

# Regionalização de Vazões Mínimas em Bacias Através de Interpolação em Sistemas de Informação Geográfica

**Henrique Marinho Leite Chaves**

Agência Nacional de Águas - ANA e Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília - UnB  
Brasília, DF - hchaves@ana.gov.br

**José Wilson Corrêa Rosa**

Instituto de Geociências - Universidade de Brasília - UnB - Brasília, DF

**Rolando Gaal Vadas**

Montgomery-Watson/Brasil - São Paulo, SP

**Rogério V. T. Oliveira**

Fundação SD - Fone (61) 274-7605 - Brasília, DF

Recebido: 26/03/01 - revisão: 23/10/01 - aceito: 07/06/02

## RESUMO

*A regionalização de vazões naturais através do método tradicional de geração de regiões hidrologicamente homogêneas e regressões regionais apresenta limitações importantes quando os dados hidrométricos disponíveis são escassos, em uma dada bacia. Como este é o caso da maior parte das bacias hidrográficas brasileiras, a precisão deste tipo de regionalização pode vir a ser seriamente comprometida, se tal método for usado. Um método alternativo, que utiliza técnicas de inter e extrapolação automáticas em ambiente SIG, é proposto. Para testar a precisão das duas metodologias, um estudo de caso com dados reais de vazões foi empregado. O método proposto foi superior ao método tradicional (regressão regional), tanto no que diz respeito ao erro médio como ao coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (1970).*

**Palavras-chave:** regionalização; vazão; mínimo.

## INTRODUÇÃO

A estimativa da oferta de água em uma bacia é uma das informações mais importantes no que diz respeito ao gerenciamento de recursos hídricos, tais como a outorga de uso de água, o cálculo de vazões afluentes anuais para o dimensionamento de reservatórios e, mais recentemente, como base para estimativa do balanço hídrico em sistemas de apoio à decisão.

A oferta de água superficial é normalmente estimada através de vazões mínimas de referência, que representam as menores vazões das séries históricas. Geralmente, para fins de estimativa de oferta de água, esta é representada através da  $Q_{90\%}$  (vazão de permanência em 90% do tempo) ou da  $Q_{7,10}$  (vazão mínima durante 7 dias consecutivos em um período de 10 anos).

Para ser efetiva, a estimativa da oferta de água superficial deve ser feita em toda a rede de drenagem da bacia. Entretanto, como as vazões são geralmente medidas apenas em alguns pontos específicos (postos fluviométricos), um dos desafios em hidrologia é espacializar (regionalizar) esta informação para toda a área de interesse. Essa regionalização de vazão, por sua vez, pode ser definida como um conjunto de ferramentas que exploram ao máximo as informações existentes, visando a estimativa das va-

riáveis hidrológicas (como vazões mínimas) em locais sem dados ou com dados insuficientes (Tucci, 2000).

Dentre os métodos mais utilizados de regionalização de vazões mínimas está o uso de equações de regressão regionais, que usa variáveis fisiográficas e climáticas das bacias, aplicadas dentro de regiões hidrologicamente homogêneas, previamente definidas (Eletrobrás, 1985; Tucci, 2000).

Em um trabalho recente de regionalização no Alto São Francisco, que possui um clima sub-úmido e uma área de 51.000 km<sup>2</sup>, Euclides et al. (2001), usando a metodologia tradicional, obtiveram resultados razoáveis para vazões mínimas ( $Q_{7,10}$ ) através de dois métodos: equações de regressão regionais e modelos de curva regional (log-Gumbel). Os autores dispunham de 33 postos fluviométricos com dados confiáveis, e os valores médios de  $R^2$  foram 0,94 e 0,80 para os dois métodos, respectivamente.

Entretanto, em algumas situações, erros de predição significativos podem ocorrer quando regressões regionais são usadas na estimativa de vazões mínimas (Stedinger et al., 1992). Thomas & Benson (1975), revisando a precisão das regionalizações hidrológicas no rio Potomac (EUA), que possui alta densidade de postos hidrométricos, concluíram que o erro padrão observado na estimativa de vazões mínimas (por exemplo  $Q_{90\%}$ ), através do uso de regressões regionais, era de 50%.

As equações de regressão regional, usadas na estimativa de vazões mínimas, e aplicadas a uma região hidrologicamente homogênea, previamente definida, têm a seguinte forma (Stedinger et al., 1992):

$$y_i = \alpha + \beta_1 \log(F) + \beta_2 \log(C) + \dots + \varepsilon \quad (1)$$

onde  $y_i$  é a vazão mínima de referência desejada em um determinado ponto da bacia;  $F$  é uma variável fisiográfica (por exemplo área, declividade do canal principal, etc.);  $C$  é uma variável climática (por exemplo precipitação anual);  $\varepsilon$  é o erro aleatório; e  $\alpha$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são parâmetros.

O erro  $\varepsilon$  na Equação (1) é uma combinação de: a) erro de amostragem temporal de  $y_i$ ; e b) erro intrínseco do modelo preditivo (falta de ajuste), devido à falha do modelo em prever o valor real de  $y_i$ . Segundo Stedinger et al. (1992), o erro de predição observado na estimativa de vazões mínimas a partir de equações de regressão regionais decorre do fato de elas serem incapazes de capturar características superficiais e sub-superficiais (geológicas) importantes das bacias.

Em situações com baixa densidade de postos fluviométricos, como é o caso da maioria das bacias hidrográficas brasileiras, essa incerteza é potencializada pelo pequeno grau de liberdade disponível para as análises de regressão ( $G.L. = N - R - 1$ , onde  $N$  é o número de postos e  $R$  é o número de variáveis preditivas da equação de regressão). Assim, se uma certa região hidrologicamente homogênea tiver cinco postos disponíveis, e duas variáveis preditivas forem usadas na equação de regressão, teríamos três graus de liberdade usados.

