

Previsão de Cheias por Conjunto em Curto Prazo

Adalberto Meller¹, Walter Collischonn², Fernando Fan², Diogo Costa Buarque²,
Rodrigo Cauduro Dias de Paiva², Pedro Leite da Silva Dias³, Demerval Soares Moreira⁴

betomeller@gmail.com; collischonn@iph.ufrgs.br; fernando.fan@bol.com.br; diogo.buarque@gmail.com;
rodrigocdpaiva@gmail.com; pldsdias@lncc.br; demerval.moreira@cpfec.inpe.br

Recebido: 26/11/12 - revisado: 19/08/13 - aceito: 06/03/14

RESUMO

Nesse trabalho é apresentada uma aplicação da abordagem da previsão de cheias por conjunto em curto prazo a uma bacia de médio porte localizada na região sudeste do Brasil, a bacia do rio Paraopeba. Para geração das previsões de vazões, a metodologia utiliza um conjunto de previsões de precipitação associada à modelagem chuva-vazão conceitual com o modelo hidrológico MGB-IPH. O experimento foi realizado durante três períodos chuvosos entre os anos de 2008 e 2011. Como parâmetro de referência na avaliação do desempenho das previsões por conjunto é utilizada uma previsão hidrológica determinística, baseada em uma previsão de precipitação única obtida da combinação ótima de diversas saídas de modelos meteorológicos, com diferentes condições iniciais e parametrizações. Nos resultados das avaliações das previsões de eventos do tipo dicotômicos, que consideram a superação ou não de níveis ou vazões limite de alerta, as previsões por conjunto mostraram superioridade em relação à previsão determinística, sendo possível obter na maior parte dos casos analisados um aumento na proporção de detecções corretas da ocorrência do evento de cheia mantendo as taxas de alarmes falsos em níveis reduzidos. Esse benefício foi, de modo geral, maior em maiores antecedências e vazões limite de alerta, situações mais importantes num contexto de prevenção de cheias.

Palavras-chave: previsão de cheia por conjunto, previsão de precipitação, modelagem hidrológica conceitual.

INTRODUÇÃO

Previsões de vazão são rotineiramente utilizadas no Brasil para prever a afluência dos reservatórios hidrelétricos mais importantes, sendo empregadas no planejamento da operação na produção de energia hidrelétrica. Neste campo de aplicação, previsões quantitativas de precipitação (QPF - *Quantitative Precipitation Forecasts*) tem se tornado cada vez mais utilizadas, visando a melhora da previsibilidade e a extensão do horizonte da previsão (GUILHON et al., 2007; CASTANHARO et al., 2007; COLLISCHONN et al., 2007; SSILVA et al., 2007). Sistemas de previsão e alerta de cheias, por outro lado, são relativamente raros no Brasil e muitas vezes baseados em modelos simplificados de propagação do escoamento na rede de drenagem, sem utilizar informações de precipitação observada ou prevista.

A ocorrência de cheias de grandes proporções registradas recentemente em âmbito global (e.g. WERNER et al., 2005; MOORE et al., 2005; PLATE, 2007; THIELEN et al. 2009; HE et al., 2012) tem atualmente motivado a utilização da QPF derivada de modelos de previsão numérica de tempo (PNT) como dado de entrada em modelos chuva-vazão, com intuito de promover alertas de cheias com maior antecipação. No caso de pequenas e médias bacias, o uso da QPF na previsão de cheias tem sido colocado como um ponto chave (e.g. BACCHI & RANZI, 2003; XUAN et al., 2009; HAPUARACHCHI et al., 2011), permitindo a adoção de medidas de mitigação dos impactos em tempo útil.

Entretanto, embora seja útil, a previsão quantitativa de precipitação ainda apresenta erros consideráveis na escala das aplicações hidrológicas, sendo considerada uma das principais fontes de incerteza na previsão de cheias (DAVILIO et al. 2008; CLOKE & PAPPEMBERGER, 2009; XUAN et al., 2009; HAPUARACHCHI et al., 2011). O uso da QPF de modelos PNT em conjunto com modelos hidrológicos para previsão de vazão é limitado por três tipos de erros citados por Habets et al. (2004):

¹ Agência Nacional de Águas

² Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS

³ Departamento de Ciências Atmosféricas - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas/USP

⁴ Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE)

(i) localização espacial do evento; (ii) instante de ocorrência do evento; e (iii) intensidade da precipitação.

