

Regionalização da Depleção Regional com Dados Primários de Vazão

Geraldo Lopes da Silveira, Jussara Cabral Cruz

*Departamento de Hidráulica e Saneamento – CT/UFSM – Cidade Universitária
geraldo@ct.ufsm.br*

André Luiz Lopes da Silveira

*Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS
andre@iph.ufrgs.br*

Rafael Cabral Cruz

*Centro Universitário Franciscano – UNIFRA
rafacruz@plug-in.unifra.br*

Recebido: 20/08/04 revisado: 26/04/05 aceito: 19/07/05

RESUMO

Este artigo propõe um método de obtenção de fatores de proporcionalidade de vazões mínimas entre pontos de uma rede fluvial, com base em algumas medições de vazão nestes pontos, durante fases de deplecionamento da bacia hidrográfica. As medições de vazão, consideradas como dados primários, pois não são obtidas por curvas-chave, são correlacionadas com características fisiográficas clássicas num processo de regionalização que integra estas com características da depleção. O método da regio-depleção, como foi denominado, é para uso em bacias com poucas estações fluviométricas onde há necessidade de síntese de vazões mínimas características em vários pontos, a partir das séries fluviométricas destas estações. O método é especialmente atrativo para necessidades de outorga em bacias com dados fluviométricos escassos. Com este intuito ele foi desenvolvido e aplicado à bacia do rio Santa Maria no Rio Grande do Sul. Algumas campanhas intensivas de medições de vazão nas seções fluviais de interesse foram suficientes para estimativa consistente dos referidos fatores de proporcionalidade.

Palavras –chave : outorga, regionalização, vazão mínima, Rio Grande do Sul

INTRODUÇÃO

Há uma idéia preconcebida em hidrologia de que somente se pode extrair informações úteis quando as séries de vazões observadas são longas. Há uma espécie de descrédito sobre a utilidade de registros fluviométricos curtos ou de medições de vazão oriundas de algumas poucas campanhas. Sustentando idéia contrária, Silveira e Tucci (1998) demonstraram que séries parciais de fluviometria, sem os registros de cheias, eram suficientes para caracterizar a disponibilidade hídrica de pequenas bacias. Em outros trabalhos Silveira e Silveira (1996) e Silveira *et al.* (1998) desenvolveram a idéia de que algumas medições de vazão na depleção fornecem uma informação hidrológica significativa para uma síntese de vazões, por modelagem chuva-vazão, voltada para o ramo inferior da curva de

permanência. No presente artigo é retomada a idéia de que vazões em depleção, mesmo em amostras reduzidas, trazem consigo uma informação consistente sobre as vazões mínimas de uma bacia. Só que esta idéia é estendida ao espaço geográfico da bacia com vistas a estabelecer inter-relações na rede fluvial. A hipótese adotada, portanto, é de que é possível estabelecer relações consistentes entre vazões mínimas de sub-bacias com base em poucos registros de vazão em depleção e informações fisiográficas regionais tradicionais, como áreas contribuintes, comprimentos dos rios principais e declividades. Apoiando-se nesta hipótese o objetivo deste artigo é propor um método de obtenção de fatores de proporcionalidade de vazões mínimas entre pontos de uma rede fluvial, de uma bacia com dados escassos, que seja superior ao método da proporção de áreas.

PROPORCIONALIDADE DE VAZÕES

Na regionalização hidrológica, a expressão da vazão mínima média com determinada duração pode ser representada da seguinte forma (Tucci, 1993):

$$Q_{\min} = aA^b L^c S^d P^e t^f \quad (1)$$

onde A é a área da bacia, L é o comprimento do rio principal, S, sua declividade média, P a precipitação média anual e t a duração da vazão mínima ; as letras a, b, c, d, e, f são parâmetros de ajuste regionais. Outras variáveis, além de A, L, S e P poderiam também ser consideradas na expressão, como a declividade média da bacia ou um fator representativo da geologia ou solo.

Considerando a expressão acima pode-se estabelecer, então, um fator de proporcionalidade de vazões mínimas de mesma duração entre duas bacias quaisquer da região. Identificando-se pelo sub-índice "i" uma das bacias e por "j", a outra, a razão mostrada a seguir corresponde a um fator de proporcionalidade de vazões :

$$k_{i,j} = \frac{Q_{\min}^i}{Q_{\min}^j} = \frac{A_i^b L_i^c S_i^d}{A_j^b L_j^c S_j^d} \quad (2)$$

Este fator $k_{i,j}$ é o fator que multiplica a vazão da bacia "j" para obter a correspondente vazão da bacia "i". Na expressão 2 foi considerada a mesma precipitação P nas duas bacias.

