

APÉNDICE A

EJEMPLOS PRACTICOS DE INTERPRETACION DE ENSAYOS DE BOMBEO POR LOS DIVERSOS METODOS

Se pretende en este apéndice exponer una serie de ejemplos prácticos reales, que pueden ser de cierta utilidad didáctica por sus particulares condiciones y comportamientos.

Los métodos de análisis utilizados para cada uno de los diversos casos prácticos desarrollados tratan de adecuarse a las específicas características de cada pozo, así como a la realidad física del acuífero estudiado.

Aunque se han intentado establecer los criterios seguidos para la aplicación de los métodos de análisis más acordes con la evolución experimentada por el acuífero ensayado, no quedan excluidas otras interpretaciones que pudieran ser igualmente válidas. En cualquier caso, los ejemplos que se citan en el presente apéndice pretenden dar unos criterios básicos que permitan acometer, de modo simple y racional, algunos de los casos más frecuentes con los que pueden encontrarse los técnicos dedicados a esta materia.

CASO PRACTICO NUM. 1

Pozo ensayado: SON PORQUE:

Tipo de prueba: Bombeo a caudal constante ($Q = 8 \text{ l/s}$). Se han observado la evolución de niveles en el pozo de bombeo, tanto en descenso como en recuperación.

Parámetros calculados: Transmisividad (T).

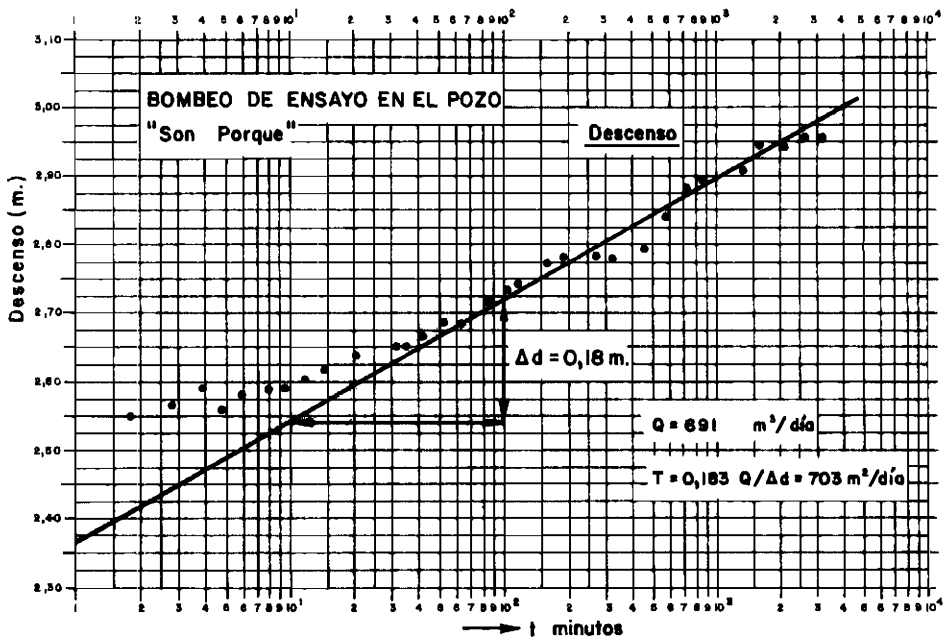
Litología del acuífero: Dolomías infraliásicas.

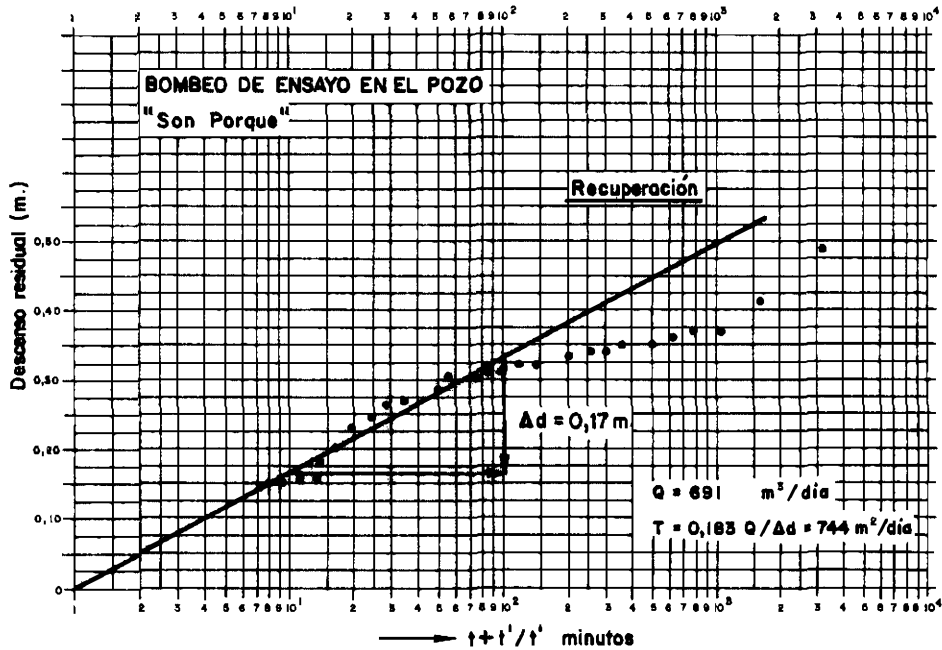
Método de interpretación: Jacob.

Observaciones

Dado que no se disponía de piezómetros de observación, solamente se ha calculado el valor de T. Conviene señalar que los valores de T en recuperación y descenso son muy similares.

Este ensayo no presenta anomalías importantes. El ajuste de los tramos rectos puede realizarse sin dificultad, tanto en descenso como en recuperación.





CASO PRACTICO NUM. 2

Pozo ensayado: PORT DES TURRENT

Tipo de prueba: Bombeo a caudal constante. Se tomaron medidas del descenso máximo en el pozo y la evolución de niveles en la recuperación.

Parámetros calculados: Transmisividad (T).

Litología del acuífero: Gravas, arenas y limos.

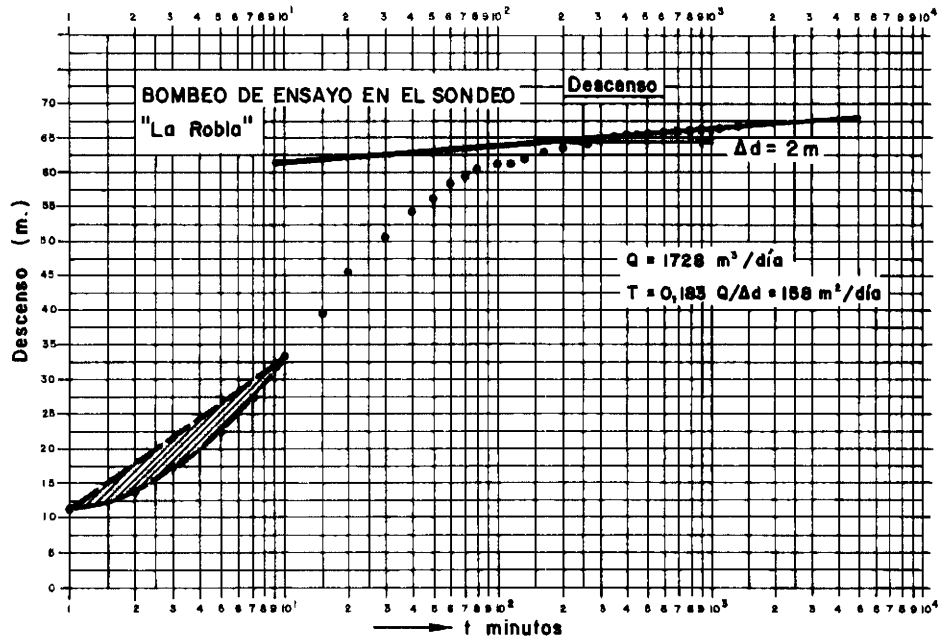
Método de interpretación: Thiem para el descenso y Jacob para la recuperación.

Observaciones

El presente ensayo se ha realizado con caudal de bombeo constante, interpretando el descenso máximo por la fórmula abreviada de Thiem. En recuperación se representan los datos de la evolución del nivel, para ser interpretados en régimen variable.

Es evidente la gran diferencia de valores de T encontrados en los dos procedimientos utilizados. Se dan como valores aceptables los obtenidos a partir de los datos de la recuperación. El valor tan alto de T obtenido en el descenso puede ser debido a no haberse alcanzado la estabilización real de niveles, o a una posible mala estimación del radio de influencia para aplicar la fórmula simplificada de Thiem.

En la recuperación se llega al mismo valor de T , si bien no se han representado los datos del ascenso.



CASO PRACTICO NUM. 4

Pozo ensayado: ALMANSA.

Tipo de prueba: Bombeo a caudal constante ($Q = 150 \text{ l/s}$), en régimen variable.

Se observa la evolución de niveles en descenso y recuperación.

Parámetros calculados: Transmisividad (T). Área de embalse.

Litología del acuífero: Calizas con orbitolinas y gravels (Aptense), con pasadas de margas grises.

Método de interpretación: Jacob.

