

Cálculo de propiedades hidrogeológicas con régimen no lineal: nuevas formulaciones

INTRODUCCIÓN

Las pruebas de bombeo siguen siendo el procedimiento más confiable para obtener las propiedades hidrogeológicas de los acuíferos, sin embargo, no siempre se realiza una adecuada utilización de los procedimientos de interpretación por la falta de datos o por el desconocimiento del fundamento teórico en los que se basa el método utilizado, aspectos que inciden de manera importante en las magnitudes de los parámetros hidrogeológicos obtenidos.

En los trabajos del Dr. Diosdado Pérez Franco, se ha destacado la importancia de considerar la presencia del régimen no lineal de flujo en las proximidades de los pozos de bombeo y ha propuesto algunos procedimientos para la interpretación de dichas pruebas Pérez, (1979, 1982, 1995 y 2005) y una variante simplificada de uno de ellos propuesta por Dilla, (1985).

Sobre la importancia que tiene la consideración del régimen no lineal en la interpretación del ensayo de bombeo a la hora de determinar el coeficiente de almacenamiento, ha sido tratada en un trabajo anterior por el autor Hernández, (2003), donde se propuso un nuevo procedimiento de cálculo para este coeficiente que simplifica a uno de los métodos anteriormente referenciados y que se presenta también en este trabajo.

El procedimiento que se presenta con las nuevas formulaciones obliga a realizar dos ensayos de bombeo con caudales diferentes, elimina la incertidumbre en el cálculo del coeficiente de almacenamiento por el procedimiento de Jacob al determinar si hay presencia o no de un régimen no lineal de flujo cuando se utiliza un solo pozo de observación para calcular todas las propiedades hidrogeológicas y se evita tener que utilizar los datos del pozo de bombeo con este objetivo (que pueden alterar significativamente los resultados al adjudicarle al acuífero pérdidas de energía que son causadas por imperfeccio-

Resumen / Abstract

Las pruebas de bombeo son aún lo más confiable para obtener propiedades hidrogeológicas de los acuíferos, pero no siempre se interpretan bien, lo que altera las magnitudes de los parámetros obtenidos. Las nuevas formulaciones y la metodología propuesta para determinar las propiedades en régimen no lineal a partir de esas pruebas, difieren de las ya propuestas antes por Pérez Franco (1995, 2005) en los dos métodos. El autor resalta la importancia del segundo método que no requiere de dos pozos de observación y al mismo tiempo permite determinar las pérdidas por estructura o por imperfecciones del pozo de bombeo, aspecto de gran importancia en el conocimiento de su eficiencia.

Palabras clave: propiedades hidrogeológicas, hidráulica subterránea, régimen no lineal, ensayos de bombeo.

Pumping tests are still the most reliable procedure to obtain hydrogeologic properties of the aquifer, although not always the interpretation procedures are applied properly. This can have an important impact in the magnitudes of these parameters. The new formulations and methodology for determination of hydrogeological properties in non linear flow from pumping tests already differ from those earlier proposed by Pérez Franco D. (1995, 2005) in both methods. The author stands out the importance of the second method in that it does not require two observation wells and, at the same time, it is possible to obtain the equation to find out structural losses or pumping well imperfections, which are of great importance in the knowledge of its efficiency.

Keywords: hydrogeologic properties, groundwater hydraulics, non linear flow, pumping tests.

nes del propio pozo de bombeo).

Se insiste en el hecho de evitar utilizar otro pozo de observación que es más costoso que realizar un ensayo de bombeo y donde las heterogeneidades del medio pudieran variar las propiedades hidrogeológicas y los errores que ello implicaría en la interpretación de la prueba. Es necesario destacar que no abundan pozos de bombeo que tengan asociados mas de un pozo de observación, para poder realizar estos ensayos por el primer procedimiento, ni tampoco son frecuentes aunque si factible hacer dos pruebas de bombeo a un mismo pozo que tenga un solo pozo de observación INRH, (1976).