Um caso particular é quando somente a variável área está presente e ela possui expoente unitário. Trata-se do conhecido fator de proporção de áreas :

$$k_{i,j} = \frac{Q_{\min}^i}{Q_{\min}^j} = \frac{A_i}{A_j} \quad (3)$$

Comparada com esta, a expressão anterior, mostra-se, por evidência, mais abrangente e flexível para absorver as diversas informações fisiográficas, cujo conjunto pode embutir processos não explícitos, como até mesmo os referentes ao comportamento dos aquíferos da região.

DEPLEÇÃO REGIONAL

A curva de depleção de vazões em um rio está associada ao esvaziamento dos aquíferos da

bacia contribuinte e tem a seguinte expressão :

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (4)$$

onde Q_t é a vazão mínima no instante t, Q_0 é a vazão de referência no instante t_0 e α é o coeficiente de depleção.

Para um conjunto de sub-bacias de uma bacia é possível imaginar que possa existir uma curva de depleção representativa regional, mas para isso é preciso que as vazões de depleção de cada uma delas sejam vazões específicas (vazões por unidade de área contribuinte). Para obter tal curva regional com dados primários, ou seja com vazões diretamente medidas em campo, não há necessidade de simultaneidade das medições, sendo necessário apenas que estejam participando de um único processo de esvaziamento da bacia. Assim considerado, a equação de depleção das vazões específicas pode ser escrita como :

$$q_t = q_0 e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (5)$$

onde q_t é a vazão mínima específica no instante t, q_0 é a vazão de referência no instante t_0 e α é o coeficiente de depleção.

Um modelo de depleção regional poderia ser ajustado com a equação 5, tendo-se o conjunto de vazões específicas obtidas como :

$$q_t^i = \frac{Q_t^i}{A_i} \quad (6)$$

onde q representa as vazões específicas das medições, Q_t , as vazões de depleção realmente medidas em todas as sub-bacias "i" e diversos instantes t ; A_i são as áreas destas sub-bacias. Os instantes t representam os horários das medições, tomados relativamente a uma referência t_0 .

Entretanto, a utilização da vazão específica pode ser restritiva, pois apenas a área participa como variável fisiográfica explicativa. A necessidade de flexibilização e maior abrangência explicativa, com a consideração de mais variáveis fisiográficas conduziram à proposição do método a seguir.

REGIONALIZAÇÃO COM DEPLEÇÃO : MÉTODO DA REGIO-DEPLEÇÃO

Para possibilitar a utilização de outras variáveis, além da área, na composição de uma vazão

específica, considera-se que a equação 6 pode evoluir de modo análogo à evolução da equação 2 em relação à equação 3, ou seja, propõe-se uma variável do tipo :

$$u_t^i = \frac{Q_t^i}{A_i^b L_i^c S_i^d} \quad (7)$$

onde u é definida como uma *vazão específica fisiográfica* (m³/s por unidade do fator do denominador), Q_t e A_i foram definidas acima e L_i e S_i são, respectivamente, comprimentos e declividades dos rios principais das sub-bacias.

A variável u é análoga à variável q, assim pode-se propor para u uma equação de depleção regional com a mesma estrutura da equação (5), ou seja, é possível considerar uma depleção regional adimensional do tipo :

$$u_t = u_0 e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (8)$$

onde u₀ é o valor de referência de u no instante t₀.

A vantagem desta equação é que ela propicia uma regionalização, filtrando a influência da depleção em vazões medidas em sub-bacias e intervalos de tempo diferentes, mas que ocorreram em um mesmo processo de esvaziamento da bacia.

Portanto, o método, que chamamos aqui de Método da Regio-Depleção, mescla as equações 7 e 8 de forma a obter uma equação de regressão capaz de fornecer os parâmetros regionais b, c, d. Os parâmetros da depleção (α, t₀) são coadjuvantes no processo, apesar de obtidos simultaneamente com os regionais no procedimento de regressão.

Assim, para cada depleção, tem-se :

$$Q_t = u_0 A^b L^c S^d e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (9)$$

A forma de ajuste sugerida é por mínimos quadrados. Há tantos conjuntos de A, L e S quanto de sub-bacias, mas normalmente deve haver mais de uma medição por sub-bacia, durante a campanha. Desta forma haverá uma amostra de Q, A, L, S, e t de tamanho igual ao número de vazões medidas na depleção. Se houver mais de uma depleção com vazões para ajuste, a estratégia mais conveniente para um cálculo mais preciso dos fatores de proporcionalidade de vazões é montar um esquema de otimização para obter um único conjunto dos expoentes de A, L e S, deixando livre a busca de um par α e u₀ para cada depleção isolada.

