

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 IV

3.2 ACUIFEROS CONFINADOS

En la figura 3.2 aparece una representación esquemática del flujo hacia un pozo en un acuífero confinado.

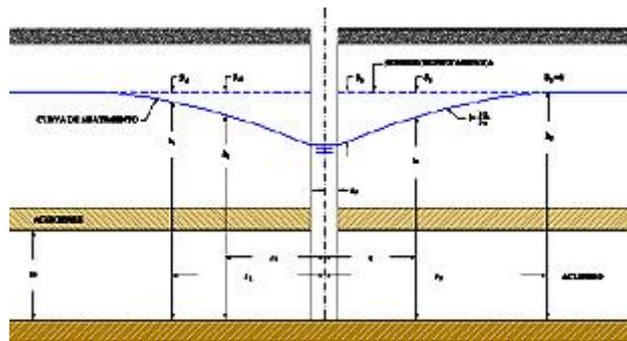


Fig. 3.2.
Flujo hacia un pozo en acuífero confinado.

Las ecuaciones que se relacionan a continuación y que caracterizan el comportamiento de los acuíferos confinados son utilizables para tiempos mayores de 40-50 minutos.

Para **ensayos a caudal constante**, la ecuación básica de flujo hacia un pozo en régimen impermanente no lineal está expresada por: (7)

$$S_r = \frac{Q}{4\pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D t}{r^2 E} + \frac{Q^2}{4\pi^2 T_T^2} \cdot \frac{(r_o - r)}{r r_o} \quad (3.4)$$

donde:

S_r , abatimiento a la distancia radial r desde el centro del pozo de bombeo

Q , caudal constante extraído del pozo

r , distancia radial desde el centro del pozo de bombeo

t , tiempo transcurrido a partir del inicio del bombeo

r_o , radio de influencia del pozo.

Para distancias r , relativamente próximas al centro del pozo de bombeo, la ecuación 3.4 puede aproximarse como: (10)

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

Para **ensayos con abatimiento escalonado en acuíferos confinados** la ecuación básica de flujo se expresa como (9):

$$S_m = \frac{\Delta Q_1}{4\pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D t_1}{r^2 E} + \frac{\Delta Q_2}{4\pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D t_2}{r^2 E} + \dots + \frac{\Delta Q_N}{4\pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D t_N}{r^2 E} + \frac{Q_N^2 (r_o - r)}{4\pi^2 T_T^2 r r_o} \quad (3.6)$$

y también abreviadamente como:

$$S_{rN} = \Delta S_{D1} + \Delta S_{D2} + \dots + \Delta S_{DN} + f(r, Q_N^2) \quad (3.7)$$

donde: S_{rN} , abatimiento en un punto del acuífero a la distancia r del pozo de bombeo en un instante determinado, dentro del escalón N

ΔS_{D1} , abatimiento lineal que produce el aumento de caudal del primer escalón, ΔQ_1 , en el tiempo t_1 , medido desde el inicio del bombeo hasta el instante considerado en el escalón N

ΔS_{D2} , abatimiento lineal que produce el aumento de caudal del segundo escalón ΔQ_2 , en el tiempo t_2 , medido desde el inicio del segundo escalón hasta el instante considerado en el escalón N

ΔS_{DN} , abatimiento lineal que produce el aumento de caudal del escalón N , ΔQ_N , en el tiempo t_N , medido desde el inicio del escalón N , hasta el instante considerado en dicho escalón

Q_N , caudal total en el escalón N , o sea:

$$Q_N = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \dots + \Delta Q_N$$

$f(r, Q_N^2)$, abatimiento turbulento en el punto considerado (a la distancia r , del centro del pozo de bombeo) producido por el caudal Q_N .

La forma más completa de expresar la ecuación característica del pozo de bombeo de acuerdo con lo propuesto por Pérez Franco resulta ser:

$$S_w = \frac{\ln t}{4\pi T_D} Q + K_{LW} Q + D_W Q^2 \quad (3.8)$$

donde: S_w , abatimiento dentro del pozo de bombeo.

K_{LW} , constante que representa la suma de los coeficientes de las componentes lineales constantes del abatimiento debidas a las características del acuífero no alterado, los efectos de la zona de desarenado, los efectos del empaque de grava y los efectos de las pérdidas de carga en la rejilla y la camisa.

D_W , constante que representa la suma de los coeficientes constantes de las componentes cuadráticas del abatimiento, debidas a los mismos efectos que se han señalado para K_{LW}

Los coeficientes K_{LW} y D_W y el valor de T_D pueden determinarse a partir de ensayos de bombeo a caudal constante o con abatimiento escalonado.