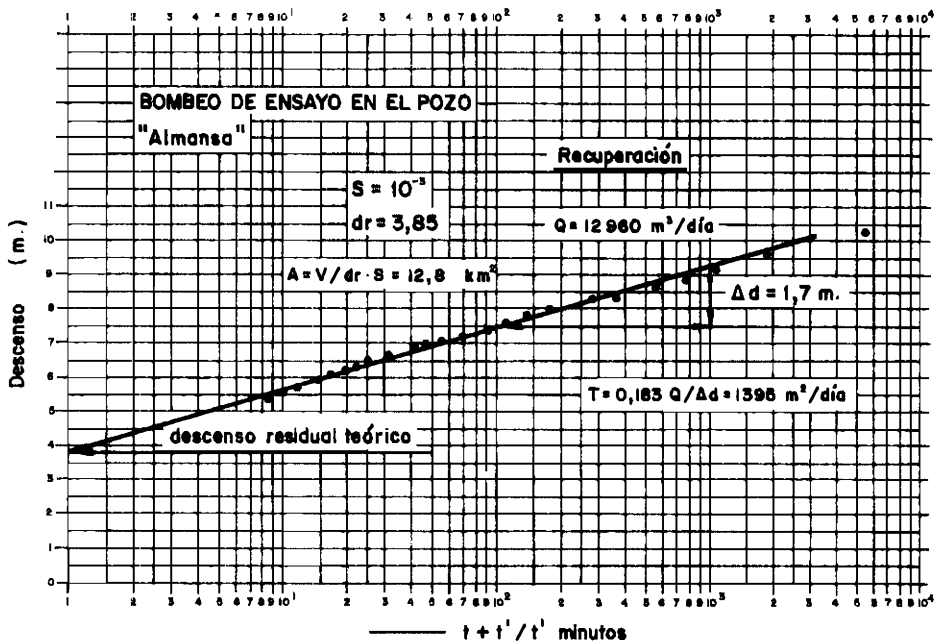
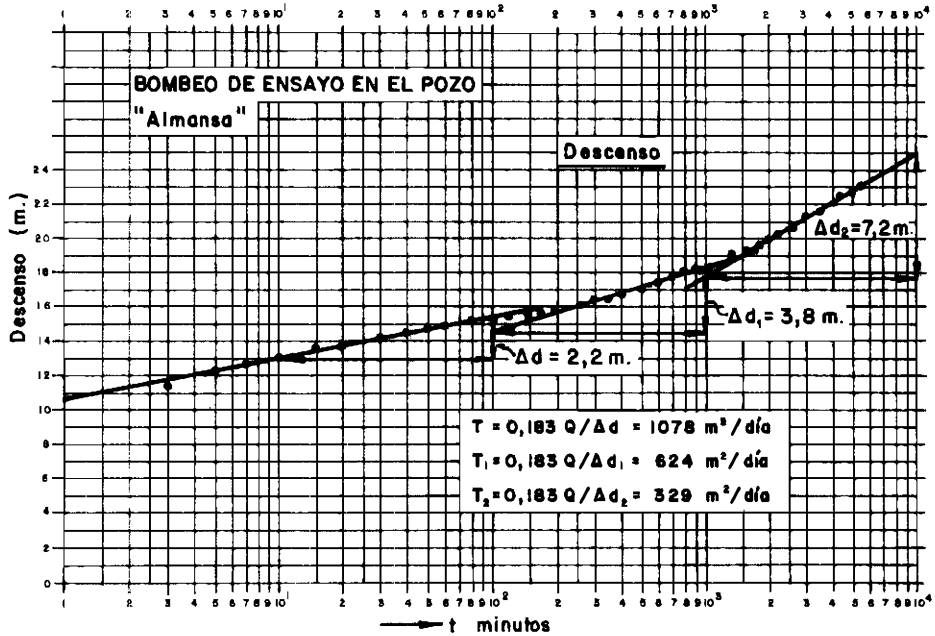
Observaciones

Se procede a un bombeo de larga duración y caudal elevado para detectar barreras impermeables y fallas que compartimentan el acuífero estudiado. En el descenso se aprecian perfectamente estos fenómenos, reduciéndose escalonadamente la transmisividad por aumento de la pendiente de la recta.

En recuperación, no se ponen de manifiesto estos fenómenos, obteniéndose un valor de T semejante al calculado con el primer tramo de la recta de

descensos. Se ha calculado el área de embalse subterráneo A, estimando un coeficiente de almacenamiento de $S = 10^{-3}$.

Este acuífero se ha agotado a los cinco años de su explotación.



CASO PRACTICO NUM. 5

Pozo ensayado: JUCAR.

Tipo de prueba: A caudal constante ($Q = 150$ l/s). Existen dos pozos de observación situados a 28 y 300 m del punto de bombeo.

Parámetros calculados: T y S.

Litología del acuífero: Calizas dolomíticas.

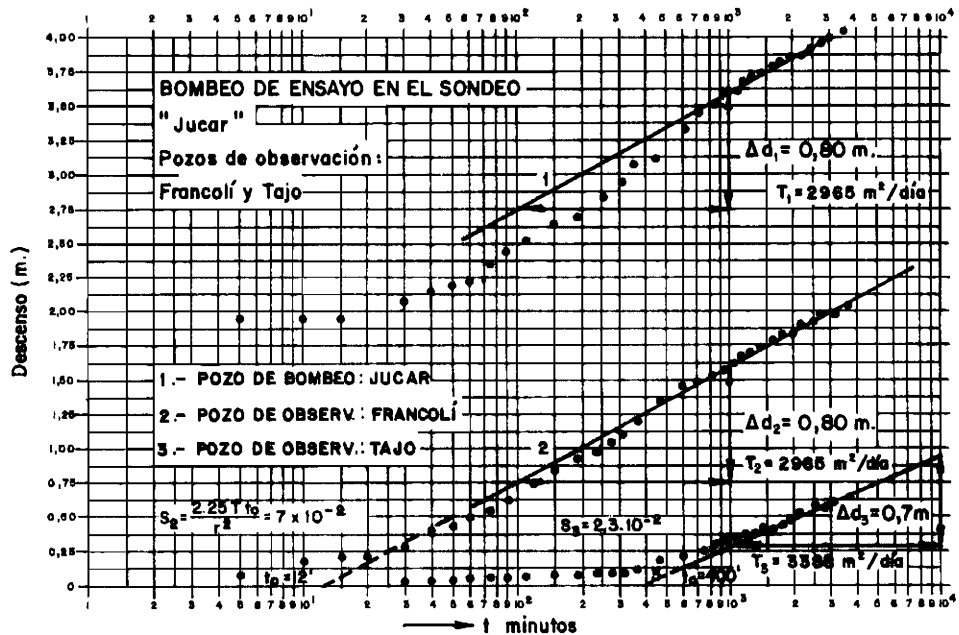
Método de interpretación: Theis y Jacob.

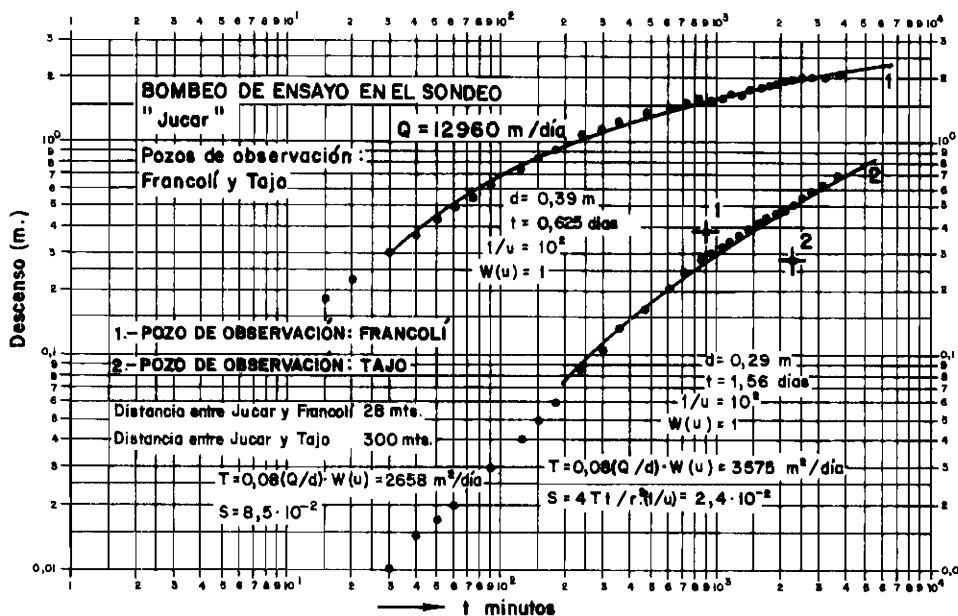
Observaciones

Se trata con este ensayo de cuantificar del modo más preciso posible los valores de los parámetros T y S. A partir de estos datos se han calculado los caudales de explotación del conjunto de pozos, para varios supuestos de tiempos y descensos.

Los valores encontrados por el análisis de los datos en los distintos sondeos han sido muy semejantes.

Se significa que las previsiones efectuadas sobre el caudal de explotación conjunto han coincidido sensiblemente con la realidad observada en una explotación experimental de cinco años.





CASO PRACTICO NUM. 6

Pozo ensayado: CAN MATAS.

Tipo de prueba: Asimilable a un bombeo en régimen permanente para el descenso y variable en recuperación.