De maneira geral, a imprecisão na QPF deve-se tanto a erros nas condições iniciais como na própria estrutura dos modelos meteorológicos, que não representam adequadamente a dinâmica das nuvens e os processos microfísicos, simplificados através de parametrizações (EBERT, 2000). Uma das questões particularmente importantes nesse contexto refere-se à sensibilidade dos modelos meteorológicos às condições iniciais. A atmosfera é um sistema não linear, extremamente dependente das condições iniciais, e os modelos meteorológicos também apresentam esta sensibilidade, de tal forma que, se inicializados com condições iniciais ligeiramente diferentes, em pouco tempo simulam estados completamente diferentes da atmosfera (Lorenz, 1969). Como o estado inicial da atmosfera nunca é perfeitamente conhecido, dificilmente será possível obter previsões determinísticas precisas de tempo com antecedências relativamente longas, tipicamente úteis para as aplicações em previsão e alerta de cheias. Além disso, modelos meteorológicos diferentes, em termos da representação física dos processos ou da resolução espacial, quando aplicados com as mesmas condições iniciais e de contorno, tendem a apresentar resultados diferentes após algumas horas ou dias de simulação.

A previsão probabilística ou por conjunto é uma técnica desenvolvida nas ciências atmosféricas e que procura explorar as incertezas associadas às condições iniciais e/ou deficiências na estrutura dos modelos meteorológicos. A partir de diferentes modelos meteorológicos ou de diferentes condições iniciais de um único modelo, são gerados um conjunto de previsões, onde cada um dos membros do conjunto representa uma possível trajetória dos processos atmosféricos ao longo do horizonte de previsão.

A técnica da previsão por conjunto tem sido usada na previsão meteorológica desde a década de 1990 (DANCE & ZOU, 2010; NOBERT et al., 2010; ZAPPA et al., 2011; SCHELLEKENS et al. 2011). Motivado pelo sucesso de sua utilização nesse campo, recentemente os EPSs (*Ensemble Prediction Systems* – Sistemas de Previsão por Conjunto) passaram a ser incorporados na previsão de vazões, dando origem aos Sistemas de Previsão Hidrológica por Conjunto (H-EPSs) (DEERITT et al., 2007; CLOKE & PAPPENBERGER, 2009). Um H-EPS procura fornecer informações sobre a incerteza das previsões hidrológicas, propondo, para cada intervalo de tempo de previsão, um conjunto de soluções a partir do qual

se pode estimar a distribuição de probabilidade do preditor (VELÁZQUEZ et al., 2011).

Pesquisas recentes, principalmente na Europa e América do Norte, tem mostrado resultados promissores do acoplamento de previsões meteorológicas por conjunto a modelos hidrológicos para realizar previsões de cheia para horizontes de até dez dias (YOUNIS et al., 2008; PAPPENBERGER et al., 2008; THIEMIG et al., 2010; BAO et al., 2011; VOISIN et al., 2011). O conjunto de previsões obtido permite representar uma faixa de possíveis cenários de cheia, e a quantificação das incertezas associadas a esses cenários tem sido colocada como útil na diminuição da emissão de falsos alertas, evitando assim a perda de credibilidade dos sistemas de alerta de cheia (PAPPENBERGER et al., 2008).

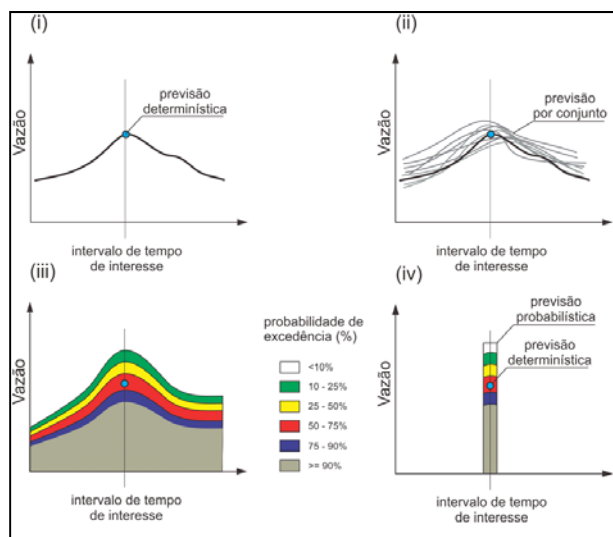


Figura 1 - Ilustração da técnica da previsão hidrológica por conjunto. Adaptado de COMET (2008). Disponível em <<https://www.meted.ucar.edu/>>. Acessado em novembro de 2012.

Em sua forma mais simples, a previsão hidrológica por conjunto consiste em alimentar o modelo hidrológico com variáveis meteorológicas previstas por um ou mais EPSs, resultando em possíveis cenários de vazões que refletem as incertezas na previsão meteorológica (Figura 1). Essa abordagem – algumas vezes chamada de *perfect hydrology* – parte do pressuposto que as previsões meteorológicas são a maior fonte de incerteza na previsão hidrológica, sendo as incertezas relacionadas ao modelo hidrológico, desprezadas. Variáveis previstas por modelos meteorológicos que são normalmente utilizadas são

a precipitação e temperatura, embora outras variáveis também possam ser utilizadas.