La influencia del diámetro del pozo de bombeo sobre el caudal y el abatimiento puede reconocerse fácilmente si se analiza la ecuación que representa el abatimiento S_p en la cara del pozo (a la distancia r_p) que se obtiene a partir de la ecuación 3.5 haciendo $r = r_p$, o sea:

$$S_p = \frac{Q}{4\pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D t}{r_p^2 E} + \frac{Q^2}{4\pi^2 T_D^2 r_p} \quad (3.9)$$

Como se sabe, el primer sumando del segundo miembro de la ecuación 3.9 representa la componente lineal del abatimiento y el segundo sumando la componente turbulenta o cuadrática del mismo. Como se ha demostrado ([5](#), [10](#)) en el caso de la componente lineal al estar el radio r_p dentro de un logaritmo, la variación del mismo tiene un efecto relativamente pequeño sobre el caudal para abatimiento constante o sobre el abatimiento para caudal constante. Este es el origen de considerar que las variaciones del diámetro del pozo no tienen efecto sobre el caudal o sobre el abatimiento. Sin embargo, en la componente turbulenta del abatimiento, se puede ver claramente que el abatimiento para caudal constante disminuye en proporción al aumento del diámetro del pozo (del radio) y que para abatimiento constante el caudal aumenta en proporción a la raíz cuadrada del aumento del diámetro del pozo.

Este es un factor importante a tener en cuenta en el diseño de los pozos, sobre todo, si se conoce que de acuerdo con las características del acuífero, el valor de la componente turbulenta del abatimiento es significativo.

La curva característica de un pozo de bombeo no es más que la representación gráfica de la relación entre los caudales extraídos y los abatimientos que se han producido en el pozo para condiciones de equilibrio, durante la ejecución del ensayo de bombeo.

También se denominan curvas características las que representan las relaciones caudal-caudal específico y caudal-abatimiento específico. El caudal específico de un pozo es caudal aportado por unidad de abatimiento (Q/S_w). El abatimiento específico es el inverso del caudal específico, o sea, el abatimiento por unidad de caudal (S_w/Q).

Para poder dibujar la curva característica harían falta como mínimo tres ensayos a caudal constante llevados a la estabilización, lo que no se hace normalmente en la práctica, en que se ejecutan cuando más dos ensayos con caudales diferentes. Esto resulta una dificultad.

En realidad, la curva característica, al representar la relación entre caudal y abatimiento, es la expresión gráfica de la ecuación característica del pozo, por lo que en las condiciones actuales del conocimiento no tiene sentido realizar tres o más ensayos, para preparar una curva cuya expresión analítica completa (la ecuación característica) se puede obtener con dos ensayos a caudal constante o a través de una sola prueba con abatimiento escalonado.

Lo anterior indica que no vale la pena tratar de preparar curvas características del pozo en la forma clásica, si se dispone de un instrumento de análisis más completo, que es la ecuación característica.

La eficiencia de un pozo de bombeo, es la relación existente entre el abatimiento, S_p , que se produce en la cara del pozo y el que se produce dentro de la camisa del pozo, S_w , debido a la resistencia adicional que introduce la estructura del pozo. O sea que:

$$ef = \frac{S_p}{S_w} \quad (3.10)$$

En un pozo sin estructura, idealmente la eficiencia sería de 100%.

Teniendo en cuenta las ecuaciones 3.8 y 3.9 la eficiencia quedará expresada como:

$$ef = \frac{\frac{Q}{4\pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D t}{r_p^2 E} + \frac{Q^2}{4\pi^2 T_T^2 r_p}}{\frac{\ln t}{4\pi T_D} Q + K_{LW} Q + D_w Q^2} \quad (3.11)$$

y también:

$$ef = \frac{\frac{1}{4\pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D t}{r_p^2 E} + \frac{Q}{4\pi^2 T_T^2 r_p}}{\frac{\ln t}{4\pi T_D} + K_{LW} + D_w Q} \quad (3.12)$$

Otro parámetro que se acostumbra utilizar para caracterizar los pozos de bombeo es el **concepto de caudal específico**, Q_s , que se usa corrientemente como índice de fertilidad relativa. Como ya se ha dicho, el caudal específico se expresa como:

$$Q_s = \frac{Q}{S_w} \quad (3.13)$$

y se ha considerado como una relación lineal constante. Sin embargo, si se tiene en cuenta el valor de S_w por la ecuación 3.8, resultará que:

$$Q_s = \frac{Q}{\frac{1nt}{4\pi T_D} Q + K_{LW} Q + D_w Q^2} = \frac{1}{\frac{1nt}{4\pi T_D} + K_{LW} + D_w Q} \quad (3.14)$$

Como se ve, Q_s es una relación no lineal que depende del tiempo y del caudal extraído, por lo que en realidad no puede considerarse constante aunque sí resulta un índice de fertilidad relativa.