En los trabajos de Pérez, (1995), se deduce a partir de la ley binómica de flujo la expresión general del abatimiento que se produce alrededor de un pozo que bombea a caudal constante, donde se cumplen las hipótesis de Dupuit-Thiem, Mogg, (1971) y donde a la componente en régimen lineal impermanente del abatimiento deducida por Theis y aproximada por Jacob, Todd, (1959), es necesario agregarle una componente turbulenta constante y dependiente del inverso a la distancia del pozo de bombeo, teniendo la siguiente expresión.

$$S = S_D + S_T = 0,183 \frac{Q}{T_D} \log\left(\frac{2,246 T_D t}{r^2 E}\right) + \left(\frac{Q}{2\pi T_T}\right)^2 \frac{1}{r} \dots\dots (1)$$

$$S = 0,366 \frac{Q}{T_D} \log\left(\frac{r_0}{r}\right) + \left(\frac{Q}{2\pi T_T}\right)^2 \frac{1}{r} \dots\dots\dots(1a)$$

$$\text{donde; } r_0 = \left(\frac{2,246 T_D t}{E}\right)^{1/2}$$

En las expresiones anteriores, el primer sumando de la derecha representa la componente darciana del abatimiento y el segundo a la turbulenta, siendo;

Q: caudal de bombeo **T_D=m.K_D:** transmisividad darciana **T_T=m.K_T:** transmisividad turbulenta, donde **m:** es el espesor del acuífero, **E:** coeficiente de almacenamiento **t:** tiempo de bombeo **r:** distancia desde el pozo de observación al centro del pozo de bombeo.

De las expresiones anteriores y a partir de las

conductividades hidráulicas Darciana $K_D = \frac{T_D}{m}$ y

$K_T = \frac{T_T}{m}$, y por las siguientes expresiones: $K_D \frac{gk}{v}$ y

$$K_T^2 = \frac{g\sqrt{k}}{C}$$

se pudieran obtener las propiedades hidrogeológicas características de los acuíferos: permeabilidad intrínseca o geométrica (**k**) y rugosidad equivalente del medio poroso o fisurado (**C**).

A continuación se presentará un resumen del procedimiento expuesto por el autor en el trabajo anterior Hernández, (2003), cuando se utilizan dos pozos de observación.

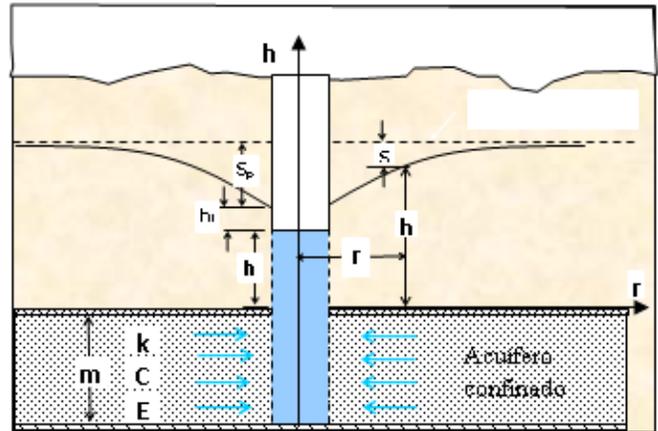


FIGURA 1. Imagen del flujo radial hacia un pozo en un acuífero confinado

CÁLCULO DE PROPIEDADES HIDROGEOLÓGICAS EN PRUEBAS DE BOMBEO A CAUDAL CONSTANTE UTILIZANDO DATOS DE DOS POZOS DE OBSERVACIÓN

I. Cálculo de la transmisividad darciana T_D.

Se sigue el mismo procedimiento enunciado por Cooper and Jacob, (1946), citado por Todd, (1959), obteniendo de la representación en un gráfico **S vs log(t)** la pendiente por ciclo $\Delta S_{t_{10}}$, y de aquí se determina la **T_D** por la siguiente expresión:

$$T_D = 0,183 \frac{Q}{\Delta S_{t_{10}}} \dots\dots\dots(2)$$

II. Cálculo de la transmisividad turbulenta T_T.

Como las rectas ajustadas en los gráficos semilogarítmicos del inciso anterior deben ser paralelas, se determina la diferencia de abatimientos entre ellas para cualquier tiempo y se despeja de la ecuación (2) el valor de **T_T**.

$$T_T^2 = \frac{Q^2 \left(\frac{r_2 - r_1}{r_2 * r_1}\right)}{\left[(S_1 - S_2) - 0,366 \frac{Q}{T_D} \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \right]} \dots\dots\dots(3)$$

Siendo; r_1 y r_2 distancias desde el pozo de bombeo a los pozos de observación

S_1 y S_2 abatimientos correspondientes a las distancias anteriores para un tiempo dado.