Existem ainda abordagens que consideram outras fontes de incertezas importantes na previsão de cheias por conjunto, tais como: a) deficiência na estrutura do modelo hidrológico, onde são utilizados um conjunto de modelos hidrológicos distintos para realização das previsões (e.g. VELÁZQUEZ et al., 2011); b) a incerteza nos parâmetros do modelo hidrológico (e.g. DIETRICH et al., 2009; HE et al. 2012); e c) a incerteza nas condições iniciais do modelo ou nos dados de entrada, como por exemplo na precipitação observada até o instante de início da previsão (e.g. ZAPPA et al., 2011; ROSSA et al., 2011). Outros métodos procuram melhorar o desempenho das previsões através da correção de erros sistemáticos e do espalhamento do conjunto nos dados de entrada – pré-processamento - ou nos resultados da previsão de vazões – pós-processamento -, tendo sido reportadas melhorias nos resultados pela aplicação desses métodos (e.g. BROWN & SEO, 2010; BOUCHER et al., 2011; ZALACHORI et al., 2012; ANDEL et al., 2012).

A previsão de cheias por conjunto é uma área de pesquisa atualmente bastante ativa, tendo sido publicada na última década uma série de trabalhos explorando seus potenciais benefícios (e.g. GOUWELLEEUW et al. 2005; DEMERITT et al. 2007; KOMMA et al. 2007; VERBUNT et al. 2007; DAVOLIO et al., 2008; PAPPEMBERGER et al. 2008; DIETRICH et al. 2009; YOUNIS et al, 2008; THIELEN et al. 2009; THIEMIG et al, 2010; BAO et al., 2011; SCHELLEKENS et al., 2011; VOISIN et al., 2011; ZAPPA et al., 2011). Muitas dessas pesquisas foram motivadas ou tiveram suporte de iniciativas científicas como o HEPEX - *The Hydrologic Ensemble Prediction Experiment* (SCHAAKE et al., 2006), a quarta fase do MAP - *Mesoscale Alpine Program* denominada de D-PHASE-*Demonstration of Probabilistic Hydrological and Atmospheric Simulation of flood events in the Alpine region* (ROTACH et al, 2012), o RAPHAEL *Project (Runoff and Atmospheric Processes for Flood Hazard Forecasting and Control)* (BACCHI & RANZI, 2003) e o projeto COST731 (ROSSA et al., 2011).

O trabalho apresentado por Verbunt et al. (2007) explorou a viabilidade das previsões meteorológicas por conjunto para previsões de vazões, em comparação com o uso de previsões meteorológicas determinísticas. Como estudo de caso foi utilizada a porção da bacia do Rio Reno definida pela estação Rheinfelden (34.550km²), na Europa Central. Como dados de entrada no modelo hidrológico foi usado um conjunto de previsões de precipitação, temperatura, velocidade do vento, umidade do ar e insola-

ção, originários do *Limited-Area Ensemble Prediction System* (LEPS). O modelo hidrológico usado foi o *Precipitation – Runoff – Evapotranspiration –Hydrotope* (PREVAH), que usa a abordagem de unidades de resposta hidrológica-URH. Para as avaliações foram selecionados dois eventos cheia, sendo os resultados avaliados em três afluentes alpinos do rio Reno. Os resultados obtidos mostraram que as previsões por conjunto são mais confiáveis quando comparadas a uma única previsão determinística. Para os casos investigados, o conjunto de previsões indicou claramente a possibilidade de ocorrência de cheias severas, ao contrário das previsões determinísticas, que não detectaram os eventos.

Pappenberger et al. (2008) apresentaram uma avaliação do uso do *grand ensemble* TIGGE (THORPEX *Interactive Grand Global Ensemble*) na previsão de eventos de cheia ocorridos durante o mês de outubro de 2007, na Romênia. A base de dados TIGGE é composta por um conjunto de sete EPSs, de diferentes centros de previsão meteorológica e que possuem diferentes números de membros (216 membros, no total). Esses sete EPSs foram utilizados individualmente e em conjunto como dado de entrada no *European Flood Alert System* (EFAS). Para previsão de vazões o EFAS usa o modelo LIS-FLOOD, com resolução espacial de 5km. Na avaliação geral, os autores concluem que o TIGGE, por incluir um número maior de cenários de previsão meteorológica, tem menor probabilidade de não detectar um evento, podendo ainda reduzir o número de alertas falsos nas previsões.