Para atender o objetivo, o método proposto obtém assim, portanto, os expoentes b, c, d. O passo metodológico seguinte é utilizá-los na equação 2 e obter os fatores de proporcionalidade de vazões mínimas desejados para espacializar vazões mínimas de interesse, como, por exemplo, a Q_{7,10} (vazão mínima de 7 dias consecutivos e 10 anos de período de retorno) ou a Q₉₅ (vazão de 95% de permanência no tempo). A aplicação da equação 2 é simples, pois basta identificar as sub-bacias “fonte” (sub-bacias “j”) e as sub-bacias “alvo” (sub-bacias “i”). As sub-bacias que podem ser do tipo “fonte” são aquelas da rede hidrometeorológica nacional com séries fluviométricas das quais é possível calcular as vazões mínimas de interesse. Assim, para que o método proposto funcione é preciso que as vazões medidas em depleção tenham ordem de grandeza semelhante às vazões mínimas que se quer espacializar.

O método apresentado neste artigo pode ser avaliado, entre outras possibilidades, de duas formas

- Por comparação com um procedimento de regionalização tradicional aplicado às vazões de depleção medidas;
- Por comparação com os fatores de proporcionalidade do primeiro modelo candidato nestas circunstâncias, que é o modelo de proporção de áreas contribuintes.

A primeira forma de avaliação usa como teste implícito observar o que acontece com a desconsideração do efeito da depleção e sua cronologia. Como o método proposto filtra o efeito da depleção, embutido na informação regional de vazões medidas durante o esvaziamento da bacia, configura-se uma oportunidade de avaliar esse efeito pela comparação dos resultados da equação 9 com os da equação 10 abaixo :

$$Q_t = a A^f L^g S^h \quad (10)$$

A segunda forma de avaliação visa cotejar o método proposto com aquele que é naturalmente aventado em primeiro lugar, pela sua simplicidade em estimar fatores de proporcionalidade de vazões pela proporção de áreas. Um modelo mais sofisticado só se justifica se for melhor que um mais simples normalmente empregado. Em suma, esta segunda forma é a comparação do desempenho dos índices das equações 2 e 3.

Em tese poderia haver uma terceira forma de avaliação, também com dados primários de vazão se, no conjunto das medições de postos com séries longas, fosse possível estabelecer fatores de proporcionalidade entre as vazões de estiagem. Entretanto, as medições destes postos fluviométricos oficiais são normalmente isoladas no tempo e dificilmente conseguem registrar os processos de depleção, não sendo nem mesmo concomitantes, muitas vezes.

BACIA DO RIO SANTA MARIA /RS

A bacia hidrográfica do rio Santa Maria está situada na fronteira sudoeste do Rio Grande do Sul, abrangendo os municípios de Santana do Livramento, Dom Pedrito, Lavras do Sul, Rosário do Sul, Cacequi e São Gabriel. Orientada em sentido sul-norte, a bacia hidrográfica do rio Santa Maria apresenta a aparência aproximada de um “y” invertido, sendo os braços do “y”, respectivamente à leste e oeste, os rios Santa Maria e Ibicuí-da-Armada, que se encontram junto à cidade de Rosário do Sul. A partir desta confluência, o rio Santa Maria segue ao norte até encontrar o rio Ibicuí-Mirim para formar o rio Ibicuí, recebendo neste trajeto as águas do rio Cacequi, na sua margem direita e do arroio Saicã na sua margem esquerda, já próximo ao exutório da bacia. A bacia hidrográfica apresenta uma forma que lembra o corpo de um violão, apresentando um estreitamento por volta da latitude 30° 30' S. A Figura 1 apresenta a localização da bacia hidrográfica do rio Santa Maria.

A área em estudo caracteriza-se especialmente pela atividade agropecuária, apresentando paisagens típicas da fronteira gaúcha, onde a pecuária extensiva tradicional se mescla com a orizicultura moderna, em campos entremeados com várzeas ocupadas por rotação de pastagem natural e lavoura de arroz. Esta paisagem apresenta um eixo de mudanças leste-oeste, que reflete as transições do Escudo Riograndense, Depressão Central e Planalto da Campanha, configurando os padrões que caracterizam as diferenças observadas entre as sub-bacias referentes aos braços Santa Maria e Ibicuí-da-Armada, que possuem suas cabeceiras nas margens opostas deste gradiente.