Entretanto, com o advento dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG's), a espacialização de variáveis hidrológicas pode ser grandemente facilitada, explorando-se ao máximo as informações hidrológicas existentes, a montante e à jusante de pontos de interesse. Esta ferramenta é ainda mais poderosa quando os procedimentos são automatizados (programação em linguagem macro).

O objetivo do presente trabalho foi propor uma metodologia simples e robusta para a regionalização de vazões mínimas em bacias hidrográficas com dados hidrométricos limitados, utilizando técnicas de interpolação em ambiente SIG. Para facilitar a apresentação e a validação do método, um estudo de caso, com dados reais de uma bacia da Bahia, foi empregado. As precisões obtidas na regionalização da vazão mínima pelo método proposto e naquela obtida pelo método tradicional (regressões regionais), foram comparadas.

## METODOLOGIA

### Desenvolvimento do método proposto

A partir do método de razão de área de drenagem, comumente usado em estimativa de vazões regionais (Stedinger et al., 1992), foram generalizadas soluções para

interpolação e extrapolação de vazões mínimas em diferentes situações da bacia, dependendo da posição relativa do ponto de interesse em relação aos postos fluviométricos mais próximos. Por se tratar de um método interpolativo, o mesmo dispensa a definição de regiões hidrologicamente homogêneas. O método proposto não se aplica a extrapolações em bacias onde dados fluviométricos não são disponíveis.

O método funciona da seguinte forma: partindo-se da rede de drenagem da bacia e da distribuição da rede hidrométrica existente, classificam-se os canais de acordo com os seguintes casos:

**Caso 1** - Ponto de interesse localizado a montante de um ponto com vazão conhecida.

Neste caso, o método de razão de área de drenagem, conforme proposto por Stedinger et al. (1992), é aplicado no cálculo da vazão mínima de referência, em um ponto de vazão desconhecida ( $Q_y$ ), dentro da área de influência de um ponto com vazão conhecida ( $Q_x$ ), ou seja:

$$Q_y = (A_y / A_x) Q_x \quad (2)$$

onde  $Q_y$  é a vazão mínima de referência em um ponto da bacia,  $Q_x$  é a vazão de referência em um posto fluviométrico próximo, e  $A_y$  e  $A_x$  são as áreas de drenagem relativas ao ponto de vazão desconhecida e ao posto próximo, respectivamente (Figura 1).

A hipótese, neste caso, é de que a vazão de referência no ponto  $y$  será proporcional à razão entre as áreas a montante de  $x$  e  $y$ . Se os pontos  $x$  (posto conhecido) e  $y$  (ponto de interesse) estiverem relativamente próximos, a robustez da equação será elevada, além de haver alta probabilidade de os pontos estarem dentro de uma mesma região hidrológica. Este caso é aplicável em regiões de cabeceiras da bacia, onde somente existam dados fluviométricos à jusante, conforme indica a Figura 1.

Entretanto, em situações (pontos de interesse) situadas entre postos com vazões de referência conhecidas, bem como em outras situações fisiográficas, a Equação (2) não seria a mais aconselhável para estimativa da vazão mínima. Neste caso, uma nova situação, que incorpore tanto a informação de montante como de jusante, é mais recomendada, e é apresentada a seguir.

**Caso 2** - Ponto de interesse localizado entre dois pontos com vazão conhecida.

No caso de um ponto de interesse  $z$  situado num trecho de canal entre dois postos fluviométricos de vazão de referência conhecida,  $x$  e  $y$  (Figura 2), a vazão de referência incógnita,  $Q_z$ , pode ser estimada através da Equação (3), abaixo:

$$Q_z = A_z [(p_x Q_x / A_x + p_y Q_y / A_y)] \quad (3)$$

onde  $A_x$ ,  $A_y$  e  $A_z$  ( $\text{km}^2$ ) são as áreas de drenagem relativas aos pontos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente,  $Q_x$ ,  $Q_y$  e  $Q_z$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) são as vazões mínimas de referência relativas aos pontos  $x$ ,

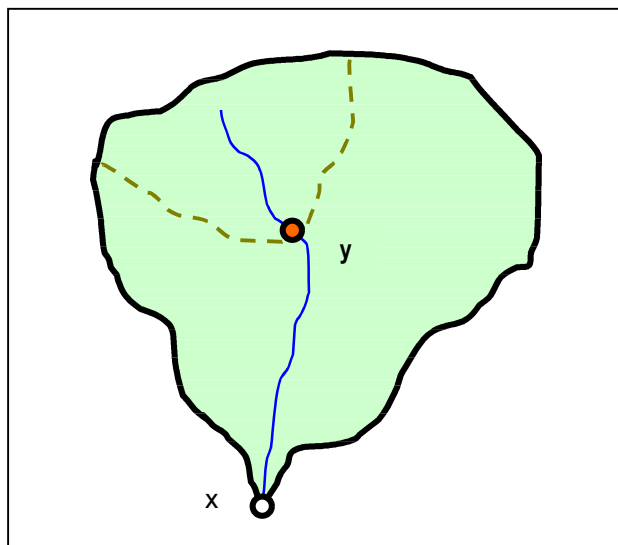


Figura 1. Caso 1 - estimativa da vazão em um ponto y a montante de um posto com vazão conhecida (x), em uma bacia hipotética (segundo Stedinger et al., 1992).

y e z, respectivamente, e  $p_x$  e  $p_y$  são os pesos relativos a x e y, dados por:

$$p_x = dy / (dx + dy) \quad \text{e} \quad p_y = dx / (dx + dy) \quad (4)$$

onde dx (km) é a distância entre x e z e dy (km) é a distância entre y e z, ambas medidas ao longo do canal.