III. Cálculo del Radio de Darcy r_D .

Este parámetro es utilizado por Pérez, (1995) para definir las zonas de flujo alrededor de un pozo de bombeo y representa a partir de que distancia desde este se pudiera considerar que el régimen es lineal¹.

$$r_D = \frac{Q}{0,1\pi} \left(\frac{T_D}{T_r^2} \right) \dots\dots\dots(4)$$

IV. Determinación del coeficiente de almacenamiento E .

Si de la ecuación (1) se despeja el valor de E se obtiene:

$$E = \frac{2,246T_D t}{r^2 e^{(s-s_r) \frac{4\pi T_D}{Q}}} \dots\dots\dots(5)$$

Para el caso de distancias r donde el régimen es lineal, la componente turbulenta del abatimiento $ST = 0$, por lo que para el tiempo t_0 el valor de $S = 0$ y la expresión anterior se convierte en la conocida del procedimiento de Jacob⁶ para la determinación del coeficiente de almacenamiento E :

$$E = E_J = \frac{2,246T_D t_0}{r^2} \dots\dots\dots(6)$$

Para distancias r donde $ST \neq 0$ si se sigue el procedimiento empleado por Jacob⁶ para calcular E_J , obteniéndose a partir de este valor el coeficiente de almacenamiento E :

$$E = \frac{2,246T_D t_0}{r^2} * e^{\frac{QT_D}{\pi r T_r^2}} = E_J * e^{0,1 \left(\frac{r_D}{r} \right)} \dots\dots\dots(7)$$

El factor que afecta a E_J en la ecuación anterior es precisamente el error que se comete al determinar el coeficiente de almacenamiento E , por el procedimiento propuesto por Jacob en un pozo de observación que se encuentra en la zona no lineal de flujo.

NUEVO PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO CON LA REALIZACIÓN DE DOS PRUEBAS DE BOMBEO CON CAUDAL CONSTANTE PERO DIFERENTE

El procedimiento expuesto anteriormente tiene el inconveniente de que por lo general solo se tienen los datos de los abatimientos en un pozo de observación y en el de bombeo y además las variaciones espaciales productos de la heterogeneidad del medio, pueden provocar variaciones en las pendientes de las gráficas tiempo abati-

miento (S vs $\log(t)$), lo que incumple las hipótesis de partida.

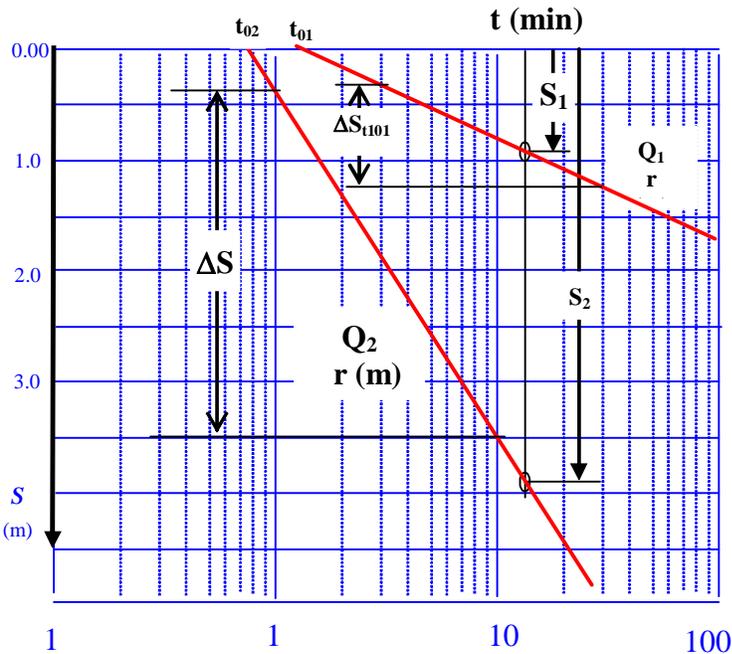


FIGURA 2. Gráfico de abatimientos contra logaritmo de tiempo (S vs log(t))

La metodología que se propone es la siguiente:

I. Realizar dos ensayos de bombeo a caudal constante ($Q_2 > Q_1$), midiendo los abatimientos en un pozo de observación y en el de bombeo, durante un intervalo que permita la aplicación del procedimiento de Jacob.

