**TRANSMISSIVIDADE E COEFICIENTE DE ARMAZENAMENTO OBTIDOS A PARTIR DA DIFUSIVIDADE EM AQUÍFEROS CONFINADOS NÃO DRENANTES**

**TRANSMISSIVITY AND STORAGE COEFFICIENT AS OBTAINED FROM DIFFUSIVITY IN NON LEAKY CONFINED AQUIFERS**

RESUMO

Um conjunto de 18.000 valores teóricos de difusividade D variando entre 0,012 m2/s e 8.914,0 m2/s, em aquífero confinado não drenante, foi gerado aleatoriamente por um programa de computador. Esse mesmo programa calculou 200 tempos de reação t0 de poços de observação posicionados a 15 distâncias diferentes do poço produtor, para 6 vazões diferentes, o que resultou na obtenção de 18.000 pares (t0, D) obtidos aleatoriamente. A partir desses pares e de seus desdobramentos, e utilizando um ajuste de uma lei potencial e dois ajustes de leis logarítmicas, foi possível chegar a uma expressão analítica que fornece D em função da vazão bombeada no poço produtor, da distância r deste poço a um poço de observação, e do t0 observado neste último. Uma vez obtida a difusividade D, são apresentadas fórmulas que permitem desmembrá-la em seu dividendo T (transmissividade hidráulica) e seu divisor S (coeficiente de armazenamento), de forma unívoca. Os resultados obtidos para D, T e S são validados por confronto com 39 valores desses parâmetros obtidos em 15 testes de aquífero realizados no Aquífero Cabeças no Vale do Gurguéia/PI. Esta abordagem é válida para a obtenção de valores confiáveis de D, T e S, de modo a respaldar a elaboração adequada de projetos de poços e de baterias de poços.

Palavras chave: aquífero, poço, difusividade, transmissividade, Gurguéia

ABSTRACT

A specific code based on Theis equation was written which generated a random series of 18.000 theoretical diffusivities D ranging from 0,012 m2/s to 8.914,0 m2/s in non leaky confined homogeneous aquifer. The code also served to provide 200 reaction times t0 (also called time lags or delay times) for observation wells placed at 15 different distances from the pumping well, for 6 different discharges, achieving eventually 18.000 random pairs (t0, D). These pairs and its further developments were subjected to one power regression and two logarithmic regressions which led to an analytical expression for D as a function of the discharge from the pumping well, the distance r from this well to an observation well and the reaction time t0. Once D is known, further expressions are proposed which split it into its constituent’s hydraulic transmissivity (T) and storativity coefficient (S). The values obtained for D, T and S are validated by comparison to 39 values of these parameters obtained from 15 long term aquifer tests performed in the decade of 1980 in the Gurgueia Valley/PI/Brazil. This approach is considered as suitable for providing reliable values of D, T and S which are required for supporting design, construction and installation of wells and well fields.

Key words: aquifer, well, diffusivity, transmissivity, Gurguéia.

1. INTRODUÇÃO

A caracterização do fluxo subterrâneo nos meios porosos exige o conhecimento de dois parâmetros hidrodinâmicos fundamentais que são: a transmissividade hidráulica (T) e o coeficiente de armazenamento (S). Esses parâmetros são classicamente obtidos em testes de aquífero convencionais. Em áreas já submetidas a uma explotação extensiva, entretanto, torna-se muito difícil a realização desses testes, sobretudo em face das superposições de escoamento decorrentes dos muitos e variados regimes de bombeamento sendo praticados. Essa dificuldade, muito frequente, levou à busca de uma abordagem alternativa para a obtenção dos referidos parâmetros hidrodinâmicos. O presente artigo constitui um esforço desenvolvido nesse sentido.

A equação diferencial geral que rege o fluxo subterrâneo em meio homogêneo e isotrópico é:

(1) em que:

h = carga hidráulica - (L)

x, y = direções ortogonais no plano horizontal - (L)

z = direção vertical - (L)

S = coeficiente de armazenamento - (adimensional)

T = transmissividade hidráulica - (L2T-1)

t = tempo decorrido a partir do início do fluxo - (T)

Soluções analíticas da equação (1) são disponíveis para as situações hidrogeológicas mais comuns, quais sejam, aquífero confinado, aquífero semiconfinado e aquífero livre. Para aquíferos confinados não drenantes a solução da equação (1) para fluxo radial para um poço é a função analítica (2), denominada comumente de equação de Theis.

(2) em que:

h0 = carga hidráulica inicial - (L)

h = carga hidráulica num dado tempo t - (L)

sw = rebaixamento num dado tempo t - (L)

Q = vazão constante de bombeamento - (L3T-1)

T = transmissividade hidráulica - (L2T-1)

W(u) = função de Theis dada por .

W(u) pode ser aproximada pela série convergente infinita:

(3) em que:

u = em que:

r = distância do poço bombeado ao ponto onde se deseja calcular o rebaixamento sw - (L).

S = coeficiente de armazenamento - (adimensional)

t = tempo contado a partir do início do bombeamento - (T).

Para valores de u muito pequenos (u<0,01) os dois primeiros termos da série (3) aproximam satisfatoriamente o valor de W(u).

Tem-se, assim (Cooper & Jacob, 1946):

e

Desenvolvendo convenientemente a equação acima se chega à chamada aproximação de Cooper & Jacob (equação 4) que é válida para pequenas distâncias do ponto de observação ao poço bombeado e longos tempos de bombeamento.