Parámetros calculados: Transmisividad (T) y cota del muro del material acuífero.

Litología del acuífero: Calizas, dolomías y margas del Jurásico.

Método de interpretación: Thiem y Jacob.

Observaciones

Se realiza el ensayo y ofrece unas curvas con un aspecto ininterpretable. A partir de los 7 m de depresión, los descensos aumentan y el agua llega a la rejilla casi instantáneamente, donde oscila hasta que se reduce el caudal estrangulando la válvula. De este modo se recupera rápidamente el nivel de siete metros y la prueba continúa normalmente.

El análisis de los partes de aforo induce a pensar que 7 m por debajo del nivel estático deja de haber material permeable, quedando el acuífero «colgado».

El caudal se midió por tiempo de llenado de un bidón de 220 litros, pudiéndose ver en los partes de descensos su evolución y las operaciones para el intento de su regulación.

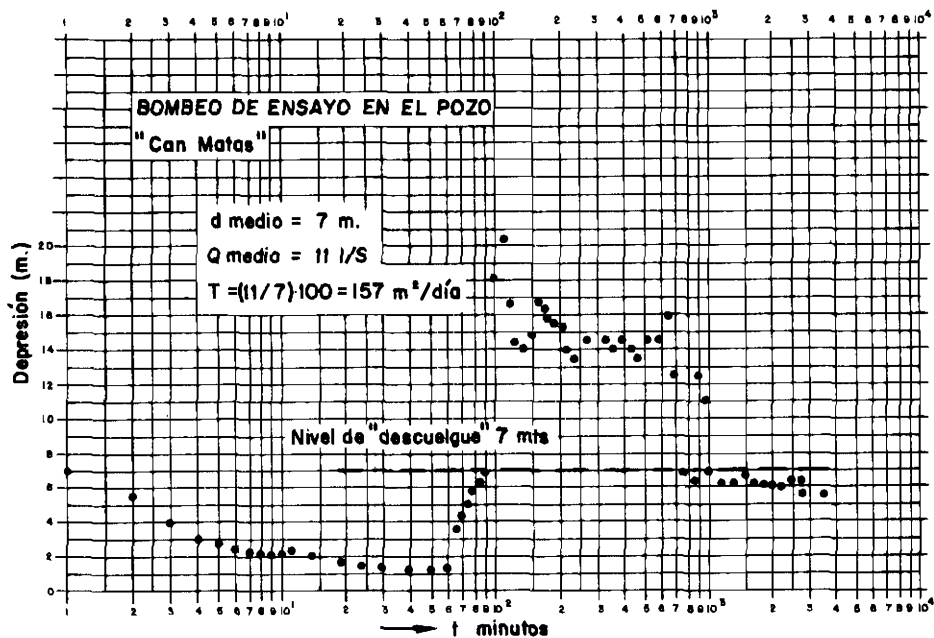
En la recuperación se oyó el ruido de agua «colgada» hasta 7 m, antes de recuperarse el nivel inicial.

Se consideró que en el descenso se había estabilizado el nivel a la cota de «descuelgue», siendo el caudal de bombeo la media ponderada de los múltiples caudales aforados.

Se obtuvo la transmisividad por el método abreviado de Thiem.

La recuperación se interpretó en régimen variable por el método de Jacob usando el caudal ponderado calculado.

Se obtuvieron resultados similares.



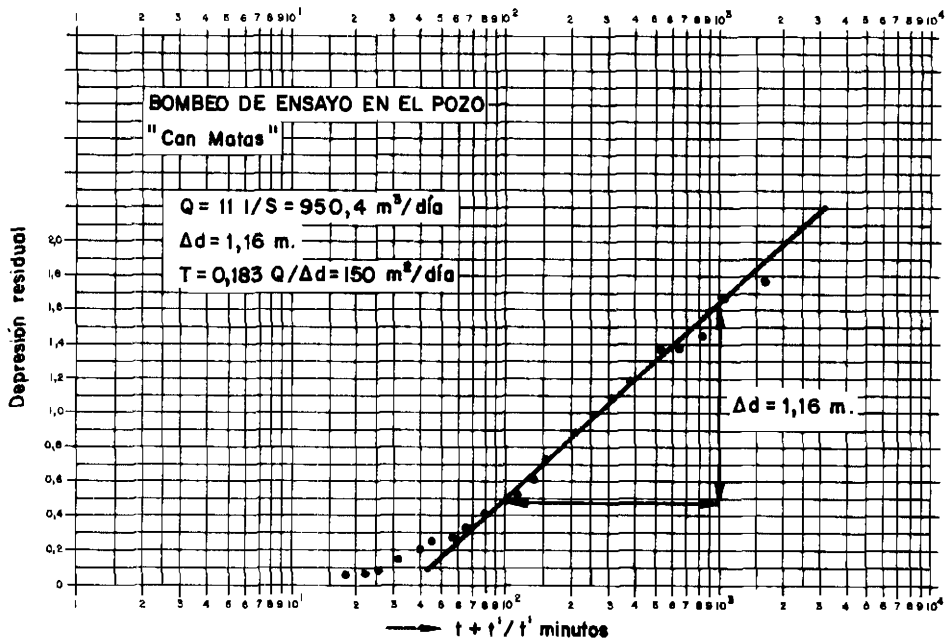


TABLA DE DESCENSOS EN POZO DE BOMBEO

N. E. 74.77

Hora	Tiempo	Depresión parcial	Depresión total	Observaciones
28/2/74	0	+0	0	
8 h 40'	1	+7,11	7,11	
	2	-1,78	5,33	
	3	-1,34	3,99	
	4	-0,75	3,24	
	5	-0,45	2,79	
	6	-0,28	2,51	
	8	-0,27	2,24	
	10	-0,04	2,20	
	12	-0,04	2,16	
	15	-0,21	1,95	
	20	-0,30	1,65	
	25	-0,19	1,46	
	30	-0,23	1,23	220 l en 12'5"
	40	-0,11	1,12	
	50	0	1,12	
9,40	60	+0,04	1,16	se abre válvula
	61	+1,46	2,62	
	62	+0,73	3,35	
	63	+0,25	3,60	
	64	+0,05	3,65	
	65	-0,06	3,59	
	66	+0,25	3,84	

Apendice A. Ejemplos prácticos de interpretación de ensayos de bombeo por los diversos métodos.

Hora	Tiempo	Depresión parcial	Depresión total	Observaciones
	68	+0.28	4.12	
	70	-0.10	4.02	
	72	+0.41	4.43	se abre válvula
	75	+0.57	5.00	
	80	+0.84	5.84	
	85	+0.37	6.21	
	90	+0.63	6.84	
	100	+11.17	18.01	
10.40	110	+2.02	20.03	
	120	-3.77	16.26	220 l en 19"
	130	-2.15	14.11	
	140	-0.30	13.81	
	150	+0.87	14.68	
	160	+1.70	16.38	
	170	-0.42	15.96	
11.40	180	-0.39	15.57	
	190	-0.27	15.30	
12.00	200	-0.13	15.17	
	210	-1.50	13.67	
	220	-0.04	13.63	
12.30	230	-0.38	13.25	
13.00	260	+1.24	14.49	220 l en 18,5"
	320	0	14.49	
	350	-0.58	13.91	
	380	+0.29	14.20	
	410	-0.48	13.72	
16.00	440	-0.33	13.39	220 l en 19,5"
	500	+1.28	14.67	
	560	+0.03	14.70	
19.00	620	+1.15	15.85	se cierra válvula
	680	-3.75	12.10	se cierra válvula
	740	-5.19	6.91	
22.00	800	-0.72	6.19	se abre válvula
	860	+6.03	12.22	
24.00	920	-1.44	10.78	se cierra válvula
1/3/74	1040	-3.73	7.05	
4.00	1160	-1.08	5.97	
	1280	-0.06	5.91	
8.00	1400	+0.55	6.46	220 l en 19,5"
	1520	-0.50	5.96	1.ª muestra agua
13.00	1700	-0.13	5.83	
15.00	1820	0	5.83	
19.00	2060	0	5.83	
22.00	2240	+0.37	6.20	
2/3/74	2420	0	6.20	
4.00	2600	-0.81	5.39	
7.00	2780	0	5.39	
9.00	2900	0	5.39	se toma 2.ª muestra de agua
12.00	3080	0	5.39	
13.00	3140	—	5.39	
13.05	3145	—	5.39	220 l en 19.9"

CASO PRACTICO NUM. 7

Pozo ensayado: SON MONJOS.

Tipo de prueba: Bombeo a caudal constante ($Q = 80$ l/s). Se ha dispuesto de un piezómetro de observación a 13 m del pozo de bombeo.

Parámetros calculados: Transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S).

Litología del acuífero: Calcarenitas miocenas, con margas semipermeables encima del acuífero.

Método de interpretación: Jacob, Theis y, parcialmente, Prickett.

Observaciones

Parece existir un efecto de drenaje diferido debido a los dos tramos paralelos inicial y final, separados por un intento de estabilización. El corte litológico del sondeo confirma esta hipótesis, encontrándose el nivel estático entre 1 y 2 m por encima del muro de margas arenosas.

