

Caracterização Hidrogeológica de Aquíferos a Partir do Fluxo de Base

Fernanda Martineli Costa, Luis de Almeida Prado Bacellar

Dep. Geologia/Escola de Minas/Universidade Federal de Ouro Preto
femartineli@yahoo.com.br, bacellar@degeo.ufop.br

Recebido: 06/11/09 – revisado: 17/03/10 – aceito: 03/08/10

RESUMO

Os meios hídricos subterrâneos e superficiais ocorrem em interação dinâmica e com interferências mútuas. Tal interconexão é a base dos métodos indiretos de caracterização hidrogeológica que permitem aferir características do aquífero a partir do conhecimento de sua contribuição para o meio superficial - fluxo de base -, que é determinado a partir do tratamento de séries fluviométricas. Os índices obtidos deste tratamento - volume total do fluxo de base e sua taxa de decaimento ou coeficiente de recessão - são, tradicionalmente, determinados pelo método de Barnes. Neste trabalho são apresentadas as técnicas alternativas de obtenção destes índices: *smoothed minima*, *matching strip* e *correlation*, que apresentam a vantagem de permitir trabalhar com séries fluviométricas relativamente curtas e descontínuas. Para tanto, foram analisados dados de nove microbacias de drenagem e de duas bacias maiores com um e com três anos de monitoramento, respectivamente. Todas se localizam no Quadrilátero Ferrífero (MG) e estão estruturadas em rochas ígneas e metamórficas. Os resultados encontrados, especialmente com as técnicas *matching strip* e *smoothed minima*, foram coerentes com os obtidos pelo método de Barnes e também com as interpretações das características hidroquímicas da água nas microbacias. Conclui-se, portanto, que as técnicas estudadas podem fornecer informações importantes e confiáveis sobre as condições dos aquíferos a partir de dados de fácil aquisição e de baixo custo, contribuindo para caracterização hidrogeológica de regiões com poucas informações subterrâneas.

Palavras-chave: coeficiente de recessão; fluxo de base; microbacias; parâmetros hidrodinâmicos; método hidrológico.

INTRODUÇÃO

Os meios hídricos subterrâneos e superficiais constituem um sistema único, em dinâmica e contínua interação e, portanto, em processo de interferência mútua. De fato, qualquer modificação em um meio refletirá, a curto ou longo prazo, em todo o sistema, justificando a necessidade de gerenciamento integrado.

A conexão hidráulica entre estes dois meios é complexa e se dá em escalas variadas no tempo e no espaço, sendo, muitas vezes, difícil observá-la e medi-la. As linhas de fluxo de recarga e descarga seguem percursos que variam de horas a séculos, atravessando camadas superficiais do solo ou níveis rochosos profundos. E, conforme as condições hídricas locais, ocorrem inversões nos processos de recarga e descarga, seja por processos naturais ou antrópicos, como, por exemplo, pela superexploração de poços tubulares profundos (Castany, 1971; Custodio & Llamas, 1976; Winter et. al., 1998).

Esta interconexão possibilita investigar processos do meio hídrico subterrâneo a partir de informações hídricas superficiais, empregando-se mé-

todos indiretos de caracterização hidrogeológica, fundamento da presente pesquisa (Trainer & Watkins Jr., 1974; USAE, 1999; Dewandel et. al., 2003; Costa, 2005). Estes métodos utilizam-se de séries fluviométricas - disponíveis, em geral, para a maioria das bacias hidrográficas -, analisando-se a contribuição do aquífero para o meio superficial, ou seja, determinando-se o fluxo de base. A partir do conhecimento do volume do fluxo de base total e de sua taxa de decaimento (coeficiente de recessão) podem ser inferidas também as condições dos aquíferos locais. Cabe ressaltar que este tipo de investigação só é possível em casos de aquíferos não-confinados e para rios efluentes.

Além de permitir estimar indiretamente os parâmetros hidrodinâmicos (difusividade e transmissividade), o conhecimento do fluxo de base tem significativa importância no gerenciamento dos recursos hídricos, ao possibilitar estimar a reserva renovável (Castany, 1971), ou seja, volume que pode ser explorado de um aquífero sem comprometer sua sustentabilidade. Segundo Rebouças et al. (1994), a disponibilidade explorável pode ser estimada em 25 a 50% do volume das reservas renováveis.

O objetivo principal do presente estudo envolveu a investigação das condições dos aquíferos de nove microbacias e de duas bacias maiores por métodos indiretos (método hidrológico). A determinação do fluxo de base e dos parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos nas microbacias foram obtidos em hidrogramas de apenas um ano hidrológico através de técnicas alternativas, pouco divulgadas em âmbito nacional, mas amplamente empregadas internacionalmente. Como objetivo secundário, procurou-se comparar os resultados obtidos com estas técnicas com o tradicional método de Barnes (ex.: Langbein, 1938; Snyder, 1939; Custodio & Llamas, 1976; Nathan & McMahon, 1990; Tallaksen, 1995; Wahl & Wahl 1995; Smakhtin, 2001; Dewandel et al. 2003; Silva, 2009). O estudo concentrou-se em bacias hidrográficas situadas em áreas de rochas ígneas e metamórficas (granitos, gnaisses e xistos) do interior do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.

FLUXO DE BASE E COEFICIENTE DE RECESSÃO

O fluxo de base de um rio é a porção do fluxo total proveniente do aquífero, ou seja, corresponde à descarga de água subterrânea para o sistema superficial, (Castany, 1971; Dunne, 1980; Chorley, 1980; Fetter, 1988; Zecharias & Brutsaert, 1988; Lacey & Grayson, 1998). É, portanto, o aporte que mantém a perenidade do canal em períodos de seca. As demais componentes do fluxo total são o fluxo superficial e o subsuperficial (ou hipodérmico), passíveis de serem individualizados por métodos de separação de hidrogramas (Castany, 1971; Custodio & Llamas, 1976; Nathan & McMahon, 1990).