(4)

Custodio & Llamas (1983) manipulando convenientemente a equação (4), para rebaixamento nulo (sw = 0), chegaram a uma expressão que permite obter estimativas da difusividade D (equação 5).

(5) em que:

r = distância do poço bombeado a um poço de observação - (L).

t = tempo decorrido, em segundos, entre o início ou a parada do bombeamento e a reação do poço de observação - (T).

Considerando, entretanto, que a equação (5) deriva da aproximação de Cooper & Jacob (equação 4), a mesma é também válida para pequenas distâncias do ponto de observação ao poço bombeado e longos tempos de bombeamento. Essa limitação restringe muito sua aplicação à avaliação de difusividades a partir de interferências entre poços.

O presente trabalho pretende discutir a obtenção de uma expressão baseada na equação de Theis, destinada a obter estimativas confiáveis de D a partir do tempo de reação (t0) de poços de observação situados a qualquer distância do poço bombeado. Discute também uma abordagem que visa à obtenção de T e S, a partir de D.

2. METODOLOGIA

## 2.1. Pesquisa Bibliográfica

A maior parte das referências encontradas na literatura sobre avaliação da difusividade de aquíferos foca nas suas relações com fenômenos externos a eles. Deve-se a Boussinesq (1877, apud Silva, 1984) o primeiro estudo sobre a propagação de ondas potenciométricas sinusoidais em resposta ao estímulo proporcionado pelas variações do nível do mar. Posteriormente, inúmeros autores visaram à avaliação de parâmetros hidrodinâmicos a partir da análise do efeito produzido por causas extra-aquífero (Jacob, 1940; Ferris, 1951, apud Huntsman & McCready, 1995; Stallman & Papadopulos, 1966; Gilmore *et al*, 1992; Huntsman & McCready, 1995; Cruz, 1997; Merritt, 2004; Fernandes *et al*, 2016; Sánchez-Úbeda *et al,* 2016; Costa & Bacellar, 2010; Barlow & Leake, 2012).

No Brasil, hidrogeólogos da antiga Sudene e, posteriormente, de empresas de consultoria e do Laboratório de Hidrogeologia da UFPE, sempre se viram às voltas com o dimensionamento de baterias de poços ou a definição da capacidade de produção de baterias já existentes, em aquíferos regionais. Citam-se como exemplos estudos realizados nos seguintes aquíferos:

* Aquífero Açu em Mossoró na Bacia Potiguar: Bezerra (1977, 1980); Caern/Hidrosolos (1970); Caern/Acquaplan (1972); AUTOR (1986, 1996, 1997); Filho (1968); Planat/Caern (1979).
* Aquífero Barreiras na região metropolitana de Natal: Caern/Planat (1979, 1980, 1981, 1983).
* Aquífero Beberibe na Região Metropolitana do Recife: França (1968); França & Capucci 1978); Oliveira (2003); AUTOR & Filho (2017).
* O Aquífero Cabeças no Vale do Gurguéia/PI: AUTOR *et al* (1990); AUTOR & Demétrio (2009).

A avaliação das interferências em baterias de poços, nos casos acima citados, sempre constituiu um permanente desafio que findou por induzir a concepção de modelos analíticos de fluxo (Feitosa *et al*, 2008) para a solução satisfatória do que se convencionou chamar de cálculo de baterias de poços. É muito natural, assim, que as noções de raio de influência e difusividade tenham ocupado as atenções dos hidrogeólogos ligados a questões relativas a essas baterias. Dessa forma, não são utilizados no presente trabalho estímulos externos ao aquífero para a avaliação das difusividades. Utilizam-se estímulos produzidos no próprio corpo do aquífero (bombeamentos de poços produtores) e a resposta a esses estímulos em poços de observação, após um tempo t0 designado de tempo de reação (“*time lag*” ou “*delay time*” dos autores de língua inglesa). Essa abordagem foi utilizada por Beauheim (2007) e Ludvigson & Hjerne (2014) para meios heterogêneos. Aqui ela será adotada para um meio homogêneo de porosidade intergranular.

## 2.2. Obtenção dos Dados

Para a explicitação de D numa expressão analítica, em aquífero confinado não drenante, foram feitas utilizações convenientes da equação de Theis. O procedimento constou da geração de um grande número de pares (D, t0) os quais foram objeto de tratamentos estatísticos. Para a obtenção desses pares foi desenvolvido um programa de computador que cumpriu as seguintes tarefas:

* Transmissividades e coeficientes de armazenamento foram gerados aleatoriamente, dentro de uma ampla gama de valores considerada realista. Consequentemente, as razões T/S foram obtidas aleatoriamente. O esquema de cálculo adotado é mostrado na Figura 1.
* Para a vazão de 50,0 m3/h, inicialmente, e para a primeira difusividade, o programa testa, utilizando a equação de Theis, se o rebaixamento calculado na distância de 50 metros é menor que 0,0001 metros, ou seja, sensivelmente próximo de zero. O tempo necessário para que isso ocorra é considerado como o t0. O programa passa em seguida para a segunda difusividade e repete a operação acima descrita. Ao final se têm 200 pares (D, t0) para a vazão de 50,0 m3/h e a distância de 50 metros (ver Figura 1). O procedimento acima é repetido para a segunda distância (100 metros) gerando mais 200 pares (D, t0). Ao ser completada a última distância (5.000 m) se terão 3.000 pares (D, t0) para a vazão de 50,0 m3/h, como mostrado na Figura 1.
* O programa toma agora a segunda vazão (100 m3/h) e repete todo o procedimento acima descrito, gerando novos conjuntos de 200 pares (D, t0) para cada distância considerada. E assim sucessivamente, de acordo com a Figura 1.
* Ao final do processo, isto é, após a utilização da sexta vazão (500 m3/h), se têm 18.000 pares (D, t0).

