

Previsão de Vazões na Bacia do Rio Iguaçu Baseada no Modelo SMAP e com Incorporação de Informações de Precipitação

Giancarlo Castanharo

COPEL – Companhia Paranaense de Energia
giancarlo.castanharo@copel.com

Rosana de Fátima Colaço Gibertoni, Ingrid Illich Müller, Marcos Vinicius Andriolo

Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC - Curitiba, PR
rosana@lactec.org.br, ingrid@lactec.org.br, marcosandriolo@lactec.org.br

Eloy Kaviski

UFPR – Universidade Federal do Paraná
eloy.dhs@ufpr.br

Luiz Guilherme Ferreira Guilhon, Vinicius Forain Rocha

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico
guilhon@ons.org.br, forain@ons.org.br

Recebido: 02/05/06 - revisado: 29/01/07 - aceito: 09/08/07

RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo de previsão de vazões com horizonte de até 12 dias para a bacia do rio Iguaçu, no trecho a montante da UHE Salto Osório. A previsão de vazões é realizada através do modelo chuva-vazão SMAP aplicado separadamente em sub-bacias e apoiada na previsão quantitativa de chuva com valores fornecidos pelo modelo ETA-CPTEC. O modelo utiliza uma rotina de interpolação espacial de dados para o cálculo da chuva média observada e prevista, e procedimentos de propagações e retro-propagações das vazões com os tempos de propagação determinados pela técnica da onda cinemática.

Foram analisadas diversas versões do método proposto, dada a dificuldades em se conhecer a resposta do modelo aos diferentes conjuntos de parâmetros, das imprecisões nos dados observados e previstos, e das simplificações do modelo. A partir de uma estrutura geral do método utilizado foram definidas 10 versões de modelo, cujas diferenças estão centradas na calibração dos parâmetros e na correção do estado de umidade da bacia. A adequação das diferentes versões do modelo analisadas à área em estudo foi verificada através de sua aplicação às sub-bacias consideradas, utilizando os dados observados no período de 1996 a 2001, período em que se dispõe de séries de precipitação previstas e observadas e séries de vazões observadas. Na análise dos resultados e validação do modelo foram adotadas duas medidas de comparação: análise visual dos hidrogramas e cálculo de estatísticas. No caso da análise visual foram plotadas as vazões observadas e as vazões calculadas para cada uma das sub-bacias. As estatísticas analisadas para avaliar os modelos foram: coeficiente de Nash, percentual do erro médio relativo, erro padrão de estimativa e desvio médio absoluto. Dentre os modelos analisados a versão B3 - que corrige o estado dos reservatórios superficial e subterrâneo no dia anterior a previsão e a calibração dos parâmetros é realizada a cada simulação - foi a que apresentou os melhores resultados.

Palavras-chave: previsão de vazões, SMAP, rio Iguaçu.

INTRODUÇÃO

O Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS realiza o planejamento, programação e despacho centralizados dos recursos de geração e transmissão para operar o Sistema Interligado Nacional -

SIN, visando assegurar o suprimento de energia elétrica no Brasil. Dentre suas atribuições, o ONS tem a responsabilidade de elaborar a previsão de vazões naturais semanais para um horizonte de até 6 semanas, nos aproveitamentos hidrelétricos do SIN. O modelo de previsão de vazões, atualmente utilizado é o modelo estocástico univariado "Previvaz" que

considera como insumo somente a informação histórica de vazões naturais. O desempenho do Previ-vaz ao longo dos últimos anos apresentou desvios nas vazões previstas para a 1ª semana de 12% a 68%, para o período de 1997 a 2004, sendo os maiores erros nas usinas da região Sul (Guilhon e Rocha, 2006).

Considerando a ordem de grandeza dos desvios existentes nas previsões de vazões naturais aos aproveitamentos do SIN, o ONS encomendou o estudo de novos modelos de previsão de vazões utilizando informações de precipitação observada e prevista pelo modelo numérico ETA. Este modelo, disponibilizado pelo CPTEC/INPE, com resolução 40Km x 40Km, simula a previsão do estado atmosférico e apresenta resultados com qualidade razoavelmente satisfatória para os horizontes considerados, segundo Guilhon e Rocha (2006).

Dentro desse contexto, o modelo de previsão proposto pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, consiste na aplicação de técnicas determinísticas de transformação chuva-vazão através do modelo SMAP - Soil Moisture Accounting Procedure. O modelo foi aplicado na bacia do rio Iguaçu, mais especificamente até a UHE Salto Osório, com horizonte de previsão de 12 dias. O método proposto foi adotado após a análise de diversas versões de modelos. As diferenças principais entre as versões analisadas consistem no período de dados utilizado para calibração e na correção do estado de umidade da bacia no instante de previsão. Os resultados obtidos pelas diferentes versões foram analisados visualmente e através das estatísticas: coeficiente de Nash, percentual do erro médio relativo, erro padrão de estimativa e desvio médio absoluto.

CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO ESTUDADA

A área de abrangência do estudo é a bacia do rio Iguaçu, contemplando três trechos, a saber: bacia a montante da UHE Foz do Areia (Trecho I); bacia do rio Jordão (Trecho II); bacia incremental entre a UHE Foz do Areia, a foz do rio Jordão e a UHE Salto Osório (Trecho III). Entretanto, a estrutura principal do modelo foi aplicada em 4 sub-bacias, pois a sub-bacia a montante de Foz do Areia foi dividida em duas. Assim, a vazão prevista na bacia a montante da UHE Foz do Areia corresponde à soma da vazão prevista na bacia incremental entre Foz do Areia e União da Vitória com a vazão prevista em União da Vitória propagada até Foz do Areia. A

Figura 1 apresenta a região em estudo e sua divisão em sub-bacias.