3.3 ACUIFEROS LIBRES

En la figura 3.3 aparece una representación esquemática del flujo hacia un pozo en un acuífero libre.

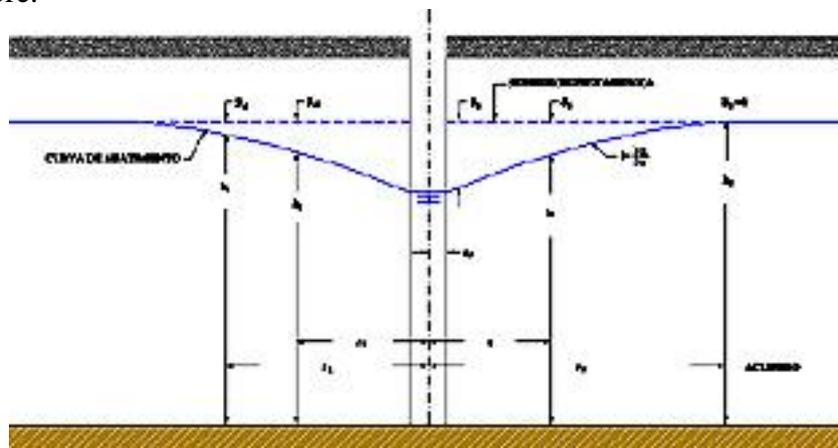


Fig. 3.3

Flujo hacia un pozo en acuífero libre

Los acuíferos libres pueden analizarse utilizando las ecuaciones correspondientes a los acuíferos confinados, en los casos en que el abatimiento sea relativamente pequeño en relación con el espesor saturado del acuífero, h_0 , (abatimiento hasta un 10% del espesor del acuífero). Cuando los abatimientos sean mayores, debe utilizarse como espesor saturado del acuífero el espesor promedio saturado, haciendo $T_D = (h_0 - S r / 2)$. K_D y $T_T = (h_0 - S r / 2)$. K_T .

3.4 ACUIFEROS SEMICONFINADOS

Cuando se bombea un acuífero semiconfinado, el agua extraída procederá no solamente del acuífero, sino también de la capa superior semipermeable, que se supone está saturada en parte, tal como se ilustra en la figura 3.4

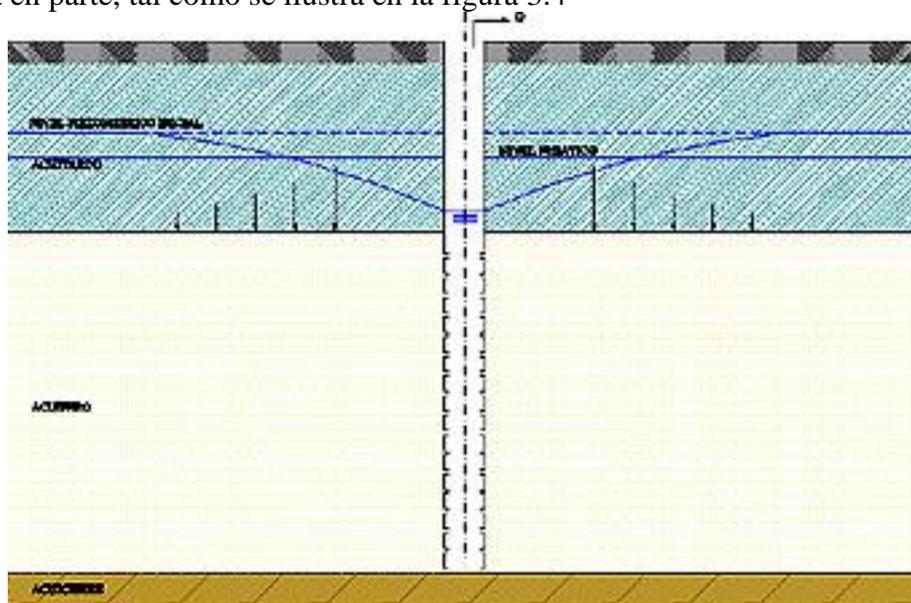


Fig. 3.4

Representación esquemática de un pozo en acuífero semiconfinado (adaptado de Kruseman (4)).