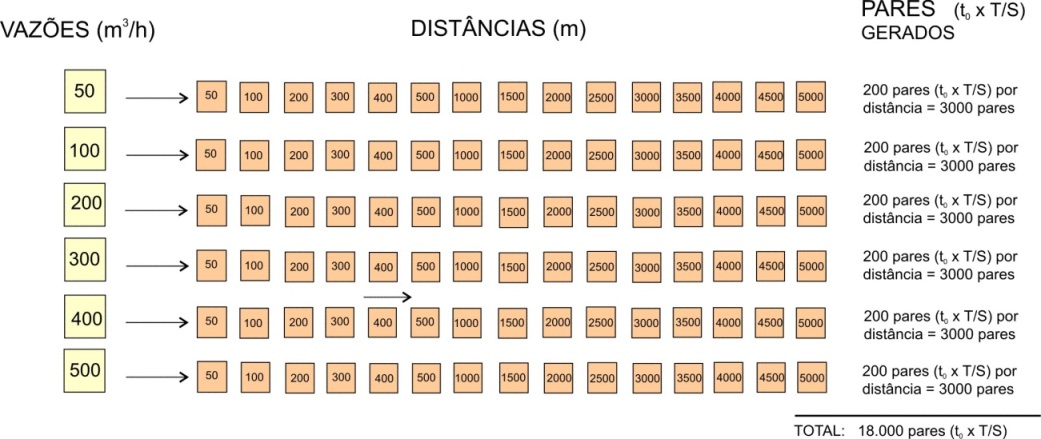


Figura 1 – Esquema de cálculo adotado

## 2.3. Análise Estatística dos Dados

A partir dos pares (D, t0), foi possível chegar a uma expressão analítica para a difusividade em função da vazão bombeada no poço produtor, da distância r deste poço a um poço de observação, e do tempo de reação t0 observado neste último. Para tal, foram realizados 3 conjuntos de correlações, descritos a seguir.

### 2.3.1 Primeiro conjunto de correlações (D x t0)

Para cada vazão, têm-se 15 conjuntos de 200 pares (D, t0) escalonados segundo as distâncias ao poço bombeado. Esses conjuntos admitem ajustes de leis potenciais com coeficientes de determinação R2 nunca inferiores a 0,99. Na Figura 2 esses ajustes são mostrados para a vazão de 100 m3/h.

A expressão matemática da lei, em diagrama bilogarítmico, para a vazão acima citada, é uma reta de equação:

(6) em que:

D = difusividade hidráulica em m2/s

t0 = tempo de reação, em minutos, do poço de observação situado a uma distância r, em metros, do poço bombeado.

B = Inclinação da reta ajustada.

C(r) = Coeficiente linear da reta ou interseção com o eixo Y, dependente de r.



Figura 2 – Leis Potenciais Ajustadas aos 15 Conjuntos de 200 Pares (D, t0), para a vazão Q = 100 m3/h.

Tabela 1 – Intersecções e Inclinações das Retas (Leis Potenciais) Ajustadas aos 15 Conjuntos de 200 Pares (D, t0)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Vazões (m3/h) | Coefs da reta ajustada | Distância do Poço de observação ao Poço Bombeado (m) | | | | | | | | | | | | | | |
| 50 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 | 3500 | 4000 | 4500 | 5000 |
| 50 | Intersecção (ln D) | 0,716 | 2,134 | 3,468 | 4,338 | 4,858 | 5,407 | 6,707 | 7,573 | 8,150 | 8,608 | 8,942 | 9,275 | 9,547 | 9,732 | 9,949 |
| Inclinação (ln D / ln t0) | -0,903 | -0,914 | -0,896 | -0,913 | -0,889 | -0,931 | -0,906 | -0,923 | -0,923 | -0,926 | -0,923 | -0,924 | -0,928 | -0,916 | -0,921 |
| 100 | Intersecção (ln D) | 0,614 | 2,011 | 3,408 | 4,229 | 4,817 | 5,213 | 6,618 | 7,441 | 7,993 | 8,450 | 8,836 | 9,146 | 9,371 | 9,622 | 9,844 |
| Inclinação (ln D / ln t0) | -0,914 | -0,924 | -0,926 | -0,926 | -0,931 | -0,910 | -0,922 | -0,924 | -0,914 | -0,922 | -0,930 | -0,925 | -0,899 | -0,915 | -0,923 |
| 200 | Intersecção (ln D) | 0,535 | 1,921 | 3,291 | 4,115 | 4,669 | 5,103 | 6,527 | 7,320 | 7,907 | 8,323 | 8,725 | 9,013 | 9,288 | 9,519 | 9,729 |
| Inclinação (ln D / ln t0) | -0,932 | -0,934 | -0,925 | -0,932 | -0,920 | -0,914 | -0,933 | -0,919 | -0,928 | -0,915 | -0,930 | -0,922 | -0,927 | -0,922 | -0,920 |
| 300 | Intersecção (ln D) | 0,468 | 1,850 | 3,255 | 4,037 | 4,628 | 5,079 | 6,465 | 7,273 | 7,851 | 8,312 | 8,660 | 8,991 | 9,257 | 9,478 | 9,677 |
| Inclinação (ln D / ln t0) | -0,929 | -0,928 | -0,932 | -0,926 | -0,934 | -0,935 | -0,929 | -0,940 | -0,933 | -0,937 | -0,939 | -0,938 | -0,947 | -0,935 | -0,938 |
| 400 | Intersecção (ln D) | 0,459 | 1,819 | 3,231 | 4,032 | 4,616 | 5,036 | 6,435 | 7,241 | 7,810 | 8,250 | 8,642 | 8,928 | 9,212 | 9,451 | 9,656 |
| Inclinação (ln D / ln t0) | -0,943 | -0,939 | -0,949 | -0,940 | -0,945 | -0,932 | -0,939 | -0,937 | -0,937 | -0,932 | -0,943 | -0,933 | -0,939 | -0,941 | -0,940 |
| 500 | Intersecção (ln D) | 0,426 | 1,809 | 3,191 | 4,007 | 4,584 | 5,006 | 6,402 | 7,220 | 7,800 | 8,243 | 8,629 | 8,884 | 9,178 | 9,419 | 9,621 |
| Inclinação (ln D / ln t0) | -0,945 | -0,942 | -0,943 | -0,948 | -0,945 | -0,934 | -0,945 | -0,945 | -0,939 | -0,941 | -0,950 | -0,929 | -0,939 | -0,942 | -0,939 |