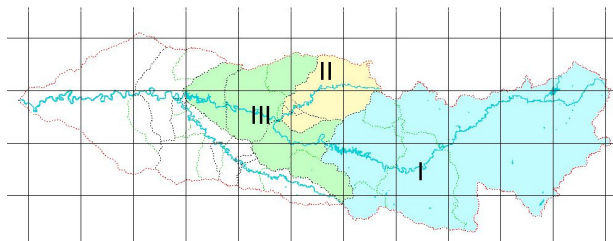


Figura 1 - Divisão da bacia do rio Iguaçu nos três trechos em estudo

O rio Iguaçu é o principal rio do Estado do Paraná e corre essencialmente na direção leste-oeste, a partir de suas nascentes nas proximidades de Curitiba, até sua foz, no rio Paraná, percorrendo cerca de 1.100 km, vencendo um desnível de mais de 800 m, e drenando uma área de cerca de 67.480 km². As regiões atravessadas de leste a oeste são os Planaltos de Curitiba, de Ponta Grossa e o de Guarapuava, também chamados respectivamente de Primeiro, Segundo e Terceiro Planaltos Paranaenses. Tanto a topografia, como os rios, nas três regiões cortadas pela bacia, revelam características distintas. A jusante de União da Vitória, onde inicia a região do Planalto de Guarapuava, as características do rio e da bacia mudam completamente, sendo o leito caracterizado por um vale profundo e encaixado, incluindo variações na pluviometria desta região.

O MODELO SMAP

Descrição do modelo

O modelo SMAP é um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão. O SMAP foi desenvolvido em 1981 por Lopes, Braga e Conejo (1982). Foi originalmente desenvolvido para intervalo de tempo diário e posteriormente foram apresentadas as versões horária e mensal, com algumas adaptações em sua estrutura. Neste trabalho foi utilizada a versão diária.

As principais vantagens do modelo SMAP estão relacionadas à sua simplicidade e ao uso de pequeno número de parâmetros. Dos seis parâmetros do modelo, três são considerados fixos com estimativas baseadas em processos físicos. Os três

restantes são parâmetros calibráveis com base nas séries históricas de precipitação e vazão.

Abaixo estão listados os parâmetros do modelo:

- S_{tr} = capacidade de saturação do solo (mm);
- K_{2t} = constante de recessão do escoamento superficial (dias);
- C_{rec} = parâmetro de recarga subterrânea (%);
- A_i = abstração inicial (mm);
- $Capc$ = capacidade de campo (%);
- K_{kt} = constante de recessão do escoamento básico (dias).

Os dados de entrada do modelo são os totais diários de chuva e o total diário de evaporação real. Segundo os autores, para calibração são necessários de 30 a 90 dias de dados de vazão, incluindo eventos de cheia.

Parâmetros de entrada fixos

Dos seis parâmetros do modelo, três são considerados fixos (K_{kt} , A_i e $Capc$), com estimativas baseadas em processos físicos.

O parâmetro K_{kt} , considerado mais estável, corresponde à constante de recessão do escoamento básico.

O parâmetro A_i (abstrações iniciais) pode ser obtido através de características da cobertura vegetal. Representa a parcela de precipitação que é captada e retida pela vegetação e é perdida por evaporação sem atingir o solo. Lopes (1999) sugere para este parâmetro os valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Abstração inicial - A_i

Vegetação	A_i (mm)
Campo	2,5
Mata	3,7
Floresta densa	5,0

O parâmetro $Capc$ (capacidade de campo) pode ser obtido através de características do tipo de solo. A retenção de água no solo é representada pela umidade na capacidade de campo, a qual é definida como a quantidade de água retida em uma amostra de solo, depois de drenado o excesso de água por gravidade. A umidade na capacidade de campo é

obtida com base nos valores de umidade no ponto de murcha permanente e da capacidade de água disponível no solo.

Parâmetros de entrada calibráveis

Os três parâmetros calibráveis do modelo SMAP são: C_{rec} , K_{2t} e S_{tr} . O parâmetro C_{rec} é expresso em valores percentuais e está relacionado ao movimento da água na zona insaturada do solo e, portanto, é função do tipo do solo. O parâmetro K_{2t} é a constante de recessão do escoamento superficial. O parâmetro S_{tr} corresponde à capacidade de saturação do solo e é expresso em mm. É uma constante cujo valor é obtido apenas uma vez, no início da simulação.

DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA GERAL DO MÉTODO PROPOSTO

A estrutura geral do modelo proposto é composta de sete procedimentos seqüenciados, executados a cada simulação:

1. Obtenção de dados pluviométricos e fluviométricos;
2. Determinação do período de calibração do SMAP;
3. Determinação da chuva-média observada diária;
4. Determinação da chuva-média prevista diária;
5. Determinação da evaporação real diária;
6. Calibração do SMAP;
7. Previsão de vazões nas sub-bacias.

No primeiro procedimento, de obtenção de dados fluviométricos, são realizadas propagações e retro-propagações de vazões para se obter a vazão da bacia incremental Foz do Arica – União da Vitória, e para obtenção da vazão incremental da bacia Salto Osório – Foz do Jordão – Foz do Arica.

Em seguida, a segunda etapa determina o período de calibragem do modelo para cada uma das sub-bacias. Este procedimento é realizado para definir o tamanho da série para o qual o SMAP será calibrado. Na série de vazões é identificado o momento do final da recessão e início do evento de cheia seguinte, pois neste ponto espera-se que não exista escoamento superficial, e assim, todas as variáveis de estado relativas ao escoamento superficial possam ser iniciadas com valor nulo na calibração.

Este estudo analisou também algumas versões de modelo que utilizam parâmetros fixos, ou seja, que não realizam a calibração a cada simulação (procedimento convencional).

O cálculo da chuva média observada (3ª etapa) é realizado através de uma rotina de interpolação espacial de dados. Esta rotina trabalha com as coordenadas do contorno da bacia e dos postos pluviométricos, selecionando automaticamente os postos que terão influência na sub-bacia em análise. Esta rotina de interpolação possui a versatilidade de, para cada instante de tempo, desprezar os postos com falhas.

