

ANÁLISE COMPARATIVA DE METODOLOGIAS DE ESTIMATIVA DE SÉRIES DE VAZÕES MÉDIAS MENSAS APLICADAS A ESTUDOS ENERGÉTICOS DE APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS

Rodrigo Gomes Otsuki¹ & Dirceu Silveira Reis Jr.²

RESUMO --- A necessidade de estimativa de dados em locais com poucas informações é um problema que vem sendo discutido e pesquisado há algum tempo na área de Hidrologia Aplicada. Este artigo avalia três diferentes métodos de estimar séries de vazões médias mensais: com base num posto de referência, fazendo uma correção pela área da bacia; com base num posto de referência, porém utilizando vazões médias mensais padronizadas (Hirsch, 1979); e via simulação hidrológica com base em modelo chuva-vazão, cujos parâmetros são estimados por meio de estudo de regionalização. A análise, baseada num estudo de validação cruzada, utilizou como critério a capacidade desses métodos em reproduzir a curva de permanência das vazões observadas e de estimar potenciais energéticos de aproveitamentos hidrelétricos a fio d'água. Os resultados obtidos indicam o método proposto por (Hirsch, 1979) como o melhor dentre os três analisados, seguido pelo método que utiliza modelo hidrológico chuva-vazão. Em relação à simulação energética, pode-se notar que os dois melhores métodos geraram curvas de energia com erros percentuais médios de 20%. Acredita-se que a estimativa do erro nessas análises seja de grande utilidade na definição da potência instalada ótima de uma usina hidrelétrica.

ABSTRACT --- The estimation of hydrologic characteristics at ungauged sites or at sites with short record lengths has been an important topic in applied hydrology. This paper evaluates three methods to estimate monthly streamflow series at ungauged sites: based upon a reference site employing a correction based on drainage area; based upon a reference site, employing standardized monthly streamflow data (Hirsch, 1979); via rainfall-runoff simulation with model parameters estimated through a regionalization procedure. The analyses, based upon a cross-validation study, used the ability of these methods in reproducing flow-duration curve and energy curve of hypothetical run-of-river hydroelectric power plants as criteria of performance. Results show that the method proposed by Hirsh (1979) achieved the best performance, followed by the one that employs a rainfall-runoff model. Regarding the energy simulation, the best two methods generated energy curves with average percentage errors of about 20%. An estimate of error on these curves may be of great value on deciding the installed capacity of a run-of-river power plant.

Palavras-chave: regionalização de vazões, simulação energética.

1) Graduando do curso de Eng. Civil da UnB na elaboração do trabalho, e atualmente Eng. Civil da Prime Projetos e Consultoria Ltda.; CEP: 70.070-120 – Brasília-DF. E-mail: rodrigo@primeprojetos.com

2) Professor Adjunto, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Faculdade de Tecnologia, Dep. de Engenharia Civil e Ambiental - ENC; CEP: 70.910-900-Brasília-DF. E-mail: dirceureis@unb.br

1 - INTRODUÇÃO

Dados hidrológicos são pré-requisitos para qualquer atividade de planejamento e gestão de recursos hídricos, seja no projeto de barragens e centrais hidrelétricas, nos estudos de disponibilidade hídrica ou na previsão de enchentes. (Masih, 2010)

Um dos maiores problemas enfrentados na área dos recursos hídricos é a necessidade de inferência do comportamento hidrológico em bacias de interesse com dados insuficientes ou inexistentes. Apesar do grande avanço nos últimos anos em implantar uma rede hidrometeorológica básica, há ainda no Brasil muitas regiões onde a disponibilidade de informações é precária.

Uma forma de estimar as variáveis hidrológicas em locais com carência de dados é a regionalização, cuja finalidade é extrair o máximo de informações dos dados disponíveis, extrapolando-os espacialmente para o local de interesse. Pode-se aplicar a regionalização a uma série de variáveis como chuva, vazão, parâmetros de modelos hidrológicos, curvas hidrológicas características, dentre outros.

No presente trabalho foram estudadas três diferentes formas de estimar séries de vazões médias mensais: com base num posto de referência, fazendo uma correção pela área da bacia; com base num posto de referência, porém utilizando vazões médias mensais padronizadas (Hirsch, 1979); e via simulação hidrológica com base em modelo chuva-vazão, cujos parâmetros são estimados por meio de estudo de regionalização.

Um estudo comparativo dos métodos foi realizado por meio de validação cruzada, utilizando as informações disponíveis nos postos fluviométricos da região da bacia do rio Paranã, afluente do rio Tocantins. A análise comparativa não se limitou aos valores de vazões mensais propriamente ditas, mas englobou também o desempenho dos métodos na estimativa de desempenho energético de usinas hidrelétricas hipotéticas, a fio d'água, instaladas nos locais dos postos fluviométricos.

2 – METODOLOGIA

2.1 – Metodologias para estimativa de vazões médias mensais

Há vários métodos utilizados para estimar séries hidrológicas em locais com dados insuficientes. Os três métodos utilizados aqui são descritos na sequência.

2.1.1 – Correção pela área da bacia empregando um posto de referência

Este método é muito popular na engenharia devido a sua simplicidade. A transferência de dados de uma bacia para a outra é feita por relação direta de área de drenagem. Esse procedimento considera que a vazão específica na bacia adotada como base é igual à vazão específica da bacia de

interesse, o que pode acarretar em erros significativos caso os comportamentos destas sejam diferentes.

A estimativa da vazão no local de interesse é calculada da seguinte forma:

$$y_i = \frac{A_i}{A_j} y_j \quad (1)$$

em que A_i é área da bacia de interesse, e A_j e y_j são respectivamente a área e o dado de vazão da bacia adotada como base.

A principal dificuldade está em escolher o posto de referência. A forma mais usual de utilizá-lo é empregando o posto mais próximo como base. Entretanto, estudos anteriores mostram que nem sempre esta escolha fornece os melhores resultados. Por exemplo, Archfield e Vogel (2010) mostram que a seleção do posto de referência baseada num mapa de correlações de vazões leva a melhores resultados do que aqueles obtidos com o posto mais próximo. De todo modo, neste trabalho, o posto de referência adotado foi o posto mais próximo. Uma desvantagem óbvia do método é o tamanho da série histórica estar restrito ao tamanho da série do posto de referência.

2.1.2 – Método proposto por Hirsch (1979)

Este método, descrito por Hirsch (1979), assume que as vazões mensais padronizadas do posto de referência são iguais às do local de interesse. A padronização da vazão observada num mês qualquer consiste em subtrair a média do mês e dividir essa diferença pelo seu desvio-padrão:

$$q_{ij} = \frac{Q_{ij} - \bar{Q}_{ij}}{s_{ij}} \quad (2)$$

em que q_{ij} é vazão padronizada no mês i observada no posto de referência j , Q_{ij} a vazão observada no mês i no posto de referência j , \bar{Q}_{ij} a média das vazões observadas durante o mês i no posto j e s_{ij} o desvio-padrão das vazões observadas durante o mês i no posto j .