As Equações (3) e (4) possuem sete variáveis preditivas e, por não serem um modelo estatístico (regressão), não há limitação em termos de graus de liberdade. A utilização de várias variáveis (distâncias, áreas de drenagem) na interpolação da vazão, garante a robustez da equação, e incorpora vantagens da lógica  $fuzzy$  (através da razão das distâncias inversas), evitando eventuais descontinuidades no cálculo de  $Q_z$ . Este tipo de interpolação ( $fuzzy$ ) é ilustrado, de forma gráfica, na Figura 3.

Na Figura 3, o ponto da vazão desconhecida (z) situa-se em algum ponto entre dois postos de vazão conhecida (x e y). As distâncias dx e dy, medidas ao longo do canal, são facilmente calculadas pelo SIG, depois de programação específica em linguagem macro. No exemplo da Figura 3, como z está mais próximo a x, é de se esperar que este influencie z mais do que y e, portanto,  $p_x > p_y$ .

Por outro lado, se z estiver exatamente no meio dos dois postos, os pesos  $p_x$  e  $p_y$  serão iguais (0,5). Caso contrário, eles serão inversamente proporcionais às distâncias dos postos.

A função de interpolação  $fuzzy$  usada é a linear (Equação 3), uma vez que não havia razão para supor o contrário (Kosko, 1998; Harr, 1987). É óbvio que, pelas Equações (3) e (4), as condições de contorno ( $dx = 0 \rightarrow A_z = A_x$ , e  $Q_z = Q_x$ , etc.) serão atendidas, havendo sempre convergência na solução.

Da mesma forma que o Caso 1, a espacialização da vazão no Caso 2 utiliza as informações hidrológicas das es-

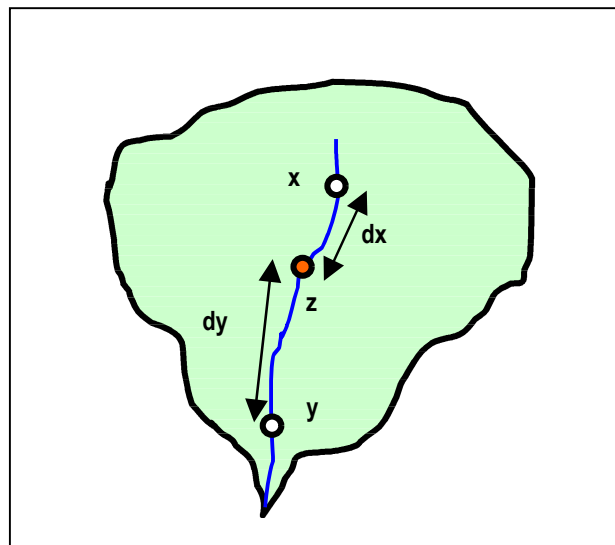


Figura 2. Caso 2 - situação de um ponto de interesse (z) situado entre dois postos com vazão de referência conhecida (x, y).

tações vizinhas, o que proporciona maiores chances do ponto de interesse z estar na mesma região hidrológica das estações x e y.

**Caso 3** - Ponto de interesse localizado à jusante de um ponto com vazão conhecida.

Um terceiro caso é aquele onde o ponto de interesse está à jusante de um posto hidrométrico, com vazão mínima conhecida. Este caso ocorre geralmente em áreas próximas ao exutório da bacia, onde há apenas dados a montante. Semelhantemente ao Caso 1, a vazão no ponto de interesse y é dada por:

$$Q_y = (A_y / A_x) Q_x \quad (5)$$

sendo que y está à jusante de x (Figura 4).

Aqui, a hipótese é semelhante a do Caso 1, ou seja, se a distância entre x e y não for excessiva, haverá grande chance de y estar na mesma região hidrológica de x e, portanto, apresenta bom potencial de robustez.

**Caso 4** - Ponto de interesse situado em um canal afluente cuja foz está entre dois postos fluviométricos de um canal de ordem superior.

Um último caso é necessário para generalizar o método. Este se refere à situação onde um ponto com vazão desconhecida se situa em um canal de ordem i, que contribui para um canal de ordem superior (i+1), e cuja confluência está localizada entre dois postos de vazão conhecida, x e y (Figura 5).

Este caso é uma combinação dos Casos 1 e 2, ou seja, a vazão no ponto de interesse é diretamente proporcional às áreas de drenagem e inversamente proporcional às distâncias relativas aos postos. Para tanto, usa-se o seguinte procedimento:

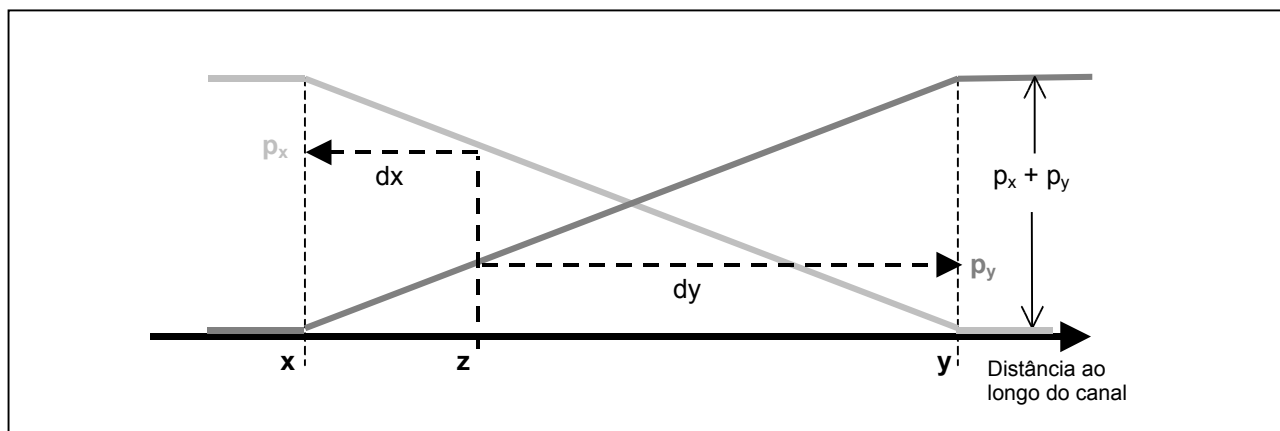


Figura 3. Solução gráfica da obtenção dos pesos  $p_x$  e  $p_y$ , (Equações 3 e 4), através de lógica fuzzy.

