

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

**MATERIA
HIDROGEOLOGIA**

**MANUAL PARA LA
INTERPRETACION DE LOS
ENSAYOS DE BOMBEO**

MATERIAL DE M.C. ALFREDO OCHOA GRANILLO

PARTE VI

EJEMPLO No. 2

En la tabla 5.2 aparecen los datos de un ensayo de bombeo tomados de Pérez Franco (6). Al representar estos resultados en el diagrama doble logarítmico de la figura 5.5, su forma indica que se trata de un acuífero libre o confinado. El análisis de los resultados indicará que tipo de acuífero es. Dicho análisis se hará combinando el procedimiento gráfico con el analítico.

TABLA 5.2

Tiempo (minutos)	Satélite 1 r1=6,00 m	Satélite 2 r2=16,00 m
01	0,16	0,057
05	0,37	0,154
10	0,439	0,206
20	0,494	0,254
40	0,54	0,293
50	0,554	0,304
60	0,564	0,313
80	0,574	0,324
100	0,586	0,335
120	0,596	0,344
150	0,602	0,350
180	0,608	0,354
240	0,618	0,364
360	0,632	0,375
420	0,637	0,381

Fig. 5.5
Gráfico doble logarítmico del ensayo en el satélite No.1

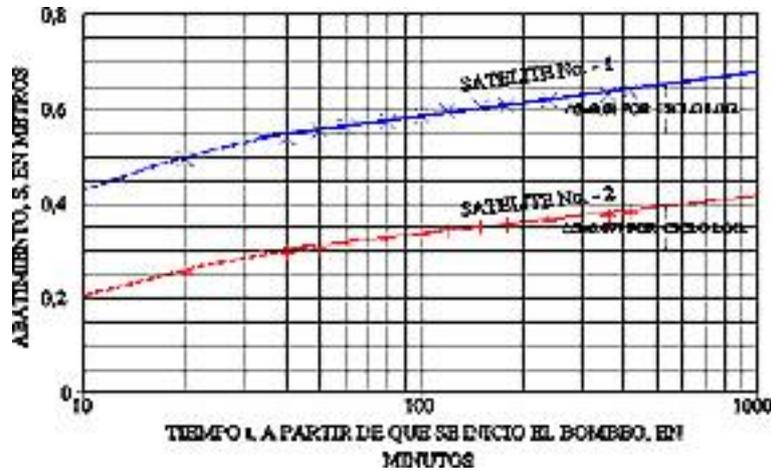


Fig. 5.6
Representación gráfica de los resultados del ensayo de bombeo registrado en la Tabla 5.2

Cálculo de TD

Disponiendo los datos de la Tabla 5.2 en un gráfico semilogarítmico de tiempo-abatimiento (figura 5.6) y trazando las rectas de ajuste correspondientes, se puede observar que las diferencias en abatimiento por ciclo logarítmico son:

Para el satélite No. 1 $DS = 0,08 \text{ m}$

Para el satélite No. 2 $DS = 0,077 \text{ m}$

$DS \text{ promedio} = 0,0785 \text{ m}$

Luego, de acuerdo con la ecuación 5.13

$$T_D = 0,1832 \frac{Q}{\Delta S} = 0,1832 \frac{0,12}{0,0785}$$

$$T_D = 0,2800 \text{ m}^2 / \text{s} = 24192 \text{ m}^2 / \text{día}$$

Cálculo de TT

Del gráfico de la figura 5.6 se puede determinar que la diferencia promedio de abatimiento entre los dos satélites, $Sr1-Sr2=0,254 \text{ m}$.. Aplicando la ecuación 5.9 resulta:

$$0,254 = \frac{0,12}{4\pi \cdot 0,28} \ln\left(\frac{16}{6}\right)^2 + \frac{(0,12)^2 (16-6)}{4\pi^2 T_r^2 (6 \cdot 16)}$$

$$\frac{3,7996 \cdot 10^{-5}}{T_r^2} = 0,254 - 0,0669 = 0,1871m$$

$$\underline{T_r = 0,01425 m^2 / s = 1231,25 m^2 / día}$$

Cálculo de E

Si se utiliza para los cálculos el pozo de observación N° 1, que está muy cerca del pozo de bombeo ($r_1=6$ m), se puede usar la forma aproximada de la ecuación general del abatimiento (ecuación 3.5) con lo que se evita tener que suponer un valor para r_0 y se simplifican y aceleran los cálculos para determinar E. La ecuación 3.5 está expresada por:

$$S_r = \frac{Q}{4\pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D t}{r^2 E} + \frac{Q^2}{4\pi^2 T_r^2} \cdot \frac{1}{r} \quad (3.5)$$

aplicándola al satélite 1 para $t=240$ minutos, el abatimiento será $S_r=0,618$ m y;

$$0,618 = \frac{0,12}{4\pi \cdot 0,28} \ln \frac{2,246 \cdot 0,28 \cdot 240 \cdot 60}{(6)^2 E} + \frac{(0,12)^2}{4\pi^2 (0,01425)^2 \cdot 6}$$

$$0,0341 \ln \frac{251,552}{E} = 0,618 - 0,299 = 0,319m$$

$$E=0,0218$$

Como se sabe, por el valor de E, el acuífero es libre.