Como foram consideradas seis vazões e obtidos 15 conjuntos de pares (D, t0) por vazão, foram ajustadas no total 6 x 15 = 90 retas. As inclinações e as intersecções das retas ajustadas são mostradas na Tabela 1, cabendo os seguintes comentários.

* A inclinação B das retas ajustadas se mantém dentro da estreita gama de -0,90 a -0,95. É possível assim considerar uma inclinação única e constante de -0,93.
* A intersecção C(r) das retas ajustadas, por outro lado, é uma função da distância r do poço de observação ao poço bombeado.

Neste primeiro conjunto de correlações, portanto, foi obtida uma expressão (equação 6) que fornece o ln D em função do ln do tempo de reação do poço de observação (t0) e de uma função C(r).

### 2.3.2 Segundo conjunto de correlações (C(r) x r)

Como verificado acima, a intersecção C(r) da equação 6 varia com a distância r do poço de observação ao poço bombeado. Foram então realizadas seis correlações entre intersecção e distância, com 15 pontos cada uma (15 distâncias r). As seis correlações foram para as vazões de 50, 100, 200, 300, 400 e 500 m3/h (Figura 3) e tiveram o objetivo de explicitar C(r).

Os melhores ajustes conseguidos foram funções logarítmicas com coeficientes de determinação nunca inferiores a 0,99. As expressões matemáticas das leis logarítmicas, em gráfico monolog, são retas de equação geral:

(7)



Figura 3 – Gráficos C (r) x r para seis vazões

Nos seis gráficos obtidos verifica-se que os coeficientes angulares são constantes e sensivelmente iguais a 2. As intersecções, por sua vez, mostradas na Tabela 2, são função da vazão. Vamos chamar essa função de F(Q).

Tabela 2 – Vazões e intersecções F(Q)

|  |  |
| --- | --- |
| Q (m3/h) | F(Q) |
| 50 | -7,14 |
| 100 | -7,20 |
| 200 | -7,29 |
| 300 | -7,37 |
| 400 | -7,36 |
| 500 | -7,39 |

Assim sendo, a equação geral (7) pode ser escrita como:

(8) em que:

C(r) = interseção na equação (6).

r = distância, em metros, do poço de observação ao poço bombeado.

F(Q) = intersecção dependente de Q

A equação (8) nos dá, portanto, a intersecção C(r) da equação (6) em função da distância r e de uma função F(Q). Resta determinar a função F(Q), o que será feito na terceira correlação a seguir.

### 2.3.3 Terceira correlação (Q x F(Q))

A correlação Q x F(Q), mostrada na Figura 4, foi realizada para verificar a influência da vazão na intersecção da equação (8). O melhor ajuste foi logarítmico com coeficiente de determinação R2 igual a 0,97.



Figura 4 – Correlação Q x F(Q)

A expressão matemática da lei logarítmica, em gráfico monolog, é uma reta de equação:

(9)

Observa-se que, para uma ampla variação da vazão, F(Q) varia muito pouco, o que mostra sua pequena contribuição ao valor da difusividade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As equações (6) a (9), convenientemente manipuladas, permitem se chegar a uma expressão para a obtenção da difusividade hidráulica, como mostrado a seguir.

## 3.1. Obtenção da Difusividade

Na equação (6) a inclinação B é igual a -0,93. A intersecção C(r), por sua vez, pode ser considerada como o log neperiano de um número A(r). Pode-se então escrever:

(10)

Levando-se em (10) o valor de C(r) explicitado em (8), vem:

(11)

A equação (6) pode então ser escrita como:

ou:

(12)

Como F(Q) é explicitado em (9) em função da vazão, chega-se finalmente a:

....(13) em que:

D = difusividade hidráulica em m2/s

t0 = tempo de reação, em minutos, do poço de observação situado a uma distância r, em metros, do poço bombeando uma vazão Q em m3/h.

A equação (13) permite obter a difusividade hidráulica de um aquífero confinado não drenante conhecendo-se o tempo de reação, em minutos, de um poço de observação situado a r metros de um poço bombeando uma vazão Q em m3/h.

Quando não se conhece a vazão Q pode-se utilizar a seguinte equação:

(14)

As diferenças entre os valores obtidos com a equação (13) e com a equação (14) são muito pequenas, uma vez que a vazão Q desempenha pequeno papel no condicionamento das difusividades (ver Figura 3).