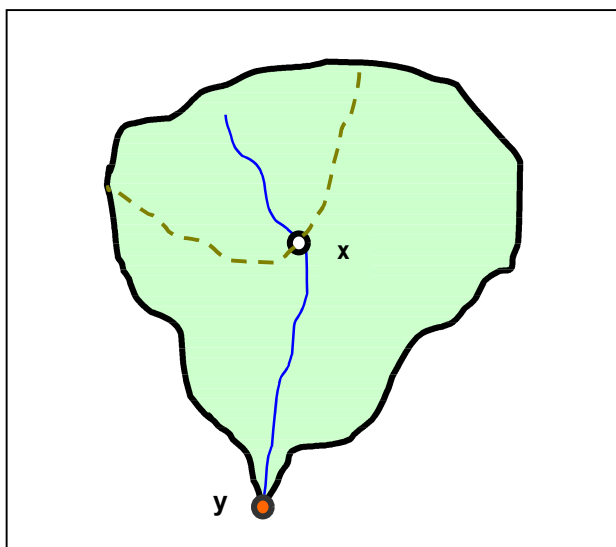


Figura 4. Caso 3 - situação de um ponto de interesse (y) situado em trecho de canal à jusante de um posto com vazão de referência conhecida (x).

- aplica-se o Caso 2 entre os postos x e y, calculando-se a vazão no ponto de confluência do canal de ordem i ( $z'$ );
- calcula-se a vazão de referência correspondente ao ponto de interesse z, usando a vazão calculada previamente em  $z'$ , aplicando-se o mesmo procedimento do Caso 1.

Com este último caso, as situações de interpolação e extrapolação de informação na bacia estarão contempladas.

## ESTUDO DE CASO

### Aplicação da metodologia proposta

De forma a facilitar a validação do método proposto, o mesmo foi aplicado à uma bacia hidrográfica com baixa densidade de postos fluviométricos, e onde a regionalização de vazões mínimas já havia sido previamente obtida através da metodologia tradicional.

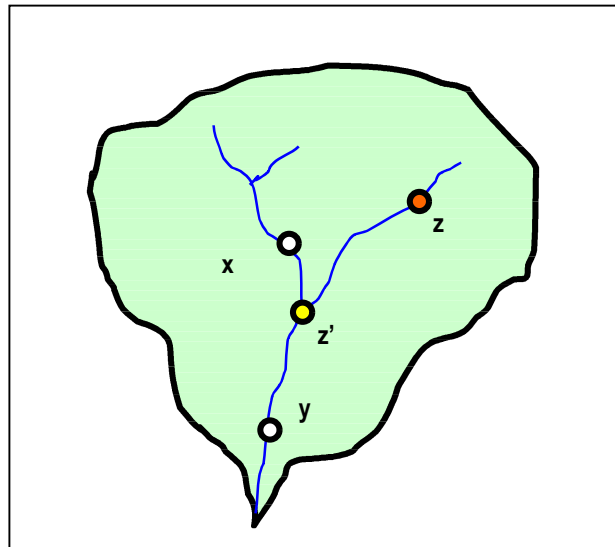


Figura 5. Caso 4 - situação de um ponto de interesse (z) situado em um canal afluente, cuja foz ( $z'$ ) se situa entre dois postos de vazão conhecida (x e y), localizados em um canal de ordem superior.

A bacia selecionada foi a do rio Itapicuru, localizada na porção nordeste do Estado da Bahia (Lat.  $9^{\circ}50'$ - $12^{\circ}$  S, Long.  $37^{\circ}30'$ - $40^{\circ}45'$  W). Esta bacia, cuja área é de 36.440 km<sup>2</sup>, apresenta uma diversidade geológica, pedológica, bem como climática e de uso do solo, que a tornam suficientemente complexa para que metodologias de regionalização de vazão sejam postas à prova.

A bacia do rio Itapicuru apresenta uma distribuição pluviométrica bastante variável, passando de 1.400 mm/ano em sua foz, no Oceano Atlântico, a 500 mm/ano nas cabeceiras, e possui uma rede hidrométrica de apenas 11 postos com dados confiáveis.