II. Realizar ajuste de las rectas en las gráficas (S vs $\log(t)$) de ambos ensayos, determinando las pendientes de ambas gráficas (ΔSt_{101} y ΔSt_{102}), (ver datos necesarios en la Figura 2) y calcular la transmisividad darciana (T_D) por la ecuación (2).

Verificar proporcionalidad entre los abatimientos y los caudales utilizados en los rangos de las rectas ajustadas, según se indica en la figura anterior. De comprobarse proporcionalidad puede ser aplicado el procedimiento de Jacob para calcular el coeficiente de almacenamiento (E), pero de no cumplirse se seguirán los pasos que más abajo se indican.

III. Calcular T_T por la siguiente fórmula deducida al igualar la ecuación (7) para cada ensayo de bombeo:

$$T_T^2 = \frac{(Q_2 - Q_1) * T_D}{\pi * r * \ln \left(\frac{t_{01}}{t_{02}} \right)} \dots\dots\dots(8)$$

donde; r : es la distancia del pozo de observación donde se midieron los niveles.

t_{01} y t_{02} , son los interceptos de las rectas ajustadas por el procedimiento de Jacob para cero abatimientos,

siendo diferentes si hay presencia de régimen no lineal, en el caso que coincidan se haría cero el denominador lo que significa que no hay efecto del régimen no lineal y por tanto no se puede calcular esta propiedad hidrogeológica.

La ecuación anterior también puede ser expresada de la siguiente forma:

$$T_r^2 = \frac{0,138 * (Q_2 - Q_1) * T_D}{r * \left(\frac{S_2}{\Delta S_{t102}} - \frac{S_1}{\Delta S_{t101}} \right)} \dots\dots\dots(9)$$

donde **S₂** y **S₁** son los abatimientos en cada recta de ajuste para un tiempo cualesquiera con el caudal **Q_i** y pendiente por ciclo **ΔS_{t10i}** correspondientes.

La fórmula anterior es equivalente a la obtenida por Pérez, (2005) con la siguiente ecuación:

$$T_r^2 = \frac{Q_2 * (Q_2 - Q_1)}{4\pi^2 r * \left[S_2 - S_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right) \right]} \dots\dots\dots(10)$$

Nota: Observar que en el régimen lineal hay proporción lineal entre abatimientos, por lo que el denominador de las dos ecuaciones anteriores se haría igual a cero, lo que implicaría que no hay régimen no lineal y por tanto no se manifiesta el efecto de la trasmisividad turbulenta **T_T**, lo que es consecuente con lo anterior.

IV. Calcular por la fórmula (4) los radios de Darcy (**r_Di**) y determinar por la fórmula (7a) el coeficiente de almacenamiento en cualesquiera de los ensayos.

$$E = \frac{2,246 T_D t_{0i}}{r^2} * e^{\frac{Q_i T_D}{\pi r T_r^2}} = E_{J_i} * e^{0,1 \left(\frac{r_{D_i}}{r} \right)} \dots\dots\dots(7a)$$

V. Cálculo de la ecuación de las pérdidas por estructura o imperfecciones del pozo de bombeo,

$$hf_i = D * Q_i^Y$$

Además de poderse determinar las propiedades hidrogeológicas características de acuífero, el procedimiento que se propone, permite calcular la ecuación de las pérdidas debidas a la estructura o a imperfecciones del pozo de bombeo como la penetración parcial Hernández, (1984), utilizando una expresión similar a la propuesta por Rorabaugh, (1953), pero considerando las modificaciones indicadas por Pérez, (1995) de incluir en el abatimiento teórico en el pozo de bombeo la componente turbulenta correspondiente, por tanto el procedimiento quedaría de la siguiente forma:

♦ Se determina de la ecuación (1) el abatimiento en el pozo de bombeo para cada caudal (**S_{p2}** y **S_{p1}**), utilizando tiempos con abatimientos medidos en este (**Sw₂** y **Sw₁**).