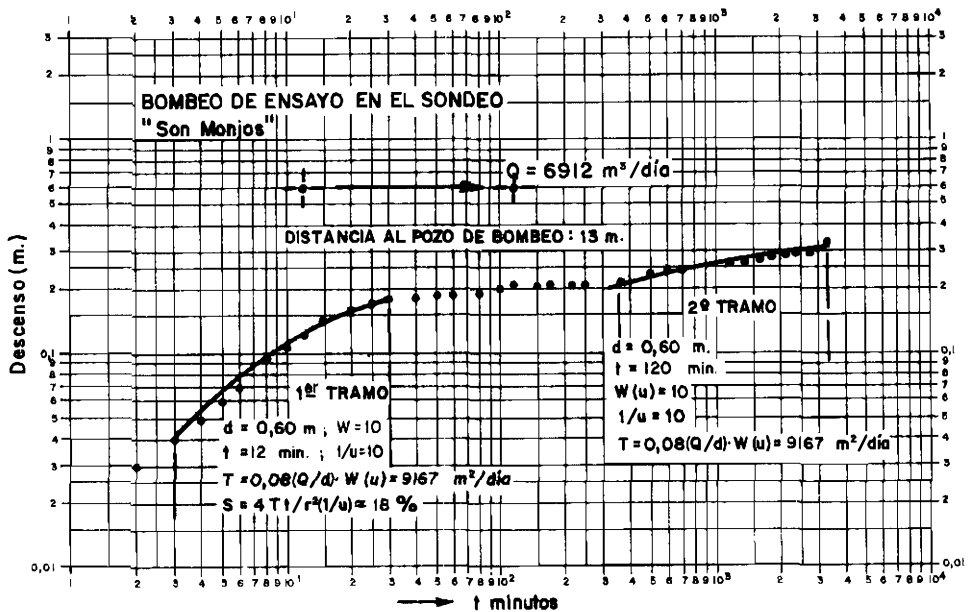
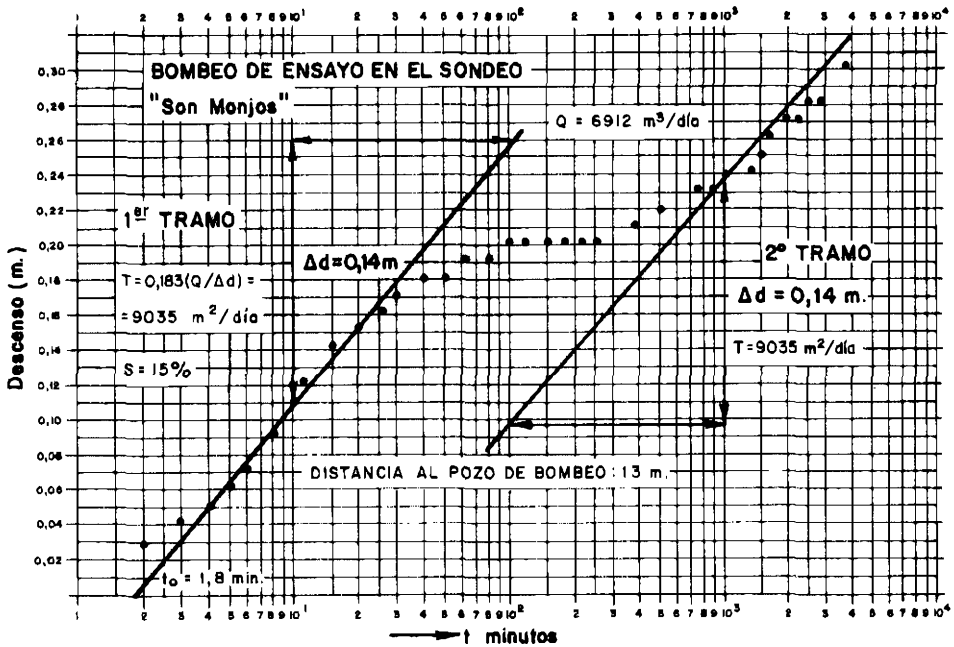
No se ha considerado el pozo de bombeo a efectos de análisis, dado lo poco que se acusa en el mismo punto las distorsiones debidas al drenaje diferido.

El coeficiente de almacenamiento se obtiene del primer tramo, dado que la disposición estructural de las capas así lo aconseja. El agua sale del acuífero calizo, que deprime poco por su alta transmisividad.

El acuífero funciona como libre desde el primer momento, habida cuenta del valor de la depresión, dando los valores propios del libre y no los de cautivo, resultantes cuando se cumplen las hipótesis de Prickett.

El agua procedente de las margas no hace sino retrasar las depresiones en el acuífero y variar, consecuentemente, el valor de t_0 .

Los valores obtenidos por los métodos de Theis y Jacob son muy similares.



CASO PRACTICO NUM. 8

Pozo ensayado: SON ELLOBETA.

Tipo de prueba: Bombeo a caudal constante ($Q = 25$ l/s), con observaciones en el pozo de bombeo y en el piezómetro situado a 80 m de distancia.

Parámetros calculados: Transmisividad (T), Coeficiente de almacenamiento (S) y área de embalse.

Litología del acuífero: Dolomías y carniolas del Suprakeuper.

Método de interpretación: Theis y Jacob.

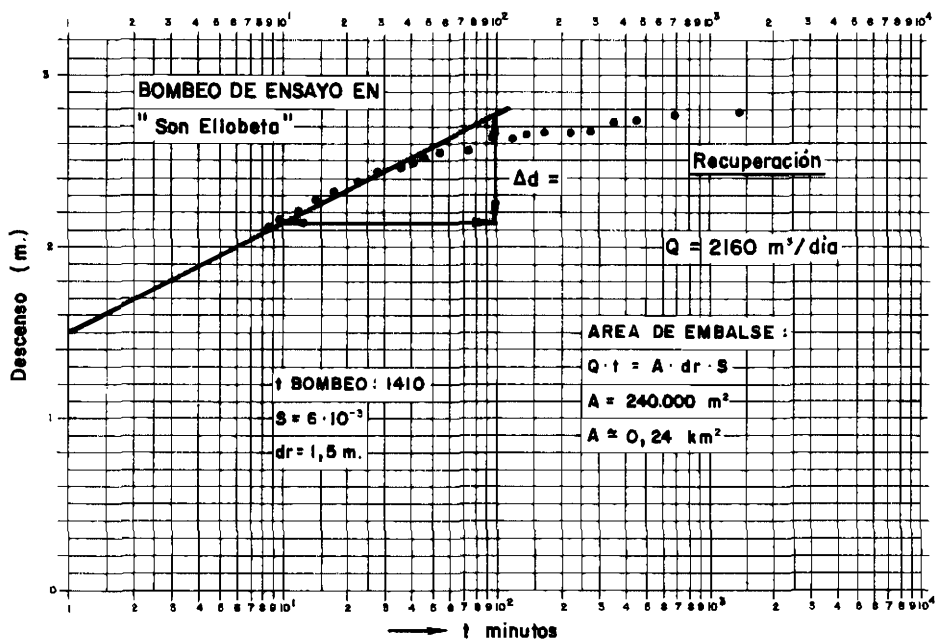
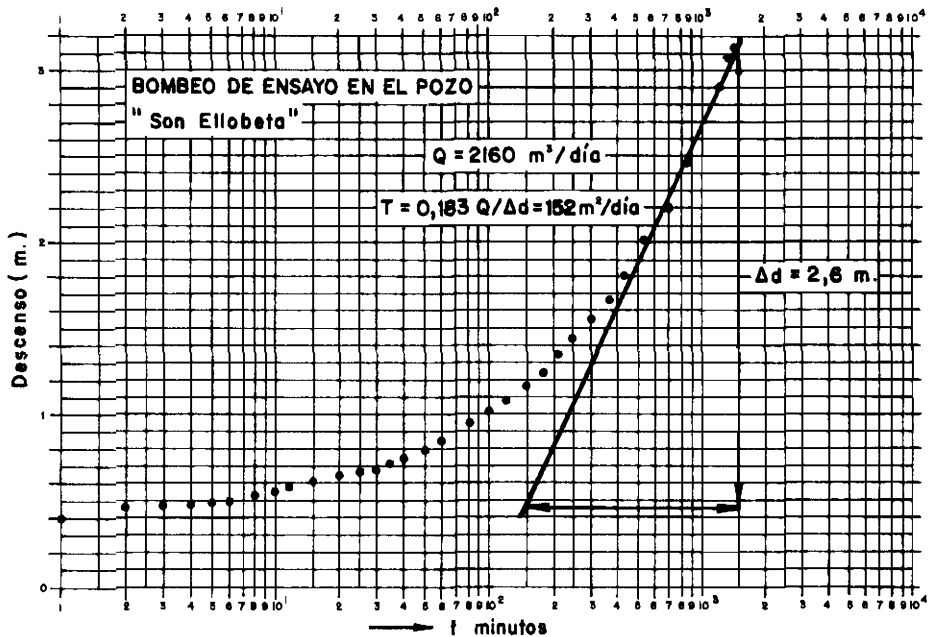
Observaciones