En resumen, las propiedades hidrogeológicas del acuífero son:

$$TD=0,2800 \text{ m}^2/\text{s} = 24192 \text{ m}^2/\text{día}$$

$$TT=0,01425 \text{ m}^2/\text{s} = 1231,25 \text{ m}^2/\text{día}$$

$$E=0,0218$$

EJEMPLO No. 3

Como se puede ver, el acuífero del ejemplo No. 1 es de baja conductividad hidráulica y el del ejemplo No. 2 es de muy alta conductividad y en ambos se produce flujo no lineal. Resulta interesante definir en cada uno, las zonas de flujo que se producen alrededor del pozo de bombeo con el caudal extraído en cada caso. Esto puede hacerse utilizando la ecuación 3.1, o sea:

$$r_D = \frac{Q}{0,1\pi} \frac{T_D}{T_T^2}$$

Para el ejemplo No. 1

$$Q = 788 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$TD = 616,28 \text{ m}^2/\text{día (método analítico)}$$

$$TT = 49,61 \text{ m}^2/\text{día (método analítico)}$$

$$r_D = \frac{788 (616,28)}{0,1\pi (49,61)^2} = 628,08m$$

De acuerdo con la ecuación 3.3:

$$r_T = \frac{r_D}{380} = \frac{628,08}{380} = 1,65m$$

Como el radio del pozo lógicamente será menor de 1 m, en este caso se presentarán las tres zonas de flujo, o sea:

Flujo turbulento puro dentro del pozo de bombeo y hasta una distancia radial de 1,65 m desde el centro del pozo.

Flujo no lineal en la zona comprendida entre las distancias radiales de 1,65 m y 628,08 m.

Flujo lineal, más allá de los 628,08 m de distancia radial.

Para el ejemplo No. 2

$$Q = 0,12 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$TD = 0,28 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$TT = 0,01425 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$r_D = \frac{0,12}{0,1\pi} \frac{0,28}{(0,01425)} 2 = 526,7 \text{ m}$$

$$y \quad r_T = \frac{r_D}{380} = \frac{526,7}{380} = 1,39 \text{ m}$$

Como el radio del pozo será con toda seguridad menor de 1 m, se presentarán las tres zonas de flujo.

Como se ha visto, tanto en acuíferos de baja como de alta conductividad hidráulica, puede presentarse el flujo no lineal en zonas bastante alejadas del centro del pozo de bombeo.

5.4 DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES DE ACUIFEROS CONFINADOS Y LIBRES POR ENSAYOS CON ABATIMIENTO ESCALONADO

Una de las ventajas que tiene la realización de ensayos con abatimiento escalonado, es que las propiedades del acuífero pueden determinarse con información de un solo pozo de observación.

Para calcular T_D se parte de la ecuación 3.6, que aplicada a dos instantes A y B del escalón N,

($t_B > t_A$) permitirá expresar que la diferencia en abatimiento para un mismo punto del acuífero, resulta: (5)

$$S_{rB} - S_{rA} = \frac{1}{4\pi T_D} \left(\sum_{i=1}^{i=N} \Delta Q_i \ln \frac{t_{iB}}{t_{iA}} \right) \quad (5.19)$$

de donde se obtiene:

$$T_D = \frac{1}{4\pi(S_{rB} - S_{rA})} \left(\sum_{i=1}^{i=N} \Delta Q_i \ln \frac{t_{iB}}{t_{iA}} \right) \quad (5.20)$$

Para calcular el coeficiente de almacenamiento, una vez obtenido T_D , se toma el abatimiento S_{rN} en el escalón N para un tiempo determinado y el abatimiento $S_{r(N-1)}$ para otro tiempo determinado en el escalón N-1 y resolviendo las ecuaciones simultáneas resultantes quedará: (5)

$$S_{rN} - G.S_{r(N-1)} = \frac{1}{4\pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D}{r^2 E} [Q_N - G \cdot Q_{(N-1)}] + \sum_{i=1}^{i=N} \frac{Q_i}{4\pi T_D} \ln t_i - G \sum_{i=1}^{i=N-1} \frac{Q_i}{4\pi T_D} \ln t_i \quad (5.21)$$

donde:

$$G = \left(\frac{Q_N}{Q_{(N-1)}} \right)^2 \quad (5.22)$$

Como todos los elementos de la ecuación 5.21 son conocidos, excepto E, con ella será posible calcular su valor.