Schellekens et al.(2011) avaliaram o desempenho do EPS regional MOGREPS (*Met Office Global and Regional Ensemble Prediction System*) para uso operacional na previsão de cheias na região do rio Tâmbisa, no Reino Unido. A versão do MOGREPS utilizada possui 24 membros fornecendo previsões para o Reino Unido e Irlanda com resolução de 24km e horizonte de até 3 dias. Para realização das previsões de cheia, foi utilizado o Modelo TCM (*Thames Catchment Model*). As previsões foram realizadas duas vezes ao dia (9 e 21h), com horizonte de 36h, e seus resultados foram analisados em 8 estações de monitoramento. As previsões de precipitação por conjunto do MOGREPS resultaram em boas previsões de cheia para toda a região do Tâmbisa, mostrando benefício em relação ao uso da previsão determinística. A frequência de alarmes falsos no período avaliado foi baixa e eventos menores, que não superaram os níveis de alerta, foram também bem previstos.

Bao et al. (2011), avaliaram o benefício do acoplamento do modelo distribuído Grid-Xinanjiang ao *grand ensemble* TIGGE, na previsão de

cheias na bacia do rio Xixian (8.826km²), na cabeceira da bacia do rio Huaine, na China. A variável precipitação de EPSs de cinco instituições que incluem a base de dados TIGGE foram utilizadas: *Canadian Meteorological Centre*-CMC (15 membros); *European Center for Medium Range Weather Forecasting*-ECMWF (51 membros); *Meteorological Office*-UKMO (24 membros); *US National Centers for Environmental Prediction*-NCEP (15 membros); *China Meteorological Administration*-CMA (15 membros). Para avaliação das previsões foi selecionado um evento de cheia durante o mês de julho de 2007. As previsões de cheia com o modelo foram realizadas com intervalo de tempo de 6h e horizonte de 10 dias. Os resultados obtidos demonstraram que o *grand ensemble* TIGGE acoplado ao modelo hidrológico é uma ferramenta promissora na emissão de alertas de cheia antecipados com dez dias de antecedência, promovendo previsões de vazões comparáveis à vazão observada.

Aos exemplos de estudos de caso citados anteriormente poderiam ser acrescentados outros, sobretudo em regiões de clima temperado na Europa e nos Estados Unidos. Uma revisão bastante abrangente destes estudos foi apresentada por Cloke & Pappenberger (2009). Apesar destes exemplos bem sucedidos de uso das previsões meteorológicas por conjunto para gerar previsões de vazão ou de cheias por conjunto, até recentemente a abordagem determinística ainda predominava em Sistemas de Previsão e Alerta de Cheias (DEMERRITT et al. 2007; VERBUNT et al, 2007). Atualmente, alguns sistemas já utilizam operacionalmente ou em modo experimental a previsão por conjunto, entre eles o *European Flood Alert System* (EFAS) (<<http://efas-is.jrc.ec.europa.eu/>>), o sistema finlandês *The watershed Simulation and Forecasting System* (<<http://www2.ymparisto.fi/i2/65/>>), o sistema sueco do *Sweedish Hydro-Meteorological Service* (<<http://www.smhi.se/>>), os sistemas de previsão de cheias do rio Danúbio nas regiões da Bavária (<www.hnd.bayern.de>) e da Baixa Áustria (<<http://www.noel.gv.at/>>) e o *NWS Short-range Hydrologic Ensembles* (<<http://www.erh.noaa.gov/mmefs/>>) do *National Weather Service* dos Estados Unidos.

No contexto brasileiro, praticamente inexistem pesquisas relacionadas à previsão de cheias por conjunto em curto prazo. O único trabalho identificado apresenta uma proposta bastante preliminar na bacia do rio Iguaçu (CALVETTI, 2011). Entretanto, previsões meteorológicas por conjunto vêm sendo produzidas operacionalmente pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos-CPTEC/

INPE desde 1999 (COUTINHO, 1999; MACHADO et al., 2010) e previsões por conjunto envolvendo diferentes modelos têm sido produzidas e avaliadas pelo Laboratório de Meteorologia Aplicada a Sistemas de Tempo Regionais - MASTER (SILVA DIAS et al., 2006).

Nesse trabalho é proposta e avaliada uma metodologia para previsão de cheias por conjunto aplicada a uma bacia de médio porte em uma região de clima tipicamente tropical, que utiliza um conjunto de previsões de precipitação, dados de monitoramento hidrológico em tempo real e ferramentas de modelagem hidrológica para previsão de vazões disponíveis em modo operacional no contexto brasileiro.

METODOLOGIA

Previsões de vazão na bacia do rio Paraopeba foram realizadas e avaliadas retrospectivamente durante períodos chuvosos de três anos hidrológicos. Foram utilizados dados observados de precipitação e vazão de estações telemétricas operadas pela Companhia Energética de Minas Gerais-Cemig e um conjunto de previsões de precipitação constantes na base de dados do Laboratório de Meteorologia Aplicada a Sistemas Regionais de Tempo (MASTER-IAG/USP). As previsões de vazões por conjunto foram avaliadas através de uma representação determinística, considerando a média dos membros que compõem o conjunto hidrológico, assim como através de uma representação probabilística, considerando todos seus membros, utilizando medidas de desempenho específicas para esse fim. As previsões foram realizadas com o modelo hidrológico MGB-IPH com intervalo de tempo horário e horizonte de 72h. Nos itens a seguir as etapas da metodologia são descritas em maior detalhe.