Para facilitar a comparação entre bacias, o fluxo de base pode ser expresso, basicamente, a partir de dois índices: o índice do fluxo de base (IFB ou BFI – base flow index) e o fluxo de base específico (FBE). O IFB representa a proporção do fluxo total derivada do fluxo de base, sendo, portanto, adimensional. É considerado um bom indicador das condições geológicas em uma bacia, sendo tanto maior (valores próximos de 1) quanto maior a contribuição do fluxo subterrâneo e tendo valores próximos a zero para rios efêmeros (Institute of Hydrology in Lacey & Grayson, 1998; Smakhtin, 2001). O FBE é o volume do fluxo de base em um ano hidrológico dividido pela área da bacia.

A recessão do fluxo de base corresponde à depleção da água subterrânea ao longo do tempo, indicando a que taxas as reservas do aquífero estão sendo liberadas para o rio, dando indícios, portanto das condições do aquífero (Castany, 1971; Custodio & Llamas, 1976; USAE, 1999; Smakhtin, 2001). Adotando-se uma relação linear entre a taxa de fluxo e a carga hidráulica, pode-se admitir para grande parte dos aquíferos um modelo exponencial para a recessão (Kresic, 1997; Dewandel et al., 2003), como a equação de Maillet:

$$Q_t = Q_o e^{-\alpha t} \quad (1)$$

Onde: Q_t (m³/s) = vazão no tempo t
 Q_o (m³/s) = vazão no início da recessão
 α (dia⁻¹) = coeficiente de recessão (ou de esgotamento)
 t = tempo (dias) desde o início da recessão

Em um hidrograma em gráfico semilogarítmico (com as vazões em escala logarítmica), o coeficiente de recessão (α) é a inclinação da reta de recessão, ou seja, da porção da curva de decaimento do fluxo quando a vazão provém, teoricamente, apenas de fontes subterrâneas (Figura 1). É um índice que depende principalmente da geologia, tipo de solo e geomorfologia (Castany, 1971; USAE, 1999), sendo, portanto, característico de cada bacia de drenagem.

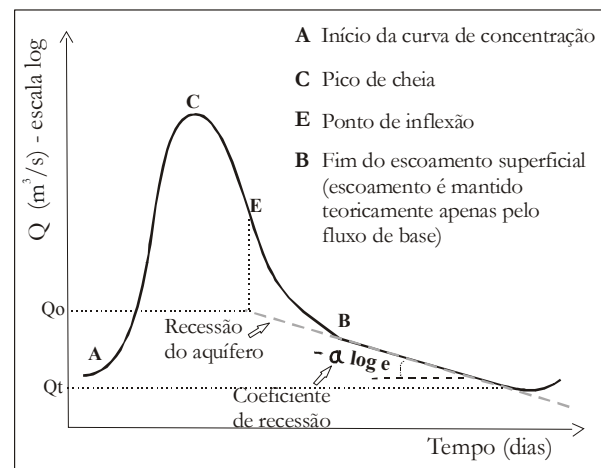


Figura 1 - Hidrograma com indicação do coeficiente de recessão (α). A recessão é o trecho a partir de B (Baseado em Custodio & Llamas, 1976).

MÉTODOS

Foram selecionadas, conforme suas características físicas, nove microbacias de drenagem com áreas de até 1km², que foram monitoradas por um ano hidrológico (entre 2003 e 2004) com pluviômetros e vertedores portáteis (Costa, 2005). Os dados pluviométricos foram tomados diariamente às 7:00h e as vazões medidas 2 vezes ao dia (manhã e tarde) na estação seca, aumentando-se a frequência para 4 medidas diárias durante a estação chuvosa (Costa, 2005; Costa et al., 2007).

Entre as microbacias, sete (B1, B2, B3, B3.1, B4, B5 e B6) estruturam-se em terreno granito-gnássico do Complexo Bação (Dorr, 1969), sendo uma destas (B6) constituída ainda por xistos, anfíbolitos e rocha metaultramáfica. As microbacias B8 e B8.1 localizam-se em xistos e filitos do Grupo Piracaba, no Supergrupo Minas (Dorr, 1969). Estas microbacias diferenciam-se entre si ainda por características geomorfológicas e graus de degradação distintos, como, por exemplo, pela presença de voçorocas. A partir do conhecimento do comportamento hidrogeológico de cada uma por meio dos métodos ora discutidos, pode-se averiguar a influência de cada um destes parâmetros físicos no supracitado comportamento (Costa, 2005; Costa & Bacellar, 2007; Costa & Bacellar, 2009).

Paralelamente, a fim de balizar os resultados, foram tratados os dados hidrológicos de duas bacias maiores: bacias do alto rio das Velhas e rio Maracujá, monitoradas por uma parceria CEMIG-IGAM desde março de 2000. Como estas possuem um maior tempo de monitoramento (entre 10/2000 e 09/2003), foi possível aplicar, além dos métodos alternativos (de separação do fluxo de base e determinação do coeficiente de recessão), o tradicional método de Barnes, que exige séries hidrológicas mais extensas, permitindo assim a validação dos resultados. A bacia do rio Maracujá (código ANA 41163000) estrutura-se 90% em rochas granito-gnássicas do Complexo do Bação (Dorr, 1969), enquanto a bacia Alto rio das Velhas (código ANA 4115200) situa-se sobre xistos, filitos e quartzitos dos supergrupos Rio das Velhas e Minas e somente 15% em áreas deste complexo.

Métodos para separação do fluxo de base

A separação do fluxo de base pode ser feita a partir de vários métodos (como discutido em Costa, 2005), sendo o mais tradicional o de Barnes (Custodio & Llamas, 1976; Nathan & McMahon,

1990), baseado na linearidade da recessão quando a vazão nos hidrogramas é expressa em escala logarítmica. Trata-se de um procedimento manual e, assim, de alguma forma, subjetivo, normalmente aplicado para séries hidrológicas extensas, com apresentação de médias mensais de vazão (Custodio & Llamas, 1976).

Existem métodos automatizados de separação, como os filtros digitais, extremamente úteis para tratamento de séries fluviométricas extensas com dados diários de vazão. Destaca-se entre estes o método da smoothed minima (Nathan & McMahon, 1990; Wahl & Wahl, 1995), utilizado neste trabalho, no qual é inicialmente identificado o menor valor de vazão a cada intervalo de 5 dias consecutivos. Posteriormente, estes são comparados com os vizinhos mais próximos. Se 90% do valor de uma dada vazão mínima é menor que a vazão corresponde aos mínimos anterior e posterior, este passa a ser um ponto de inflexão. A união dos pontos de inflexão separa o fluxo de base do fluxo de cheia em todo o hidrograma (Nathan & McMahon, 1990; Wahl & Wahl, 1995).