A geologia da bacia do Itapicuru é bastante complexa, englobando tipos litológicos de idades bastante variadas, desde o Arqueano até o Quaternário recente, todos fazendo parte do contexto geológico do *Craton* do São Francisco. Esta variabilidade geológica gerou uma diversidade geomorfológica e pedológica na bacia. Geomorfológica-

**Tabela 1. Postos fluviométricos, dados fisiográficos e climáticos, e respectivas vazões mínimas ( $Q_{90\%,7d}$ ) na bacia do rio Itapicuru (BA) - Fonte: Governo do Estado da Bahia (1995).**

P.F.	Cód. ANEEL	Nome	$A_d$ (km <sup>2</sup> )	D (m/km)	$P_m$ (mm)	Duração da série	$Q_{90\%,7d}$ (m <sup>3</sup> /s)
1	50340000	Saúde	75	0,10	988	11/45 a 01/72	0,119
2	50360000	Campo Formoso	230	0,10	1.140	02/50 a 01/72	0,145
3	50380000	Ponto Novo	2.679	0,16	908	02/68 – cont.	0,766
4	50420000	Jacobina	1.354	0,24	657	03/34 – cont.	0,070
5	50430000	Pedras Altas	2.250	0,29	730	06/68 a 02/74	0,119
6	50465000	Queimadas	10.072	0,33	743	12/11 a 08/64	0,539
7	50520000	Pte. E. da Cunha	26.105	0,45	636	12/11 – cont.	1,305
8	50540000	Cipó	28.345	0,52	629	10/34 – cont.	2,379
9	50580000	Fazenda Mamão	34.050	0,59	658	03/68 a 01/74	4,572
10	50590000	Itapicuru	34.320	0,62	666	10/34 – cont.	1,544
11	50595000	Usina Altamira	35.150	0,62	677	03/64 – cont.	5,894

$A_d$  = área de drenagem do posto; D = declividade média do curso principal;  $P_m$  = precipitação anual média.

mente, a bacia apresenta modelados de aplanamento e dissecação, com serras, tabuleiros e depressões. Já em termos pedológicos, predominam as classes de Planossolos, que cobrem mais de 50% da área da bacia, seguidos de Latossolos Vermelho-amarelos e Areias Quartzosas.

Em termos de uso atual do solo da bacia, os principais são o de agricultura de subsistência, pastagens naturais, silvicultura para fins de carvão vegetal e mineração. Há também pequenas manchas com agricultura irrigada.

Recentemente, um Plano Diretor de Recursos Hídricos foi elaborado para a bacia (Governo do Estado da Bahia, 1995). Dentre as informações geradas no Plano, estava a regionalização de vazões mínimas, obtida através da técnica de regressão regional. Para tanto, duas regiões hidrologicamente homogêneas foram definidas, conforme a metodologia tradicional (Eletrobrás, 1985). Estas regiões, com áreas de aproximadamente 15.000 km<sup>2</sup>, foram a do Alto e Baixo Itapicuru, a montante e à jusante da cidade de Queimadas, respectivamente.

A Tabela 1 apresenta os postos fluviométricos existentes, as principais características fisiográficas e climáticas, e as respectivas vazões mínimas de referência observadas, obtidas no referido Plano Diretor (Governo do Estado da Bahia, 1995).

De forma a permitir a regionalização das vazões mínimas da bacia do Itapicuru pelo método proposto, a rede de drenagem da bacia do Itapicuru foi dividida em cada um dos quatro casos identificados acima. A Figura 6 apresenta a bacia, com a rede de drenagem classificada de acordo com os referidos casos, indicando os postos fluviométricos.

Na Figura 6, observa-se que, em função da distribuição dos postos e da rede de drenagem da bacia, a maior parte dos afluentes do médio e baixo Itapicuru foi considerada como Caso 4. Por outro lado, grande parte do canal principal do Itapicuru foi considerada como Caso 2, e apenas dois segmentos foram considerados como Caso 3.

O procedimento da regionalização de vazões usando o método proposto foi o seguinte:

- a bacia hidrográfica, incluindo a rede de drenagem, as curvas de nível e os postos fluviométricos foram digitalizados no SIG (Arc-View, versão 3.1), tendo cada um dos postos os respectivos valores de  $Q_{90\%,7d}$  associados, em uma tabela de atributos de ponto;
- cada um dos segmentos classificados (Casos 1-4) foi programado em linguagem macro (Avenue-ESRI) no ambiente SIG, de forma que, “clitando-se” o mouse em um ponto de interesse, em qualquer um dos segmentos da rede de drenagem, o SIG automaticamente: a) identificava o caso de regionalização, b) identificava os pontos próximos de vazão conhecida (a montante, jusante ou ambos); c) calculava a vazão mínima no ponto selecionado, usando as Equações (2) e (5), conforme o caso em questão, calculando, para isso, as áreas de drenagem dos pontos x, y e z, e, se for o caso, as distâncias dx e dy (para o Caso 3);
- no caso de o *click* do mouse estar fora de uma distância mínima da rede de drenagem, o SIG identificava o problema, através de uma mensagem em tela. No caso de a distância ser inferior a um valor *threshold*, o SIG automaticamente marca o ponto no canal desejado.

Assim, a vazão mínima pôde ser estimada em qualquer ponto da rede de drenagem da bacia, de forma fácil e rápida, sem a necessidade de executar os procedimentos tradicionais de determinação de regiões hidrologicamente homogêneas, seleção de variáveis e obtenção de equações regionais, bem como a subsequente estimativa (muitas vezes manual) dos valores das vazões mínimas.

### Aplicação da metodologia tradicional

Visando comparar o método proposto com a metodologia tradicional de regionalização de vazões, utilizada no Plano Diretor de Recursos Hídricos da bacia, uma breve descrição desta última se faz necessária. O método tradicional envolveu as seguintes etapas (Governo do Estado da Bahia, 1995):