A crescente escassez de água e conflitos de uso, como é o caso da bacia do rio Santa Maria, na região hidrográfica do Uruguai, indica a necessidade de implantar a outorga de uso da água, de forma a minimizar os conflitos já existentes e evitar aqueles potenciais. Assim, a bacia do Rio

Santa Maria foi objeto de estudos recentes visando o desenvolvimento de metodologias para implantação de um projeto piloto de outorga no Estado do Rio Grande do Sul (UFSM/SEMA, 2002). Para essa finalidade, a rede de drenagem foi dividida em trechos de gerenciamento (Figura 1). O problema hidrológico se concentra, então, na avaliação de disponibilidades hídricas para as seções hidrológicas de referência (SHRs) que delimitam os trechos estabelecidos, com base nas informações existentes e em campanhas de medição de vazão.

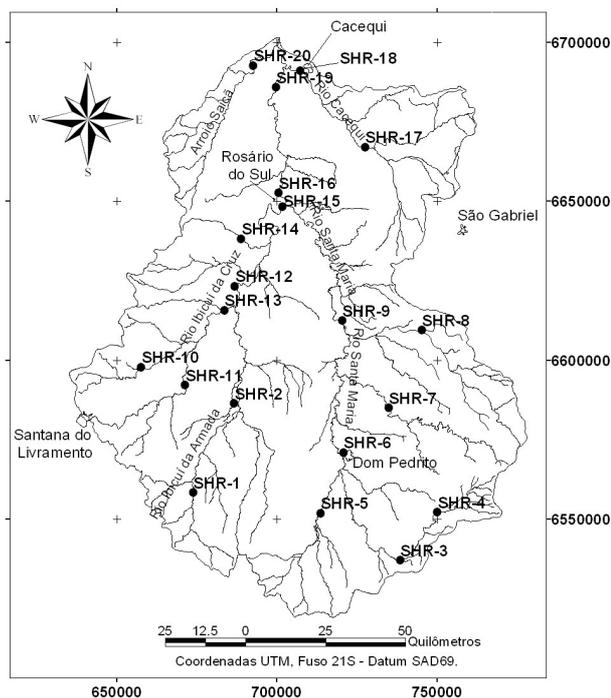


Figura 1 – Bacia do Rio Santa Maria/RS

A bacia do rio Santa Maria dispõe de uma reduzida base de dados e informações hidrometeorológicas da Agência Nacional de Águas. Atualmente estão em operação na bacia nove estações pluviométricas (Torquato Severo, Dom Pedrito, Três Vendas, Santana do Livramento, Santa Rita, Rosário do Sul, Granja Umbu, Saicã e Cacequi) e apenas duas estações fluviométricas: no rio Santa Maria em Rosário do Sul, com área de drenagem de 12.077 km², e no rio Ibicuí da Armada em Ponte Ibicuí da Armada, com área de 6.005 km². A presente escassez de informações conduziu à necessidade de utilização de técnicas regionais para estimativa das vazões nos locais sem dados, o que culminou pelo desenvolvimento da metodologia ora proposta.

Índices fisiográficos dos trechos de gerenciamento de cada SHR

A obtenção dos índices fisiográficos, necessários à aplicação da metodologia para estimativa da disponibilidade hídrica em cada SHR, foi realizada através de mapas digitalizados, com o auxílio de técnicas de geoprocessamento. Os principais mapas utilizados na determinação dos índices foram:

- Mapa altimétrico obtido por interpolação através de um modelo de triangulação (TIN), a partir das curvas de nível e pontos cotados digitalizados com origem em cartas da DSG 1:50.000 e projetados sobre uma grade com células de 50m.
- Mapas geológico e de solos vetorizados respectivamente a partir das cartas da CPRM em escala 1:100.000, editadas em 1986, e do projeto RADAMBRASIL.
- Mapa de cobertura e uso dos solos obtido com classificação supervisionada da imagem do satélite Landsat TM7 de outubro de 2001, pela técnica de máxima verossimilhança.

A bacia de contribuição de cada SHR é definida como a área total de contribuição àquela seção, desde a nascente, incluindo, quando for o caso, as SHRs situadas à montante. Da mesma forma define-se como critério para o rio principal aquele mais longo. Os índices obtidos estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Índices fisiográficos e métodos de estimativa

Elemento	Índice	Método
Bacia	A = Área	Diretamente em modo vetorial
Rio Principal	L = Comprimento	Diretamente em modo vetorial
Rio Principal	S = Declividade média	multiplicação do mapa de declividades expressas em porcentagem pelo mapa booleano (rio = 1, vertente = 0).

Na Tabela 2 estão colocados os valores obtidos dos índices.