A quarta etapa é realizada da mesma forma que a anterior, porém, os dados considerados são a chuva prevista disponibilizada pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC, através do modelo ETA. Adotou-se a hipótese de se considerar que cada ponto de chuva prevista equivale a um pluviômetro localizado neste ponto e que possui influência em um pixel de 40x40 km. Desta forma foram fornecidas à rotina de chuva média as coordenadas do centro do pixel de previsão e o valor de chuva prevista.

A quinta etapa é responsável pela determinação da evaporação real nas sub-bacias. Para cada sub-bacia foram tabelados totais mensais de longo prazo desta grandeza, que são desagregados em valores diários.

O objetivo do sexto procedimento é executar a calibração do SMAP nas sub-bacias, sendo que, as versões que utilizam apenas parâmetros fixos não utilizam este procedimento. O método utilizado foi o de busca exaustiva, onde são ajustados uma variável de estado (teor de umidade inicial - Tu_{in}) e os 3 parâmetros calibráveis do SMAP (capacidade de saturação do solo - Str , constante de recessão do escoamento superficial - K_{2t} , e parâmetro de recarga subterrânea - $Crec$). Os demais parâmetros utilizados pelo modelo - abstração inicial (Ai), capacidade de campo ($Capc$) e constante de recessão do escoamento básico (K_{kt}) - foram determinados através de características físicas da bacia.

Esta proposta de alteração dos parâmetros em tempo real difere dos procedimentos consagrados da aplicação dos modelos chuva-vazão, nos quais são delimitados períodos para calibração, validação e simulação. A variação em tempo real destes parâmetros está baseada na hipótese de que os parâmetros que regem as características físicas de uma bacia com grande área, da ordem de 10.000 km², perdem sua representatividade física diante da complexidade do processo chuva-vazão em tal escala espacial,

tornando-se apenas coeficientes matemáticos que “tentam” ajustar as equações ao processo.

Finalmente, a última etapa consiste em aplicar o SMAP nas sub-bacias consideradas, fornecendo assim, as vazões diárias previstas. Os parâmetros ótimos são utilizados na simulação pelo SMAP em um período igual à soma do período de calibração acrescido da duração do horizonte de previsão, igual a 12 dias. Os dados de vazão prevista em União da Vitória devem ser propagados através do leito do rio Iguaçu até o local da barragem de Foz do Areia. Após esta propagação, o hidrograma resultante é superposto ao previsto na bacia incremental entre Foz do Areia e União da Vitória, resultando no hidrograma de vazões totais previstas em Foz do Areia. Adicionalmente, são calculadas as médias de vazões semanais entre o 4º e 10º dia, entre o 5º e 11º dia e entre o 6º e 12º dia.

ABORDAGENS DO MÉTODO PROPOSTO

Em função das dificuldades de se conhecer a resposta do modelo aos diferentes conjuntos dos parâmetros, das imprecisões nos dados observados e previstos e das simplificações do modelo, foram analisadas 10 versões do método proposto. As diferenças entre estas propostas residem na calibração dos parâmetros e na correção do estado de umidade da bacia.

Com base na abordagem da forma e período de calibração foram definidos os modelos de Classe A, B e C:

- a) Classe A: a calibração é realizada a cada simulação e o período utilizado engloba 2 ou 3 eventos de cheia;
- b) Classe B: a calibração é realizada a cada simulação e o período utilizado corresponde a 2 anos mais um evento seco;
- c) Classe C: a calibração é realizada uma única vez, anteriormente à fase operacional do modelo, com base no período de 1968 a 1995. Na fase operacional todos os parâmetros do modelo SMAP são fixos.

Em cada classe foram definidas variações, identificadas como Tipo 1, 2, 3 e 4, que enfocam diferentes métodos de atualização do estado de umidade da bacia:

- 1) Tipo 1: nenhuma correção do estado de umidade da bacia é realizada;

- 2) Tipo 2: a correção do estado de umidade da bacia é realizada somando-se uma constante à vazão prevista em cada dia do horizonte de previsão. O valor da constante de correção é determinado pela diferença entre a vazão observada e calculada no dia anterior ao do início da previsão;
- 3) Tipo 3: o estado dos reservatórios da superfície da bacia R_{sup} e subterrâneo R_{sub} , no dia anterior ao da previsão, são corrigidos em função da diferença entre a vazão observada e calculada neste dia. Os reservatórios R_{sup} e R_{sub} são corrigidos proporcionalmente aos valores do escoamento direto (E_d) e do escoamento básico (E_b), respectivamente. A adição ou subtração de água nestes reservatórios é compensada pela subtração ou adição de água no reservatório do solo R_{solo} ;
- 4) Tipo 4: tal como na correção de umidade da bacia dos modelos do Tipo 3, esta versão corrige os reservatórios R_{sup} e R_{sub} , sendo que a retirada ou adição de água é compensada no R_{solo} . Neste caso, porém, a correção é dividida gradativamente nos 20 dias anteriores ao de previsão. Esta versão só foi implementada para o modelo de Classe A.

A combinação das Classes A, B e C, com os Tipos 1, 2, 3 e 4 resultou em 10 diferentes versões de modelo, a saber: A1, A2, A3, A4, B1, B2, B3, C1, C2 e C3. As Tabelas 2 e 3 listam para as classes A, B e C as principais vantagens e desvantagens, respectivamente.

Tabela 2 – Principais vantagens das versões de modelos analisadas das Classes A, B e C

Modelo	Vantagens
A	A calibração automática tenta contornar o problema da variabilidade espacial das características da bacia e a variabilidade espacial da chuva.
B	O período de calibração utilizado é suficiente para garantir a consideração de diferentes tipos de eventos de chuva e retrata as condições mais atuais da bacia.
C	Utiliza parâmetros considerados mais robustos, pois atua sobre muitos tipos de eventos.