### 3.1.1 Validação do Método

Na década de 1980 foram realizados 20 testes do Aquífero Cabeças/PI[[1]](#footnote-1), confinado e não drenante (AUTOR *et al*, 1990), em três baterias de poços (bateria do Incra, bateria do Projeto Piloto e bateria da Unifor)[[2]](#footnote-2), incluindo um teste em um poço isolado (poço Tranqueira). Desses 20 testes, 15 foram considerados no presente artigo. Como foram utilizados muito poços de observação nesses testes, têm-se um total de 39 pares (T,S) e, consequentemente, 39 difusividades confiáveis para utilizar como referência.

Os dados referentes a esses testes são mostrados na Tabela 3 onde as colunas têm os seguintes significados:

* Coluna C – Distâncias do poço bombeado ao poço observado.
* Coluna D – Vazão constante dos testes de aquífero.
* Colunas E e F – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos dos testes de aquífero.
* Coluna G - Difusividades obtidas dos testes de aquífero (D=T/S).
* Coluna H – Tempo de reação t01 do poço observado, obtido por extrapolação da curva de rebaixamento em gráfico bi-log, com auxílio da curva de Theis, até a ordenada de valor sw = 0,001 m.

Tabela 3 – Difusividades avaliadas e seus confrontos com os testes das baterias do Gurguéia



* Coluna I – Difusividade D1 obtida pela aplicação da equação 13 para o tempo de reação t01.
* Coluna J - Tempo de reação t02 do poço observado, obtido na curva de rebaixamento em gráfico mono-log, na ordenada de valor sw = 0,0 m.
* Coluna K - Difusividade D2 obtida pela aplicação da equação 13 para o tempo de reação t02.
* Coluna L - Difusividade D1 obtida pela aplicação da equação 5 para o tempo de reação t01. Os valores dessa coluna são irreais, extremamente elevados, demonstrando a impropriedade da equação (5), proposta por Custodio & Llamas (1983), para avaliar difusividades em poços de observação muito afastados do poço produtor.

Em todos os parâmetros analisados a seguir, comparados entre si através de regressões, prevalece sempre a condição de contorno que estabelece que Y = 0 para X = 0. Por esta razão foram adotadas equações do tipo Y = aX para as leis ajustadas aos dados experimentais.

Na Figura 5 mostra-se a correlação entre as difusividades obtidas pela equação (13) para tempos t0 de reação avaliados na curva de Theis (eixo Y), e as difusividades obtidas pela razão T/S dos testes (eixo X).



Figura 5 – Correlação difusividade para t0 obtido da curva de Theis para sw = 0,001 m x difusividade dos testes de aquífero.

Existe uma boa correlação entre os dois conjuntos de difusividade (R2 = 0,94). Observa-se uma discreta subestimação (Y = 0,83X) dos valores da difusividade avaliados pela equação (13) em relação àqueles obtidos a partir dos testes de aquífero. Isso pode ser explicado pela discreta superestimação dos tempos t0 resultante da forma como foram obtidos. Esses tempos, com efeito, foram tomados na curva de Theis para um rebaixamento de 0,001 m, enquanto que no programa que gerou os pares teóricos (D,t0), mostrados na Figura 1, foram considerados rebaixamentos menores que 0,0001 metros como limite das aproximações sucessivas.

Na Figura 6 mostra-se a correlação entre as difusividades obtidas pela razão T/S dos testes de aquífero (eixo X) e as difusividades obtidas pela equação (13) para tempos t0 de reação dos poços de observação avaliados na curva de Cooper/Jacob (eixo Y). Tem-se aqui também uma boa correlação entre os dois conjuntos de difusividade (R2 = 0,88). A subestimação (Y = 0,56X) dos valores da difusividade avaliados pela equação (13) é, entretanto, muito mais acentuada que no caso anterior. Essa subestimação deve-se à dificuldade de extrapolar corretamente a curva de rebaixamento, na maioria dos casos, para a obtenção confiável dos tempos t0 de reação (Figura 7). Apenas em poucos testes de aquífero (APp11/APz8, APp5/APz7, APp7/APp5, APp4/APz4) foram flagrados rebaixamentos iniciais suficientemente pequenos para caracterizar o regime de Theis no gráfico monolog e permitir avaliações confiáveis do t0 (ver teste APp4/APz4 na Figura 7). Nesses casos os tempos t0 de reação dos poços de observação praticamente coincidem com aqueles obtidos no gráfico bilog.



Figura 6 – Correlação difusividade para t0 obtido da curva de Cooper/Jacob para s = 0,0 m x difusividade dos testes de aquífero.



Figura 7 – Extrapolação da reta de Cooper/Jacob

Na grande maioria dos testes de aquífero analisados a extrapolação do regime de Theis, no gráfico monolog, conduziu a tempos t0 de reação muito superestimados e, consequentemente, nas equações (13) e (14), a difusividades muito subestimadas. Foi por esta razão que foram adotados, na presente análise, os tempos t0 obtidos com o auxílio da curva de Theis.

## 3.2. Explicitação do Par (T,S) a partir da Difusividade

Uma vez obtidas as difusividades D em cada poço, é possível explicitar seus respectivos pares (T,S) através do procedimento analítico mostrado a seguir:

Consideremos a equação (2) aplicada a um poço de observação qualquer.

(17) em que:

s’ = rebaixamento num dado tempo t’ - (L)

Q = vazão constante de bombeamento - (L3T-1)

T = transmissividade hidráulica - (L2T-1)

W(u) = função de Theis explicitada na equação (3)

u = em que:

r = distância do poço bombeado ao poço de observação considerado - (L).