Medições de vazões nas sub-bacias

As medições de vazão utilizadas no estudo são oriundas da campanha de campo realizada entre 27 de janeiro e 06 de fevereiro de 2002. Foram realizadas 54 medições de vazão em 18 sub-bacias delimitadas por SHRs. As vazões medidas e as correspondentes vazões específicas estão nas Tabelas 3 e 4, em ordem cronológica. A estratégia da campanha de campo, de três medições por SHR, procurou captar o regime hidrológico de depleção na bacia. Mesmo com a ocorrência de chuvas, que sempre podem acontecer em meio a campanhas, a despeito de previsões, a campanha realizada logrou em extrair informações hidrológicas de interesse. A análise realizada, com base na seqüência cronológica das vazões específicas, permitiu distinguir três grupos de vazões (Figura 2), dois referentes a processos de depleção regional (da bacia como um todo) e um terceiro, reunindo vazões de cheias parciais em locais isolados da bacia e outros casos, incluindo algumas poucas inconsistências.

Tabela 2 – Índices fisiográficos das SHRs

SHR	A km ²	L km	S %
1	303,2	39,5	0,591
2	1916,1	82,8	0,503
3	415,3	57,2	2,065
4	225,6	29,5	1,460
5	700,2	45,8	1,119
6	2116,7	116,7	1,214
7	578,9	76,8	3,757
8	638,1	62,9	2,928
9	4971,6	206,3	0,728
10	256,2	33,1	4,288
11	641,0	55,7	1,559
12	4540,9	140,6	0,531
13	1719,5	95,4	0,943
14	206,2	25,2	1,668
15	5998,1	196,5	0,394
16	12102,0	293,1	0,513
17	1240,6	51,8	0,961
18	1845,2	90,6	0,794
19	13025,6	341,3	0,452
20	720,4	61,8	1,718
21	15797,3	362,6	0,427

Tabela 3 – Medições de vazão em ordem cronológica
(medições 1 a 27)

N	SHR	Data	Q (m ³ /s)	q (l/s/km ²)
1	17	27/1/02 15:35	1,93	1,574
2	18	27/1/02 18:30	1,47	0,793
3	20	28/1/02 9:00	2,17	3,007 (1)
4	19	28/1/02 11:00	62,6	4,827 (1)
5	15	28/1/02 14:45	45,0	7,506 (1)
6	16	28/1/02 17:35	70,7	5,861 (1)
7	14	28/1/02 19:00	0,988	4,466 (1)
8	12	29/1/02 8:15	25,2	5,511 (1)
9	13	29/1/02 10:20	5,30	3,094 (1)
10	11	29/1/02 12:00	1,77	2,668 (1)
11	10	29/1/02 15:15	0,548	2,141 (1)
12	2	29/1/02 18:00	6,01	3,044 (1)
13	4	30/1/02 8:00	0,320	1,472 (1)
14	6	30/1/02 10:35	5,42	2,388 (1)
15	5	30/1/02 12:05	1,16	1,659 (1)
16	3	30/1/02 15:45	0,441	1,100 (1)
17	8	30/1/02 17:10	1,03	1,639 (1)
18	7	30/1/02 18:20	0,933	1,790 (1)
19	19	1/2/02 8:35	106,5	8,213 (2)
20	17	1/2/02 11:00	7,28	5,935 (2)
21	16	1/2/02 13:00	84,2	6,979 (2)
22	12	1/2/02 14:45	38,0	8,318 (2)
23	11	1/2/02 15:50	2,62	3,948 (2)
24	6	1/2/02 19:00	79,4	34,969
25	5	2/2/02 10:30	19,8	28,330
26	3	2/2/02 18:15	11,2	28,016
27	4	2/2/02 19:45	1,25	5,740 (2)

(1) primeira depleção

(2) segunda depleção

Isto significa que a campanha realizada conseguiu evidenciar a depleção regional na bacia e medir duas amostras desta depleção, as quais foram objeto de aplicação do método proposto. Os dados numéricos destas depleções estão sinalizados nas Tabelas 3 e 4.

Na Tabela 3 está toda a primeira depleção e parte da segunda. Na Tabela 4 está a segunda metade das medições com o resto da segunda depleção.

Tabela 4 – Medições de vazão em ordem cronológica

(medições 28 a 54)