Tabela 3 – Principais desvantagens das versões de modelos analisadas das Classes A, B e C

Modelo	Desvantagens
A	Dependendo do período de calibração e a data de simulação o modelo pode calibrar considerando eventos convectivos e prever para um evento frontal, ou vice-versa.
B	O hidrograma calculado tende a descolar em relação ao observado nas proximidades do instante de previsão, o que foi constatado empiricamente.
C	A alta heterogeneidade temporal e espacial da precipitação conduz à obtenção de parâmetros médios, os quais nem sempre são condizentes com a situação da bacia.

DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS

Dados fluviométricos

Ao todo, o modelo utiliza as séries de vazões de 6 locais, sendo que, destes, um corresponde aos dados observados de estação fluviométrica (União da Vitória), e 5 correspondem às séries reconstituídas de vazões naturais em locais de usinas, obtidas conforme metodologia apresentada em LACTEC (2003). A Tabela 4 reúne algumas informações destes locais. Em LACTEC (2005a) é apresentada a análise de consistência dos dados fluviométricos utilizados.

Tabela 4 - Locais com dados fluviométricos utilizados no estudo

Local	Código	Tipo*	Área de drenagem (km ²)
União da Vitória	65310001	EFT	24.210
Foz do Areia	65774403	AH	30.127
Jordão	65826600	RES	4.682
Segredo	65805010	AH	34.346
Salto Santiago	65883051	AH	43.852
Salto Osório	65894991	AH	45.769

* EFT – estação fluviométrica telemétrica; AH – aproveitamento hidrelétrico; RES – reservatório.

As vazões nas usinas hidrelétricas de Segredo e Salto Santiago são utilizadas considerando a

propagação para compor a vazão incremental Salto Osório – Foz do Jordão – Foz do Areia. Todas as informações fluviométricas utilizadas no estudo foram fornecidas pelo ONS.

Dados pluviométricos observados

Na composição da rede pluviométrica selecionaram-se estações situadas internamente à área de estudo e aquelas que, mesmo fora dos limites considerados, influenciam na determinação da precipitação média nos Trechos I, II e III.

É apresentada uma análise de consistência dos dados pluviométricos utilizados em LACTEC (2005a).

Dados pluviométricos previstos

As previsões de precipitação do modelo ETA, elaboradas pelo CPTEC, correspondem ao total de chuva acumulada em 24 horas, compreendida no intervalo das 9h do dia anterior até às 9h do dia atual e com horizonte de previsão de 1 a 10 dias. As previsões disponibilizadas são periódicas, ocorrendo sempre às quartas-feiras.

Em LACTEC (2005b) é apresentada uma análise do desempenho das previsões de precipitação, onde foi considerado o período de informações, entre janeiro de 1996 a dezembro de 2001. As principais observações do referido estudo acerca das previsões de precipitação para a bacia do rio Iguaçu, resultantes do modelo ETA, são:

- O total diário de precipitação previsto apresenta grande dispersão quando confrontado com o correspondente total diário de chuva observada;
- A previsão de chuva para o horizonte de um dia perde em qualidade para horizontes maiores, provavelmente pela necessidade do modelo ETA em adequar-se às condições iniciais;
- No refinamento da análise observa-se que os maiores desvios estão prioritariamente associados às grandes precipitações e que estes desvios tendem a aumentar levemente para horizontes de previsão maiores.

Como a precipitação fornecida pelo modelo ETA possui horizonte de previsão de 10 dias, houve a necessidade de estimar a chuva do 11º e 12º dia. No presente estudo adotou-se, para estes dias, a estimativa de chuva nula. As justificativas para tal escolha são:

- À medida que os horizontes de previsão aumentam, ocorre um acréscimo considerável das incertezas nas estimativas de previsão;
- A resposta da bacia à precipitação que ocorre nos dois últimos dias verifica-se no 12º dia, ou mesmo, posteriormente a este;
- O modelo será utilizado como ferramenta no planejamento e programação da operação do Sistema Interligado Nacional – SIN. Deste modo, a previsão de chuva nula é, de maneira geral, mais conservadora que outras hipóteses;
- Sendo muito alta a permanência de precipitações nulas, a probabilidade que esta estimativa esteja correta é bastante razoável.

APLICAÇÃO DO MODELO NA BACIA DO RIO IGUAÇU

Divisão do Trecho I em sub-bacias

Em seu percurso, a montante de Foz do Areia, o rio Iguaçu corta o Primeiro e o Segundo Planalto do Paraná, duas regiões geomorfológicas distintas. O curso do rio Iguaçu no Primeiro Planalto é caracterizado por pequenas declividades, acentuada sinuosidade e longo tempo de concentração, reflexos da topografia suave do Primeiro Planalto. A jusante de União da Vitória têm-se as corredeiras de Porto Vitória que marcam a passagem para o Segundo Planalto. A bacia incremental entre União da Vitória e a UHE Foz do Areia é caracterizada por rápida resposta hidrológica devido à topografia mais acidentada e com maior declive.

Acredita-se que esta acentuada heterogeneidade espacial do Trecho I inviabiliza a aplicação do modelo de forma concentrada, pois se verifica uma marcante desigualdade orográfica, pedológica e do regime pluvial entre as bacias a montante e a jusante de União da Vitória. Assim, para que as características físicas do trecho sejam corretamente representadas pelos parâmetros do modelo, foi considerada uma divisão em duas sub-bacias, uma a montante da estação de União da Vitória (Trecho Ia) e a outra correspondendo à área de drenagem entre União da Vitória e Foz do Areia (Trecho Ib). Com esta configuração o modelo é aplicado, ao todo, em quatro trechos, sendo que no Trecho I as vazões previstas em União da Vitória são propagadas até Foz do Areia e somadas às vazões previstas nesta bacia incremental.