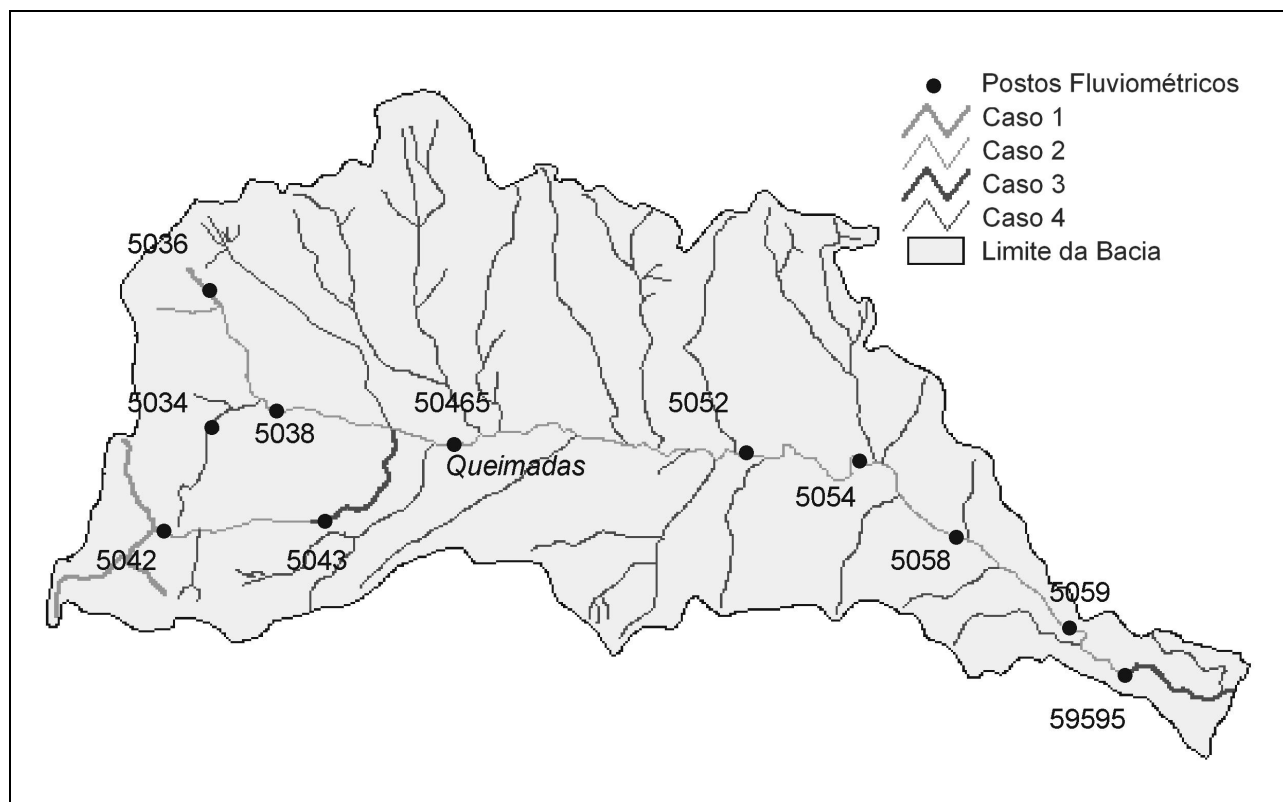


Figura 6. Rede hidrográfica da bacia do Itapicuru, identificando os casos de espacialização da vazão mínima ( $Q_{90\%,7d}$ ) pelo método proposto, e os postos fluviométricos.

- determinação da regressão entre a média das vazões mínimas anuais com características físicas e climáticas e a sua duração, para os postos da região;
- adimensionalização dos valores de vazão mínima pela média das mínimas;
- plotagem dos valores adimensionalizados em papel probabilístico, para cada posto;
- verificação da dispersão das curvas dos postos;
- definição de regiões hidrologicamente homogêneas, através do exame das tendências das curvas individuais de frequência e dos resíduos da equação de regressão; e
- obtenção dos valores de vazão absoluta, através da dimensionalização das equações de vazões específicas.

Assim, apenas duas regiões hidrologicamente homogêneas puderam ser obtidas para a bacia do Itapicuru (Regiões I e II). As respectivas equações regionais obtidas foram (Governo do Estado da Bahia, 1995):

**Região I** - Porção da bacia do rio Itapicuru a montante da cidade de Queimadas (P.F. n°50465, na Figura 6):

$$Q_{90\%,7d} = 0,0844 \exp (9,69 \times 10^{-4} A) \quad (6)$$

onde  $A$  ( $\text{km}^2$ ) é a área de contribuição, e:

**Região II** - Área à jusante de Queimadas (Baixo Itapicuru):

$$Q_{90\%,7d} = 0,275 \exp (6,89 \times 10^{-5} A) \quad (7)$$

No Plano Diretor citado, os valores de  $Q_{90\%,7d}$  foram obtidos através de ajuste a uma distribuição apropriada (Assintótica dos Extremos Tipo III, com três parâmetros). No caso da  $Q_{90\%,1d}$ , a mesma não foi usada no Plano Diretor pois seu ajuste foi pobre ( $R^2 < 60\%$ ). Os autores explicaram que a dispersão dos resultados possivelmente tenha sido oriunda da heterogeneidade das características regionais e de erros de observação (Governo do Estado da Bahia, 1995).

### Validação das metodologias proposta e tradicional

Para validar os métodos proposto e tradicional de regionalização de vazão mínima, a precisão dos mesmos foi obtida usando-se dados de uma bacia real, conforme sugerem James & Burges (1984).

Para isso, foram escolhidos cinco pontos de interesse, correspondendo a quatro postos fluviométricos de vazão mínima conhecida, onde as vazões foram supostas como desconhecidas (incógnitas), apenas para efeito de teste.

Assim, foram selecionados os postos 5042, 5043, 5052 e 5054, de forma a atender o maior número possível

Tabela 2. Validação das metodologias proposta e tradicional.