O Modelo MGB-IPH

O MGB-IPH (Modelo de Grandes Bacias) é um modelo hidrológico conceitual, distribuído, apresentado por Collischonn (2001), para aplicação em grandes escalas espaciais. Na versão adotada, o modelo utiliza a discretização da bacia em pequenas sub-bacias, denominadas minibacias. O tipo de vegetação e uso do solo dentro de cada minibacia é categorizado dentro de uma ou mais classes utilizando a abordagem de Unidades de Resposta Hidrológica-URH (KOUWEN et al., 1993).

A estimativa da evapotranspiração no modelo é realizada pelo método de Penman – Monteith

(SHUTTLEWORTH, 1993) e a propagação do escoamento na rede de drenagem, através do método de Muskingum-Cunge, embora exista uma versão do modelo que utiliza um método hidrodinâmico (PAIVA, 2009). Para previsão de vazões, o modelo usa o procedimento de assimilação de dados apresentado nos trabalhos de Paz et al. (2007) e Collischonn et al. (2007). Esse procedimento utiliza as vazões observadas em tempo-real para atualizar as condições iniciais do modelo, representadas pelas vazões calculadas ao longo da rede de drenagem e o volume de água armazenado nos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo de cada minibacia do modelo hidrológico.

Previsão de Cheias

A proposta metodológica para geração das previsões de cheia por conjunto se baseia na realização de sucessivas previsões com o modelo MGB-IPH, utilizando como dados de entrada um conjunto de previsões de precipitação (conjunto meteorológico), dando origem a um conjunto de previsões de vazão (conjunto hidrológico). Como parâmetro de referência na avaliação das previsões de cheia por conjunto é utilizada uma previsão hidrológica determinística, baseada na previsão de precipitação MSMES, obtida da combinação ótima de saídas de diversos modelos meteorológicos (SILVA DIAS et al., 2006). Na estimativa das condições iniciais do modelo hidrológico bem como durante a previsão de cheias, variáveis climatológicas como temperatura, velocidade do vento e outras utilizadas no cálculo da evapotranspiração assumem os valores das normais climatológicas.

A análise dos resultados das previsões por conjunto está dividida em duas partes principais. A primeira parte é baseada em uma avaliação determinística, onde é comparado o desempenho da média do conjunto hidrológico com a previsão determinística de referência e com as previsões com chuva “perfeita” (chuva observada nas estações de medição) e chuva zero. Como medidas de desempenho nessa avaliação são utilizados o Coeficiente de Persistência-CP (KITANISDIS & BRAS, 1980) e o Erro Médio Quadrático-EMQ, para determinada faixa de magnitude de vazões observadas. São ainda realizadas comparações entre o desempenho da média do conjunto e cada um dos membros, para determinada faixa de magnitude de vazões. Nessa análise é utilizada como medida de desempenho o coeficiente de eficiência-CM, similar a CP, mas que compara o desempenho das previsões com o desempenho da média do conjunto hidrológico.

A segunda parte da análise é baseada em uma avaliação probabilística. Nesse caso é utilizado o Diagrama ROC (descrito mais a frente), para algumas antecedências e vazões limites de alerta. A seguir as medidas de desempenho mencionadas anteriormente são descritas.

Medidas de Desempenho

Avaliação determinística

Para análise determinística das previsões foram utilizados o Coeficiente de Persistência-CP e o Erro Médio Quadrático-EMQ. O CP, dado pela Equação 1, compara o resultado da previsão com um modelo hipotético que prevê para todos os intervalos de tempo o último valor observado, para o qual é adotado o termo persistência. Quanto mais próximo seu valor estiver da unidade, melhores são os resultados das previsões. Quando CP apresenta valores menores que zero, a previsão apresenta desempenho inferior a se utilizar como valor previsto o último valor observado. O índice CM (Equação 2), por sua vez, compara, de maneira similar a CP, os resultados da previsão com uma previsão de referência. Nesse caso, entretanto, a previsão de referência não é o último valor observado e sim a previsão dada pela média do conjunto hidrológico. Valores positivos do índice indicam melhor desempenho da previsão avaliada em relação ao conjunto médio. Valores negativos, por outro lado, indicam melhores resultados do conjunto médio.