Inicialização do modelo

O modelo considera que o início do período de calibração ocorra em fase de estiagem, igualando a vazão básica inicial Eb_{in} ao primeiro valor do hidrograma de dados observados utilizado. Desta forma, é possível obter uma melhor estimativa para as variáveis de estado. A adoção deste procedimento tem reflexo na calibração dos parâmetros que são sensíveis aos valores iniciais das variáveis de estado (R_{solo} e R_{sub}). Devido às dificuldades na determinação do valor do teor de umidade inicial Tu_{in} , a calibração também é executada para esta variável.

Calibração do modelo

Para os modelos de Classe A e B, os parâmetros calibráveis do modelo SMAP são determinados na fase operacional a cada simulação realizada, de maneira que os dados atualizados possam ser utilizados a cada previsão, e os parâmetros sejam calibrados levando em conta a situação atual da bacia hidrográfica. Neste caso, precedendo à calibração automática, o modelo seleciona o período sobre o qual ela será realizada. O critério utilizado nos modelos de Classe A é selecionar o período antecedente ao dia de simulação que possua alguns eventos de cheia significativos que atendam a determinadas condições. Para que esta seleção seja feita automaticamente, a vazão de 90% de permanência (Q_{90}) é usada como referência para desprezar eventos de cheias com vazões muito pequenas. Para os Trechos Ia e II são selecionados 3 eventos e para os Trechos Ib e III são selecionados 2 eventos. O número de eventos foi determinado através de análises realizadas nas sub-bacias em estudo e da extensão do período de calibração resultante nestas análises.

Determinação dos parâmetros fixos

O critério utilizado pelos modelos da Classe B para selecionar o período de calibração é reunir os dois anos anteriores mais um período seco.

A calibração dos parâmetros dos modelos da Classe C foi realizada de maneira convencional, onde, sobre os dados históricos é separado um período para a calibração e outro para a validação. Neste caso, o período considerado para calibração foi de 01/04/1968 a 31/12/1995. Os valores finais dos parâmetros calibráveis (Str, K_{2t} e Crec) e da variável de estado Tu_{in} , utilizados nos modelos de Classe C, estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores finais dos parâmetros calibráveis dos modelos de Classe C

Local	Tu_{in} (adim.)	Str (mm)	K_{2t} (dias)	Crec (%)
Trecho Ia	10,0	55,0	14,0	1,0
Trecho Ib	15,0	150,0	3,3	4,2
Trecho II	15,0	165,0	4,9	4,2
Trecho III	15,0	135,0	6,0	4,2

Coefficiente de depleção do escoamento subterrâneo

Foram determinados os valores de K_{kt} para estações básicas, nas quais foi baseada a obtenção dos valores finais para os Trechos Ia, Ib, II e III. A Tabela 6 apresenta para estes trechos os respectivos valores de K_{kt} , válidos para todos os modelos analisados.

Tabela 6 – Valores de K_{kt} para os Trechos Ia, Ib, II e III

Local	K_{kt} (dias)
Trecho Ia	50
Trecho Ib	21
Trecho II	30
Trecho III	35

Abstração inicial

A avaliação da cobertura vegetal dos trechos em estudo foi feita em duas etapas. A primeira refere-se à classificação de imagens do satélite Landsat ETM+, onde foram consideradas as seguintes classes: urbano, solo exposto (agricultura sem vegetação), agricultura (com vegetação), campo, floresta, água, sombra e nuvem.

Em uma segunda etapa, os usos do solo foram agrupados em três grupos (exceto a classe Água): Área Florestada, compreendendo as regiões interpretadas como floresta; Área Não Florestada, agrupando as áreas consideradas como solo exposto, agricultura, campo e urbano; e Não Classificado reunindo as classes sombra, nuvem ou eventualmente os locais não enquadrados nas outras classes. Estes agrupamentos foram feitos observando-se a similaridade que os valores de abstração inicial devem assumir entre as classes dentro de um mesmo grupo. A classificação resultante não distingue a diferença entre mata e floresta densa devido à dificuldade de interpretação das imagens de satélite. Conseqüen-

temente, os valores de abstração inicial apresentados na Tabela 1 foram adaptados conforme mostra a Tabela 7. As regiões não classificadas foram desconsideradas no cálculo do A_i por apresentarem, supostamente, as mesmas características de cobertura do solo de regiões vizinhas e que, portanto, este descarte não afeta os valores médios finais de forma significativa.

Tabela 7 – Classificação adaptada dos valores de A_i

Cobertura do solo	A_i (mm)
Área não florestada	2,5
Área florestada	5,0

O valor calculado da abstração inicial para cada sub-bacia é a média aritmética dos valores apresentados na Tabela 7, ponderada pelas proporções de áreas dos diferentes tipos de cobertura vegetal.

Os valores de A_i resultantes para cada sub-bacia são apresentados na Tabela 8. Estes valores são válidos para todos os modelos analisados.

Tabela 8 – Abstração inicial dos trechos estudados

Local	A_i (mm)
Trecho Ia	3,68
Trecho Ib	4,39
Trecho II	3,62
Trecho III	3,86

Tabela 9 – Capacidade de campo dos trechos estudados

Local	Capc (%)
Trecho Ia	33
Trecho Ib	32
Trecho II	43
Trecho III	39

Capacidade de campo

A capacidade de campo Capc resulta da soma dos valores correspondentes às grandezas ponto de murcha e capacidade de água disponível. Estas grandezas foram calculadas individualmente para cada tipo de solo e o valor médio correspondente foi obtido por ponderação pela área ocupada pelos diferentes tipos de solo presentes na bacia, definidos

com base no mapa de solos do Paraná e Santa Catarina. Os dados físicos dos solos foram retirados do boletim de Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Paraná (EMBRAPA, 1984). A Tabela 9 apresenta os valores da capacidade de campo para os trechos estudados, válidos para todos os modelos analisados.