N	SHR	Data	Q (m ³ /s)	q (l/s/km ²)
28	2	3/2/02 0:00	25,5	12,901
29	13	3/2/02 0:01	8,99	5,244 (2)
30	20	3/2/02 0:02	7,31	10,112
31	10	3/2/02 11:10	1,02	4,001 (2)
32	14	3/2/02 14:25	0,971	4,389 (2)
33	15	3/2/02 16:35	51,3	8,559
34	18	3/2/02 18:00	8,20	4,427 (2)
35	7	4/2/02 0:00	8,32	15,958
36	8	4/2/02 8:35	1,54	2,445 (2)
37	17	4/2/02 10:30	4,17	3,401 (2)
38	18	4/2/02 12:20	7,68	4,146 (2)
39	20	4/2/02 16:55	7,69	10,629
40	19	4/2/02 18:50	124,1	9,569
41	13	5/2/02 0:00	5,19	3,026 (2)
42	16	5/2/02 9:40	112,3	9,312
43	15	5/2/02 10:35	46,7	7,791
44	14	5/2/02 11:35	0,541	2,446 (2)
45	12	5/2/02 12:45	29,7	6,495
46	10	5/2/02 16:15	0,249	0,973
47	11	5/2/02 17:50	2,18	3,286
48	2	5/2/02 19:05	19,9	10,066
49	6	6/2/02 9:00	36,4	16,055
50	5	6/2/02 10:45	16,4	23,468
51	3	6/2/02 13:15	1,09	2,720 (2)
52	4	6/2/02 14:45	0,572	2,631 (2)
53	7	6/2/02 16:10	1,49	2,867 (2)
54	8	6/2/02 17:55	1,03	1,628 (2)

(2) segunda depleção

Com respeito aos dados disponíveis da rede fluviométrica oficial, as informações contidas na Tabela 5 esclarecem sobre a precariedade observacional da hidrologia da bacia do rio Santa Maria. Há apenas duas estações em operação e mesmo que as extintas estivessem operando ainda assim a cobertura espacial seria deficiente. De qualquer forma, para os propósitos deste artigo, haviam seis postos cujos conjuntos de medições de vazão poderiam ser utilizadas nas avaliações, mas a falta de concomitância na maioria das datas das vazões de estiagem, fez abandonar sua utilização como uma eventual referência de validação.

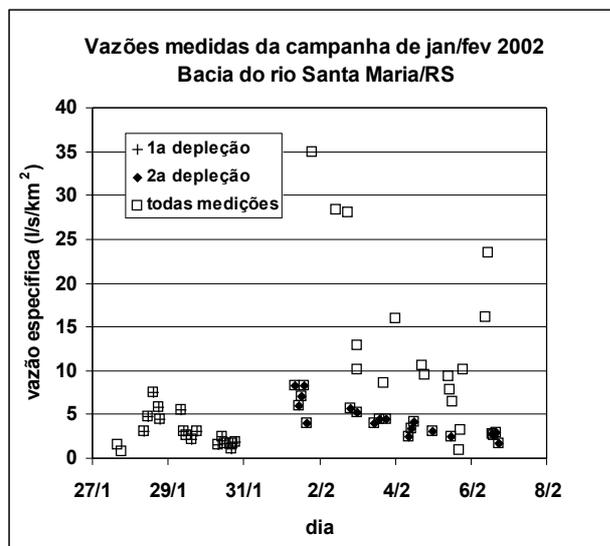


Figura 2 – Medições de vazão e depleções

Tabela 5 - Postos Fluviométricos da Bacia do Santa Maria

Código	Nome	Curso D'água	Área (km ²)	Período
76250000	Dom Pedrito	Rio Santa Maria	2101	1941-1977
76260000	P. do Guterres	Ar. Taquarembó	577	1976-1989
76300000	P. Ibic. Armada	R. Ibic. Armada	6005	1967-
76310000	Rosário do Sul	Rio Santa Maria	12077	1967-
76360001	Azevedo Sodré	Rio Cacequi	1220	1976-1987
76380000	Cacequi	Rio Cacequi	1826	1940-1979

RESULTADOS

A partir dos dados de vazão das duas depleções selecionadas, o método proposto foi aplicado, obtendo-se os resultados da Tabela 6. O coeficiente de determinação médio (Nash-Stucliffe) foi de $R^2 = 0,73$. Os valores b, c, d guardam coerência física, atestando vazões mínimas maiores com o aumento da área e declividade e vazões mínimas menores com o aumento da declividade. As depleções sucessivas explicam a queda do parâmetro α pois as reservas d'água estão maiores na bacia quando se dá a segunda depleção, que foi, por isso, mais suave. Os parâmetros α e u_0 não intervêm no cálculo dos coeficientes de

transposição, apenas possibilitam o cálculo dos parâmetros b, c, d, estes sim, integrantes das expressões desses coeficientes, conforme visto anteriormente.

Tabela 6 – Parâmetros ajustados

Parâmetro	1ª depleção	2ª depleção
b (*)	0,773	
c (**)	0,271	
d (***)	-0,310	
u_0	11,11	10,60
α	0,423	0,183

(*) válido para área em km²

(**) válido para comprimento de rio em km

(***) válido para declividade do rio em %

A Figura 3 mostra o aspecto visual da adequação das curvas de vazão (específica) fisiográfica propiciado por ajuste de todos os parâmetros às duas depleções observadas. Nota-se uma boa representatividade das curvas, permitindo uma boa confiabilidade dos parâmetros dos coeficientes k de transposição de vazões.