♦ Se calculan las diferencias (**hf₂** y **hf₁**) entre los valores medidos de los abatimientos y los calculados en el pozo de bombeo.

♦ Se obtienen los coeficientes de la ecuación de las

pérdidas **D** y **Y** con dos parejas de datos de caudales y pérdidas de carga.

$$Y = \frac{\log\left(\frac{hf_2}{hf_1}\right)}{\log\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)} \dots\dots(10) \quad \text{y} \quad D = \frac{hf_i}{Q_i^Y} \dots\dots(11)$$

EJEMPLO DE CÁLCULO APLICANDO LA METODOLOGÍA ANTERIOR

Datos necesarios:

- Pozo de bombeo con 60 cm de diámetro
- Pozo de observación a 5 metros del pozo de bombeo.
- Caudales de bombeo **Q₁**=30 lps y **Q₂**=120 lps
- Las pendientes de las rectas de ajustes correspondientes fueron:
 - ΔSt₁₀₁= 0,15 m y ΔSt₁₀₂=0,6 m
 - Para un tiempo de 1 día, los abatimientos observados fueron:
 - Sw₁= 2,09 m, Sw₂=10,19 m, S₁=0,9 m y S₂=3,77 m
 - Interceptos con cero abatimientos: t₀₁=1,44*10⁻³min y t₀₂=7,5*10⁻⁴min

Ejemplo de Aplicación de la metodología

II. Cálculo de la trasmisividad darciana T_D.

$$T_D = 0,183 \frac{Q}{\Delta S t_{10}} = 0,183 \frac{30 * 86,4}{0,15} = 3162 \quad m^2 / d$$

III. Analizar proporcionalidad entre caudales y abatimientos:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{120}{30} = 4 \neq \frac{S_2}{S_1} = \frac{3,77}{0,9} = 4,19 \quad \text{por tanto hay}$$

régimen no lineal en el pozo de observación.

IV. Cálculo de **T_T** por las ecuaciones (8), (9) ó (10).

$$T_r^2 = \frac{(Q_2 - Q_1) * T_D}{\pi * r * \ln\left(\frac{t_{01}}{t_{02}}\right)} = \frac{90 * 86,4 * 3162}{\pi * 5 * \ln\left(\frac{1,44 * 10^{-3}}{7,5 * 10^{-4}}\right)} \implies T_T = 1549 \text{ m}^2/d$$

$$= 2,4 * 10^6 \text{ m}^4 / d^2$$

$$T_T^2 = \frac{0,138 * (Q_2 - Q_1) * T_D}{r * \left(\frac{S_2}{\Delta S_{t_{102}}} - \frac{S_1}{\Delta S_{t_{101}}} \right)}$$

$$= \frac{0,138 * 90 * 86,4 * 3162}{5 * \left(\frac{3,77}{0,6} - \frac{0,9}{0,15} \right)} \implies T_T = 1549 \text{ m}^2/\text{d}$$

$$= 2,4 * 10^6 \text{ m}^4 / \text{d}^2$$

$$T_T^2 = \frac{Q_2 * (Q_2 - Q_1)}{4\pi^2 r * \left[S_2 - S_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right) \right]}$$

$$= \frac{120 * 90 * 86,4^2}{4\pi^2 * 5 * [3,77 - 0,9 * (4)]} \quad T_T = 1549 \text{ m}^2/\text{d}$$

$$= 2,4 * 10^6 \text{ m}^4 / \text{d}^2 \implies$$

V. Cálculo de los radios de Darcy y coeficiente de almacenamiento E.

$$r_{D1} = \frac{Q_1}{0,1\pi} \left(\frac{T_D}{T_T^2} \right) = \frac{30 * 86,4}{0,1\pi} \left(\frac{3162}{1549^2} \right) = 10,9 \text{ m}$$

$$r_{D2} = 4 * r_{D1} = 43,5 \text{ m}$$

a) Utilizando el primer caudal

$$E_{J1} = \frac{2,246 T_D t_{01}}{r^2} = \frac{2,246 * 3162 * 1,44 * 10^{-3}}{5^2 * 1440}$$