O Erro Médio Quadrático-EMQ (Equação 3) mede a raiz da diferença quadrática média entre as previsões e observações correspondentes. Representa a magnitude do erro cometido na previsão, dando maior peso aos maiores desvios. Quanto mais próximo seu valor estiver de zero, melhores são os resultados das previsões.

$$CP_i = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (o_i - p_i)^2}{\sum_{n=1}^N (o_i - o_{i0})^2} \quad (1)$$

$$CM_i = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (o_i - p_i)^2}{\sum_{n=1}^N (o_i - p_i^m)^2} \quad (2)$$

$$EMQ_i = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (p_i - o_i)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

onde p é o valor previsto; p^m é o valor previsto pela média do conjunto; o é o valor observado; $t0$ é o instante de realização da previsão; i é a antecedência da previsão e N é o número total de previsões.

Avaliação Probabilística

O Diagrama ROC

O Diagrama ROC (*Relative Operating Characteristic* ou ainda *Receiver Operating Characteristic*) mede a capacidade de um sistema de previsão em discriminar entre eventos ocorridos ou não, como, por exemplo, a ocorrência ou não de inundações (WILKS, 2006; BROWN et al. 2010). É utilizado na avaliação em previsões de eventos dicotômicos, onde somente dois resultados são possíveis. O diagrama pode ser utilizado tanto na avaliação de previsões determinísticas como probabilísticas. No caso da previsão determinística, a partir de um determinado limiar definido para a variável considerada é construída uma tabela de contingência 2x2. As informações da tabela de contingência são usadas para o cálculo dos índices POD (probabilidade de detecção) e POFD (Probabilidade de Falsa Detecção ou Taxa de Alarme Falso). O par (POD;POFD) é então plotado no gráfico, em conjunto com os pares (0,0) e (1,1), conforme metodologia para construção do diagrama (WILKS, 2006). No eixo das ordenadas do diagrama aparece o valor de POD, e no das abscissas, POFD.

No caso da previsão probabilística ou por conjunto, o diagrama mede a qualidade de uma previsão binária ou da decisão sobre a emissão do alerta baseado em diferentes limites de probabilidade da previsão por conjunto. Dessa forma, para diferentes probabilidades da distribuição da previsão (e.g. decis do conjunto) são construídas tabelas de contingência 2x2 e calculados os valores de POD e POFD. A Figura 2 ilustra um Diagrama ROC e seus elementos para uma previsão por conjunto hipotética.

Komma et al.(2007) colocam que qualquer um dos quantis do conjunto podem ser usados na decisão de emissão ou não de alertas de cheia, existindo um *trade-off* na escolha do quantil e sua utilidade. Membros do conjunto na extremidade superior, representados por maiores quantis (e.g. 8º e 9º decil), possuem uma maior probabilidade de detectar o evento de cheia, entretanto ocorrerá uma maior taxa de alarmes falsos. Membros do conjunto na extremidade inferior apresentam menores valores

de POD, mas por outro lado apresentam valores de POFD menores.

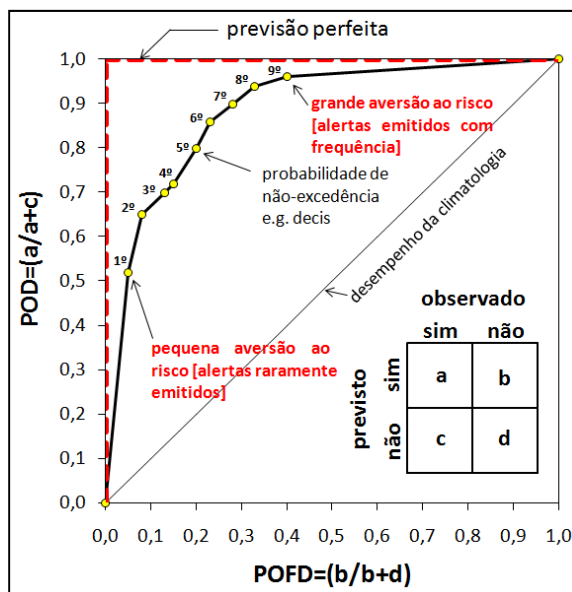


Figura 2 - Elementos de um Diagrama ROC. Modificado de Brown (2008).

ESTUDO DE CASO E DADOS UTILIZADOS

A bacia do rio Paraopeba possui área de 12.150 km² e situa-se na região centro-sul do Estado de Minas Gerais, entre as longitudes 43ºO e 45ºO e latitudes 18ºS e 21ºS. O rio Paraopeba é afluente pela margem direita do rio São Francisco e tem como alguns de seus principais afluentes os rios Pardo, Manso, Brumado, Camapuã e Maranhão. A Figura 3 apresenta o mapa de localização da bacia do rio Paraopeba e a rede telemétrica de monitoramento na região operada pela Cemig.

O clima predominante na bacia é do tipo tropical semi-úmido (4 a 5 meses secos) (IBGE, 2002), com sazonalidade bem definida. O período chuvoso ocorre entre os meses de outubro a março, sendo que o trimestre mais chuvoso é de novembro a janeiro. O período seco se estende de abril a setembro. Nas análises empreendidas nesse trabalho o mês de abril foi considerado como pertencente ao período chuvoso na bacia, já que alguns eventos hidrológicos iniciados no mês de março possuem seu pico durante o mês de abril.