Verificação dos valores dos parâmetros calibráveis

Com base nas recomendações dos autores do modelo SMAP e nos testes de sensibilidade realizados neste estudo foram determinadas, para cada uma das 4 sub-bacias, faixas de valores, dentro das quais a calibração deve gerar os valores dos parâmetros calibrados na primeira busca exaustiva.

Através destes valores limites foram determinadas novas faixas de variação, cujos valores são válidos para a segunda busca exaustiva. Estes limites foram obtidos considerando uma variação em torno dos valores obtidos na primeira busca exaustiva.

Determinação da evaporação real e desagregação de valores

Os valores de evaporação real diária usados neste estudo foram obtidos pela desagregação dos valores plurianuais de evaporação real calculados pelo modelo CRLE - Complementary Relationship Lake Evaporation (Morton, Ricard e Focarasi, 1985), no lugar da evaporação de tanque sugerida no modelo SMAP. Os valores utilizados foram obtidos pelo modelo SISEVAPO desenvolvido por Müller, Müller e Kaviski (2001) para o ONS.

A desagregação dos valores mensais em valores diários foi realizada considerando-se que todos os dias do mês apresentam a mesma evaporação, isto é, dividindo-se o valor mensal pelo número de dias do mês. O uso de técnicas mais sofisticadas de desagregação não se justificou pelo fato dos valores em questão serem muito pequenos, da ordem de precisão dos modelos de cálculo empregados.

Propagação de vazões

Conforme já mencionado anteriormente, o modelo utiliza séries de vazões propagadas entre diversos locais. Os tempos de propagação das vazões nos trechos considerados foram determinados pelo modelo da onda cinemática, onde a velocidade de propagação das vazões foi calculada a partir de dados de medição de vazão nos postos fluviométricos escolhidos. Com os valores medidos de vazão Q e área da seção transversal A foi possível ajustar uma reta do tipo $Q = Q_0 + c.A$, onde a inclinação desta

reta ($c = dQ/dA$), definiu o valor da velocidade de propagação da onda cinemática na seção em estudo.

ANÁLISE DOS RESULTADOS E VALIDAÇÃO DO MODELO

A adequação das versões de modelo à área analisada foi verificada através de sua aplicação aos trechos em estudo utilizando os dados observados do período de 1996 a 2001, período em que se dispõe de séries de precipitação previstas e observadas, e séries de vazões observadas. Foram realizadas simulações, semana a semana, utilizando a série de precipitações observadas no horizonte de previsão. As vazões simuladas assim obtidas foram comparadas às vazões observadas. Para tanto, as quartas-feiras contidas no intervalo de tempo 1996-2001 foram consideradas como dias de simulação, com o modelo fornecendo as séries de vazões diárias previstas com 12 dias de horizonte. Para a seleção do modelo foram utilizadas somente precipitações observadas, pois a análise dos modelos deve, primeiramente, basear-se em resultados desvinculados da qualidade da precipitação prevista.

Para a análise dos resultados e validação do modelo foram adotadas duas medidas de comparação: análise visual dos hidrogramas e cálculo de estatísticas. Para a análise visual de comparação foram plotadas as vazões observadas e as vazões calculadas para cada uma das sub-bacias.

As estatísticas dos modelos basearam-se nos seguintes índices: coeficiente de Nash (Nash), percentual do módulo do erro médio relativo (e), erro padrão de estimativa (s2) e desvio médio absoluto (desv_med_ab), equacionados, respectivamente, por (8) a (11).

$$\text{Nash} = 1 - \frac{\sum (\hat{Q} - Q)^2}{\sum (Q - \bar{Q})^2} \quad (8)$$

$$e = \frac{1}{n} \sum \frac{|\hat{Q} - Q|}{Q} \cdot 100 \quad (9)$$

$$s2 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\hat{Q} - Q)^2} \quad (10)$$

$$\text{desv_med_ab} = \frac{1}{n} \sum |\hat{Q} - Q| \quad (11)$$

Onde:

\hat{Q} - vazão calculada;

Q - vazão observada;

\bar{Q} - média das vazões observadas;

n - número de pontos amostrais.

Estes coeficientes foram calculados sobre as séries de vazões observadas e calculadas obtidas individualmente para cada dia do hp (horizonte de previsão) e para as médias entre o 4º e 10º dias (Q_1), 5º e 11º dias (Q_2) e 6º e 12º dias (Q_3) do horizonte de previsão. Cada uma das 10 versões de modelo foram simuladas para todas as semanas dos anos de 1996 a 2001, resultando em mais de 3.000 previsões realizadas.

A Tabela 10 apresenta para as sub-bacias qual versão de modelo apresenta melhores resultados por índice analisado. Nesta análise foram priorizadas as médias semanais (Q_1 , Q_2 e Q_3).

Tabela 10 – Versões de modelo com os melhores desempenhos

Índice	Posição	Trecho			
		Ia	Ib	II	III
Nash	1º lugar	B-1	B-1	B-1	A-1
	2º lugar	C-1	A-1	C-1	B-1
e	1º lugar	B-2	B-3	C-3	B-3
	2º lugar	C-2	B-1	C-2	C-3
s2	1º lugar	B-1	B-1	C-1	A-1
	2º lugar	B-3	A-1	C-1	B-1
desv_med_ab	1º lugar	B-3	B-1	C-3	B-1
	2º lugar	B-1	A-1	C-1	A-1

A comparação entre todos os modelos levou a adoção do modelo B3, cujas estatísticas indicam como modelo de segundo melhor desempenho. Apesar do modelo B1 indicar coeficientes com resultados um pouco melhores, em uma análise dos hidrogramas calculados e observados, verificou-se que para o modelo B3 os hidrogramas são, de maneira geral, mais aderentes entre si, conforme se pode verificar na comparação dos hidrogramas calculados nas Figuras 2 e 3. Os modelos do Tipo 3 tendem a superestimar os picos das cheias, conduzindo a melhores resultados em períodos de baixas e

médias vazões. Estes erros nos picos de cheia, por se tratarem de grandes desvios de vazões, tendem a causar uma avaliação inadequada destes modelos através dos coeficientes que contém o quadrado da diferença entre vazão calculada e observada.