A vazão no local de interesse, para cada mês do ano, pode ser então obtida pela equação:

$$Q_{ik} = q_{ij} s_{ik} + \bar{Q}_{ik} \quad (3)$$

onde Q_{ik} é a vazão estimada para o mês i no local de interesse k , q_{ij} a vazão padronizada do mês i observada no posto de referência j , e \bar{Q}_{ik} e s_{ik} a média e o desvio-padrão das vazões durante o mesmo mês no mesmo posto de referência.

Como não há dados de vazão disponíveis no local de interesse, o método emprega estimativas regionais de \bar{Q}_{ik} e s_{ik} , obtidas por meio de estudo de regressão regional, melhor descrito a seguir.

Regressão linear

Um estudo de regressão visa obter uma relação entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis explanatórias. Seja θ a variável de interesse, assume-se que:

$$\theta_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j X_{ij} + \varepsilon_i \quad (4)$$

onde,

$i = 1, 2, 3, \dots, N$ estações, X_{ij} ($j=1, 2, 3, \dots, p$) são as características climáticas e fisiográficas das bacias, β_0 é a componente constante do modelo linear, β_j são os coeficientes das variáveis dependentes e ε_i o erro do modelo.

Em termos matriciais, tem-se:

$$\theta = X\beta + \varepsilon \quad (5)$$

onde,

$$\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N), \quad \beta = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_p \end{pmatrix}; \quad \varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_N \end{pmatrix}, \quad \text{e } X = \begin{pmatrix} 1 & X_{11} & \dots & X_{1p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_{N1} & \dots & X_{Np} \end{pmatrix}$$

Assume-se que o erro ε do modelo possui uma distribuição Normal com média 0 e variância σ_ε^2 , de tal forma que $\varepsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$.

De acordo com o teorema de Gauss-Markov, o estimador de β não depende de σ_ε^2 , apenas das características fisiográficas e dos valores de θ :

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T \theta \quad (6)$$

com matriz de covariância:

$$\sum(\hat{\beta}) = \begin{pmatrix} \text{Var}(\beta_0) & \dots & \text{Cov}(\beta_p \beta_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Cov}(\beta_1 \beta_p) & \dots & \text{Var}(\beta_p) \end{pmatrix} = \hat{\sigma}_\varepsilon^2 (X^T X)^{-1} \quad (7)$$

O estimador de σ_ε^2 pode ser encontrado pela seguinte expressão:

$$\hat{\sigma}_\varepsilon^2 = \frac{(\theta - X \hat{\beta})^T (\theta - X \hat{\beta})}{N - p - 1} \quad (8)$$

Há diversas formas de selecionar as variáveis explanatórias que devem ser incluídas no modelo de regressão. Uma estratégia razoável, e que vem sendo empregada em diversos estudos como em Reis et al. (2005), e que é recomendada pelo United States Geological Survey (USGS) dos Estados Unidos, consiste em escolher o modelo que apresenta a menor variância de predição (VP), calculada por:

$$VP = E[(\theta_0 - X_0 \beta)^2] = \sigma_\varepsilon^2 + X_0 (X^T X)^{-1} X_0^T \quad (9)$$

em que σ_ε^2 é a variância do erro do modelo e $X_0 (X^T X)^{-1} X_0^T$ a variância amostral.

A VP leva em consideração não apenas a variância do erro do modelo, mas também a variância do estimador dos coeficientes β . Sendo assim, a VP apresenta a vantagem de penalizar a inclusão de mais variáveis no modelo. Como normalmente a equação de regressão obtida é utilizada para uma região e não para um local específico, é mais coerente escolher o modelo a ser adotado utilizando a variância média de predição:

$$\text{VMP} = \sigma_{\varepsilon}^2 + \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i (X^T X)^{-1} X_i^T \right] \quad (10)$$

onde,

$$\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i (X^T X)^{-1} X_i^T \right] = \text{variância amostral média (VAM)}$$

Vale notar que este critério de seleção do melhor modelo baseia-se na idéia de que os postos utilizados no estudo de regressão são representativos dos locais de interesse para onde a equação deverá ser empregada no futuro. Em outras palavras, a VMP seria um indicador do desempenho da equação regional no futuro. Desta forma, calcula-se VMP para cada modelo proposto, sendo o mais adequado aquele que apresentar menor valor.

Deve-se garantir ainda que os valores encontrados para os coeficientes β sejam estatisticamente diferentes de zero. Isto é feito aplicando um teste de hipótese de t-Student com hipótese nula $H_0: \beta = 0$. A idéia é que a hipótese nula seja rejeitada com um determinado nível de confiança, adotado 95% para os estudos desse trabalho. Modelos que apresentem coeficientes β que não satisfaçam essa condição devem ser descartados, por mais que apresentem valor atrativo de VMP.

2.1.3 – Utilização de modelos hidrológicos

Outra forma de estimar vazões em locais sem dados disponíveis é utilizar modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão. Uma vantagem deste método em relação aos outros apresentados acima consiste no tamanho da série gerada não estar limitada ao tamanho da série do posto de referência, mas sim ao tamanho da série de precipitação da região. Na grande maioria das situações, o tamanho das séries de precipitação é maior do que das séries de vazão.

A desvantagem do método está relacionada à dificuldade em estimar os valores dos parâmetros do modelo hidrológico, já que não há dados de vazão para realizar um estudo de calibração. O grau de incerteza dessas estimativas costuma ser grande, levando a consideráveis incertezas na série de vazões geradas.

Há duas estratégias para estimar os valores de parâmetros de modelos hidrológicos em locais sem dados de vazão: (1) por meio de relações dos parâmetros com medições de propriedades físicas da bacia ou (2) por meio da construção de uma relação empírica entre os parâmetros do modelo e características climáticas e fisiográficas da bacia. As duas estratégias são foco de intensas pesquisas

na área de hidrologia, como em Wagener et. al (2004). Entretanto, ainda não se obteve um método que apresente bom desempenho para os mais diversos casos.

A estratégia utilizada neste trabalho foi a segunda, normalmente chamada de regionalização hidrológica por regressão ou regressão hidrológica. Em específico, será utilizado o modelo SMAP, um modelo do tipo precipitação-vazão descrito detalhadamente na seção 3, cujos parâmetros foram estimados com base em regressão linear regional, apresentada anteriormente.

2.2 – Simulação energética de aproveitamentos hidrelétricos

A potência fornecida por um grupo hidrogerador pode ser definida pela seguinte expressão:

$$P = \rho_{\text{água}} g H_L Q \eta \quad (11)$$

em que $\rho_{\text{água}}$ é massa específica da água, g a aceleração da gravidade, H_L a queda líquida, Q a vazão turbinada e η o rendimento do grupo hidrogerador.