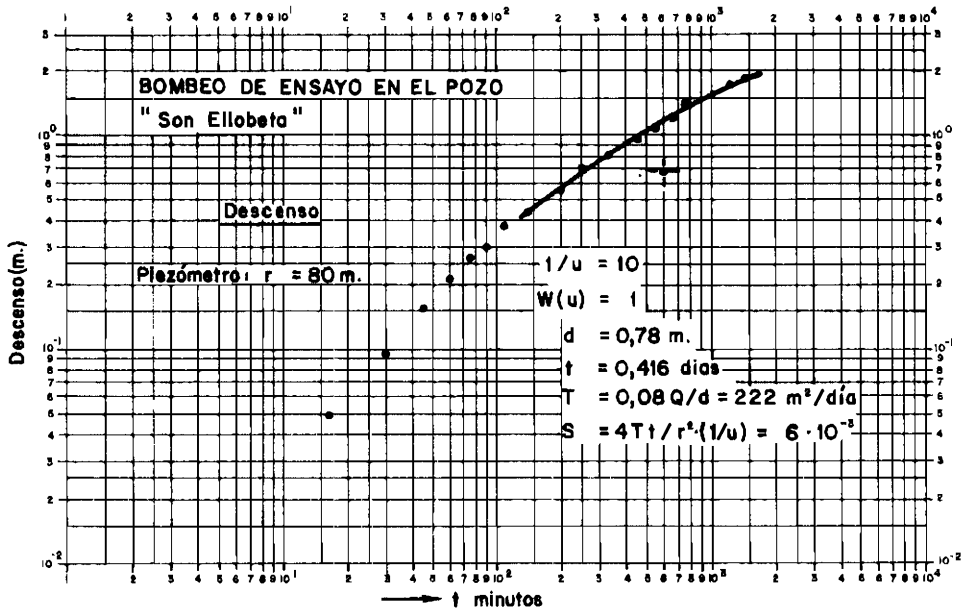
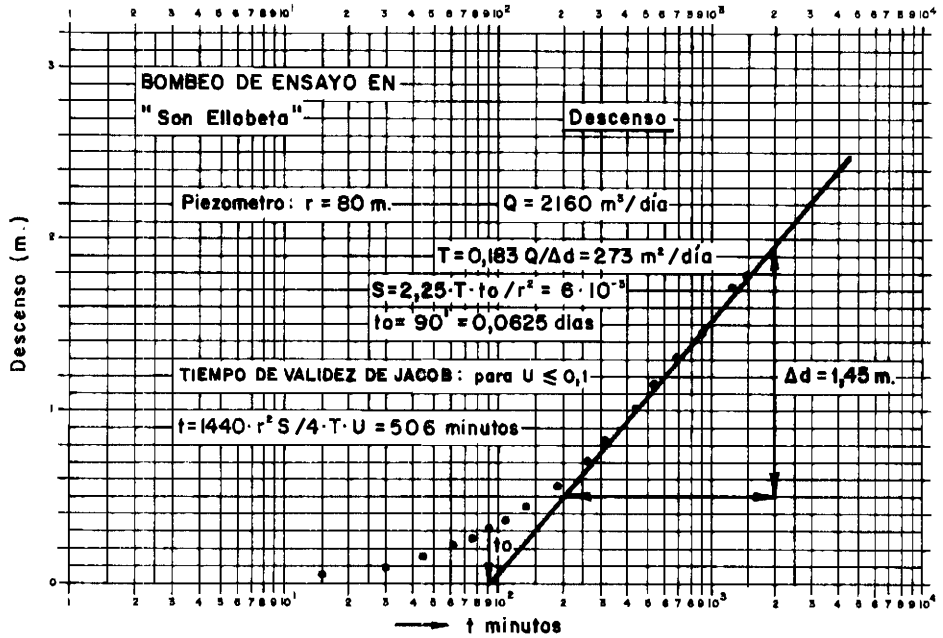
En este pozo se bombeó, durante veinticuatro horas, a un caudal de 25 l/s, provocándose un descenso, en el mismo punto de bombeo, de tan sólo 3 m. La primera impresión hacía pensar en un pozo excelente.

El análisis de la recuperación, con el consecuente cálculo del área de embalse subterráneo, pone de manifiesto un acuífero muy limitado, que embalsa agua en una superficie no superior a la cuarta parte de 1 km².

Una prospección fotogeológica, junto a un rápido reconocimiento de campo, delimitaron el acuífero constituido por un afloramiento de dolomías y carniolas infrailásticas, cabalgadas sobre unas margas del Cretácico inferior. El área observada es coincidente con la calculada en el análisis de la recuperación.

Cabe indicar adicionalmente, que ya las curvas de descensos permitían intuir un efecto de vaciado puesto de manifiesto en los descensos, anormalmente crecientes, acontecidos a lo largo de toda la prueba.





CAMPO PRACTICO NUM. 9

Pozo ensayado: AREVALO.

Tipo de prueba: Bombeo a caudal constante ($Q = 30$ l/s) y recuperación. Bombeos escalonados con recuperación parcial.

Parámetros calculados: Transmisividad y pérdidas de carga.

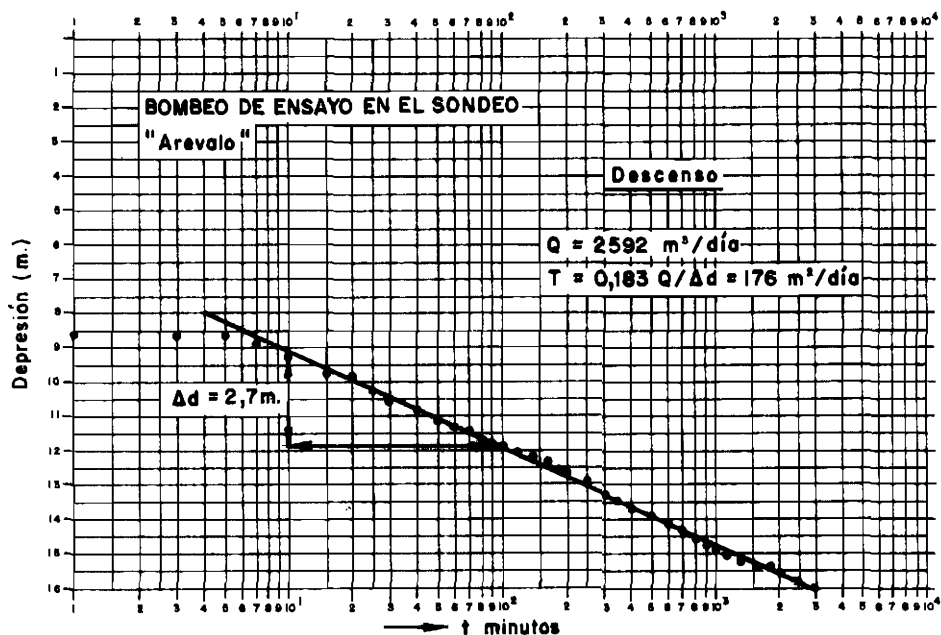
Litología del acuífero: Arenas terciarias (acondicionando con filtros dúplex).

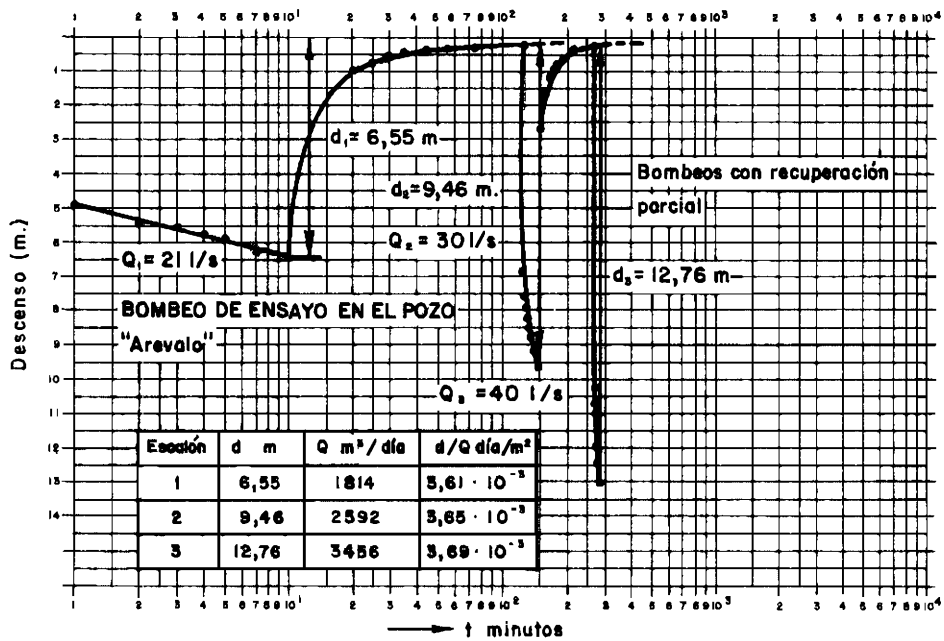
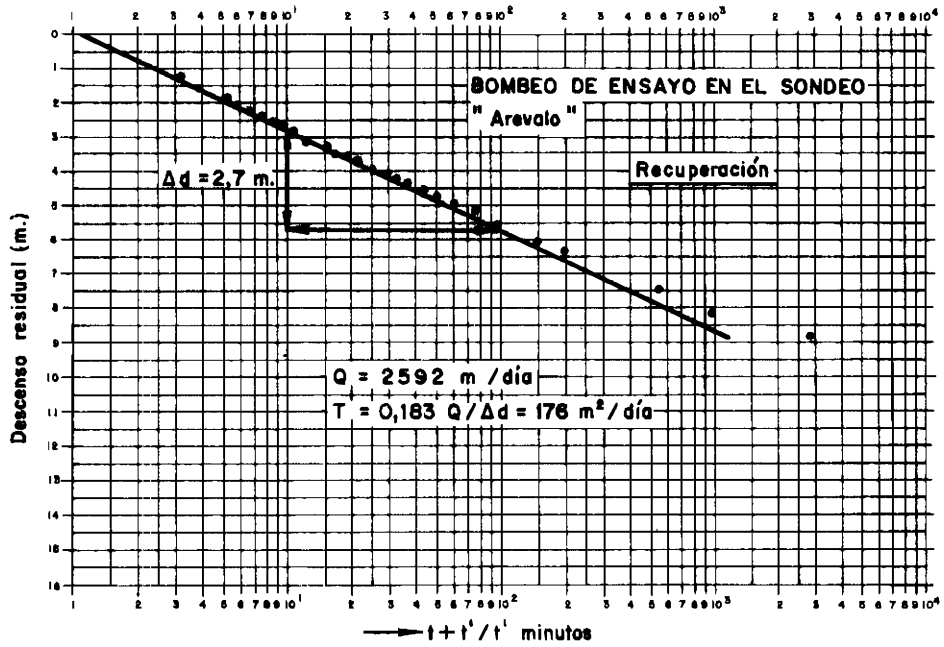
Método de interpretación: Jacob.

