recomendar que entre el primer y segundo escalón el factor de multiplicación se sitúe entre 2,5 y 3, pudiendo quedar en 2 en los escalones centrales y disminuirse ligeramente en los siguientes.

De cualquier modo, la pauta debe darla el incremento de descenso específico entre escalones sucesivos.

El estudio y significado de los valores de los coeficientes que definen las pérdidas de carga es siempre un tema complejo y de difícil análisis.

La recomendación que se da, es utilizar piezómetros siempre que pueda disponerse de ellos. Los métodos de análisis de perfiles de descensos tratados en el capítulo III de este texto, permiten conocer con un aceptable nivel de garantía las pérdidas de carga reales en un pozo, ante diversos caudales a través del estudio de los descensos en los piezómetros de observación.

Para calcular los coeficientes B y n , una vez conocidas las pérdidas a los diversos caudales, puede procederse como sigue:

$$d = AQ + BQ^n \quad d - AQ = BQ^n$$

Como $(d - AQ) = P_c$ (pérdidas de carga)

$$P_c = BQ^n \quad \lg P_c = \lg B + n \lg Q$$

Luego en un gráfico doble logarítmico, se llevan en abscisas los valores de Q y en ordenadas los de P_c . La recta que se obtiene, tiene de pendiente n y de ordenada en el origen B .

Este procedimiento es probablemente el más seguro y realista, pero requiere disponer de una serie de pozos de observación, lo cual no es posible en un elevado número de casos.

Los estudios sobre la eficiencia de pozos no deben estar sujetos a un método único con aceptación dogmática de sus resultados. Se utilizarán métodos y tanteos de diversa índole, procurando contrastar los resultados de unos y otros, siendo al final, una vez más, la experiencia y sentido común del técnico que realiza e interpreta los ensayos, la que decida sobre el valor más adecuado de los diversos parámetros y coeficientes calculados.