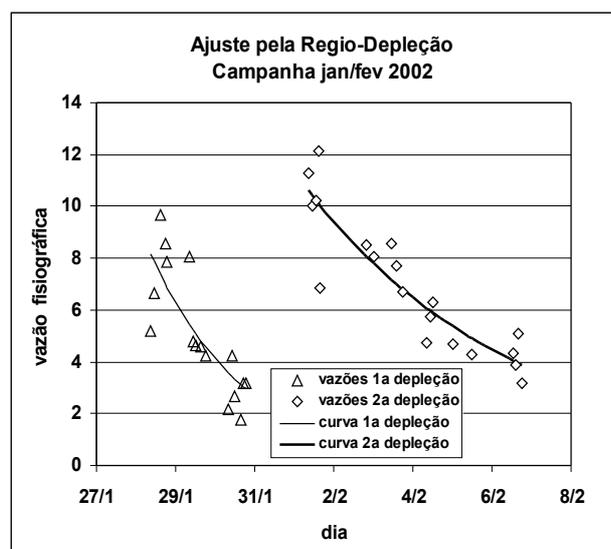


Figura 3 – Ajuste do método

DISCUSSÃO

Uma avaliação mais objetiva foi feita comparando-se os resultados do método com aqueles dos métodos da proporção de áreas e regionalização aplicados às mesmas vazões das depleções analisadas. A Figura 4 resume esta

comparação. O método da proporção de áreas é trivial e foi aplicado tendo por base a SHR 16 (Rosário). O método da regionalização consistiu na regressão da vazão (equação 10) em função das mesmas variáveis utilizadas na regio-depleção A, L e S (área da bacia, comprimento e declividade), desconsiderando-se a cronologia, ou seja, o efeito das depleções.

Os coeficientes de determinação grafados na Figura 4 demonstram os melhores resultados do método proposto ($R^2 = 0,978$ contra $0,927$ da proporção de áreas e $0,941$ da regionalização). O método da proporção de áreas, comparativamente ao método da regio-depleção, tem uma reta de valores esperados mais inclinada em relação à reta da igualdade exata, e uma dispersão maior dos pontos, o que baixou seu R^2 . O método da regionalização teve um R^2 intermediário, mas suas predições (não mostradas na Figura 4) foram de qualidade inferior. Assim, baseado nestas constatações pôde-se adotar consistentemente os resultados do método que chamamos aqui da regio-depleção.

Os resultados do método proposto e adotado permitem que se estabeleçam coeficientes de proporcionalidade de vazões entre duas SHRs quaisquer. Entretanto, no exemplo da bacia do Santa Maria, como o objetivo é sintetizar vazões nas SHRs, porque quase todas não dispõem de séries fluviométricas de tamanho suficiente, resolveu-se adotar como estação-fonte o posto fluviométrico de Rosário (que é a SHR 16), que possuía uma série de vazões diárias consistente entre 1977 e 2001.

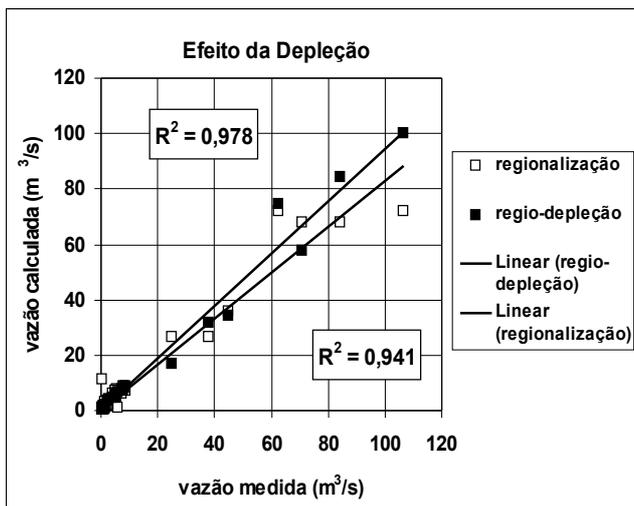


Figura 4 – Comparação de desempenho

Na Tabela 7 são apresentados os coeficientes de proporcionalidade k obtidos. Uma verificação adicional pôde ser feita com a seção SHR 15, que é a seção do outro posto operacional da bacia do Santa Maria com dados de vazão (Ponte Ibicuí da Armada). O seu coeficiente k teve valor notavelmente semelhante à proporcionalidade de vazões com Rosário, sendo indiferente a aplicação do mesmo ou o uso direto da série da SHR 15 na definição de vazões mínimas de referência.