O comportamento hidroenergético de um aproveitamento pode ser analisado a partir da curva de permanências de vazões médias mensais afluentes no local, uma vez que a mesma relaciona vazões com intervalos de tempo e fornecem a idéia da regularização hidrológica. (ANEEL, 2008)

Devido à inviabilidade econômica, usualmente não se utiliza toda a disponibilidade hídrica para geração de energia, devendo-se escolher uma vazão de projeto para dimensionamento das turbinas, denominada vazão máxima turbinada (Q_{turb}). A potência instalada está associada a esta vazão, aplicando-a na Equação 11.

De acordo com ANEEL (2008), a energia média mensal pode ser diretamente obtida por meio de uma simulação energética, mês a mês, resultando do somatório das energias produzidas em cada mês, descontadas as indisponibilidades:

$$E_{\text{med-mensal}} = \frac{\sum_{i=1}^k \rho_{\text{água}} g H_L Q_{\text{turb}-i} \eta_t \eta_g n_{\text{mês}-i}}{k} \quad (12)$$

em que $Q_{\text{turb}-i}$ é vazão turbinada no mês i , η_t e η_g os rendimento da turbina e gerador, $n_{\text{mês}-i}$ o número de horas no mês i , e k o número de meses da simulação energética.

A energia média do aproveitamento, em kW, é calculada pela divisão da energia média anual pelo número de horas do ano. Ou seja, a denominada “energia média” do setor elétrico nada mais é do que uma potência média gerada ao longo do ano.

Sendo a energia média a grandeza que corresponde à expectativa de geração do aproveitamento, ou seja, o montante de energia que será produzido, em média anual, e remunerado, é comum relacionar essa energia com a potência instalada da usina. Essa relação é denominada fator de capacidade, cujo valor de referência do setor elétrico brasileiro é de 0,55, mas que depende

fortemente do comportamento hidrológico da bacia, podendo variar entre 0,30 (bacias com muita sazonalidade) e 0,90 (bacias muito regularizadas, com pequenas variações médias mensais).

Outra forma de analisar a relação é construindo um gráfico “Potência instalada x Energia média”, exemplificado pela Figura 1.

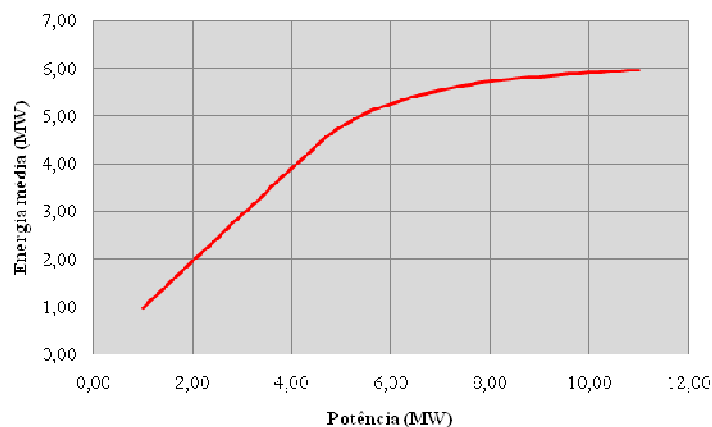


Figura 1 – Exemplo de curva “Potência instalada x Energia média”

Pode-se notar que o ganho energético diminui gradativamente a partir de um dado valor de potência. Isso ocorre devido à diminuição da permanência de vazões turbinadas maiores, associadas aos maiores valores de potência instalada (Figura 1).

Para um determinado ponto deve ocorrer a saturação energética do aproveitamento, ou seja, para quaisquer acréscimos de vazão turbinada não há quaisquer ganhos energéticos, reduzindo-se desnecessariamente o fator de capacidade da usina.

2.3 – Comparação das metodologias via estudo de validação cruzada

A validação cruzada é uma metodologia de análise de desempenho de modelos regionais. Apresentado por Castellarin et. al (2004) apud Figueiredo (2011), a validação cruzada tipo “jack-knife” pode ser descrita de forma sucinta pelas seguintes etapas:

1. Gera-se um modelo de regionalização com base nos dados dos postos disponíveis para estudo;
2. Remove-se um dos postos do grupo;
3. Utilizando as mesmas variáveis explicativas do passo 1, gera-se um novo modelo de regionalização a partir dos dados dos N-1 postos disponíveis;
4. A partir do modelo regional gerado na etapa anterior, pode-se estimar o valor do parâmetro de interesse para o posto que foi retirado no passo 2;
5. Os resultados obtidos são comparados aos valores observados do posto utilizando-se um índice de desempenho, verificando-se assim a qualidade do modelo;
6. Repete-se os passos 2 a 5 para todas as estações.

O índice de desempenho a ser utilizado pode ser escolhido dentre vários disponíveis na literatura, sendo, inclusive, alguns trabalhos como Krause et. al (2005) voltados à avaliar a eficácia desses índices em mensurar a qualidade dos dados estimados. Optou-se por utilizar o coeficiente proposto por Nash-Sutcliffe (1970), já apresentado anteriormente.

Portanto, a validação cruzada tem como objetivo avaliar se a perda das informações referente ao posto retirado compromete a capacidade do modelo em estimar os parâmetros deste posto. A estimativa de resultados não satisfatórios significa que o modelo não está conseguindo representar bem a região estudada.

3 – MODELO HIDROLÓGICO SMAP

O SMAP é um modelo de transformação chuva-vazão simplificado, desenvolvido por Lopes et al. (1981), cujos parâmetros são relacionados com características físicas da bacia. O modelo trabalha com intervalos de tempo diários ou mensais, sendo apenas a versão mensal abordada no presente trabalho.

Para ser executado, o modelo SMAP necessita da série temporal de duas variáveis: precipitação e evapotranspiração potencial.

Na escala mensal, o modelo SMAP simula o armazenamento e o fluxo entre dois reservatórios lineares fictícios: um representando o solo e outro o aquífero.

Para cada evento de precipitação (P) é realizado um balanço de massa em todo o sistema. Parte dessa precipitação é convertida em escoamento superficial (ES), enquanto o restante (P - ES) sofre perda por evaporação (EP) antes de seguir para o reservatório que representa o solo.

A umidade do reservatório do solo é atualizada com o tempo levando em consideração as perdas por evapotranspiração real (ER). ER é função da evapotranspiração potencial (EP) e da umidade (TU) do solo, obtida pela relação entre o nível do reservatório (RSOLO) e a capacidade de saturação (SAT) desse mesmo material.

O reservatório do solo sofre ainda perda pela recarga (REC) do reservatório subterrâneo, sendo esta função de um coeficiente de recarga, da umidade TU, e do nível RSOLO.

O nível (RSUB) do reservatório subterrâneo é deplecionado a uma taxa constante (K), gerando o escoamento de base (EB), função dessa taxa K e do nível RSUB.

A soma do escoamento superficial (ES) com o escoamento de base (EB) resulta na vazão efluente do ponto estudado. A Figura 2 apresenta todo o esquema do modelo SMAP anteriormente descrito.