Posto incógnito	Caso	Área (km <sup>2</sup> )	Q <sub>90%</sub> obs	Q <sub>90%</sub> calc. mét. prop.	Erro relat. (%)*	Q <sub>90%</sub> calc. mét. trad.	Erro relat. (%)
5042	1	1.354	0,070	0,072	2,3	0,313	347,8
5054	2	28.345	2,379	2,611	9,7	1,939	18,5
5052	2	26.105	1,305	1,955	49,8	1,661	27,3
5043	3	2.250	0,119	0,116	2,3	0,747	527,6
5043	4	2.250	0,119	0,311	161,3	0,747	527,6
				Erro médio	45,1	Erro médio	289,7
				Coef. N-S**	0,879	Coef. N-S**	0,725

\* Erro Relativo =  $100 \cdot \text{Abs} [(Q_{\text{obs}} - Q_{\text{calc}}) / Q_{\text{obs}}]$ ;

\*\* Coef. de Eficiência de Nash-Sutcliffe (1970):  $E = (\sum(O_i - \mu_o)^2 - \sum(O_i - P_i)^2) / (\sum(O_i - \mu_o)^2)$ .

de casos da metodologia proposta, e cobrir a maior amplitude geográfica, climática e fisiográfica possível.

No caso da regionalização com o método proposto, os valores de  $Q_{90\%,7d}$  foram então calculados de acordo com os quatro casos supra citados, usando-se as equações correspondentes (2 - 5). Esses valores calculados foram então comparados aos valores observados de  $Q_{90\%,7d}$  dos quatro postos selecionados.

Assim, por exemplo, o ponto correspondente ao posto 5054 teve a vazão mínima calculada utilizando os dados das estações 5052 (a montante) e 5058 (à jusante) – Caso 2.

O valor calculado de  $Q_z$  no posto 5054 foi então comparado com o valor observado de  $Q_{90\%,7d}$ , e assim por diante.

No caso da regionalização do método tradicional, as equações de regressão regionais, Equações (6) e (7), foram aplicadas aos quatro postos, e as vazões mínimas calculadas.

A precisão dos dois métodos foi obtida através de dois índices: i) o erro relativo entre o valor observado e o calculado, e ii) o índice de eficiência de Nash & Sutcliffe (1970). Este coeficiente é tradicionalmente usado em ajuste de modelos matemáticos, e é dado pela equação:

$$E = (\sum(O_i - \mu_o)^2 - \sum(O_i - P_i)^2) / (\sum(O_i - \mu_o)^2) \quad (8)$$

onde  $O_i$  é o valor de vazão mínima observado;  $\mu_o$  a média dos valores de vazão mínima observados;  $P_i$  o valor calculado pelo modelo. Maiores valores de E representam melhores ajustes.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados das vazões mínimas calculadas pelos métodos proposto e tradicional, para os quatro postos fluviométricos, cujas vazões foram supostas incógnitas. Para cada um dos postos, foram calculados o erro relativo e o coeficiente de eficiência de ajuste de Nash & Sutcliffe (1970).

No Caso 4, a interpolação usou, como incógnito, o mesmo ponto usado para o Caso 3 (posto 5043), uma vez que este posto era um dos poucos que permitiam a interpolação nos dois casos.

De acordo com a Tabela 2, o erro médio observado entre os valores de  $Q_{90\%,7d}$  calculados pelo método proposto foi inferior ao obtido pelo método tradicional (45,1% *versus* 289,7%, respectivamente). Além disso, em todos os casos o valor do erro relativo obtido pelo método proposto foi inferior aos obtidos pelo método tradicional, com exceção do ponto relativo ao posto 5052.

No caso do coeficiente de eficiência de Nash & Sutcliffe (1970), este foi superior no caso do método proposto ( $E = 0,88$ ), em comparação ao do método tradicional ( $E = 0,73$ ).

Ambos os resultados são uma indicação de que o método proposto foi mais eficiente na espacialização da vazão mínima na bacia estudada. Este melhor desempenho, por sua vez, pode ter sido decorrência da maior robustez da metodologia proposta, uma vez que as interpolações de vazões neste método usaram as informações das estações mais próximas, evitando eventuais heterogeneidades comuns a grandes bacias.

Já no caso do método tradicional, apenas duas regiões homogêneas puderam ser obtidas (Regiões I e II), em função do pequeno número de postos disponíveis. Além disso, apenas uma variável preditiva (área) foi usada, possivelmente em função do limitado número de graus de liberdade disponível (cinco para cada região homogênea). Ambas as limitações devem ter contribuído para a menor precisão observada neste método.

Portanto, como hipotetizado anteriormente, o método proposto apresenta um melhor potencial de precisão de predição de vazões mínimas em bacias com dados hidrométricos escassos, que é o caso em tela.

## Cuidados e limitações

Tanto o método proposto como o método tradicional devem ser usados com cautela quanto há derivações significativas em pontos da bacia, principalmente quando não houve tempo suficiente para estas serem detectadas pelas estatísticas da série histórica.

Embora não se possa generalizar a aplicação do método proposto para todas as bacias, os resultados obtidos acima indicam que o mesmo é aplicável para situações

semelhantes a da bacia estudada, ou seja, área, fisiografia e clima similares.

Além disso, a metodologia proposta não pode ser aplicada a bacias sem dados fluviométricos (extrapolação), uma vez que a mesma requer pelo menos algumas vazões conhecidas.

Os casos de interpolação (1 - 4) propostos são específicos para a bacia estudada. É possível que outras bacias requeiram equações distintas, em função de suas particularidades (rede de drenagem, distribuição de postos, etc.). Entretanto, o objetivo do presente trabalho foi mostrar que o princípio de interpolação automática é possível e viável.

No que diz respeito à aplicação do método proposto em outras escalas que não a bacia em tela, se as interpolações ou extrapolações dos Casos 1-4 forem feitas dentro de regiões fisiograficamente semelhantes, haverá menor risco de erros.