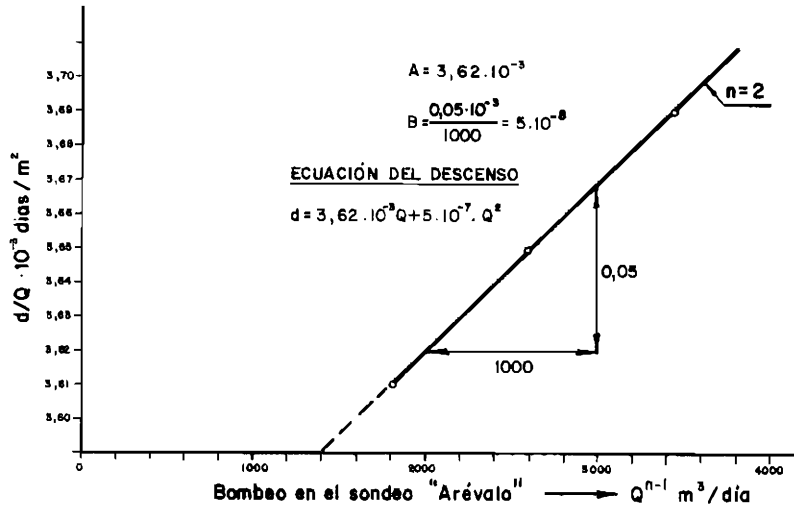
Observaciones

El ensayo de bombeo se ha realizado en un sistema multicapa. El nivel dinámico alcanzado se mantuvo por encima del techo del primer acuífero acondicionado.

Como puede observarse en las representaciones obtenidas con las medidas del descenso y recuperación, se trata de un acuífero con un comportamiento de «libro».







Las pérdidas de carga ($BQ^n = 0,3 \text{ m}$) representan el 3,5 por 100 del descenso total medido, para el caudal de 30 l/s (2.593 m³/día) al cabo de quince minutos de bombeo.

Aunque el ajuste de la terna de valores ha sido bueno, se ha operado en una zona de elevada sensibilidad del método.

BOMBEO ESCALONADO CON RECUPERACION PARCIAL EN EL SONDEO AREVALO

Primer bombeo: $Q = 21 \text{ l/s} = 1.814 \text{ m}^3/\text{día}$.

DESCENSO			RECUPERACION		
Tiempo de bombeo (minutos)	Nivel (m)	Descensos (m)	Tiempo de parada (minutos)	Nivel (m)	Descensos residuales (m)
0	54,61	0,00	1	56,09	1,48
1	59,57	4,96	5	55,57	0,96
2	60,00	5,39	10	55,27	0,66
3	60,20	5,59	15	55,11	0,50
4	60,31	5,70	20	55,03	0,42
7	60,43	5,82	30	54,93	0,32
10	60,90	6,39	40	54,87	0,26
15	61,16	6,55	60	54,81	0,20
			120	54,75	0,14

Segundo bombeo: $Q = 30 \text{ l/s} = 2.592 \text{ m}^3/\text{día}$.

DESCENSO			RECUPERACION		
Tiempo de bombeo (minutos)	Nivel (m)	Descensos (m)	Tiempo de parada (minutos)	Nivel (m)	Descensos residuales (m)
0	54,75		1	57,22	2,61
1	61,61	6,86	5	56,26	1,65
2	62,32	7,57	10	55,71	1,10
3	62,71	7,96	15	55,58	0,97
4	63,00	8,25	20	55,35	0,74
5	63,20	8,45	30	55,19	0,58
7	63,57	8,82	40	55,10	0,49
10	63,92	9,17	60	55,00	0,39
15	64,33	9,58	120	54,88	0,27

Tercer bombeo: $Q = 40 \text{ l/s} (3.456 \text{ m}^3/\text{día})$.

Tiempo	Nivel	Descensos
1	63,97	9,09
2	65,15	10,27
3	65,63	10,75
4	66,02	11,14
5	66,36	11,48
7	66,84	11,96
10	67,33	12,45
15	67,90	13,02

CASO PRACTICO NUM. 10

Pozo ensayado: CABAÑAS NUM. 5.

Tipo de prueba: Bombeo escalonado para el cálculo de los coeficientes A, B y n.

Parámetros calculados: Pérdidas de carga del sondeo.

Litología del acuífero: Gravas y arenas de terraza cuaternaria.

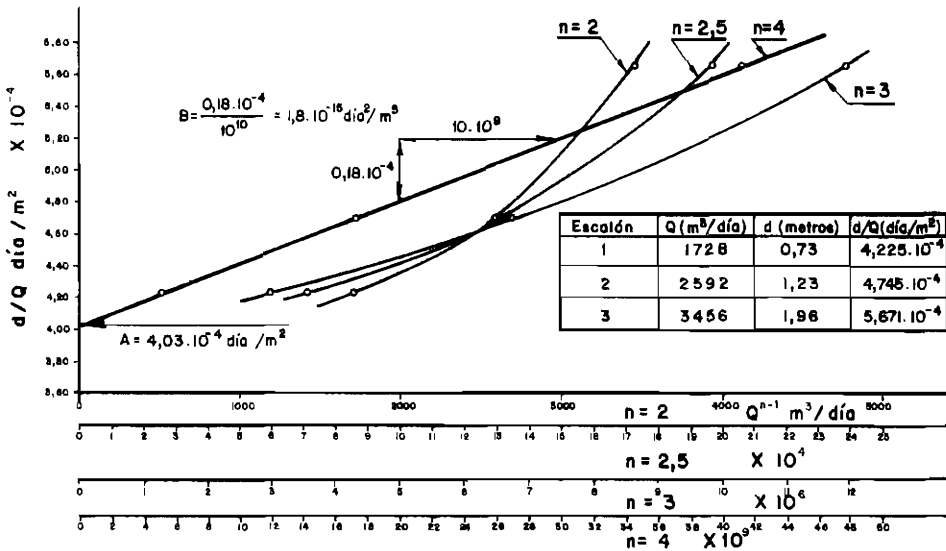
Método de interpretación: Por tanteo del valor de n.

Observaciones

Es evidente que el resultado obtenido para el coeficiente de pérdidas de carga ($B = 1,8 \cdot 10^{-15} \text{ día}^2/\text{m}^5$) es absurdo. Este coeficiente que, en principio, indicaría unas pérdidas de carga insignificantes, se obtiene para un valor de $n = 4$, que implica un excesivo régimen turbulento en las proximidades del pozo, con pérdidas de carga muy altas.

Consecuentemente, desde el punto de vista conceptual, no es admisible el resultado.

Un análisis rápido de las relaciones entre los caudales específicos de escalones sucesivos pone de manifiesto que, tal y como se vio en el capítulo de reflexiones generales, al ser bajas estas relaciones, el método se encuentra en una gama de valores que lo hacen muy sensible. Esto implica que pequeñas variaciones en los datos de entrada producen altas variaciones en el valor que se obtenga de n y B .



CASO PRACTICO NUM. 11

Pozo ensayado: DAIMIEL NUMS. 1 y 2.

Tipo de prueba: Bombeos escalonados en ambos sondeos y bombeo a caudal constante en el pozo número 1, tomando el número 2 como pozo de observación.

Parámetros calculados: T, S, pérdidas de carga y caudal de explotación.

Litología del acuífero: Calizas miocenas.

Método de interpretación: Jacob.

Observaciones

El sondeo número 2 presentó ciertos problemas de arrastres, con expulsión de trozos de calizas de tamaño considerable. Su deficiente construcción se manifiesta en unas pérdidas de carga mayores que en el sondeo número 1.

En el sondeo número 1 se consideran despreciables las pérdidas de carga, ya que su curva característica (d-Q) es una recta que, aunque no pasa por el origen, la desviación es muy pequeña.