$$= 2,84 * 10^{-4}$$

$$E = E_{J1} * e^{0,1 \left(\frac{r_{D1}}{r} \right)} = 2,84 * 10^{-4} * e^{0,1 * \frac{10,9}{5}}$$

$$= 3,53 * 10^{-4}$$

b) Utilizando el segundo caudal

$$E_{J2} = \frac{2,246 T_D t_{02}}{r^2} = \frac{2,246 * 3162 * 7,5 * 10^{-4}}{5^2 * 1440}$$

$$= 1,48 * 10^{-4}$$

$$E = E_{J2} * e^{0,1 \left(\frac{r_{D2}}{r} \right)} = 1,48 * 10^{-4} * e^{0,1 * \frac{43,5}{5}}$$

$$= 3,53 * 10^{-4}$$

NOTA: Observar que no hay diferencias en el resultado del valor del coeficiente de almacenamiento, cosa que era de esperar, ya que el valor de T_T condiciona dicha igualdad.

VI. Cálculo de la ecuación de las pérdidas por estructura o imperfecciones del pozo de bombeo:

$$hf_i = D * Q_i^Y$$

◆ Se determina de la ecuación (1 ó 1a) el abatimiento en el pozo de bombeo para cada caudal (Sp_2 y Sp_1), utilizando tiempos con abatimientos medidos en este (Sw_2 y Sw_1).

$$S_{p1} = 0,183 \frac{Q_1}{T_D} \log \left(\frac{2,246 T_D t}{r_p^2 E} \right) + \left(\frac{Q_1}{2\pi T_T} \right)^2 \frac{1}{r_p}$$

$$S_{p1} = 0,183 \frac{30 * 86,4}{3162} \log \left(\frac{2,246 * 3162 * 1}{0,3^2 * 3,52 * 10^{-4}} \right) +$$

$$\left(\frac{30 * 86,4}{2\pi * 1549} \right)^2 \frac{1}{0,3} = 1,253 + 0,236 = 1,49$$

$$S_{p2} = 0,183 \frac{Q_2}{T_D} \log \left(\frac{2,246 T_D t}{r_p^2 E} \right) + \left(\frac{Q_2}{2\pi T_T} \right)^2 \frac{1}{r_p}$$

$$S_{p2} = 0,183 \frac{120 * 86,4}{3162} \log \left(\frac{2,246 * 3162 * 1}{0,3^2 * 3,52 * 10^{-4}} \right) +$$

$$\left(\frac{120 * 86,4}{2\pi * 1549} \right)^2 \frac{1}{0,3} = 5,011 + 3,783 = 8,79$$

◆ Se calculan las diferencias (hf_2 y hf_1) entre los valores medidos de los abatimientos y los calculados en el pozo de bombeo.

$$hf_1 = Sw_1 - Sp_1 = 2,09 - 1,49 = 0,60 \text{ m}$$

$$hf_2 = Sw_2 - Sp_2 = 10,19 - 8,79 = 1,40 \text{ m}$$

◆ Se obtienen los coeficientes de la ecuación de las pérdidas **D** (para gasto expresado en lps y pérdidas de carga en metros) y **Y** (adimensional) con dos parejas de datos de caudales y pérdidas de carga.

$$Y = \frac{\log\left(\frac{hf_2}{hf_1}\right)}{\log\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)} = \frac{\log\left(\frac{1,4}{0,6}\right)}{\log\left(\frac{120}{30}\right)} = 0,611 \quad y$$

$$D = \frac{hf_i}{Q_i^Y} = \frac{0,6}{30^{0,611}} = 0,075$$

NOTA: Observar que, de utilizarse el abatimiento medido en el pozo de bombeo para cada caudal, con los datos del pozo de observación para el caudal correspondiente, para calcular por el primer procedimiento las propiedades hidrogeológicas, se hubiese obtenido la misma transmisividad hidráulica darciana (T_D) pero diferentes valores de la transmisividad hidráulica turbulenta (T_T), radios de Darcy y coeficientes de almacenamiento E.