Métodos para determinação do coeficiente de recessão

O coeficiente de recessão é tradicionalmente obtido a partir do método gráfico de Barnes. Porém, como citado anteriormente, este método não pode ser aplicado quando se dispõe de séries hidrológicas curtas.

Adicionalmente, em regiões de clima úmido, como em grande parte do Brasil, as recessões são frequentemente interrompidas por episódios de recarga devido às precipitações e, assim, têm-se diversos estágios curtos de recessão, muitas vezes com características distintas entre si em função de condições iniciais variáveis, como a umidade antecedente e a posição do nível freático. Estas recessões, contudo, tendem a convergir para uma curva principal típica (Snyder, 1939; Langbein, 1938; Nathan & McMahon, 1990; Tallaksen, 1995; Smakhtin, 2001), denominada curva de recessão mestra (CRM). Tal fato possibilita determinar o coeficiente de recessão para séries fluviométricas curtas e, até mesmo, descontínuas. O coeficiente de recessão determinado a partir da CRM, teoricamente, representa de forma mais fiel as condições da bacia, pois indica um nível básico para onde todos os pequenos estágios de recessão convergem.

Na presente pesquisa, a CRM e o coeficiente de recessão foram determinados a partir de duas técnicas: matching strip e correlação:

A – Matching Strip

Esta técnica baseia-se no princípio da superposição de várias pequenas curvas de recessão de diferentes eventos que convergem para uma CRM (Snyder, 1939). Em gráficos, em escala semilogarítmica, da vazão diária (m³/s) versus tempo, os períodos de recessão, identificados pelos trechos retilíneos, são destacados. Posteriormente, cada pequeno estágio de recessão é movimentado horizontalmente até estabelecer uma CRM comum a todos (como será mostrado na Figura 5). O coeficiente de recessão é, então, determinado utilizando-se da equação 1 (Nathan & McMahon, 1990; Tallaksen, 1995)

B – Correlação (Correlation)

Na técnica da correlação utilizam-se apenas os períodos da série fluviométrica que mostrem vazão decrescente (recessão aparente). Plota-se, então, em escala normal, a vazão de um dia (Q_n) contra a vazão de um intervalo arbitrário de t dias antes (Q_{n-t}) (intervalo de atraso). As curvas geradas tendem progressivamente a uma reta de recessão comum (CRM) à medida que a vazão diminui (como será mostrado na Figura 6) (Langbein, 1938; Nathan & McMahon, 1990; Tallaksen, 1995; Smakhtin, 2001). Teoricamente, deveria-se utilizar o maior valor possível de t (Nathan & McMahon, 1990), embora isto dificulte a seleção de um número suficiente de períodos de recessão, principalmente quando a série fluviométrica é curta. Consequentemente, é comum utilizar-se valores de intervalo de atraso entre 1 e 5 (Smakhtin, 2001). Neste trabalho optou-se por um valor de 2, conforme recomendado por alguns autores (Nathan & McMahon, 1990). Para se obter o coeficiente de recessão por este método, primeiramente calcula-se a constante k , que é dada pela própria inclinação da CRM, ou seja Q_n/Q_{n-t} elevada ao inverso do tempo de atraso:

$$\text{Sendo } k = e^{-\alpha} \quad (2)$$

$$Q_t = Q_0 k^t \quad (3)$$

Então:

$$k = \left(\frac{Q_t}{Q_0} \right)^{\frac{1}{t}} = \left(\frac{Q_n}{Q_{n-t}} \right)^{\frac{1}{t}} \quad (4)$$

O coeficiente de recessão é então determinado pela expressão (a partir da equação 2):

$$\alpha = \frac{-\log k}{0,4343} \quad (5)$$

Para homogeneizar os resultados, Nathan & McMahon (1990) sugerem que k seja medida a 2/3 da vazão diária média.

Determinação indireta de parâmetros hidrogeológicos

Para bacias hidrográficas com rios efluentes e estruturadas em aquífero homogêneo, isotrópico e não confinado é possível estimar parâmetros hidrodinâmicos, como transmissividade (T) e rendimento específico (S_y), que é o coeficiente de armazenamento dos aquíferos livres. De fato, nestas condições, a recessão do fluxo de base pode ser matematicamente modelada em termos das características do aquífero, baseando-se na equação geral de fluxo subterrâneo (Rorabaugh, 1960 in Trainer & Watkins Jr., 1974; Custodio & Llamas, 1976; Feitosa & Manoel Filho, 1997; USAE, 1999; Dewandel et. al., 2003). Segundos os fundamentos de Rorabaugh, assumindo-se um comportamento linear para a recessão - como a equação exponencial de Maillet (1) -, pode-se determinar a difusividade (T/S_y) a partir do conhecimento do coeficiente de recessão e das dimensões do aquífero segundo a fórmula:

$$\alpha = \frac{\pi^2 K b}{4 S_y L^2} \quad (6)$$

onde : K (m/dia) = condutividade hidráulica
 S_y = rendimento específico (specific yield)
 b (m) = espessura saturada média ou profundidade do aquífero
 L (m) = distância da drenagem ao divisor de águas subterrâneas. Na prática, assume-se que este divisor coincide com o divisor de águas superficiais.