Para el tiempo total de duración de la prueba de bombeo (4.000 minutos = 2,78 días), y el caudal constante de 12.096 m³/día, el descenso teórico sería:

Parámetros calculados:

$$T = 9.000 \text{ m}^2/\text{día}$$

$$S = 6 \cdot 10^{-3}$$

$$D_{\text{teórico}} = 0,183 \frac{12.096 \text{ m}^3/\text{día}}{9.000 \text{ m}^2/\text{h}} \log \frac{2,25 \times 9.000 \text{ m}^2/\text{h} \times 2,78 \text{ días}}{0,2^2 \text{ m} \times 6 \cdot 10^{-3}} =$$

$$= 2,05 \text{ m}$$

El descenso real medido al final del bombeo fue de 1,94 m.

El error cometido, supuestas nulas las pérdidas de carga, ha sido de 11 cm, lo que indica que se han subvalorado mínimamente los valores de las constantes del acuífero.

Para un período de explotación ininterrumpido de cien días y un caudal constante de bombeo de 300 l/s (25.920 m³/día) se provocará un descenso de:

$$d = 0,183 \frac{25.920 \text{ m}^3/\text{día}}{9.000 \text{ m}^2/\text{h}} \log \frac{2,25 \times 9.000 \times 100}{0,2^2 \times 6 \cdot 10^{-3}} = 5,23 \text{ m}$$

Dado que el espesor saturado del acuífero es de 42 m, resulta perfectamente aplicable Jacob, y no se precisa hacer ningún tipo de correcciones en las medidas tomadas, ya que el efecto de pérdidas de carga en el acuífero en el entorno próximo del sondeo es despreciable.

El sondeo número 2, que sí tiene pérdidas de carga para las condiciones impuestas en el anterior caso, presentaría el siguiente descenso:

$$d = 0,183 \frac{25.920 \text{ m}^3/\text{día}}{9.000 \text{ m}^2/\text{h}} \log \frac{2,25 \times 9.000 \times 100}{0,2^2 \times 6 \times 10^{-3}} + BQ^n$$

$$d = 5,23 \text{ m} + BQ^n;$$

para

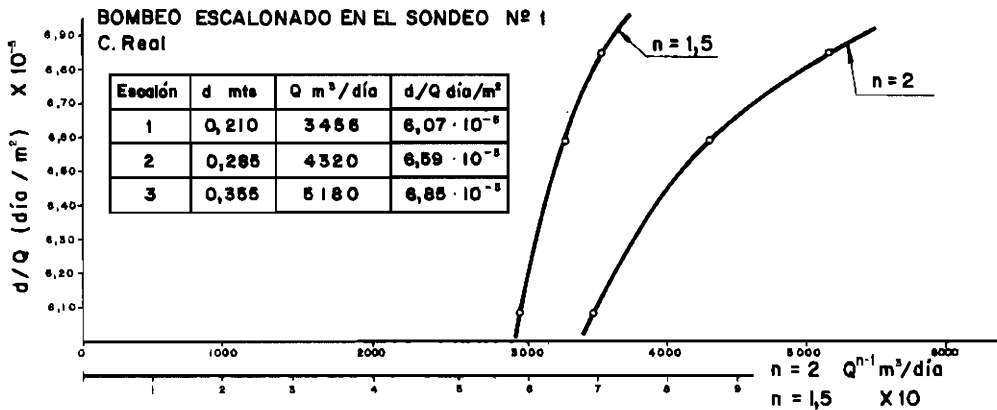
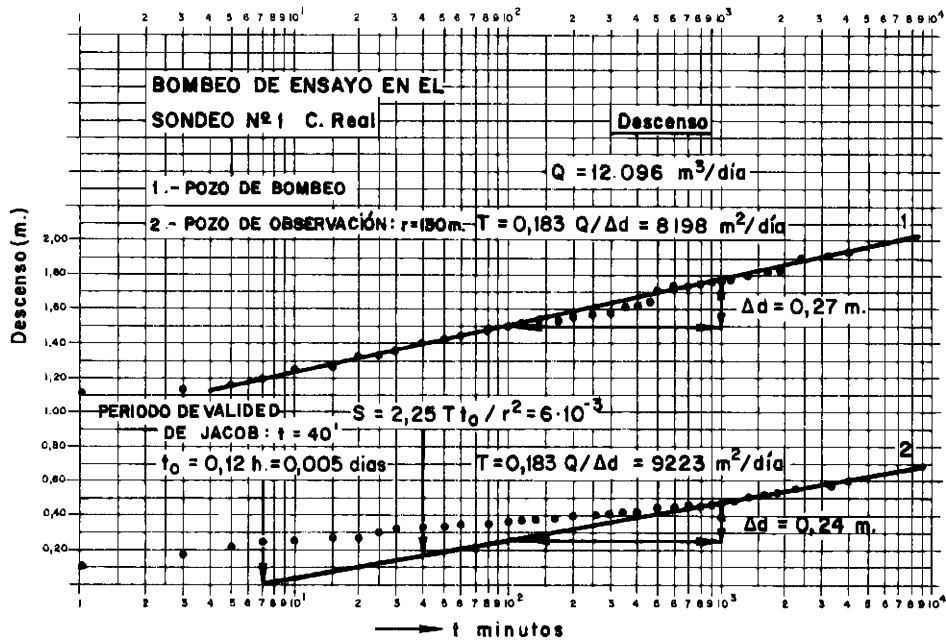
$$n = 2$$

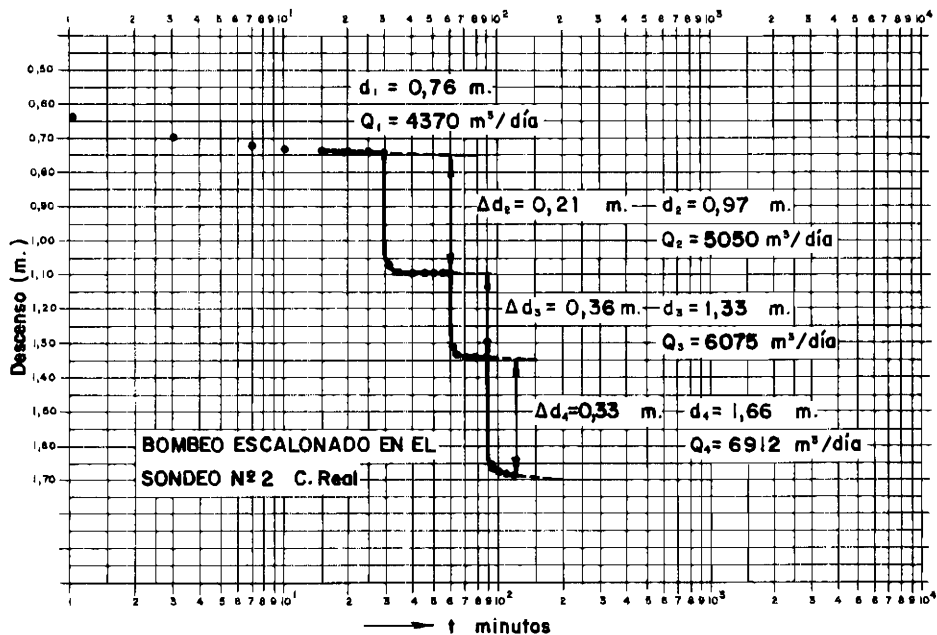
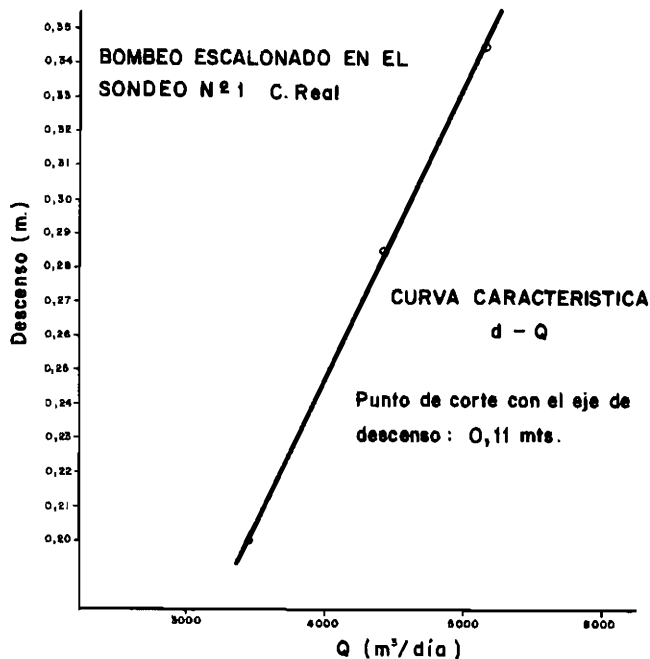
$$B = 2,7 \cdot 10^{-8}$$

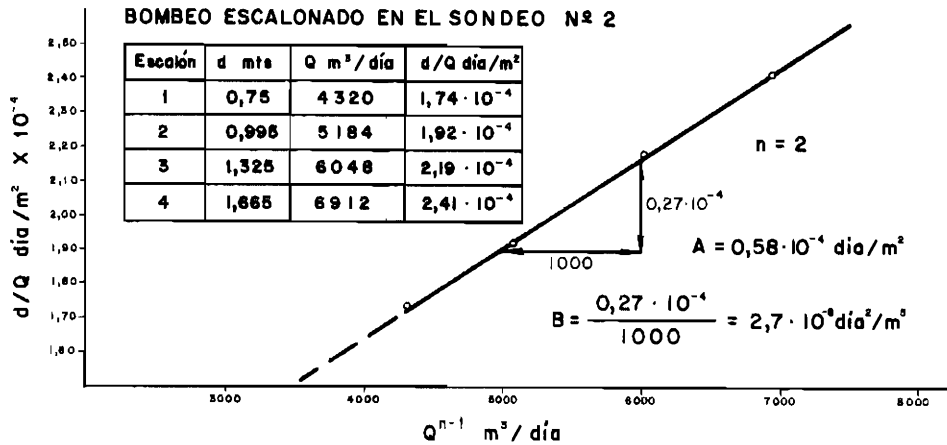
$$d = 5,23 + 2,7 \times 25.920^2 = 23,37 \text{ m}$$

Este sondeo, en las actuales condiciones no alcanzaría un caudal de 300 l/s (25.920 m³/día), debido al importante descenso originado como consecuencia de las pérdidas de carga.