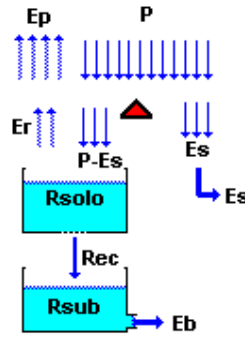


Figura 2 - Esquema do modelo SMAP

O modelo SMAP possui quatro parâmetros que necessitam de calibração: o expoente K_{es} utilizado para o cálculo de ES; a capacidade de saturação do solo (SAT); o coeficiente de recarga do aquífero (CREC) e a taxa de deplecionamento (K). A taxa de umidade inicial (TU_{in}) e o escoamento de base inicial (EB_{in}) podem ser calibrados, quando não se dispõe de informações de campo.

Optou-se por utilizar a calibração dos parâmetros por otimização, visto que a metodologia por tentativa e erro exige maior experiência do usuário. Collischonn e Tucci (2003) alertam que a utilização de métodos computacionais não isentam o hidrólogo da responsabilidade de conferir a validade dos parâmetros calculados.

A calibração exige ainda que seja definida uma função objetivo, cuja escolha não é uma tarefa simples. Usualmente são mais utilizadas as relacionadas à soma dos quadrados das diferenças entre os valores calculados e observados. Esse tipo de função ganhou destaque, já que não apresenta importantes irregularidades. Porém, assume implicitamente que os erros são independentes e possuem mesma variância ao longo do tempo. Neste trabalho será utilizado como função objetivo o coeficiente de Nash-Sutcliffe (1970), apresentado abaixo,

$$NS = 1 - \frac{\sum(Q_{obs,i} - Q_{est,i})^2}{\sum(Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (13)$$

Desta forma, quanto mais próximos da unidade os valores de NS, mais próximos dos valores observados estão os valores calculados pelo modelo.

Há ainda outras formas adaptadas do coeficiente NS. Este trabalho utilizará a versão aplicada a curvas de permanência que faz a comparação de vazões com valores específicos de permanência, conforme a Equação 14.

$$NS = 1 - \frac{\sum(Q_{obs,i}^{Pe} - Q_{est,i}^{Pe})^2}{\sum(Q_{obs,i}^{Pe} - \bar{Q}_{obs}^{Pe})^2} \quad (14)$$

onde $Q_{obs,i}^{Pe}$ e $Q_{sim,i}^{Pe}$ são respectivamente as vazões estimada e simulada com probabilidade $Pe\%$ de não-excedência, e \bar{Q}_{obs}^{Pe} a média das vazões observadas associadas aos percentis $Pe\%$.

4 – ESTUDO DE CASO

O estudo comparativo entre as três metodologias de estimativa de séries de vazões médias foi baseado na bacia do rio Paranã, afluente do rio Tocantins, e três bacias adjacentes, pertencentes à sub-bacia 46. Essa região encontra-se na divisa dos estados de Goiás, Tocantins e Bahia, sendo que a maior parte da área estudada está compreendida nesses dois primeiros estados. A seguir são apresentados o conjunto de dados utilizados no trabalho.

4.1 – Dados fluviométricos

O levantamento dos postos fluviométricos com dados de vazão disponíveis foi realizado na sub-bacia 21, e em parte da sub-bacia 46, bacia adjacente aos rios estudados. A Tabela 1 apresenta os postos que foram utilizados com suas respectivas coordenadas.

Tabela 1 – Relação de postos fluviométricos

Posto		Coordenadas			
Código	Nome	Latitude	Longitude	UTM	
21220000	FLORES DE GOIÁS	14° 27' 3" S	47° 2' 50" W	279314	8401423
21300000	ALVORADA DO NORTE	14° 28' 37" S	46° 29' 26" W	339355	8398997
21500000	NOVA ROMA (FAZ.SUCURI)	13° 45' 45" S	46° 50' 15" W	301334	8477776
21510000	PONTE SÃO MATEUS	13° 48' 35" S	46° 38' 58" W	321707	8472699
21560000	FAZENDA VENEZA	13° 29' 55" S	46° 46' 49" W	307308	8507020
21580000	SÃO VICENTE	13° 33' 5" S	46° 28' 10" W	340994	8501404
21600000	PONTE PARANÃ	13° 25' 26" S	47° 7' 55" W	269159	8514985
21750000	LAVANDEIRA	12° 47' 37" S	46° 30' 44" W	335860	8585203
21850000	RIO DA PALMA	12° 24' 56" S	47° 11' 58" W	260889	8626503
21890000	BARRA DO PALMA	12° 36' 12" S	47° 51' 41" W	189103	8605030
21900000	PARANÃ	12° 37' 20" S	47° 53' 9" W	186468	8602909
46420000	RODA VELHA DE BAIXO	12° 42' 55" S	45° 50' 43" W	408230	8594196
46520000	RIO DE PEDRAS	12° 11' 40" S	45° 29' 23" W	446727	8651892
46530000	LIMOEIRO	12° 17' 14" S	45° 32' 58" W	440251	8641620

4.2 – Dados pluviométricos

Da mesma forma que foi feito em relação aos postos fluviométricos, foi realizado também um levantamento dos postos pluviométricos da região. Foram priorizados os postos localizados dentro das áreas das bacias dos postos fluviométricos.

Pode-se perceber que a densidade de postos pluviométricos na região é baixa, o que dificultou a realização dos trabalhos. Além disso, há alguns destes postos que apresentam séries com muitas falhas, impossibilitando a utilização de seu período integral de dados no modelo SMAP. Foram considerados no total dados de 40 postos pluviométricos, permitindo a utilização do método de Thiessen para a geração de séries de precipitação das bacias em estudo.

4.3 – Dados de evapotranspiração

Foram selecionadas cinco estações da publicação “Normais Climatológicas do Brasil 1961 - 1990”, do INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, de onde foram obtidos os dados de evapotranspiração necessários para execução do modelo SMAP.

4.4 – Características fisiográficas e climatológicas

As características fisiográficas e climatológicas, necessárias para o processo de regionalização, foram obtidos de forma automática com base em Modelos Digitais de Elevação (MDEs) do SRTM disponibilizados pela EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. A Tabela 2 apresenta as características obtidas para cada posto.