Neste caso, tanto a relação de bifurcação ( $R_b$ ) e de comprimento ( $R_c$ ) de Horton (1945), bem como a dimensão fractal- $D_f$  (Tarboton et al., 1988) da rede de drenagem, que são parâmetros independentes de escala, poderão ser usados para identificar essas regiões. Em outras palavras, onde  $R_b$ ,  $R_c$  e  $D_f$  forem mais ou menos constantes, interpolações de vazões poderão ser feitas com maior confiabilidade.

Fatores de correção de escala também poderiam ser usados, quando justificados. Stedinger et al. (1992) sugerem que um expoente ( $b < 1$ ), obtido através de relações de regressão, pode ser usado na razão  $(A_y/A_x)^b$ , empregada na Equação (2) - Caso 1.

## CONCLUSÕES

Uma metodologia de interpolação e extrapolação de vazões mínimas foi desenvolvida, baseada na razão de área de drenagem, no inverso das distâncias e em combinações destas. Este método foi generalizado para permitir a espacialização da vazão mínima em diferentes situações da rede de drenagem da bacia.

Ao contrário do método tradicional de regionalização de vazões, que utiliza equações de regressão regionais, aplicadas a regiões hidrologicamente homogêneas, previamente definidas, o método proposto não é limitado pelo número de graus de liberdade, e incorpora outras variáveis preditivas importantes.

Para facilitar a validação do método, o mesmo foi aplicado a uma bacia hidrográfica com baixa densidade de postos hidrométricos (típica da situação brasileira). A precisão obtida na estimativa da vazão mínima em diferentes pontos da bacia pelo método proposto foi comparada àquela obtida através do método tradicional.

O erro médio obtido entre os valores de  $Q_{100\%,7d}$  calculados pelo método proposto e os valores observados (45,1%) foi significativamente inferior ao obtido pelo método tradicional (289,7%). Além disso, o índice de eficiência de ajuste de Nash & Sutcliffe (1970), no caso do método proposto, foi 15% superior ao do método tradicional, indicando que o primeiro apresentou uma maior precisão.

Com o advento dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG's), o método proposto, com algumas modificações em função das particularidades locais, pode ser aplicado a bacias hidrográficas onde a escassez de dados ou a incerteza possa limitar a aplicação do método tradicional de equações de regressão regionais.

Entretanto, o método proposto deve ser usado com cautela quanto há derivações significativas em pontos da bacia, principalmente quando não houve tempo suficiente para estas serem detectadas pelas estatísticas da série histórica.

Embora não se possa generalizar a aplicação do método proposto para todas as bacias, os resultados obtidos acima indicam que o mesmo é aplicável para situações semelhantes a da bacia estudada, ou seja, área, fisiografia e clima similares.

Além disso, a metodologia proposta não pode ser aplicada a bacias sem dados fluviométricos (extrapolação), uma vez que a mesma requer pelo menos algumas vazões conhecidas.

## REFERÊNCIAS

- ELETROBRÁS/IPH-URGS (1985). *Metodologia para regionalização de vazões*. Rio de Janeiro.
- EUCLYDES, H. P.; FERREIRA, P. A.; RUBERT, O. A. e SANTOS, R. M. (2001). Regionalização hidrológica na bacia do Alto São Francisco a montante da barragem de Três Marias, MG. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 6(2): 81-105.
- GOVERNO DO ESTADO DA BAHIA (1995). *Plano diretor da bacia do rio Itapicuru – documento síntese*. Salvador, 242p.
- HARR, M. E. (1987). *Reliability-based design in civil engineering*. McGraw-Hill, N. York.
- HORTON, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins – hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bull. Geol. Soc. Am.*, vol. 56: 275-370.
- JAMES, L. D. & BURGESS, J. (1984). Selection, calibration, and testing of hydrologic models, in C.T. Hann (ed.): *Hydrologic modeling of small watersheds*. ASAE Publ. St. Joseph.
- KOSKO, B. (1997). *Fuzzy engineering*. Prentice-Hall, N. York, 547p.
- NASH, J. E. & SUTCLIFFE, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models: a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, vol. 10, p.282-290.
- STEDINGER, J. R.; VOGEL, R. M. & FOUFLA-GEORGIOU, E. (1992). Chap. 18.5 - Regionalization, in Maidment, D. R. (ed.): *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, N. York, p.18.33-18.66.
- TARBOTON, D. G.; BRAS, R. L. & RODRIGUES-ITURBE, J. (1988). The fractal nature of river networks. *Water Res. Res.* 26(4): 2243-2247.
- THOMAS, D. M. & BENSON, M. A. (1975). *Generalization of streamflow characteristics from drainage-basin characteristics*, US Geological Survey, Water Supply Paper #1970, 1975.
- TUCCI, C. E. M. (2000). Regionalização de vazões. In: Tucci, C (Org.): *Hidrologia Ciência e Aplicação*. ARBH, Porto Alegre, 2ªed., p.573-620.



## ***Regionalisation of Minimum Streamflow Data by GIS Interpolation***

### ***ABSTRACT***

*Streamflow regionalisation achieved using the traditional method of regional regression/homogeneous regions has limited accuracy when the available streamflow data is scarce. Since this is the case for most Brazilian watersheds, the uncertainties resulting from the regionalisation process may be significant. An alternative method, which uses a different approach (interpolation of known streamflow data in a GIS environment), is presented. In order to test the accuracy of both traditional and proposed methods, a case-study is presented, using actual streamflow data from a watershed in the state of Bahia. The proposed method outperformed the traditional method in both standard error and Nash & Sutcliffe (1970) criteria, indicating that the former could be more appropriate under conditions of limited streamflow data.*

*Key Words: regionalisation; streamflow; minimum.*