Como ya se conocen los valores de TD y E se puede aplicar la ecuación general (ecuación 3.6), para a partir de un valor conocido de SrN en el mismo punto del acuífero que se ha venido analizando, poder calcular TT. Para hacer ese cálculo se puede utilizar también otra forma de expresar la ecuación general, que puede resultar más cómoda, y que es la siguiente:

$$S_{rN} = \frac{Q_N}{4\pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D}{r^2 E} + \sum_{i=1}^{i=N} \frac{Q_i}{4\pi T_D} \ln t_i + \frac{Q_N^2 (r_o - r)}{4\pi^2 T_T^2 r r_o} \quad (5.23)$$

El valor de ro a utilizar en las ecuaciones 3.6 ó 5.23 se calculará con la ecuación 4.9 para el tiempo t1 correspondiente al instante del escalón N para el cual se haya tomado el valor srN, o sea que:

$$r_o = \left(\frac{2,246 T_D t_1}{E} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.24)$$

De ese modo quedarán calculadas todas las propiedades del acuífero.

5.5 EJEMPLO ILUSTRATIVO DE DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES DE UN ACUIFERO A TRAVES DE UNA PRUEBA CON ABATIMIENTO ESCALONADO

La prueba de un pozo con abatimiento escalonado se ha realizado con tres escalones de 180 minutos cada uno, con escalones sucesivos de 44, 78 y 104 L/s. Los datos de ensayos aparecen en la tabla 5.3.

TABLA 5.3
DATOS DE UNA PRUEBA DE POZO CON ABATIMIENTO ESCALONADO

Escalón 1 Q1=44 L/s Q1=44 L/s	Escalón 2 Q2=78 L/s Q2=34 L/s	Escalón 3 Q3=104 L/s Q3=26 L/s	ABATIMIENTOS (m)	
			Pozo de bombeo	Satélite r=8,5 m
Tiempo t1 (minutos) t1=0	Tiempo t2 (minutos) t1=180 min	Tiempo t3 (minutos) t1=360 min		
1			0,54	0,39
3			0,61	0,44
8			0,73	0,525
20			0,805	0,595
40			0,83	0,635
60			0,86	0,66
100			0,88	0,68
120			0,90	0,70
150			0,92	0,72
180			0,945	0,73
181	1		1,82	1,27
200	20		1,965	1,44
220	40		2,015	1,485
240	60		2,03	1,51
260	80		2,05	1,53
280	100		2,085	1,565
300	120		2,10	1,565
330	150		2,125	1,59
360	180		2,13	1,60
361	181	1	2,865	2,04
380	200	20	3,165	2,25
400	220	40	3,24	2,28
420	240	60	3,30	2,305

440	260	80	3,31	2,31
460	280	100	3,31	2,33
480	300	120	3,31	2,35
510	330	150	3,32	2,36
540	360	1280	3,35	2,375

Cálculo de TD

Para dos instantes A y B en el escalón N se aplica la ecuación 5.20. Los datos a introducir en la ecuación son:

$$\Delta Q_1 = 0,44 \text{ m}^3/\text{s}; \Delta Q_2 = 0,034 \text{ m}^3/\text{s}; \Delta Q_3 = 0,026 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$S_B = 2,375 \text{ m}; S_A = 2,310 \text{ m}; S_B - S_A = 0,065 \text{ m}$$

$$t_{1B} = 540 \text{ min } t_{1A} = 440 \text{ min}$$

$$t_{2B} = 360 \text{ min } t_{2A} = 260 \text{ min}$$

$$t_{3B} = 180 \text{ min } t_{3A} = 80 \text{ min}$$

$$T_D = \frac{1}{4\pi \cdot 0,065} \left(0,044 \ln \frac{540}{440} + 0,034 \ln \frac{360}{260} + 0,026 \ln \frac{180}{80} \right)$$

$$T_D = 0,05039 \text{ m}^2/\text{s} = 5,039 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

Cálculo de E

Se utiliza la ecuación 5.21 tomando en el escalón N=3, el abatimiento $S_rN = 2,375 \text{ m}$, para el tiempo $t_1=540 \text{ min}$, de donde resulta $t_2=360 \text{ min}$ y $t_3=180 \text{ min}$. Y para el escalón N-1=2, el abatimiento $S_r(N-1)=1,60 \text{ m}$, para el tiempo $t_1=360 \text{ min}$, de donde resulta $t_2=180 \text{ min}$.