Tabela 2 – Características fisiográficas das bacias dos postos fluviométricos

Posto		Área de Drenagem (km ²)	Comprimento do rio (km)	Declividade total (m/km)	Fator de Forma
Código	Nome				
21220000	FLORES DE GOIÁS	7209	181,92	1,578	0,218
21300000	ALVORADA DO NORTE	3762	91,72	2,497	0,447
21500000	NOVA ROMA (FAZ,SUCURI)	22633	292,39	4,166	0,265
21510000	PONTE SÃO MATEUS	1019	57,49	4,835	0,308
21560000	FAZENDA VENEZA	2840	91,15	4,322	0,342
21580000	SÃO VICENTE	398	42,20	5,664	0,224
21600000	PONTE PARANÃ	29610	368,38	3,904	0,218
21750000	LAVANDEIRA	1048	59,21	4,510	0,299
21850000	RIO DA PALMA	12696	163,63	2,084	0,474
21890000	BARRA DO PALMA	17664	278,94	1,208	0,227
21900000	PARANÃ	40286	583,52	3,309	0,118
46420000	RODA VELHA DE BAIXO	535	51,36	3,680	0,203
46520000	RIO DE PEDRAS	1489	112,25	1,728	0,118
46530000	LIMOEIRO	1899	88,23	2,074	0,244

5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 – Regionalização da média e desvio-padrão das vazões mensais

Como já foi abordado no item 2.1.2, o procedimento apresentado por Hirsch (1979) exige que sejam estimados, via estudo de regionalização, valores mensais de média e desvio-padrão para cada local onde se deseja aplicar o método.

A regionalização dessas variáveis foi realizada por meio de um estudo de regressão utilizando como variáveis explanatórias a área (A) da bacia dos postos e a chuva média mensal (P_m), visto que é essa a escala temporal adotada pelo método. Para melhor ajuste ao padrão linear, foi aplicado o

logaritmo natural a todas as variáveis. Sendo adotadas duas variáveis explanatórias, os modelos possíveis para regressão foram os seguintes:

$$\text{Modelo 1} \rightarrow \ln(X) = \beta_0$$

$$\text{Modelo 2} \rightarrow \ln(X) = \beta_0 + \beta_1 \ln(A)$$

$$\text{Modelo 3} \rightarrow \ln(X) = \beta_0 + \beta_2 \ln(P_m)$$

$$\text{Modelo 4} \rightarrow \ln(X) = \beta_0 + \beta_1 \ln(A) + \beta_2 \ln(P_m)$$

A escolha do modelo a ser adotado foi baseada no valor da variância média de predição (VMP), desde que os parâmetros β fossem comprovados estatisticamente diferentes de zero pelo teste de *t-Student*. Desta forma, utilizando a metodologia de validação cruzada previamente descrita, foi adotado um modelo de regressão para cada mês do ano para cada um dos postos fluviométricos estudados. Pode-se notar que, tanto para a vazão média mensal, quanto para o desvio-padrão, houve forte predominância do modelo que utiliza apenas a área da bacia como variável explanatória.

A Figura 3 apresenta dois gráficos relacionando os valores observados e os valores estimados via regionalização para as vazões médias e os desvios-padrão.

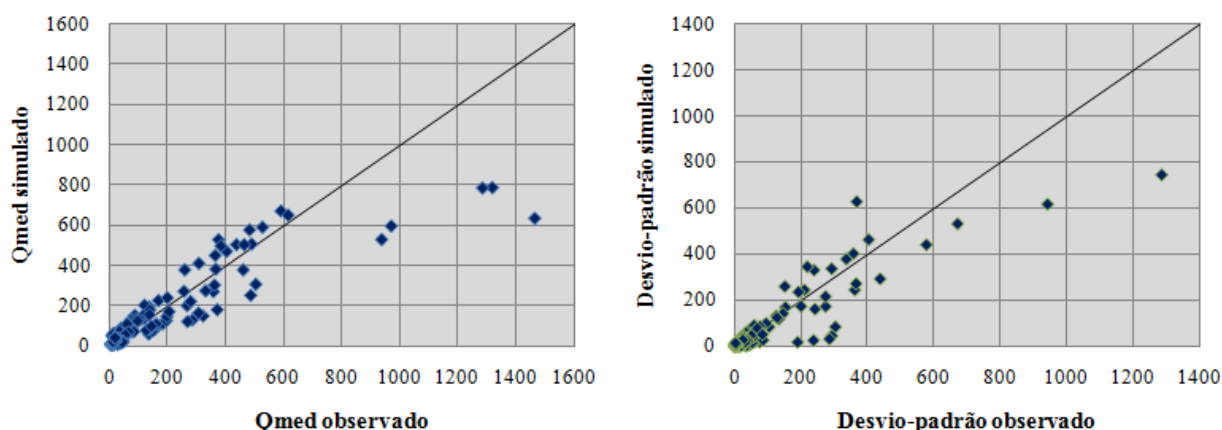


Figura 3 – Gráficos comparativos – Valores observados e estimados

5.2 – Calibração dos parâmetros do modelo SMAP

A calibração dos parâmetros do modelo SMAP utilizou como algoritmo de otimização o PSO (Particle Swarm Optimization) e como função objetivo o coeficiente (NS) de Nash-Sutcliffe aplicado a curvas de permanência. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos da calibração.

Tabela 3 – Calibração dos parâmetros do modelo SMAP

Posto	Sat	Pes	Crec	K	Tuin	Ebin	Coefficiente NS
21220000	2557,86	5,99	0,72	3,29	83,68	9,71	0,994
21300000	655,43	4,91	96,26	7,49	0,00	54,38	0,992
21500000	1154,10	5,35	7,55	2,58	40,27	172,16	0,999
21510000	640,99	3,39	97,66	6,03	0,00	13,71	0,993

Posto	Sat	Pes	Crec	K	Tuin	Ebin	Coefficiente NS
21560000	843,63	3,15	90,17	19,00	34,74	28,83	0,987
21580000	680,11	2,62	61,33	68,58	14,36	13,87	0,975
21600000	2008,30	2,57	7,76	7,81	14,30	163,16	0,990
21750000	782,13	6,94	74,20	14,08	71,82	7,04	0,381
21850000	2800,00	10,80	6,10	5,10	98,20	12,00	0,934
21890000	4329,32	10,11	1,25	7,10	86,56	50,47	0,997
21900000	798,87	2,89	24,66	9,37	75,21	89,53	0,994
46420000	2750,66	12,66	20,37	15,97	41,58	9,26	0,944
46520000	2302,83	6,48	14,48	19,01	11,45	24,53	0,947
46530000	2769,64	11,78	9,55	5,17	69,91	8,10	0,940

Analisando de maneira geral os valores dos coeficientes NS, nota-se que, a não ser pelo posto 21750000, foram obtidos bons resultados. Entretanto, por meio de análise visual comparativa nos hidrogramas gerados e estimados, percebe-se que o ajuste realizado para os postos da sub-bacia 46 não foram satisfatórios e que, aparentemente o problema maior no posto 21750000 está na magnitude dos valores estimados, e não no comportamento temporal das vazões. A Figura 4 ilustra o hidrograma comparativo do posto 21750000 e um exemplo de posto da sub-bacia 46.