$$T_{T1} = 571,4 \text{ m}^2/\text{d}, r_{D1} = 79 \text{ m} \quad y$$

$$E = E_{J_1} * e^{0,1\left(\frac{r_{D1}}{r}\right)} = 2,84 * 10^{-4} * e^{0,1 * \frac{79}{5}} = 1,38 * 10^{-3}$$

$$T_{T2} = 1312 \text{ m}^2/\text{d}, r_{D2} = 60 \text{ m} \quad y$$

$$E = E_{J_2} * e^{0,1\left(\frac{r_{D2}}{r}\right)} = 1,48 * 10^{-4} * e^{0,1 * \frac{60}{5}} = 4,91 * 10^{-4}$$

De lo anterior se puede apreciar que pueden presentarse diferencias significativas entre las propiedades anteriormente estimadas y las reales correspondientes, al haberse adjudicado al acuífero pérdidas de carga por fuerzas inerciales, cuando realmente se deben a problemas de estructuras e imperfecciones del pozo de bombeo.

CONCLUSIONES

Se puede considerar que el nuevo procedimiento de interpretación de los ensayos permite eliminar incertidumbres en la determinación de los parámetros hidrogeológicos:

- Realizar la interpretación del ensayo con un solo pozo de observación, evitando la necesidad de incluir el pozo de bombeo o construir otro de observación, con la posibilidad de variaciones espaciales de las propiedades por no homogeneidad del medio.
- Por lo general no se dispone de un segundo pozo de observación y son escasos dos ensayos de bombeo con caudales diferentes realizados al mismo pozo de bombeo.
- Analizando proporcionalidad entre caudales y abatimientos, se puede de antemano conocer si con alguno de los ensayos se presenta régimen no lineal en el pozo

de observación.

- Se pueden determinar las pérdidas por estructura en el pozo de bombeo o por imperfecciones de este.
- El no considerar la presencia de régimen no lineal existiendo realmente, puede conllevar a subvalorar el coeficiente de almacenamiento.
- Utilizar el pozo de bombeo adjudicándole las pérdidas en el mismo por estructura o imperfecciones a la presencia de régimen no lineal en el acuífero implicaría sobre-valorar las capacidades de almacenamiento de la formación hidrogeológica.

REFERENCIAS

1. Cooper, H. H. and C. E. Jacob (1946). "A generalized Graphical Method for Evaluating Formations Constant and Summarizing well-Field History", Trans. Am. Geophysical Research Union., 27. (526-534).
2. Dilla Salvador F. (1985). "Método simplificado para el cálculo de las propiedades hidráulicas de los acuíferos". Ing. Hidráulica, Vol VI. No. 3. pp. (202-208).
3. Hernández Valdés A. O. (1984). "Efectos de la penetración parcial con régimen no lineal". Ing. Hidráulica, vol. V, no. 2, pp.216-228.
4. Hernández Valdés A. O. (2003). "Nuevo procedimiento de cálculo para el coeficiente de almacenamiento en pruebas de bombeo con régimen no lineal". Ing. Hidráulica y Ambiental. vol. XXIII, No. 1. ISPJAE. CUBA.
5. INRH (Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos) (1976). "Archivos de pruebas de bombeo de la Empresa Habana del INRH".
6. Mogg, Joe L. (1971). "Hidráulica de pozos". Traducido del inglés por Osvlado de Sola. Editorial CENTSCO. La Habana.
7. Pérez Franco D. (1979). "Pruebas de pozo con abatimiento escalonado en régimen no lineal impermanente". Ciencias Técnicas. Ser. de Ing. Hidráulica", no 3. pp. 5-17. ISPJAE. Cuba.
8. Pérez Franco D., (1982). "Hidráulica subterránea", Ed. Científico Técnica, La Habana.
9. Pérez Franco D., (1995). "La explotación del agua subterránea. Un nuevo enfoque". Coedición. MTI LTDA. Colombia y Ed. Científico Técnica. Inst. Cubano del Libro.
10. Pérez Franco D. (2005). "Determinación de las propiedades de un acuífero a partir de la información obtenida de un solo pozo de observación". Ing. Hidráulica y Ambiental". Vol. XXVI, No 1, CUJAE. Cuba.
11. Rorabaugh, M.I. (1953). "Graphical and theoretical analysis of step drawdown test of artesian well". ASCE Proceedings, no. 362.
12. Todd, D. K. (1959). "Groundwater Hydrology", John Wiley and Sons, New York.