S = coeficiente de armazenamento - (adimensional)

t' = tempo > t0 considerado suficientemente grande para a obtenção de um rebaixamento s’ mensurável com confiança - (T).

A expressão para u pode ser convenientemente escrita como:

(18) em que:

r = distância do poço bombeado ao poço de observação (L)

Na equação (18) todas as variáveis são conhecidas, sendo (S/T)=1/D o inverso da difusividade que foi avaliada pela equação (13). De posse dos valores de u, para cada poço, calcula-se o respectivo W(u) com auxílio de uma rotina conveniente.

Manipulando-se convenientemente a equação (17), chega-se à seguinte expressão:

(19)

A equação (19) fornece a transmissividade em cada poço, com auxílio de uma rotina conveniente. Essa mesma rotina fornece os respectivos coeficientes de armazenamento utilizando a equação (20).

(20)

Os pares (t’,s’) foram tomados nas curvas de rebaixamento dos testes de aquífero do Gurguéia (AUTOR *et al*, 1990) de modo que os valores s’ fossem no mínimo centimétricos para minimizar as imprecisões. Esse procedimento acarretou tempos de bombeamento t’ variando entre 5 minutos e 14 horas, dependendo da distância r.

Observe-se que, teoricamente, qualquer ponto (s’,t’) da curva de rebaixamento fornece de forma unívoca o par (T,S), desde que a difusividade seja conhecida.

### 3.2.1. Validação do método

Tal como feito na obtenção das difusidades, a validação da abordagem para a obtenção dos pares (T,S) aqui discutidos foi feita considerando como referência os pares (T,S) obtidos a partir dos testes de aquífero realizados no Vale do Gurguéia (AUTOR *et al*, 1990). Os dados utilizados e os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados utilizados, pares (T,S) avaliados e seus confrontos com os pares (T,S) avaliados nos testes das baterias do Gurguéia



Na Figura 8 mostra-se a correlação entre as transmissividades medidas nos testes de aquífero do Aquífero Cabeças e as transmissividades fornecidas pela equação (19). O coeficiente de determinação R2 = 0,91 sugere que estas últimas são aceitáveis como representativas do aquífero em questão.

Na Figura 9 mostra-se a correlação entre os coeficientes de armazenamento medidos nos testes de aquífero do Aquífero Cabeças no Vale do Gurguéia e os coeficientes de armazenamento fornecidos pela equação (20). O coeficiente de determinação R2 = 0,92 sugere que estes últimos são também aceitáveis como representativos do aquífero em questão.



Figura 8 – Confronto entre as transmissividades observadas nos testes de aquífero e as transmissividades avaliadas via difusividade.



Figura 9 – Confronto entre os coeficientes de armazenamento observados nos teste de aquífero e os coeficientes de armazenamento avaliados via difusividade.

4. CONCLUSÃO

É proposto no presente trabalho um método para obtenção da difusividade hidráulica de aquíferos confinados e, a partir desta, dos parâmetros transmissividade hidráulica (T) e coeficiente de armazenamento (S). Os seguintes comentários são pertinentes:

* A difusividade, em m2/s, pode ser obtida, preferencialmente, pela equação (13) em que t0 é o tempo de reação, em minutos, de um poço de observação situado a uma distância r, em metros, de um poço bombeando uma vazão Q em m3/h. Pode-se também utilizar a equação (14) com resultados cerca de 10% mais elevados, apenas, uma vez que o papel da vazão no condicionamento do valor da difusividade é muito pequeno.
* As equações (13) e (14) são válidas dentro de uma ampla gama de difusividades. As correlações realizadas, com efeito, utilizaram valores teóricos escalonados entre 0,012 m2/s e 8.914,0 m2/s. Dentro dessa gama situam-se comodamente as difusividades realistas variando entre 8,0 m2/s e 73,0 m2/s avaliadas nos poços do Vale do Gurguéia.
* O tempo de reação t0, observado num dado poço de observação, é válido para um poço produtor que iniciou ou que interrompeu o bombeamento.
* A partir da difusividade obtida com a equação (13) ou com a equação (14), pode-se avaliar a transmissividade e o coeficiente de armazenamento de forma unívoca, utilizando-se as equações (19) e (20).
* Os valores de t0, t’ e s’ utilizados na avaliação do par (T,S) foram obtidos dos testes de aquífero do Gurguéia/PI. Em aplicações práticas do método, entretanto, devem ser adotados procedimentos específicos que devem melhorar a precisão dos resultados. Esses procedimentos são os seguintes:
  + - Instalar no poço de observação um sensor transdutor de pressão que vai monitorar continuamente as variações do nível d’água. Na impossibilidade dessa instalação, pode-se utilizar um medidor de nível convencional.
    - Anotar como tempo zero o momento da ligação ou desligamento da bomba do poço produtor.
    - O tempo t0, em minutos, será o tempo que marca a reação do poço de observação. Essa reação se caracterizará por um aumento brusco do nível d’água ou por uma recuperação brusca desse nível.
    - Manter a observação até a obtenção de um valor considerado confiável de rebaixamento ou recuperação. Esse valor será o s’ acima citado e o tempo correspondente será o t’. Para poços de observação muito distantes do poço bombeado (2.500,0 m, por exemplo) o t’ pode chegar a 14 horas como observado no Gurguéia. Para distâncias mais razoáveis, de 200,0 ou 300,0 metros, entretanto, esse tempo se reduz para algo em torno dos 5 minutos.
* As equações (13) e (14) aqui apresentadas são válidas para aquífero confinado não drenante. É sempre possível, entretanto, obter equações análogas para aquíferos semiconfinados ou livres adotando-se a mesma linha de raciocínio, mas, utilizando-se soluções analíticas da equação geral do fluxo subterrâneo (equação 1) adaptada às respectivas situações.