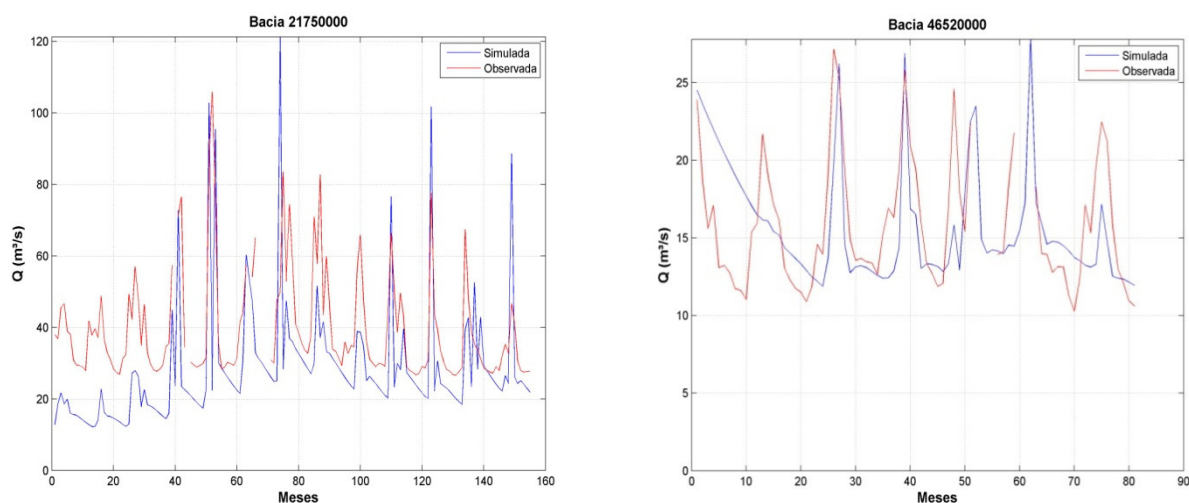


Figura 4 – Hidrogramas comparativos – Calibração dos parâmetros SMAP (Postos 21750000 e 46520000)

5.3 – Regionalização dos parâmetros do modelo SMAP

A regionalização dos parâmetros do SMAP foi realizada com base em características climáticas e fisiográficas das bacias dos postos fluviométricos. Ao contrário da regionalização das vazões médias e desvio-padrão mensais que utilizou duas variáveis explanatórias, foram consideradas cinco para esta regionalização: área (A) da bacia, precipitação média anual (P_a), comprimento do rio principal (C), declividade do rio principal (D) e fator de forma (FF) da bacia. Sendo cinco as variáveis explanatórias, por análise combinatória, há 32 tipos de modelos possíveis de regressão para cada parâmetro do modelo SMAP.

Os postos 21750000, 46420000, 46520000 e 46530000 não foram considerados nos cálculos, visto que não apresentaram bons resultados de calibração. A inclusão desses postos contribuiria com o acréscimo de informações que não devem representar a realidade local. Desta forma, apenas dez postos foram utilizados no estudo de regressão dos parâmetros do modelo. No entanto, como a idéia geral do trabalho é avaliar as diferentes metodologias por meio de um estudo de validação cruzada, no qual um posto é retirado do grupo a cada etapa, as equações de regressão de cada modelo, para cada posto, foram obtidas com base em dados de apenas nove postos fluviométricos.

Foram regionalizados quatro parâmetros: SAT, Kes, CREC e K, utilizando a seguinte metodologia:

1. Realização do estudo de regressão linear para cada um dos quatro parâmetros do modelo SMAP, considerando todos os 32 modelos possíveis. Esta etapa empregou todos os 10 postos fluviométricos.

2. Escolha do melhor modelo regional com base no menor valor de variância média de predição e no teste t-Student dos coeficientes β , verificando se é possível ou não rejeitar a hipótese nula de que $\beta=0$. As etapas (1) e (2) foram realizadas apenas para definir quais variáveis explanatórias seriam utilizadas em cada equação regional dos parâmetros do modelo SMAP. Os valores dos coeficientes β obtidos nessa etapa foram utilizados apenas para os quatro postos que obtiveram resultados ruins de calibração. A idéia foi obter equações diferentes (valores de β diferentes) para um dos 10 postos fluviométricos restantes via estudo de validação cruzada.

3. Escolhido o tipo de modelo (definição das variáveis explanatórias) de acordo com o item anterior, partiu-se para a utilização da validação cruzada para cálculo dos coeficientes β de cada regressão. Desta forma, foram obtidas 40 equações regionais (4 parâmetros do modelo SMAP x 10 postos fluviométricos). Nesta etapa, todas as equações regionais foram obtidas com base nos dados de apenas nove postos, já que os dados do posto em questão foram removidos da amostra.

Com base nas etapas (1) e (2), os tipos de modelo adotados para cada parâmetro do modelo SMAP foram os seguintes:

$$\ln(\text{SAT}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(P_m)$$

$$\ln(\text{Kes}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(D) + \beta_2 \ln(\text{FF})$$

$$\ln(\text{CREC}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(A) + \beta_2 \ln(P_m) + \beta_3 \ln(C) + \beta_4 \ln(\text{FF})$$

$$\ln(K) = \beta_0 + \beta_1 \ln(A)$$

Calculadas as equações para cada parâmetro, para cada posto, pode-se enfim estimar seus valores, apresentados na Tabela 4. Em relação aos quatro postos que não foram considerados inicialmente para a escolha das variáveis a serem utilizadas nos modelos, seus parâmetros foram estimados a partir das regressões gerais (passo 2).

Tabela 4 – Parâmetros regionalizados do modelo SMAP

Posto	SAT	Kes	CREC	K
21220000	1881.52	7.58	3.19	9.46
21300000	877.92	7.77	198.77	11.24
21500000	1198.95	3.23	4.43	6.65
21510000	837.77	3.27	283.78	25.12
21560000	962.05	3.99	30.85	11.01
21580000	494.90	2.44	18.79	8.88
21600000	1114.10	3.49	25.76	4.62
21850000	3591.07	6.82	1.30	6.64
21890000	2621.39	7.99	1.23	6.04
21900000	1229.76	2.82	1.32	3.62
21750000	4058.26	3.44	1.30	16.90
46420000	3152.14	3.39	0.77	21.47
46520000	1690.32	4.88	5.70	14.92
46530000	1581.72	5.93	8.39	13.68

5.4 – Análise comparativa de desempenho dos métodos

O estudo comparativo entre os três métodos foi baseado na curva de permanência de vazões e na curva de energia. Em relação aos resultados sobre a curva de permanência, após a execução de cada metodologia, a avaliação da qualidade dos resultados foi feita novamente utilizando o coeficiente proposto por Nash-Sutcliffe (1970). A Tabela 5 apresenta os valores obtidos para cada posto para cada método.