Os maiores volumes de precipitação na bacia ocorrem nas regiões sul/sudeste bacia e em toda a extensão das serras que atravessam a bacia no sentido Leste-Oeste, próximo a latitude 20ºS, onde os

volumes médios anuais alcançam cerca de 1.800mm. Na região norte da bacia são observados os menores volumes anuais de precipitação, com valores próximos a 1.200mm.

Na aplicação do modelo MGB-IPH, foram utilizadas as seguintes bases de dados:

- modelo numérico do terreno, derivado da missão STRM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução de 90m (FARR et al., 2007) ;
- dados de tipo do solo para o estado de Minas Gerais, na escala 1:1.000.000, disponibilizados através do portal na internet IDE-GeoMINAS (<http://www.ide.ufv.br/geominas/>);
- dados de cobertura vegetal para a América do Sul, obtidos via sensoriamento remoto, com resolução aproximada de 1km, desenvolvido por Eva *et al.* (2002);
- dados horários de precipitação de 16 estações pluviométricas das redes telemétricas das bacias do rio São Francisco e rio das Velhas, no período de 2000 a 2011, operada pela Cemig (Figura 3);
- dados horários de vazão de duas estações telemétricas no rio Paraopeba, no período de 2000 a 2011, operada pela Cemig (Figura 3);
- normais climatológicas de 14 estações na região da bacia do rio Paraopeba, publicadas pelo INMET-Instituto Nacional de Meteorologia (Figura 3).

Em uma etapa anterior a utilização, tanto os dados de chuva como vazão foram submetidos a um procedimento de verificação, sendo descartados dados considerados incoerentes. Maiores detalhes acerca desse procedimento podem ser encontrados em Meller (2012).

Os parâmetros do modelo MGB-IPH foram calibrados para as duas sub-bacias definidas pelas estações fluviométricas mostradas na Figura 3, no período entre 01/12/2006 00:00 UTC a 20/06/2011 23:00 UTC, representando 40% da série de dados horários. Nesse processo dois tipos de técnicas foram usadas: (1) calibração manual, por tentativa e erro e, (2) calibração automática multi-objetivo utilizando o algoritmo MOCOM-UA (YAPO et al., 1998).

A validação do modelo foi realizada para o período entre 19/06/2000 00:00 UTC a 30/11/2006

23:00 UTC, representando cerca de 60% da série de dados. Os resultados da calibração e validação do modelo em termos do Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe e do erro de volume foram considerados razoáveis e são mostrados na Tabela 1. Informações adicionais a respeito da calibração e validação do modelo, incluindo os gráficos de comparação entre hidrogramas observados e calculados, estão disponíveis em Meller (2012).

Tabela 1 - Resultados da calibração e validação do modelo MGB-IPH na bacia hidrográfica do rio Paraopeba.

Estação fluviométrica	Área de drenagem (km ²)	Calibração		Validação	
		NS	ΔV (%)	NS	ΔV (%)
Porto do Mesquita	10.280	0,81	-3,1	0,89	3,0
Ponte Nova do Paraopeba	5.774	0,78	-6,6	0,76	-11,5

Dados de previsão de precipitação

A base de dados de previsão de precipitação utilizada nessa pesquisa compreende 38 saídas de modelos PNT, que se distinguem em relação ao tipo de modelo (global ou regional), à resolução, às parametrizações utilizadas, às condições iniciais e de contorno e às perturbações do estado inicial. A organização dessa base de dados surgiu da iniciativa do Laboratório de Meteorologia Aplicada a Sistemas Regionais de Tempo (MASTER-IAG/USP <<http://www.master.iag.usp.br/>>) em cooperação com outras instituições em conduzir uma atividade de intercomparação entre modelos PNT (SILVA DIAS *et al.*, 2006). A listagem completa dos modelos PNT utilizados no trabalho podem ser encontradas em Meller (2012).

As previsões de precipitação utilizadas possuem frequência diária, discretização temporal de, em geral, 6h, sendo emitidas às 00:00 UTC. Essas previsões são disponibilizadas pelo Laboratório MASTER em pontos correspondentes às latitudes e longitudes de uma ampla rede de estações de monitoramento de superfície na América do Sul. Para uso no modelo hidrológico as previsões foram desagregadas uniformemente do intervalo de 6h para 1h, e interpoladas pelo método do Inverso do Quadrado da Distância (vide MENDES & CIRILO, 2001) para os centróides das minibacias do modelo hidrológico.