El sondeo número 1 está en explotación, y la desviación con respecto a los cálculos realizados es despreciable.







CASO PRACTICO NUM. 12

Pozo ensayado: SA COVA.

Tipo de prueba: Bombeo a caudal crítico y análisis de la recuperación de niveles después de la parada.

Parámetros calculados: Transmisividad (T).

Litología del acuífero: Dolomías margosas del Suprakeuper.

Método de interpretación: Aplicación del método de Jacob en gráfico de caudales inversos.

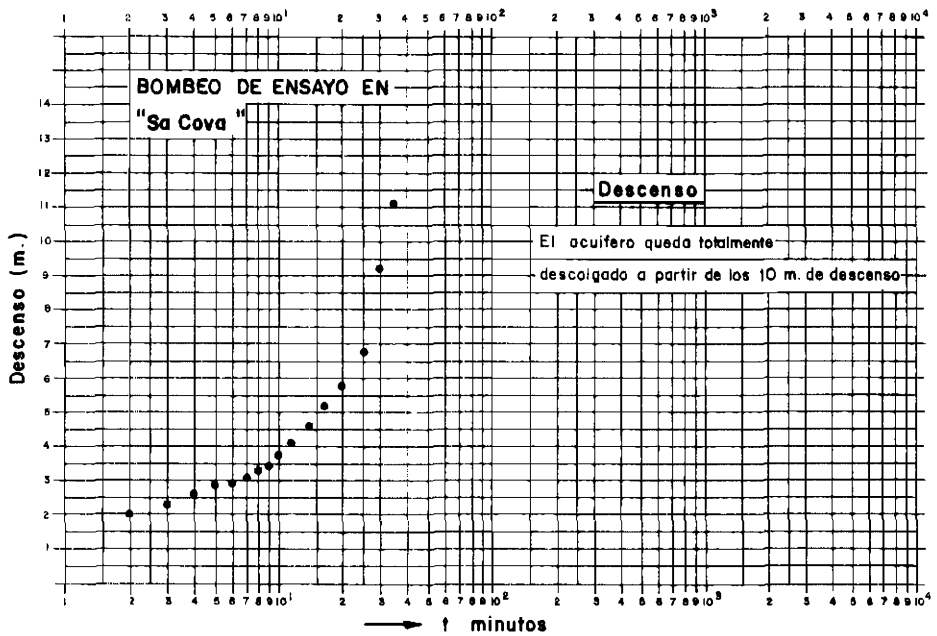
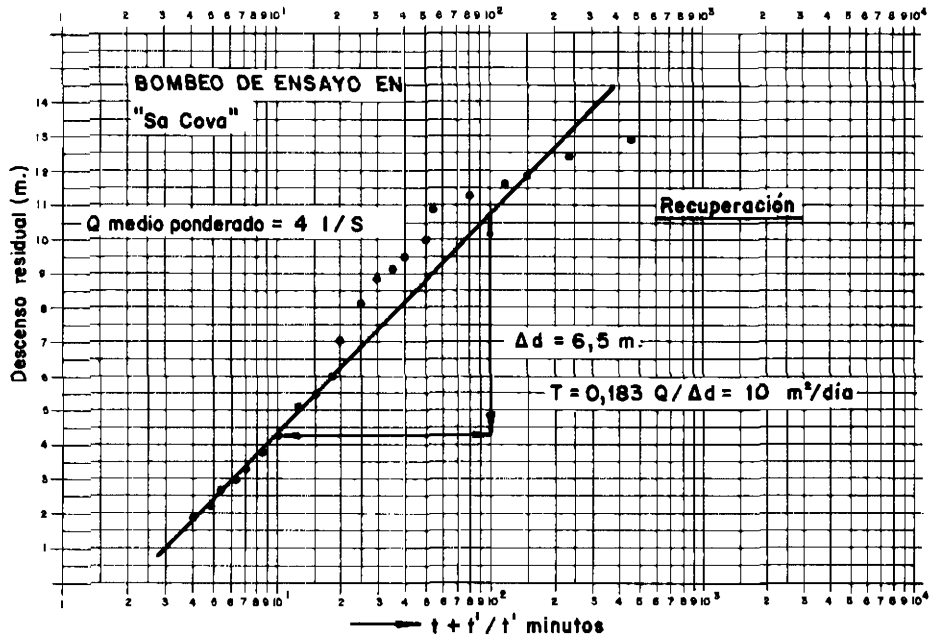
Observaciones

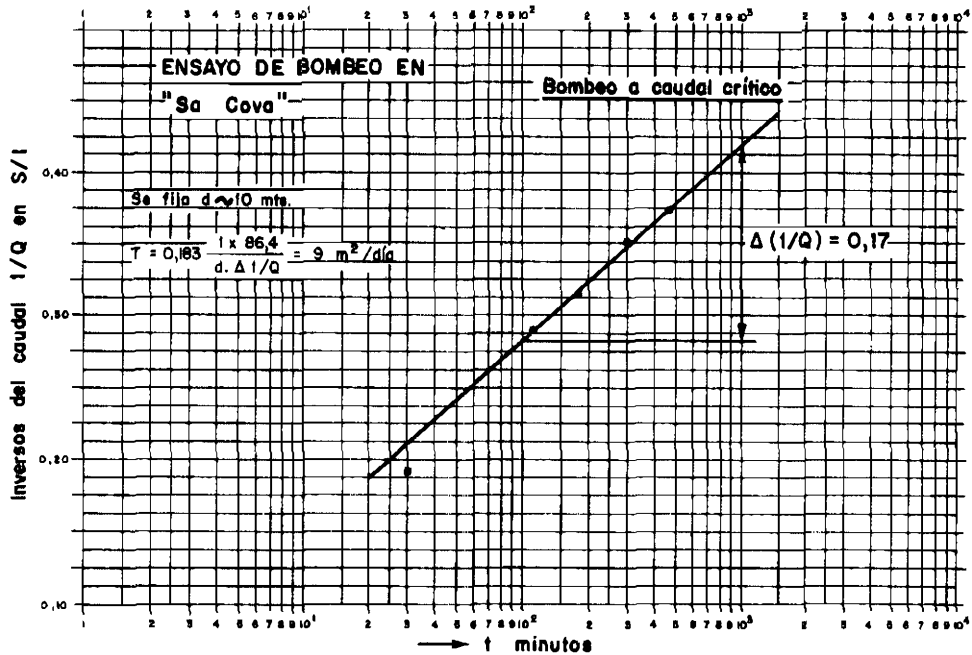
El acuífero queda «colgado» a los pocos minutos de iniciado el bombeo. Este efecto se produce a 10 m por debajo del nivel de agua inicial, y es comprobable por dejar de oírse a este nivel el ruido característico del agua «descolgada» en la prueba de recuperación.

Los primeros minutos de bombeo, representados en el gráfico, no son interpretables por su escasa amplitud.

La interpretación de la recuperación y del bombeo a caudal crítico a través del gráfico semilogarítmico de caudales inversos, arroja resultados similares para el valor T.

El caudal utilizado para interpretar la recuperación es el caudal medio ponderado de la fase de bombeo que, como se sabe, a partir de quedar el acuífero «colgado» variaba con el tiempo, según el agotamiento de dicho acuífero.





CASO PRACTICO NUM. 13

Pozo ensayado: SA BASSA DES COLL.

Tipo de prueba: Bombeo a caudal constante ($Q = 56 \text{ l/s}$), con observaciones en el mismo pozo de bombeo y en un piezómetro situado a 175 m de distancia.

Parámetros calculados: Transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S).

Litología del acuífero: Dolomías y carniolas del Suprakeuper.

Método de interpretación: Theis y Jacob.

Observaciones

Los resultados que sobre el valor de la transmisividad T arroja la interpretación de los datos de evolución de niveles en el pozo son coincidentes tanto en la fase de bombeo como en la de recuperación.

En el piezómetro se calculan los valores de T y S que son análogos para los dos métodos aplicados (Theis y Jacob).

El valor de T obtenido en el piezómetro y en el pozo son sustancialmente distintos.

Este último fenómeno es una realidad práctica, que aparece con mucha frecuencia en los ensayos que se realizan en rocas con permeabilidad por fisuración y karstificación. Su justificación para este caso concreto puede dársele acudiendo a la falta de homogeneidad de los materiales calizos, que tal vez den unas mejores características de permeabilidad en la dirección pozo-piezómetro.