Em termos de difusividade (D) e transmissividade (T) a equação 6 pode ser escrita:

$$D = \frac{T}{S_y} = \frac{4L^2 \alpha}{\pi^2} \quad (7)$$

Pois $T = K.b$ e $D = T/S_y$

Ou seja, uma vez conhecida a largura média da bacia ($2L$), pode-se calcular a difusividade a partir de α . Se os valores de S_y forem conhecidos ou estimados, pode-se determinar T , que representaria

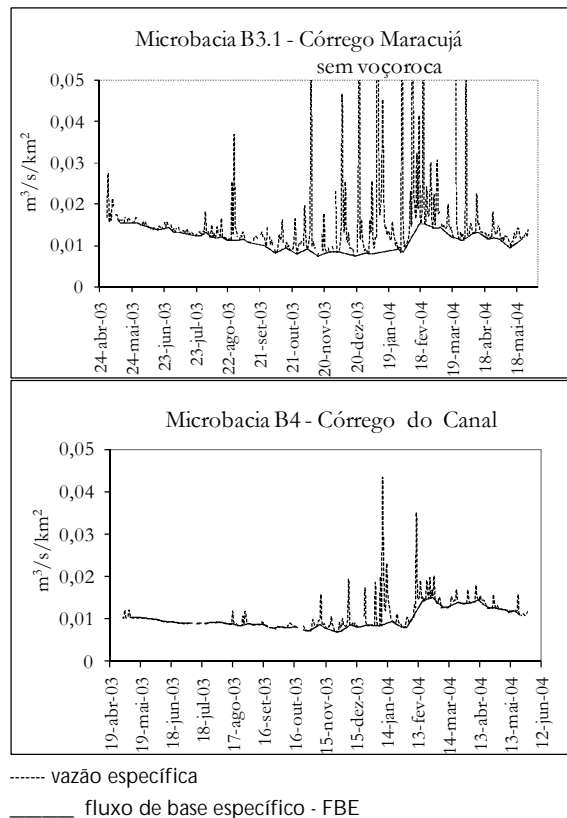
um valor médio da transmissividade dos aquíferos da bacia.

RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos nas bacias e microbacias monitoradas.

Separação do fluxo de base

A técnica smoothed minima é utilizada em softwares específicos (ex.: Hysep - USGS), mas pode também ser aplicada com uso de planilhas eletrônicas (ex.: Excel).



..... vazão específica
 _____ fluxo de base específico - FBE
Figura 2 - Hidrogramas de duas microbacias (B3.1, B4) com a separação do fluxo de base pela técnica smoothed minima (valor máximo da vazão específica limitado em 0,05m³/s/km² para melhor visualização do fluxo de base) (Baseado em Costa, 2005).

Admitindo-se que o fluxo de base varia linearmente entre dois pontos de inflexão (Nathan & McMahon, 1990; Wahl & Wahl, 1995), torna-se possível calcular os valores intermediários e, assim, obter o fluxo de base diário e calcular o IFB (fluxo de

base médio dividido pelo fluxo total médio) para cada microbacia (Figura 2). Deve-se observar que o fluxo de base diário calculado por este procedimento pode, em alguns trechos do hidrograma, ser sutilmente maior que o fluxo total, o que denota uma situação irreal, mas inerente à técnica.

O IFB de cada microbacia foi calculado com base na vazão de um ano hidrológico. Contudo, o período de monitoramento de campo não foi coincidente, pois há uma defasagem de dois meses no período de instrumentação das microbacias (Costa, 2005). Assim, para fins de comparação, considerando que o IFB é um índice sazonal (e, portanto, dependente do período do monitoramento), foi calculado também o IFB para o intervalo de tempo em que todas as microbacias foram monitoradas, ou seja, entre 25/07/03 a 30/05/04 (tabela 1). Não se observaram diferenças significativas dos IFBs calculados em diversos intervalos e, assim, os dados obtidos para o intervalo comum de monitoramento (embora inferior a 1 ano) foram considerados adequados para correlações com outros índices. O FBE (Fluxo de base específico) foi calculado para o ano hidrológico completo de cada microbacia (tabela 1).

Tabela 1 – IFB e FBE das microbacias calculados a partir da smoothed minima.

| Micro bacias | IFB | | | | FBE anual (m³/km²) |
|--------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------|--------------------|
| | 15/05/03 a 14/05/04 | 25/07/03 a 24/07/04 | 25/07/03 a 30/05/04 | | |
| B1 | 0,66 | --- | 0,64 | 112.068,22 | |
| B2 | 0,41 | --- | 0,36 | 20.986,54 | |
| B3 | 0,58 | --- | 0,50 | 174.370,59 | |
| B3.1 | 0,72 | --- | 0,67 | 349.889,74 | |
| B4 | 0,91 | --- | 0,89 | 311.848,10 | |
| B5 | 0,63 | --- | 0,59 | 100.370,50 | |
| B6 | 0,62 | --- | 0,60 | 114.396,90 | |
| B8 | --- | 0,69 | 0,67 | 181.338,54 | |
| B8.1 | --- | 0,17 | 0,14 | 68.948,09 | |

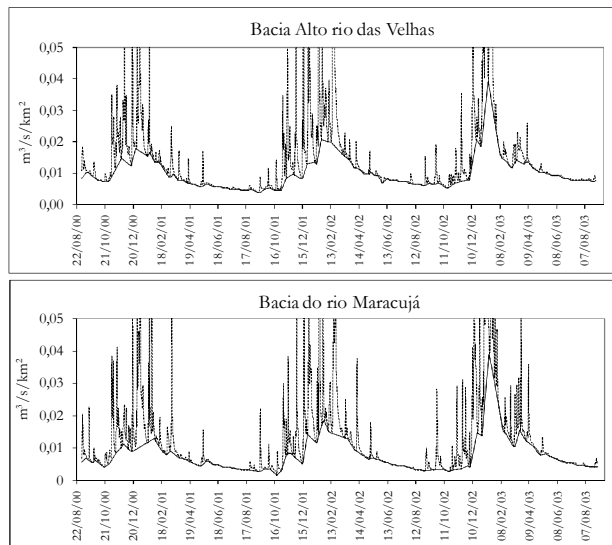
As variações observadas entre os IFB's e FBE's (assim como entre os coeficientes de recessão (?) apresentados a seguir) das microbacias foram analisadas frente às características de cada uma em trabalhos já publicados (Costa, 2005; Costa & Bacellar, 2007; Costa & Bacellar 2009). Ou seja, as respostas hidrológicas de cada microbacia foram compa

Tabela 2 – IFB e FBE anuais das bacias Alto rio das Velhas e rio Maracujá obtidos por meio de smoothed minima e Barnes.

| Código | Bacia | Período | IFB | | FBE anual (m ³ /Km ²) | |
|----------|---------------------|---------------------|--------|------------------------|--|------------------------|
| | | | Barnes | <i>smoothed minima</i> | Barnes | <i>smoothed minima</i> |
| 41152000 | Alto rio das Velhas | Out/2000 a set/2003 | 0,5258 | 0,6893 | 277.030,41 | 327.790,70 |
| 41163000 | Rio Maracujá | Out/2000 a set/2003 | 0,4593 | 0,5762 | 194.862,10 | 248.559,90 |

radas frente aos diferentes contextos físicos e ambientais, o que permitiu estabelecer a influência dos condicionantes geológicos, geomorfológicos e de uso e ocupação do solo na potencialidade hídrica das mesmas.