A abordagem aqui defendida não substitui os clássicos testes de aquífero. Num campo complexo de bombeamento, entretanto, onde poços entram e saem de operação frequentemente[[3]](#footnote-3), é praticamente impossível a realização desses testes. Nessas situações, a aplicação consciente da abordagem aqui discutida pode fornecer valores da transmissividade (T) e do coeficiente de armazenamento (S) suficientemente representativos do aquífero de modo a permitir projetos adequados de poços e de baterias de poços.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são devidos ao hidrogeólogo Prof. José Geilson Alves Demétrio pela revisão do texto e, principalmente, pelas discussões e sugestões quando da concepção da abordagem. Agradecimentos são também devidos aos hidrogeólogos Helena Magalhães Porto Lira, João Manoel Filho e Fernando Antonio Carneiro Feitosa pela revisão do texto.

REFERÊNCIAS

ANA. Avaliação dos recursos hídricos subterrâneos e proposição de modelo de gestão compartilhada para os aquíferos da Chapada do Apodi, entre os estados do Rio Grande do Norte e Ceará. Relatório Final, Vol. III – Hidrogeologia, 2010.

AUTOR & Demétrio, J.G.A. Os Aquíferos Cabeças e Serra Grande no Vale do Gurgéia – PI: Síntese dos Conhecimentos e Perspectivas de Explotação. Labhid/CTG/UFPE – CPRM, relatório inédito, Recife, 2009.

AUTOR & Filho, J.M. O Aquífero Beberibe na Área do Botafogo – Município de Itapissuma/PE: Viabilidade de uma bateria de poços. Atepe/Pöyry Tecnologia Ltda, relatório inédito, Recife, 2017.

AUTOR (Coord.), Demétrio, J.G.A.; Feitosa, F.A.C., Duarte, W.D. O Aquífero Cabeças no Vale do Gurguéia: Atualização dos Conhecimentos - Relatório Final (03 volumes). UFPE/ATEPE/DNOCS, Recife. Relatório Inédito, 1990.

AUTOR. A Explotação do Aqüífero Açu na Região de Mossoró - Caracterização da Situação Atual e Perspectivas de Atendimento da Demanda Futura. CPRM, Série Hidrogeologia: Pesquisa e Desenvolvimento, Vol.1, 44 p.il, Brasília, 1996.

AUTOR. Captação de Mossoró: Perspectivas de Atendimento da Demanda Futura e Previsão de Níveis Dinâmicos. CAERN/ATEPE, Natal, relatório inédito 1986.

AUTOR. Parecer Sobre as Causas do Aprofundamento dos Níveis de Bombeamento em Mossoró. SERHID/RN – Secretaria de Recursos Hídricos e Projetos Especiais do Rio Grande do Norte. Natal, Relatório Inédito, 1997.

Barlow, P.M & Leake, S.A. Streamflow Depletion by Wells—Understanding and Managing the Effects of Groundwater Pumping on Streamflow. U.S. Department of the Interior, Geological Survey, Groundwater Resources Program, Circular 1376, 2012.

Beauheim, R.L. Diffusivity Mapping of Fracture Interconnections. Conference: 2007 U.S. EPA/NGWA Fractured Rock Conference: State of the Science and Measuring Success in Remediation, At Portland, Maine, 2007.

Bezerra ,M.A. Captação de Mossoró: Diagnóstico Sobre a Situação do Manancial e do Dispositivo de Captação. CAERN/PLANAT, Natal, relatório inédito, 1980.

Bezerra, M.A. Captação de Mossoró: Dimensionamento das Condições de Exploração dos Poços Tubulares e Programa de Trabalho Complementar. CAERN/PLANAT, Natal, relatório inédito, 1977.

Caern/Acquaplan. Projeto de Abastecimento d'Água de Mossoró/RN: Estudo do Manancial Subterrâneo. Recife, relatório inédito, 1972.

Caern/Hidrosolos. Estudos Hidrogeológicos para Ampliação do Abastecimento d'Água da Cidade de Mossoró/RN. Recife, relatório inédito, 1970.

Caern/Planat. Captação de Cidade Satélite: Poços Produtores - Relatório de Conclusão. Natal/RN, relatório inédito, 1983.

Caern/Planat. Captação de Encanto: Poços Produtores - Relatório de Conclusão. Natal/RN, relatório inédito, 1980.

Caern/Planat. Captação de Ielmo Marinho: Poços Produtores - Relatório de Conclusão. Natal/RN, relatório inédito, 1981.

Caern/Planat. Captação do Conjunto Pirangi: Poços Produtores - Relatório de Conclusão. Natal/RN, relatório inédito, 1979.

Cooper, H.H. & Jacob, C.E. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. Am. Geophys. Union Trans., vol. 27, pp. 526-534, 1946.

Costa, F.M. & Bacellar, L.A.P. Caracterização Hidrogeológica de Aquíferos a Partir do Fluxo de Base. RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 15, n.3, 173-183, 2010.

Cruz, J.V. Estudo hidrogeológico da Ilha do Pico (Açores - Portugal). Tese para a obtenção do grau de Doutor em Geologia, Universidade dos Açores, 2 vol., Ponta Delgada, 433p, 1997.

Custodio, E. & Llamas, M.R. Hidrologia Subterranea. 2ed, Edicionnes Omega S.A., Barcelona, 1983.