No caso dos dois primeiros métodos, fez-se necessário escolher um posto base para cada posto de interesse. Quanto ao método de correção pela área da bacia, foi utilizado como base o posto mais próximo, mesmo que, na maior parte dos casos, estes não tenham sido os que melhor representaram o comportamento do posto de interesse. Essa decisão se baseou no fato de que, no caso da estimativa de uma série para um local sem dados, não haveria dados observados para fazer comparações e escolher a melhor relação. Deve-se lembrar que estudos, como Archfield e Vogel (2010), abordam métodos mais sofisticados e mais trabalhosos de escolha do posto base que poderiam resultar em resultados melhores. A relação com o posto mais próximo foi adotada por ser mais simples e usual.

Já para o método das vazões padronizadas, foram adotados os postos base que ofereceram os melhores resultados. Uma vez que o procedimento não estipula critérios para escolha da base, a decisão torna-se subjetiva e dependente da experiência do hidrólogo. Decidiu-se então, como critério, supor que a melhor opção tenha sido feita pelo profissional.

Tabela 5 – Comparação entre os resultados dos coeficientes NS obtidos para os três métodos

	Método da correção pela área	Método das vazões médias padronizadas	Regionalização modelo SMAP
Posto	Coefficiente NS	Coefficiente NS	Coefficiente NS
21220000	0,731	0,779	0,822
21300000	0,632	0,945	0,708
21500000	0,784	0,854	0,761
21510000	0,727	0,834	0,866
21560000	0,626	0,963	0,833
21580000	0,032	-0,069	-0,554
21600000	0,859	0,991	0,932
21750000	-1,386	-1,275	-0,882
21850000	0,949	0,873	0,905
21890000	0,756	0,971	0,250
21900000	0,878	0,655	0,891
46420000	-4,603	-3,928	-22,312
46520000	0,827	-3,946	-2,286
46530000	0,748	-10,135	-3,524
Média (sem sub-bacia 46)	0,508	0,593	0,503

Os resultados obtidos para os três postos da sub-bacia 46 foram muito ruins. As séries de dados destes postos são relativamente curtas e com diversas falhas, especialmente a do posto 46420000, que apresentou péssimos resultados nos três métodos avaliados. Especificamente no caso do método que utiliza o modelo hidrológico SMAP, a situação é ainda pior, pois foi verificado no estudo de calibração um alto grau de incompatibilidade entre as chuvas estimadas pelo método de Thiessen e as vazões observadas, provavelmente consequência da baixa densidade de postos pluviométricos nessas bacias. Além da Tabela 5, foi confeccionado um gráfico do tipo *boxplot* (Figura 5) com o intuito de fornecer uma visão comparativa entre os modelos. Pode-se notar um melhor desempenho do método proposto por Hirsch (1979), embora o valor da mediana esteja bem próximo ao valor da mediana do método baseado na regionalização dos parâmetros do modelo SMAP.

Apesar dos resultados relativos à curva de permanência serem importantes num estudo de avaliação, no que concerne aos estudos energéticos, o fator preponderante na análise de desempenho dos diferentes métodos de estimativa de séries de vazão está na capacidade destes em representar de maneira satisfatória a curva “Potência instalada x Energia” para os locais de interesse.

Realizando a mesma análise comparativa a respeito dos resultados obtidos para a curva de energia, pode-se definir qual dos métodos obteve melhor desempenho em relação a esse critério. Para tal, decidiu-se não mais utilizar o coeficiente NS como coeficiente de desempenho, mas sim o erro médio relativo, definido como sendo a média dos erros relativos absolutos quando analisados

um conjunto de pontos. A Tabela 6 apresenta os valores dos erros médios relativos obtidos para cada posto utilizando cada um dos métodos.

Tabela 6 – Comparação entre os erros médios relativos obtidos para os três métodos

	Método de correção pela área	Método das vazões médias padronizadas	Regionalização modelo SMAP
Posto	Erro médio Relativo	Erro médio Relativo	Erro médio Relativo
21220000	77,6%	58,2%	36,6%
21300000	42,1%	2,1%	9,6%
21500000	44,9%	24,3%	12,0%
21510000	33,6%	29,8%	34,6%
21560000	36,0%	5,0%	17,4%
21580000	35,0%	25,2%	60,3%
21600000	29,3%	0,9%	22,2%
21750000	33,2%	40,4%	51,0%
21850000	13,7%	22,1%	10,2%
21890000	5,1%	16,3%	10,6%
21900000	5,2%	32,7%	26,5%
46420000	29,7%	12,2%	28,4%
46520000	10,6%	8,2%	23,0%
46530000	11,7%	18,9%	6,8%
Média	29,1%	21,2%	24,9%

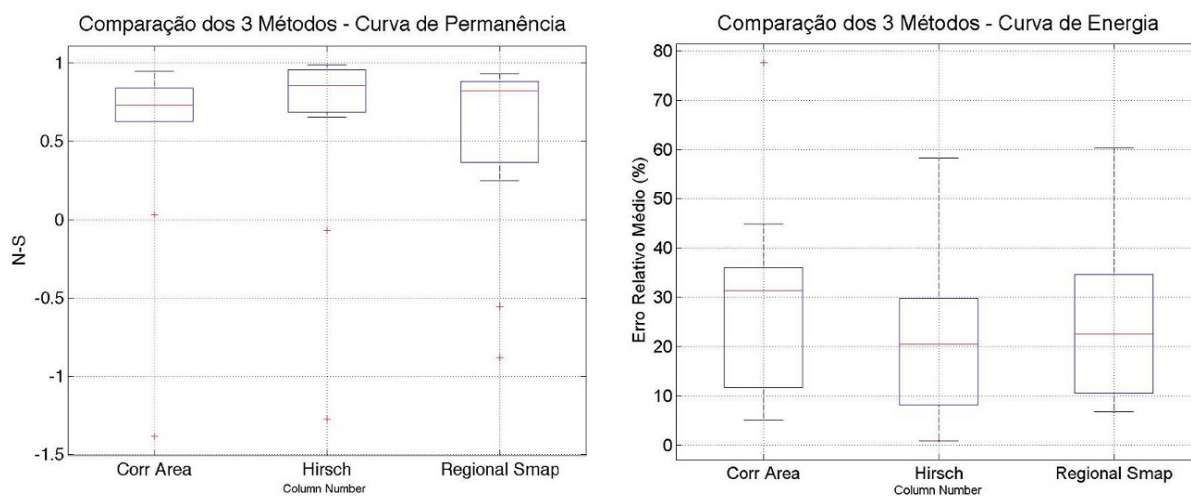


Figura 5 – Gráficos comparativos entre os métodos

Assim como foi feito em relação à análise comparativa das curvas de permanência, foi construído um gráfico comparativo tipo *boxplot* com a finalidade de fornecer uma melhor visão dos resultados. (Figura 5).

Quanto à curva energética, não houve um método que prevalecesse em todos os postos. Pode-se notar em muitos casos que, tratando-se de um mesmo posto, a variação dos resultados entre os métodos é relativamente grande. Em alguns postos o erro médio relativo calculado foi grande para qualquer uma das metodologias, como é o caso do posto 21220000, 21510000 e 21750000. Salvo os

casos dos postos 21890000 e 21900000, os métodos das vazões médias padronizadas e o método da regionalização dos parâmetros tiveram melhores resultados que o método de correção por área da bacia.