Para as bacias Alto rio das Velhas e rio Maracujá também foi aplicada a técnica smoothed minima e calculados os respectivos índices IFB e FBE (Figura 3, Tabela 2). Considerando que estas bacias possuem um tempo de monitoramento fluviométrico maior (3 anos), foi possível aplicar também o método de Barnes (Figura 4, Tabela 2).



----- vazão específica
 _____ fluxo de base específico - FBE

Figura 3 - Hidrogramas das bacias Alto rio das Velhas e rio Maracujá com a separação do fluxo de base com a técnica smoothed minima (valor máximo da vazão limitado em 0,05m³/s/km² para melhor visualização do fluxo de base) (Modificado de Costa, 2005).

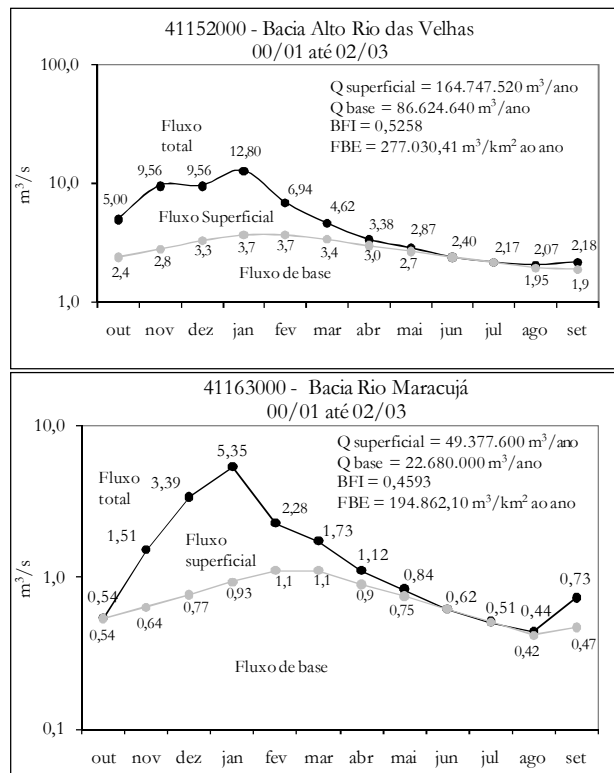


Figura 4 – Hidrogramas das bacias Alto rio das Velhas e rio Maracujá com a separação do fluxo de base pelo método de Barnes (Modificado de Costa, 2005).

Determinação do Coeficiente de Recessão (α)

Nas bacias Alto rio das Velhas e rio Maracujá, aplicaram-se as três técnicas de determinação de α simultaneamente. Por outro lado, como nas microbacias dispõe-se de dados fluviométricos de apenas um ano hidrológico, foram aplicadas as técnicas Matching Strip e Correlação (Figuras 5 e 6).

No método da correlação utilizou-se o intervalo de atraso n=2, como já mencionado. Exclusiva-

Tabela 3 - Coeficientes de recessão obtidos pelo Matching Strip, Correlação (t = 2 e t = 5) e Método de Barnes.

| | Bacia hidrográfica | Coeficiente de recessão (α) | | | |
|--------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|
| | | Matching Strip | Correlação t = 2 dias | Correlação t = 5 dias | Método de Barnes |
| Micro bacias | B1 | 0,00727 | 0,01491 | -- | -- |
| | B2 | 0,01191 | 0,04002 | -- | -- |
| | B3 | 0,01401 | 0,01818 | -- | -- |
| | B3.1 | 0,00432 | 0,0149 | -- | -- |
| | B4 | 0,00334 | 0,00918 | -- | -- |
| | B5 | 0,0105 | 0,03031 | -- | -- |
| | B6 | 0,00749 | 0,027 | -- | -- |
| | B8 | 0,0136 | 0,02079 | -- | -- |
| | B8.1 | 0,041 | 0,048 | -- | -- |
| 41152000 | B. Alto rio das Velhas | 0,00412 | 0,00931 | 0,00636 | 0,00336 |
| 41163000 | B. rio Maracujá | 0,00753 | 0,01076 | 0,00714 | 0,0065 |

mente nas bacias Alto rio das Velhas e rio Maracujá foi possível utilizar também o intervalo n=5, dada a seqüência mais longa de dados disponíveis de vazão.

Nestas técnicas, foram empregados recursos dos programas Excel, Origin e Corel Draw e o procedimento foi repetido por vários operadores, visando um resultado menos subjetivo possível. Os coeficientes de recessão de todas as bacias e microbacias analisadas podem ser observados na tabela 3.

Utilizaram-se os coeficientes de recessão determinados pela técnica matching strip, mais confiáveis. Para as bacias maiores (rio Maracujá e Alto rio das Velhas) não se fez este cálculo, uma vez que seriam necessários estudos mais aprofundados visando, em especial, a comprovação da homogeneidade e da espessura saturada de seus aquíferos constituintes.

Diferentemente da transmissividade, que pode variar em várias ordens de magnitude, o coeficiente de armazenamento (S_y) tende a apresentar valores mais uniformes e previsíveis, quando se conhece o contexto hidrogeológico. Assim, é prática corrente estipular valores de S_y e, assim, avaliar valores de transmissividade. Portanto, atribuíram-se valores máximos e mínimos de S_y para os aquíferos das microbacias, para estimar o intervalo de variação da transmissividade. O coeficiente de armazenamento (S) varia, em geral, entre 0,3 e 0,01 em aquíferos livres (S_y), e entre 0,001 e 0,0001 em aquíferos confinados (Freeze & Cherry, 1979). Considerando-se que a região é caracterizada por um aquífero livre no regolito (de composição argilo ou silto-arenosa) sobre um aquífero livre a semi-confinado em rochas ígneas ou metamórficas sãs (gnaiesses, xistos e grani-

tos), adotaram-se valores de S_y variando entre 0,01 e 0,1 (Costa, 2005).