Cuando se bombea la carga piezométrica del acuífero disminuye, con lo que se crea una diferencia de carga entre la capa confinante semipermeable y el acuífero, de modo que se origina un movimiento vertical del agua dentro de la capa semipermeable que actuará como recarga del acuífero. O sea, que a partir del momento en que la carga piezométrica en parte del acuífero sea menor que la carga en la capa superior semipermeable, el agua extraída del pozo será la suma de la que cede el acuífero más una cantidad que procede del acuitardo.

De acuerdo con lo propuesto por Pérez Franco (12) la ecuación que caracteriza el flujo impermeable no lineal en un acuífero semiconfinado está expresada por:

$$S_r = \frac{Q}{4\pi T_D} W(u, r/B) + \frac{Q^2}{4\pi^2 T_T^2 r} \quad (3.15)$$

donde:

$$u = \frac{r^2 E}{4T_D t} \quad (3.16)$$

El primer sumando del segundo miembro de la ecuación 3.15 es la componente lineal del abatimiento, que es función del tiempo. El segundo sumando es la componente turbulenta del abatimiento, que se mantiene constante a través del tiempo.

Los valores de la función $W(u,r/B)$ para ciertos valores de r/B según varía u , aparecen en el anexo I, tomado de Kruseman (4), tabla que ha sido preparada de acuerdo con lo expresado por Hantush (2).

3.5 ACUIFEROS SEMILIBRES Y LIBRES CON ENTREGA RETARDADA

Los acuíferos semilibres resultan ser una situación intermedia entre los acuíferos libres y los semi-confinados. En este caso, el acuitardo que limita la parte superior del acuífero no es tan impermeable que pueda ignorarse la existencia en él de una componente horizontal del flujo, que contribuye en cierto grado al caudal extraído del pozo. El comportamiento de este tipo de acuífero es similar al que se presenta en un acuífero libre, en que no es inmediata la respuesta al drenaje del agua de gravedad contenida en él (conocido como acuífero libre con entrega retardada o drenaje diferido).

La imagen más simple de este tipo de acuíferos sería la de una capa acuífera homogénea de granos gruesos, limitada por debajo por una capa impermeable y por arriba por un estrato de granos finos, cuya conductividad hidráulica es notablemente inferior que la del material de la capa acuífera homogénea, pero no tan baja que pueda clasificarse como semipermeable. Al bombear este tipo de acuífero, la superficie freática en el estrato superior también desciende, pero inicialmente menos que la superficie piezométrica del acuífero subyacente (4). En la figura 3.5 aparece representado esquemáticamente este tipo de acuífero.

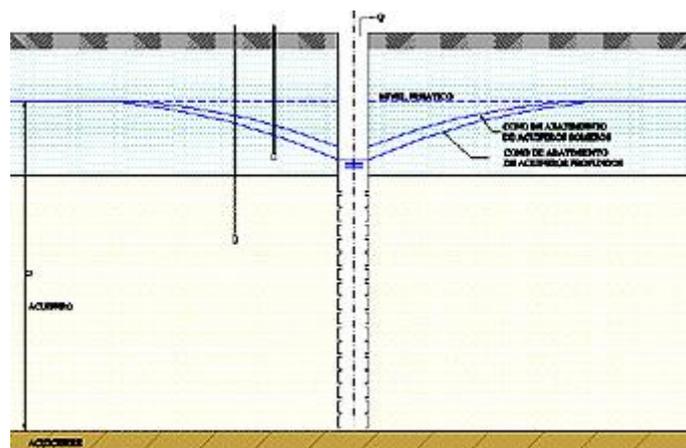


Fig. 3.5
Representación esquemática de un pozo en acuífero semilibre
(adaptado de Kruseman (4))

La solución general de la ecuación de flujo en este tipo de acuíferos se debe a Boulton (1) y es una ecuación diferencial compleja, que simbólicamente y por analogía con la ecuación de Theis, puede representarse como:

$$S_r = \frac{Q}{4\pi T_D} W(u_{AY}, r/D) \quad (3.17)$$

La expresión $W(u_{AY}, r/D)$ se denomina comúnmente función de pozo de Boulton.

Los métodos comunes de solución de problemas en acuíferos semilibres o libres con entrega retardada, se basan en la superposición de la representación de los resultados de pruebas de bombeo sobre curvas tipo pertenecientes a lo que se conoce como familia de curvas tipo de Boulton y pueden consultarse en la referencia 4.