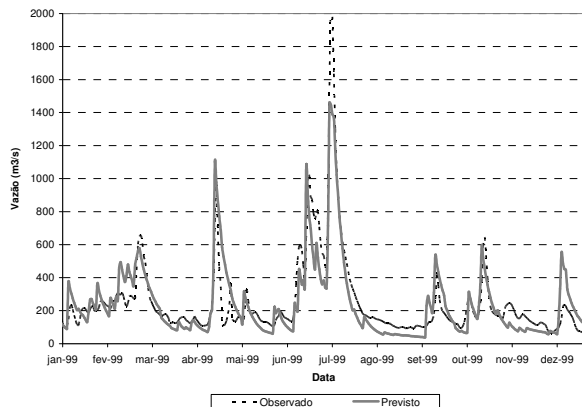


Figura 2 – Vazões observadas e calculadas pelo modelo B1 em Salto Osório ao longo do ano de 1999

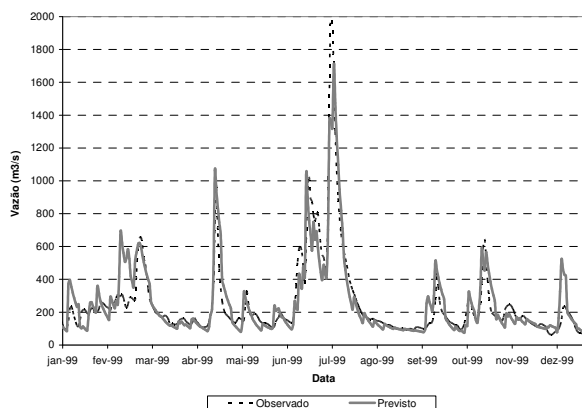


Figura 3 – Vazões observadas e calculadas pelo modelo B3 em Salto Osório ao longo do ano de 1999

Para o modelo adotado B3 foram realizadas simulações considerando, no horizonte de previsão, a chuva prevista. As Figuras 4 a 7 apresentam para cada um dos coeficientes a comparação entre o modelo B3 considerando chuva prevista e chuva observada para o Trecho II (bacia do rio Jordão). Os resultados são plotados para cada um dos dias do horizonte de previsão e para as médias semanais Q_1 , Q_2 e Q_3 . Verifica-se nestas figuras que a qualidade de previsão decai consideravelmente ao utilizar-se a precipitação prevista. Nestas figuras ressalta-se também a gradativa perda de desempenho do modelo

ao longo do horizonte de previsão nas simulações que consideram chuva prevista.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com relação à análise dos resultados, temos que, os desvios podem estar associados à precisão do modelo de transformação chuva-vazão, à qualidade dos dados observados, ao baixo grau de divisão da bacia em sub-trechos e, principalmente, à qualidade das previsões de precipitação. Com a utilização da chuva prevista no horizonte de previsão a qualidade do modelo adotado decai consideravelmente.

O modelo B3 apresentou-se, de forma geral, como o modelo mais indicado para realizar as previsões, apresentando um bom desempenho nos períodos com baixas e médias vazões. O modelo B1 indica coeficientes com resultados um pouco melhores que o B3. Este fato explica-se pelo fato dos índices analisados utilizarem a diferença ou o quadrado da diferença entre vazões calculadas e observadas, e os modelos do Tipo 3 tenderem a superestimar os picos das cheias, causando grandes desvios de vazões.

Apesar dos desvios verificados, os resultados comprovam um ganho na qualidade da previsão em relação ao Previvaz, conforme atesta Guilhon e Rocha (2006). Como recomendações para estudos futuros acerca da previsão de vazões na bacia do rio Iguaçu, através da utilização de modelos de transformação chuva-vazão, têm-se:

- a) Analisar o benefício de uma discretização maior na aplicação dos modelos concentrados chuva-vazão. O aumento do número de sub-bacias na modelagem chuva-vazão ocasiona um proporcional aumento da complexidade do sistema de cálculo envolvido, pois além do maior número de procedimentos, começam a ser necessárias outras tipos de rotinas, como por exemplo, um modelo de propagação em canal. A região do Alto Iguaçu é dotada de vastas planícies de inundação. Este fator aliado à baixa declividade do leito do rio exige modelos de propagação em canal, cuja calibração é mais complexa que em rios de grande declividade. Além da importante diferença de rugosidade existente entre a calha e as planícies laterais do rio Iguaçu, a questão do armazenamento lateral precisa ser bem analisada, validando assim a utilização de um modelo de propagação em canais;