Feitosa, F.A.C; Filho, J.M.; AUTOR; Demétrio, J.G.A., (Coordenadores). Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. 3ª Edição - Revisada e Ampliada. CPRM/LABHID-UFPE, 2008.

Fernandes, M.F.S.; Castro, J.W.A.; Silva Jr, G.C.; Mendes, G.S. Estimativa de Parâmetros Hidrodinâmicos do Aquífero Emborê em Farol de São Tomé - RJ com as Oscilações do Nível Piezométrico e Maré Oceânica. Águas Subterrâneas 30(2):209-223, 2016.

Ferris, J.G. Cyclic fluctuations of water level as a basis for determining aquifer transmissibility: Internat. Geodesy Geophysics Union, Assoc. Sci. Hydrology Gen. Assembly, Brussels, v. 2, p. 148-155; duplicated 1952 as U. S. Geological survey Ground Water Note 1, 1951.

Filho, J.M. (Coord.). Bacia Potiguar: Estudo por Analogia Elétrica das Condições de Exploração das Águas Subterrâneas do Arenito Açú na Região de Mossoró/RN. SUDENE, DD, Série Hidrogeologia no 23, Recife, 1968.

França, H.P.M. & Capucci, E.B. Diagnóstico preliminar das condições de exploração de água subterrânea do aquífero Beberibe – área Olinda-Paulista-Itamaracá. CPRM / COMPESA – Recife, relatório inédito, 1978.

França, H.P.M. Diagnóstico preliminar das condições de explotação de água subterrânea no aquífero Beberibe, área Olinda, Paulista e Itamaracá. CPRM. Recife, relatório inédito, 1968.

Gilmore, T.J.; Spane Jr, E. A.; Newcomer, D.R.; Sherwood, C.R. Application of Three Aquifer Test Methods for Estimating Hydraulic Properties Within the 100-N Area. Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington 99352, 1992.

**Huntsman, B.E. & McCready, R.W.** Passive Monitoring to Determine Aquifer Diffusivity. International Association of Hydrogeologists Congress. Edmonton, Alberta, Canada, **1995.**

Jacob, C.E. Flow of groundwater in Engineering Hydrau­lics, edited by H. Rouse, New York. John Wiley and Sons, 1950.

Jacob, C.E. On the flow of water in an elastic artesian aquifer: American Geophysical Union Transactions. part 2, p. 574-586; duplicated 1953 as U. S. Geological Survey Ground Water Note 8, 1940.

Knudby, C. & J. Carrera. On the Use of Apparent Hydraulic Diffusivity as an Indicator of Connectivity. Journal of Hydrology, 329: 377-389, 2006.

Li, H. & Jiao, J.J. Tide-induced groundwater fluctuation in a coastal leaky confined aquifer system extending under the sea. Water Resources Research, Vol. 37, No. 5, Pages 1165–1171, 2001.

Ludvigson, J.E. & Hjerne, C. Detailed analysis of selected hydraulic interference tests and review of new test analysis methods. Geosigma AB. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm, 2014.

Merritt, M.L. Estimating Hydraulics Properties of the Floridan Aquifer System by Analysis of Earth-Tide, Ocean-Tide, and Barometric Effects , Collier and Hendry Counties, Florida. U.S. Geological Survey, Water Resources Investigations Report 03-4267, 2004.

Oliveira, L.T. Aspectos Hidrogeológicos da Região Costeira Norte de Pernambuco – Paulista a Goiana. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

Planat/Caern. Captação de Baraúna, poço tubular no 2 CPRM-04-MO-15-RN. Relatório de conclusão. Relatório inédito, 1979.

Sánchez-Úbeda, J.P.; Calvache, M.L.; Duque, C.; López-Chicano, M. Estimation of hydraulic diffusivity using tidal-extracted oscillations from groundwater head affected by tide. 24th Salt Water Intrusion Meeting and the 4th Asia-Pacific Coastal Aquifer Management Meeting, Cairns, Australia, 2016.

Silva, M. Hidrogeologia do Algarve Oriental. Dissertação para Obtenção do Grau de Doutor em Geologia. Departamento de Geologia da FCUL, 1984. 260 pp, 1984.

Stallman, R.W. & Papadopulos, S. Меаsurement of Нуdraulic Diffusivity of Wedge-Shaped Aquifers Drained by Streams. Geological Survey Professional Paper 514, 1966.

Theis, C.V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. Transactions American Geophysical Union, 16th Ann. Meeting, part 2, 1935.

Wen, J.C.; Lin, H.R.; Jim Yeh, T.C.; Wang, Y.L.; Lin, K.L.; Huang, S.Y. Hydraulic Tomography for Estimating the Diffusivity of Heterogeneous Aquifers Based on Groundwater Response to Tidal Fluctuation in an Artificial Island in Taiwan. Geofluids Volume 2018, Article ID 6046258, 15 pages, 2018.

1. 72 horas de bombeamento com vazão rigorosamente constante (320 m3/h a 600 m3/h, dependendo do poço) aferida por escoador de orifício circular. Bomba turbina ESCO de eixo prolongado, pertencente à CPRM, acionada por motor MWM diesel de 12 cilindros. [↑](#footnote-ref-1)
2. Poços com profundidades variando entre 350 e 466 m, totalmente penetrantes no Aquífero Cabeças cujas espessuras variam entre 158 e 302 m. [↑](#footnote-ref-2)
3. Cita-se, por exemplo, o Aquífero Beberibe na região metropolitana norte do Recife [↑](#footnote-ref-3)