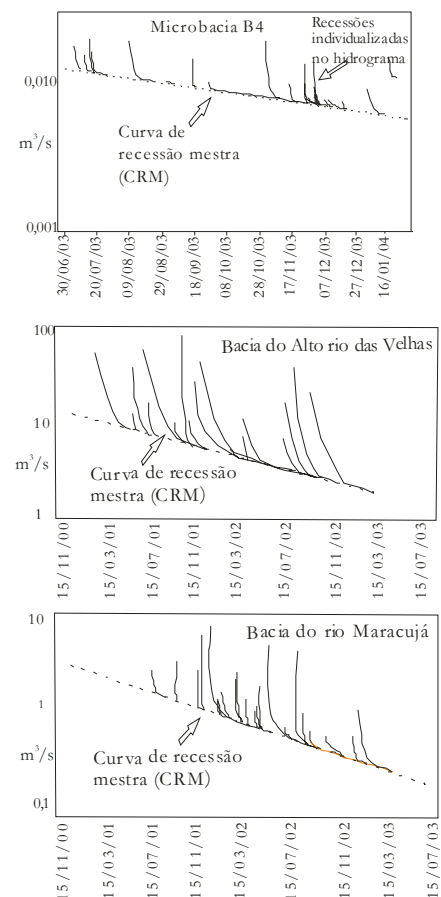


Figura 5 - Método Matching Strip aplicado à microbacia B4 e às bacias Alto rio das Velhas e rio Maracujá (Baseado em Costa, 2005).

Tabela 4 – Valores estimados de difusividade e transmissividade para as microbacias.

| Micro bacia | L (m) | Coeficiente de recessão (<i>matching strip</i>) | Difusividade (T/S) | Valores mínimos | | Valores máximos | |
|-------------|-------|---|--------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|
| | | | | Sy | T (m ² /dia) | Sy | T (m ² /dia) |
| B1 | 615 | 0,00727 | 278,60 | 0,01 | 2,79 | 0,1 | 27,86 |
| B2 | 250 | 0,01191 | 75,42 | 0,01 | 0,75 | 0,1 | 7,54 |
| B3 | 500 | 0,01401 | 354,88 | 0,01 | 3,55 | 0,1 | 35,49 |
| B3.1 | 370 | 0,00432 | 59,92 | 0,01 | 0,60 | 0,1 | 5,99 |
| B4 | 747 | 0,00334 | 188,84 | 0,01 | 1,89 | 0,1 | 18,88 |
| B5 | 440 | 0,0105 | 205,97 | 0,01 | 2,06 | 0,1 | 20,60 |
| B6 | 732 | 0,00749 | 406,63 | 0,01 | 4,07 | 0,1 | 40,66 |
| B8 | 327 | 0,0136 | 147,34 | 0,01 | 1,47 | 0,1 | 14,73 |
| B8.1 | 207 | 0,041 | 178,00 | 0,01 | 1,78 | 0,1 | 17,80 |

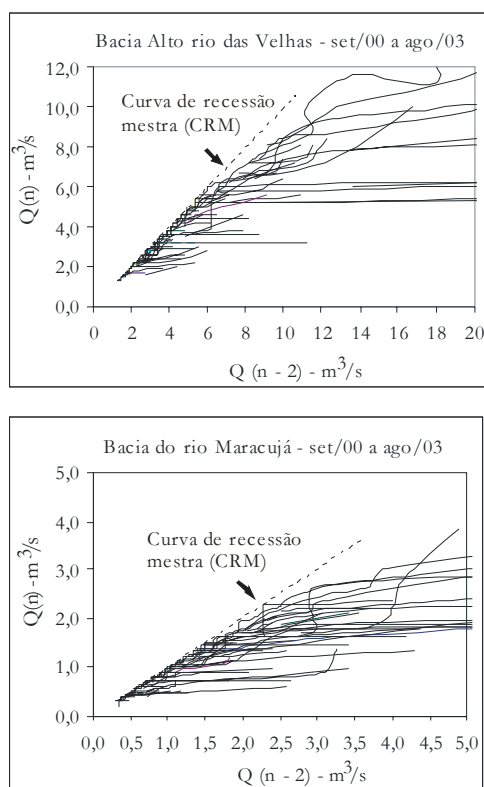


Figura 6 – Método Correlação aplicado às bacias Alto rio das Velhas e rio Maracujá (Baseado em Costa, 2005).

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Separação do fluxo de base

O IFB calculado pela técnica smoothed minima para as microbacias (Tabela 2) corresponde

a simples estimativa, provavelmente superestimada, uma vez que alguns picos de vazão ao longo do ano hidrológico não foram medidos. De fato, como o monitoramento fluviométrico foi feito de 1 a 4 vezes ao dia, eventuais picos de vazão podem não ter sido completamente registrados. De mesma forma, as vazões superiores à capacidade máxima do vertedor, embora de ocorrência rara, também não foram registradas (Costa et. al , 2007).

Nas bacias Alto rio das Velhas e rio Maracujá, o monitoramento da vazão também não foi contínuo e, portanto, os valores de IFB também podem estar superestimados. Apesar destas considerações, os resultados obtidos com o smoothed minima e pelo método de Barnes em hidrogramas com médias diárias e mensais, respectivamente, são coerentes, embora os valores do primeiro sejam ligeiramente maiores (Tabela 2). Como as reservas renováveis são proporcionais ao fluxo de base, verifica-se que algumas bacias apresentam maior disponibilidade hídrica. Costa (2005) demonstrou que a disponibilidade na região depende principalmente de fatores geológicos e geomorfológicos e das condições de degradação do terreno, em especial, da presença de voçorocas.