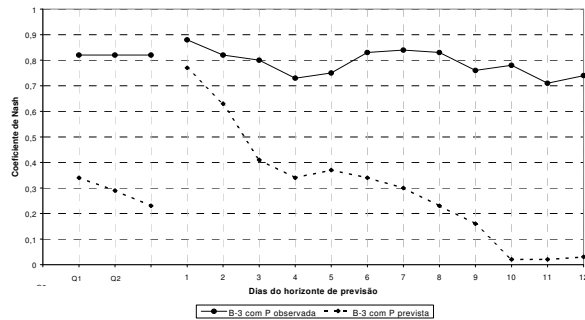


Figura 4 – Coeficiente de Nash - Trecho II

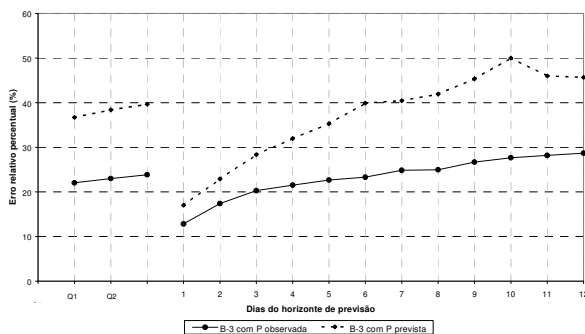


Figura 5 – Erro (em módulo) médio relativo percentual - Trecho II

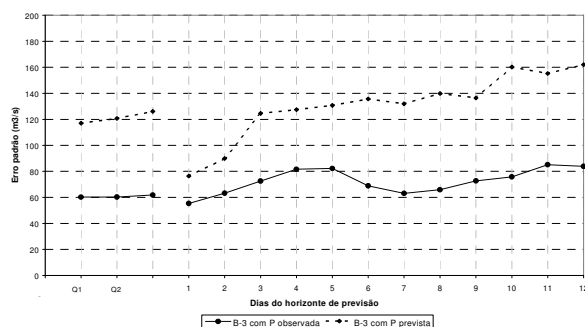


Figura 6 – Erro padrão de estimativa - Trecho II

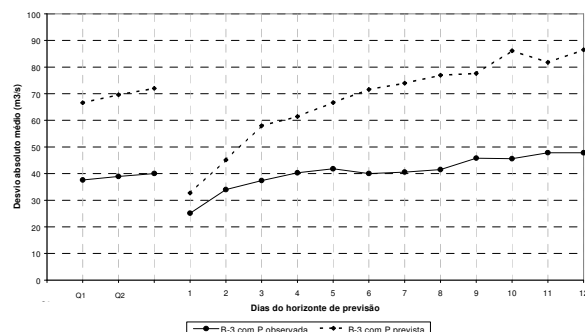


Figura 7 – Desvio médio absoluto - Trecho II

- b) Investigar a eficiência da “não conservação de massa” no algoritmo do SMAP, durante a rotina de atualização do estado dos reservatórios no dia da previsão. A correção do estado destes reservatórios em instantes antecedentes a um grande evento de cheia, demonstrou que a conservação de massa nestes instantes, causa a ocupação de todo o reservatório do solo, o que ocasiona a superestimativa dos picos de cheias que ocorrem nos instantes seguintes. Por outro lado, se a lei da conservação de massa não é aplicada, os períodos de depleção e vazões baixas são distorcidos. Por este motivo, torna-se necessária a avaliação dos benefícios obtidos em simulações que considerem a censura na conservação de massa. A análise desta alternativa deve focar os períodos onde o reservatório do solo está próximo da capacidade máxima, quando ocorre, no caso de eventos chuvosos intensos, a superestimativa dos picos de cheia. Para esta análise, pequenas alterações no algoritmo de atualização dos reservatórios do SMAP, no instante de previsão, precisam ser investigadas.

REFERÊNCIAS

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Paraná. (Boletim Técnico, 27). Londrina: EMBRAPA / IAPAR, 1984.
- GUILHON, L. G. F.; ROCHA, V. F. Modelos de previsão de vazões para os aproveitamentos hidrelétricos do sistema interligado nacional - SIN. IN: Workshop sobre Gestão Estratégica de Recursos Hídricos. Brasília, DF, dez, 2006.
- LACTEC. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Projeto HG-193 - Estudos de Consistência e Reconstituição de Séries de Vazões Naturais na Bacia do Rio Iguaçu. Relatório final. Curitiba: LACTEC / CEHPAR, 2003.
- LACTEC. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Projeto HG-210 - Previsão de Vazões na Bacia do Rio Iguaçu com Incorporação de Informações de Precipitação. Relatório técnico nº 1 – Análise dos Dados Hidrometeorológicos (Fluviométricos e Pluviométricos). Curitiba: LACTEC / CEHPAR, 2005a.
- LACTEC. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Projeto HG-210 - Previsão de Vazões na Bacia do Rio Iguaçu com Incorporação de Informações de Precipitação. Relatório técnico nº 2 – Análise de De-

- sempenho das Previsões de Precipitação (Modelo ETA – CPTEC). Curitiba: LACTEC / CEHPAR, 2005b.
- LOPES, J. E. G. Manual do modelo SMAP. 1999.
- LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. SMAP - A Simplified Hydrological Model, Applied Modelling in Catchment Hydrology, Ed. V.P.Singh, Water Resources Publications, 1982.
- MORTON, F. I.; RICARD, F.; FOGARASI, S. Operational estimates of areal evapotranspiration and lake evaporation – Program WREVP. National Hydrology Research Institute. Ottawa. Canada, 1985.
- MÜLLER, I. I.; MÜLLER, M.; KAVISKI, E. Projeto HG-160 – Método de Avaliação da Evaporação Líquida dos Reservatórios do Sistema Elétrico Brasileiro. Relatório Final. Curitiba: LACTEC, 2001.

A Streamflow Forecasting Model for the Iguaçu River Using the SMAP Rainfall-discharge Model and Forecast Rainfall Data from the ETA-CPTEC Model

ABSTRACT

A short-term discharge forecast model with a 12-day horizon for the Salto Osório Hydropower Plant basin is presented. The forecast is performed using the SMAP rainfall-discharge model and forecast rainfall data from the ETA-CPTEC model. The model was developed using a spatial interpolation routine to compute the average rainfall either observed or forecast, as well as the propagation and the back-propagation of discharge routines. The propagation times are computed by the cinematic wave technique. Considering the difficulty to assess the model response to a different set of parameters, lack of accuracy of the data and the implementation of necessary simplifications, several versions of the proposed model were analyzed. Ten combinations of the model were studied based on distinct setups of parameter calibration and basin humidity. The results of the versions of the model were then compared to the historical data observed during the 1996-2001 period and their adequacy was assessed. The validation of the model and analysis of the results were performed through visual examination of the hydrographs and statistical analysis. The B-3 version of the model - the one that adjusts the superficial and underground reservoir states for the previous day and performs the calibration of the parameters after each simulation - presented the best results.

Key-words: *streamflow forecasting model, SMAP, Iguaçu River.*