Por otra parte se tendrá que:

$$G = \left(\frac{Q_3}{Q_2} \right)^2 = \left(\frac{0,104}{0,78} \right)^2 = 1,778$$

Calculando los términos de la ecuación 5.21 se obtiene:

$$S_{rN} - G \cdot S_{r(N-1)} = 2,375 - 1,778 \cdot 1,60 = -0,4694 \text{ m}$$

$$\frac{1}{4\pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D}{r^2 E} (Q_N - G \cdot Q_{N-1}) = \frac{0,104 - 1,778 \cdot 0,78}{4\pi \cdot 0,5039} \ln \frac{2,246 \cdot 0,05039}{(8,5)^2 E}$$

Recordando que para el escalón N=3, se ha tomado SrN=2,375 m para los tiempos t1=540 min, t2=360 min, y t3=180 min., resulta:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{i=N} \frac{\Delta Q_i}{4\pi T_D} \ln t_i &= \frac{\Delta Q_1}{4\pi T_D} \ln t_1 + \frac{\Delta Q_2}{4\pi T_D} \ln t_2 + \frac{\Delta Q_3}{4\pi T_D} \ln t_3 \\ &= \frac{0,044 \text{ en } 540 \cdot 60}{4\pi \cdot 0,05039} + \frac{0,034 \text{ en } 360 \cdot 60}{4\pi \cdot 0,05039} + \frac{0,026 \text{ en } 180 \cdot 60}{4\pi \cdot 0,05039} = 1,6389 \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que para el escalón N-1=2, se ha tomado Sr(N-1)=1,60 m, para los tiempos t1=360 min y t2=180 min, resulta:

$$\begin{aligned} G \cdot \sum_{i=1}^{i=N-1} \frac{\Delta Q_i}{4\pi T_D} \ln t_i &= \left(\frac{\Delta Q_1}{4\pi T_D} \ln t_1 + \frac{\Delta Q_2}{4\pi T_D} \ln t_2 \right) G = \\ &= 1,778 \left(\frac{0,044 \ln 360 \cdot 60}{4\pi \cdot 0,05039} + \frac{0,034 \ln 180 \cdot 60}{4\pi \cdot 0,05039} \right) = \end{aligned}$$

De los cálculos anteriores resulta:

$$-0,4694 = 0,3536 + 0,05475 \ln E + 1,6389 - 2,1197$$

Luego en E:

$$-\frac{0,3422}{0,05475} = -6,25023$$

$$E = 1,93 \cdot 10^{-3}$$

Cálculo de TT

Partiendo de la ecuación general en la forma presentada como 5.23 y recordando que se ha tomado SrN=2,375, t1=540 min, t2=360 min y t3=180 min se calculan los términos de dicha ecuación como sigue, todo para el escalón N=3.

$$S_{tN} = 2,375 \text{ m}$$

$$\frac{Q_N}{4\pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D}{r^2 E} = \frac{0,104}{4\pi \cdot 0,05039} \ln \frac{2,246 \cdot 0,05039}{(8,5)^2 \cdot 0,00193} = -0,0343$$

$$\sum_{i=1}^{i=N} \frac{\Delta Q_i}{4\pi T_D} \ln t_{i=1,6389} \quad (\text{Calculando para determinar E})$$

$$\frac{Q_N^2 (r_o - r)}{4\pi^2 T_T^2 r r_o} = \frac{(0,104)^2 (r_o - 8,5)}{4\pi^2 \cdot T_T^2 \cdot 8,5 r_o}$$

Calculando r_o por la ecuación 5.24 se tendrá

$$r_o = \left(\frac{2,246 \cdot 0,05039 \cdot 540 \cdot 60}{0,00193} \right)^{\frac{1}{2}} = 1378,39$$

de donde:

$$\frac{(0,104)^2 (r_o - 8,5)}{4\pi^2 T_T^2 \cdot 8,5 r_o} = \frac{0,32033 \cdot 10^{-4}}{T_T^2}$$

Luego, los términos de la ecuación 5.23 aplicada a los datos del ensayo quedarán:

$$2,375 = -0,0343 + 1,6389 + \frac{0,32033 \cdot 10^{-4}}{T_T^2}$$

de donde:

$$T_T^2 = 0,4158 \cdot 10^{-4}$$

$$T_T = 0,6448 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

En resumen, las propiedades del acuífero obtenidas del análisis del ensayo con abatimiento escalonado son:

$$TD = 5,039 \cdot 10^2 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$TT = 0,6448 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

E=1,93.10-3