Tabela 7 – fatores k

SHR	k
1	0,0321
2	0,1718
3	0,0307
4	0,0179
5	0,0524
6	0,1549
7	0,0358
8	0,0394
9	0,4100
10	0,0145
11	0,0466
12	0,3799
13	0,1351
14	0,0153
15	0,5661
16	1,0000
17	0,0884
18	0,1483
19	1,1473
20	0,0509
21	1,3776

CONCLUSÃO

A proposição e a aplicação de um método baseado em registros regionais de vazão medidas em campanhas limitadas no tempo e em informações fisiográficas revelaram que a consideração do efeito da depleção regional melhorou objetivamente as estimativas de vazões de baixa magnitude em comparação com métodos como da regionalização e proporção de áreas, aplicados aos mesmos dados.

Isto acontece porque o método proposto filtra o efeito da depleção regional, sempre presente em campanhas programadas em estiagem, e os fatores de proporcionalidade de vazões entre sub-bacias passam a incluir preferencialmente apenas efeitos fisiográficos.

Paralelamente, o método preconiza que a informação que provém de campanhas de medição de vazão em locais de interesse sem postos fluviométricos pode enriquecer a transposição de informações de vazões mínimas referenciais de postos fluviométricos para estes locais. Isto teve uma evidência a favor quando o método proposto obteve fatores de proporcionalidade de vazões mínimas superiores ao método da proporção de áreas (que não envolve informações de vazão).

Na aplicação feita à bacia do Santa Maria, que serviu de estudo de caso, o método desenvolvido no presente artigo permitiu a transferência de curvas de permanência de uma seção fluviométrica (Rosário do Sul) para as demais SHRs, caracterizando, desta forma, a disponibilidade hídrica nos trechos para gerenciamento de outorgas.

AGRADECIMENTOS

Ao apoio da Secretaria Estadual do Meio-Ambiente do Rio Grande do Sul que tornou possível este trabalho.

REFERÊNCIAS

- SILVEIRA G. ; TUCCI, C.E.M. ; SILVEIRA, A.L.L., 1998, Quantificação de Vazão em Pequenas Bacias sem Dados, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 3, N.3, jul/set, pp 111-131.
- SILVEIRA G. ; TUCCI, C.E.M. , 1998, Monitoramento em Pequenas Bacias para a Estimativa de Disponibilidade Hídrica, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 3, N.3, jul/set, pp 97-110.
- SILVEIRA, A.L.L.; SILVEIRA G.L., 1996, Novo Método de Quantificação de Vazões em Pequenas Bacias Hidrográficas Sem Dados, II Fórum de Energia e Meio Ambiente, Santa Maria, novembro, 1996. Anais, pp 35-43.
- SILVEIRA, A.L.L. ; SILVEIRA, G. , 2001, Capítulo 5 – Vazões Mínimas. In : PAIVA, J.B.; PAIVA, E.M., 2001 (org.) , Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas, Recope-Rehidro Sub-rede 3 Finep, ABRH, UFSM, Santa Maria, pp 125-163.
- TUCCI, C.E.M., 1993, Regionalização de vazões, In : TUCCI, C.E.M. (org.), Hidrologia, Ciência e

Aplicação, cap 15, ABRH, Editora da Universidade, Porto Alegre, 1993.

UFSM/SEMA, 2002, Desenvolvimento das Ações de Apoio Necessárias à Implantação da Outorga de Uso da Água na Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria, Relatório Técnico, Convênio SEMA (Secretaria Estadual do Meio-Ambiente/RS) e UFSM (Universidade Federal de Santa Maria/RS).

Regionalization of Regional Low Flows using Primary Discharge Data

ABSTRACT

This paper proposes a method to obtain proportionality factors for low flows between points on a river network, based on discharge measurements at those points during recession phases in the basin. Discharge measurements, considered as primary data because they are not obtained from a stage-discharge curve, were correlated with classical physiographic characteristics in a regionalization process that combines these characteristics with low flow characteristics. The method, here called the regional-depletion method, was developed for use in basins with few flow-gauging stations, where it is necessary to synthesize low-flow characteristics at various points, using such flow records as are available. The method is especially attractive where licenses for water use are to be granted in basins where flow data are scarce. The method was developed and applied for this purpose in the basin of the River Santa Maria, in the Brazilian State of Rio Grande do Sul. Some intensive field visits for discharge measurement in sections of interest were sufficient to provide consistent estimates of the factors of proportionality

Key-words: water use licenses; regionalization; low flow; Rio Grande do Sul