Determinação do Coeficiente de Recessão (α)

No método da correlação, os pequenos intervalos de recessão nem sempre foram suficientes para definir uma curva de envelopamento (CRM) unívoca, havendo, portanto certa subjetividade na sua definição, em especial para as microbacias B2, B5 e B6. Para as bacias Alto rio das Velhas e rio Maracujá, nas quais foi possível utilizar o intervalo de atraso n=5 (Qn-5), a CRM foi mais facilmente defi-

nida e o α calculado aproximou-se mais daquele obtido pelo método de Barnes. Segundo Nathan & McMahon (1990), quando a inclinação da CRM encontra-se entre 43,50 e 450 (intervalo praticamente coincidente com os valores mais freqüentes dos coeficientes de recessão: 0,93 a 0,995), as constantes de recessão são mais bem discriminadas quando se utilizam intervalos de atraso maiores. Também verificam-se que pequenas variações na inclinação da CRM causam consideráveis variações no coeficiente de recessão (dado o pequeno intervalo geralmente encontrado para α), como observado no exemplo hipotético abaixo (Tabela 5). Possivelmente, tal dificuldade se deve, ao curto período de monitoramento, gerando um volume de dados de vazão insuficiente para se obter resultados confiáveis a partir da rotina empregada. Cabe ressaltar que outros autores (e.g. Nathan & McMahon, 1990) também citam tal deficiência. Assim, os resultados deste método não foram utilizados na avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos das microbacias.

Tabela 5 – Exemplos de α calculados a partir de curvas mestras obtidas com a técnica da correlação. Notar que pequenas variações na inclinação resultarão em substanciais diferenças de α

| Inclinação da CRM ($\Delta y/\Delta x$) | K = $(\Delta y/\Delta x)^{1/2}$ | $\alpha = -\log K$ 0,4343 |
|---|---------------------------------|------------------------------|
| 0,970 | 0,9849 | 0,01523 |
| 0,980 | 0,9899 | 0,01010 |
| 0,990 | 0,9950 | 0,00502 |

Já na aplicação com o matching strip, pôde-se definir mais claramente a CRM e o coeficiente de recessão. De fato, pode-se observar para as bacias onde foram aplicadas as três técnicas simultaneamente (Alto rio das Velhas e rio Maracujá), que os valores de α são coerentes quando se comparam os resultados calculados pelo matching strip e métodos de Barnes (tabela 3).

Parâmetros hidrodinâmicos determinados indiretamente

Para as microbacias B1 a B6, estruturadas em granitos e gnaisses do Complexo do Bação, os valores estimados de T foram coerentes com os determinados por Silva et al. (1994) para esta região a partir de testes de aquífero (T = 25m²/dia), com

ressalvas para as microbacias B2 e B3.1. Cabe ressaltar que, em geral, os valores da transmissividade obtidos indiretamente tendem a ser menores que aqueles determinados por testes de aquífero, em geral executados em poços de maior produtividade, ou seja, em aquíferos com maior transmissividade. Assim, os resultados do método indireto não devem ser usados para estimar a produtividade de poços. Segundo Trainer & Watkins Jr. (1974), os valores obtidos pelos dois métodos (direto e indireto) tendem a ser mais coincidentes para aquíferos homogêneos e com perfis de intemperismo pouco espessos.

Observa-se que as microbacias B2 e B3.1 apresentam os menores valores de difusividade (75,42 e 59,92, respectivamente) e, conseqüentemente, os menores valores de transmissividade. Como apresentam as menores áreas dentre as estruturadas em terreno granito-gnáissico, poder-se-ia supor uma menor espessura saturada (b) quando comparadas com as outras microbacias maiores, o que resultaria em menores valores de T e semelhantes ordens de grandeza da condutividade hidráulica.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstraram que as técnicas alternativas de determinação do fluxo de base (via separação de hidrogramas) e do coeficiente de recessão (através de curvas mestras pelas técnicas matching strip e correlação) são coerentes com os encontrados com o tradicional método de Barnes, com a grande vantagem de se poder utilizar séries fluviométricas curtas e descontínuas. Para a determinação do coeficiente de recessão, a técnica matching strip mostrou-se mais eficaz que a da correlação.

A determinação do FBE e IFB, juntamente com o coeficiente de recessão, permitiu a caracterização das condições do fluxo de base nas nove microbacias estudadas. A partir deste resultado (ou seja, do conhecimento do comportamento hidrológico de cada microbacia) pôde-se, em trabalhos já publicados (Costa, 2005; Costa & Bacellar, 2007; Costa & Bacellar, 2009), prosseguir com a comparação entre as microbacias e averiguar a influência de importantes variáveis (a saber, geologia, geomorfologia, processos erosivos e grau de preservação) no potencial hídrico e no volume de reservas renováveis.

Adicionalmente, os resultados obtidos são consistentes com interpretações prévias (Costa &

Bacellar, 2006) do comportamento hidroquímico das águas destas microbacias.

Adotando-se modelos conceituais simples de geração de fluxo de base, pôde-se estimar a difusividade e a transmissividade média dos aquíferos das respectivas microbacias (método indireto), mesmo com séries fluviométricas curtas. Os dados de transmissividade estimados são coerentes com os esperados para os aquíferos da região.

Portanto, embora ainda pouco empregadas no Brasil, as técnicas analisadas forneceram estimativas das condições dos aquíferos a partir de dados de fácil aquisição e de baixo custo, contribuindo para caracterização hidrogeológica de regiões com poucas informações subterrâneas, como no caso da área pesquisada. Porém, mais estudos ainda são necessários, sobretudo em bacias com grande disponibilidade de informações hidrogeológicas, para verificar a confiabilidade dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