Outro ponto interessante a observar é que os resultados dos postos da sub-bacia 46 não foram tão ruins quanto o esperado, levando em conta as péssimas avaliações realizadas para suas curvas de permanência. Isso significa que mesmo não correspondendo à realidade hidrológica nesses postos, a série de vazões estimadas pelas metodologias apresenta geração energética não muito distante da observada. É evidente que esse fato não pode ser interpretado como um resultado satisfatório para o modelo, visto que o ajuste entre as curvas ocorreu por mera coincidência, não representando qualquer comportamento hidrológico das bacias.

O gráfico tipo *boxplot* dos erros médios relativos das curvas de energia mostra novamente o método proposto por Hirsch (1979) como o que apresenta os melhores resultados. Da mesma forma que o gráfico anterior, as medianas dos métodos das vazões médias padronizadas e de regionalização dos parâmetros do modelo SMAP ficaram muito próximas, bem abaixo do valor referente ao método da correção pela área da bacia do posto mais próximo. Pode-se verificar que, no caso do método de Hirsch, em 75% dos casos os erros relativos foram menores do que 30%, e em 25% dos casos os erros foram menores do que 9%.

Buscou-se também investigar se havia regiões definidas na qual algum dos métodos tenha prevalecido, por qualquer justificativa. Infelizmente, nenhum padrão foi encontrado em relação à distribuição espacial dos resultados.

6 – CONCLUSÕES

Este trabalho analisou três diferentes métodos de estimativa de séries de vazões médias mensais para locais com dados insuficientes ou inexistentes, levando em consideração que as séries geradas seriam utilizadas num estudo de simulação energética. Os métodos abordados foram: correção pela área de drenagem utilizando um posto próximo como referência; método das vazões mensais padronizadas proposto por Hirsch (1979) e simulação hidrológica baseada em modelo chuva-vazão com parâmetros estimados via estudo de regionalização.

Uma vez que são necessários dados de referência para analisar a qualidade dos métodos, estes foram aplicados às próprias bacias dos postos fluviométricos da região de estudo. Desta forma, foi possível comparar os valores gerados pelos métodos com aqueles observados. A comparação foi toda baseada num estudo de validação cruzada. Além da avaliação das estimativas de vazão obtidas pelos três métodos, representadas pelas curvas de permanência, o estudo comparativo empregou também o desempenho dessas metodologias na simulação de estudos energéticos de

aproveitamentos hidrelétricos fictícios, tendo em vista que o objetivo geral do trabalho era avaliar essas metodologias para fins de geração de energia elétrica.

O método proposto por Hirsch (1979) mostrou-se o melhor dentre os três analisados. Deve-se ressaltar que o desempenho deste método depende muito do posto base que é escolhido para gerar os dados mensais. No presente estudo, foi escolhido o melhor dentre os postos mais próximos ao local de interesse. Porém, para gerar séries em locais sem dados, a escolha do posto base fica susceptível à experiência do hidrólogo e ao conhecimento da região de interesse. O segundo melhor método avaliado foi aquele que emprega o modelo hidrológico SMAP com os valores dos parâmetros estimados através de um estudo de regressão. É possível que melhores resultados fossem obtidos com este método caso fossem incorporadas ao grupo de variáveis explanatórias índices de uso e ocupação do solo e características geológicas e geomorfológicas das bacias.

Pôde-se notar a partir dos resultados obtidos nos estudos energéticos, que a escolha do modelo de estimativa de séries de vazões tem grande influência na estimativa da variabilidade e capacidade energética de um aproveitamento hidrelétrico. A média e a mediana dos erros médios relativos das curvas energéticas estimadas foram de aproximadamente 20% em relação às observadas, o que pode ser determinante em relação a decisões de investimentos. De toda forma, a estimativa dos erros na construção dessas curvas de “Potência instalada x Energia média”, que são fundamentais na definição da potência instalada ótima de uma usina, deve ser visto como algo positivo porque fornece informação valiosa aos tomadores de decisão.

Por fim, vale notar que os resultados obtidos neste trabalho não podem ser generalizados para outras bacias, visto que dependem muito das características regionais.

BIBLIOGRAFIA

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Sistema de informações hidrológicas - HIDROWEB*. Disponível em <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 1 jul. 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Revisão dos Estudos de Inventário do rio Forquilha, sub-bacia 72, Estado do Rio Grande do Sul*. Nota Técnica nº 001, de 02 de janeiro de 2008. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1655>. Acesso em: 9 ago. 2010.

ARCHFIELD, S. A. e VOGEL, R. M (2010). “*Map correlation method: Selection of a reference streamgage to estimate daily streamflow at ungaged catchments*”. *Water Resources Research*, 46, W10513, doi:10.1029/2009WR008481, 2010.

COLLISCHONN, W. e TUCCI C. E. M. (2003). “*Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico*”. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.8, n.3 Jul/Set 2003, 27-39.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *O Brasil em relevo*. Disponível em < <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download/index.htm/>>. Acesso em 1 set. 2010.

FIGUEIREDO, V. A. *Modelos Regionais de curvas de permanência de vazões para rios perenes, intermitentes e efêmeros, e seu emprego na calibração indireta de modelos de simulação hidrológica*. 2008. 72 f. Tese de Dissertação de mestrado - Programa de pós-graduação em saneamento, Meio ambiente e Recursos Hídricos da Universidade federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.

HIRSCH, R. (1979), “*Evaluation of some record reconstruction techniques*”, *Water Resources Research*, 15(6), 1781–1790, ISSN 0043 - 1397.

KRAUSE, P.; BOYLE, D. P e BÄSE F. (2005). “*Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment*”. *Advances in Geosciences*, 5, 89–97, 2005.

LOPES, J. E. G; BRAGA JR., B. P. F e CONEJO, J. G. L. (1981) “*Simulação hidrológica: Aplicações de um modelo simplificado*”. In: *Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, v.2, 42-62, Fortaleza.

MASIH, I.; UHLENBROOK, S.; MASKEY S. e AHMAD, M. D. (2010). “*Regionalization of a conceptual rainfall–runoff model based on similarity of the flow duration curve: A case study from the semi-arid Karkheh basin, Iran*”. *Journal of Hydrology*, 391, 188–201.

NASH, J. E. e SUTCLIFFE, J. V. (1970). “*River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles*”. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.

REIS, D. S. Jr.; STEDINGER, J. R. e MARTINS, E. S. (2005) “*Bayesian generalized least squares regression with application to log Pearson type 3 regional skew estimation*”. *Water Resources Research*, 41, W10419, doi:10.1029/2004WR003445, 2005.

WAGENER, T.; WHEATER, H. S. e GUPTA, H. V. (2004) “*Rainfall-runoff modeling in gauged and ungauged catchments*”. Imperial College Press, London.