- CASTANY, G. Tratado Practico de las Aguas Subterraneas. Barcelona: Omega, 1971.
- CHORLEY, R.J. The Hillslope Hydrological Cycle. In: Kirkby, M.J. (Eds.) Hillslope Hydrology. 3ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1980.
- COSTA, F.M. Análise por métodos hidrológicos e hidroquímicos de fatores condicionantes do potencial hídrico de bacias hidrográficas – Estudo de casos no Quadrilátero Ferrífero – MG. Ouro Preto, 2005. 147p. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental e Conservação de recursos naturais). Departamento de Geologia - UFOP
- COSTA F.M, BACELLAR L.A.P. Análise hidrogeoquímica como suporte na investigação das condições dos fluxos subterrâneos. In: Enc. Reg. Soc. Bras. Química – MG, São João Del Rei – MG. 2006. XX. CD-ROOM
- COSTA F.M., BACELLAR L.A.P. Analysis of the influence of gully erosion in the flow pattern of catchment streams, Southeastern Brazil. CATENA, v.69, issue 3, p. 230-238. 2007
- COSTA F.M, BACELLAR L.A.P., SILVA E.F. 2007. Vertedores Portáteis em microbacias de drenagem. REM – Revista da Escola de Minas. v.60, p.213 - 218, 2007
- COSTA F.M, BACELLAR L.A.P. The hydrogeologic potential conditioning factors of hydrographic catchments of Upper Velhas River Basin, Southeastern Brazil.. Environmental Geology (Berlin). , V.59 N.1; p 89-97, 2009.
- CUSTODIO, E. & LLAMAS, M.R. Hidrologia Subterrânea. Vol.2. Barcelona: Omega, 1976.
- DEWANDEL, B.; LACHASSAGNE, P.; BAKALOWICZ, M.; WENG PH.; AL-MALKI A. Evaluation of aquifer thickness by analyzing recession hydrographs. Application to the Oman ophiolite hard-rock aquifer. Journal of Hydrology. v. 274, p. 248-269, 2003.
- DORR J.V.N. Physiographic, stratigraphic and structural development of Quadrilátero Ferrífero, Brazil. U.S.Geological Survey Professional Paper. 641(A): 110p, 1969.
- DUNNE, T. Field Studies of Hillslope Flow Processes. In: KIRKBY, M.J. (Eds.) Hillslope Hydrology. 3ed. John Wiley & Sons, 1980
- FEITOSA, A.C. & MANOEL FILHO, J. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Fortaleza: CPRM - LABHID-UFPE, 1997
- FETTER, C.W. Applied Hydrogeology. 2.ed. Oshkosh: Merrill Publishing Company, University of Wisconsin, 1988.
- FREEZE, R.A. & CHERRY, J.A. Groundwater. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1979.
- KRESIC, N. Quantitative solutions in hydrogeology and groundwater modeling. Florida: CRC Press LCC, 1997.
- LACEY, G.C. & GRAYSON, R.B. Relating baseflow to catchment properties in south-eastern Australia. Journal of Hydrology. v. 204, p. 231-250, 1998
- LANGBEIN, W.B. Some channel-storage studies and their application to the determination of infiltration. Reports and Papers, hydrology. AGU, v. 19, p. 435-447, 1938.
- NATHAN, R.J. & MCMAHON, T.A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. Water Resources Research. v. 26, p. 1465-1473, 1990
- REBOUÇAS A.C, RICCOMINI C., ELLERT N., DUARTE U., MELLITO K. M., SENF L.A., SOUZA J.C.S. Diagnóstico Hidrogeológico da Região Metropolitana de São Paulo/RMSP. In: ABAS, Cong. Bras. de Águas Subterrâneas 8. Recife, 1994. Anais, p.93-102
- SILVA R.F.G. Estimativa de parâmetros hidrodinâmicos de aquíferos em áreas de embasamento através de métodos indiretos. Ouro Preto, 2009. 109p. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental e Conservação de recursos naturais). Departamento de Geologia – UFOP
- SILVA A.B., NETO A.F.S., BERTACHINI A.C. Potencial das águas subterrâneas do Quadrilátero Ferrífero. In: ABAS, Cong. Bras. de Águas Subterrâneas 8. Recife, 1994. Anais, p.264 – 273
- SMAKHTIN, V.U. Low flow hydrology: a review. Journal of Hydrology. v. 240, p. 147-186, 2001
- SNYDER, F.F. A conception of runoff-phenomena. Reports and papers, hydrology. AGU, v. 20, p. 725-738, 1939

- TALLAKSEN, L.M. A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology*. v. 165, p. 349-370, 1995
- TRAINER, F.W. & WATKINS JR., F.A. Use of base-runoff recession curves to determine areal transmissivities in the upper Potomac river basin. *Journal Research - USGS*, v. 2, p. 125-131, 1974
- USAE. Engineering and Design - Groundwater Hydrology. Department of the Army. US Army corps of Engineers. Washington, n. 1110-2-1421, p 1-90, 1999
- ZECHARIAS, Y.B. & BRUTSAERT, W. Recession Characteristics of Groundwater Outflow and Base flow from Mountainous Watersheds. *Water Resources Research*. v. 24, n. 10, p. 1651-1658, 1988
- WAHL, K.L. & WAHL, T.L. Determining the flow of Comal Spring at New Braunfels, American Society of Civil Engineers, Texas, n. 16, p. 77-86, 1995.
- WINTER, T.C.; HARVEY, J.W.; FRANKE, O.L.; ALLEY, W.M. Ground Water and Surface Water – A single resource, USGS Circular, n. 1139, p. 1-79, 1998.

Hydrogeologic Characterization of an Aquifer Using Base Flow

ABSTRACT

Surface water shows a dynamic interaction and mutual interferences with groundwater. This interconnection supports the indirect methods of hydrogeologic characterization, which allows establishing aquifer characteristics based on knowledge of its streamflow - the baseflow - which is determined from the treatment of streamflow series. The indexes obtained with these treatments – base flow volume and its decay rate or recession coefficient – are usually determined by the traditional Barnes method. This paper analyses alternative techniques to obtain these indexes - smoothed minima, matching strip and correlation - which have the advantage of working with shorter and discontinuous streamflow series data. Nine catchments and two basins were monitored for one and three years, respectively. The results, especially with the matching strip and smoothed minima techniques, were consistent with those found by the Barnes method and with previous interpretations of the hydrochemical behavior of such catchments. It has been proved that these techniques supply important and reliable information about the aquifers based on low cost, easily accessible data, contributing for the hydrogeologic characterization of regions without enough groundwater information.

Key-words: recession coefficient, baseflow, catchments, hydrodynamic parameters; hydrologic method.