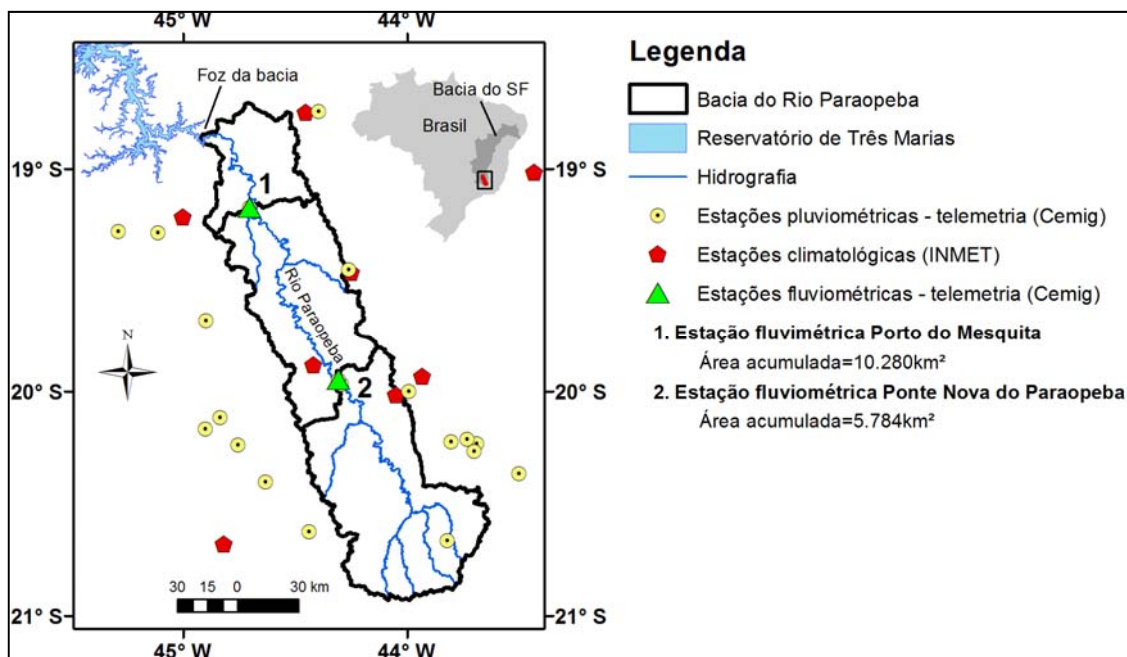


Figura 3 - Mapa de localização da bacia do rio Paraopeba mostrando algumas das estações de monitoramento utilizadas.

Uma das características de EPSs formados por saídas de diferentes modelos operados por diferentes centros (também chamado de *poor's man ensemble*) como o MASTER, é que nem todos os membros do conjunto estão disponíveis para todas as previsões. A ausência de determinados membros em algumas previsões deve-se, tipicamente, a problemas de *software* ou *hardware* nos centros que produzem as previsões ou problemas durante o envio ou recebimento dessas informações respectivamente pelos centros emissor ou receptor. No período considerado para realização das previsões de cheia nessa pesquisa, o número máximo e mínimo de membros para uma previsão qualquer foi de, respectivamente, 36 e 4, sendo que 70% das previsões possuem entre 31 e 36 membros.

O MASTER produz ainda a previsão determinística MSMES-M, baseada no conceito *multimodel super ensemble* (KRISHNAMURTI et al., 1999), onde os membros do conjunto meteorológico são combinados estatisticamente em única previsão, levando em conta seus desempenhos em um período de tempo 15 dias anterior à previsão. Nesse procedimento é utilizado um esquema bayesiano onde os pesos dos membros utilizados são definidos em função do erro quadrático médio de previsões anteriores, após a remoção do viés. O objetivo desse tipo de técnica é obter uma previsão determinística única com desempenho superior ao da média aritmética

do conjunto ou qualquer um de seus membros. O resultado da previsão hidrológica com a previsão determinística MSMES-M foi utilizado como parâmetro de referência na avaliação dos resultados das previsões de cheia por conjunto.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As previsões de cheia na estação Porto do Mesquita foram realizadas retrospectivamente no período entre ago/2008 e mai/2011, com intervalo de tempo de 1h, horizonte de 72h e frequência de um dia, no horário 00:00 UTC, conforme disponibilidade dos dados de previsão de precipitação. Para alimentar o modelo hidrológico foi utilizado um conjunto de previsões de precipitação além da previsão determinística MSMES-M, usada como referência na avaliação dos resultados. Em algumas das análises são ainda apresentados os resultados das previsões com chuva zero e com chuva perfeita. A avaliação dos resultados se concentrou nos três períodos chuvosos (out-abr) entre 2008 e 2011, resultando em 631 eventos de previsão.

Foram adotadas com propósito meramente investigativo quatro vazões limite de alerta, associadas aos quantis com probabilidade de não-excedência de 80%, 95%, 98% e 99% da série de

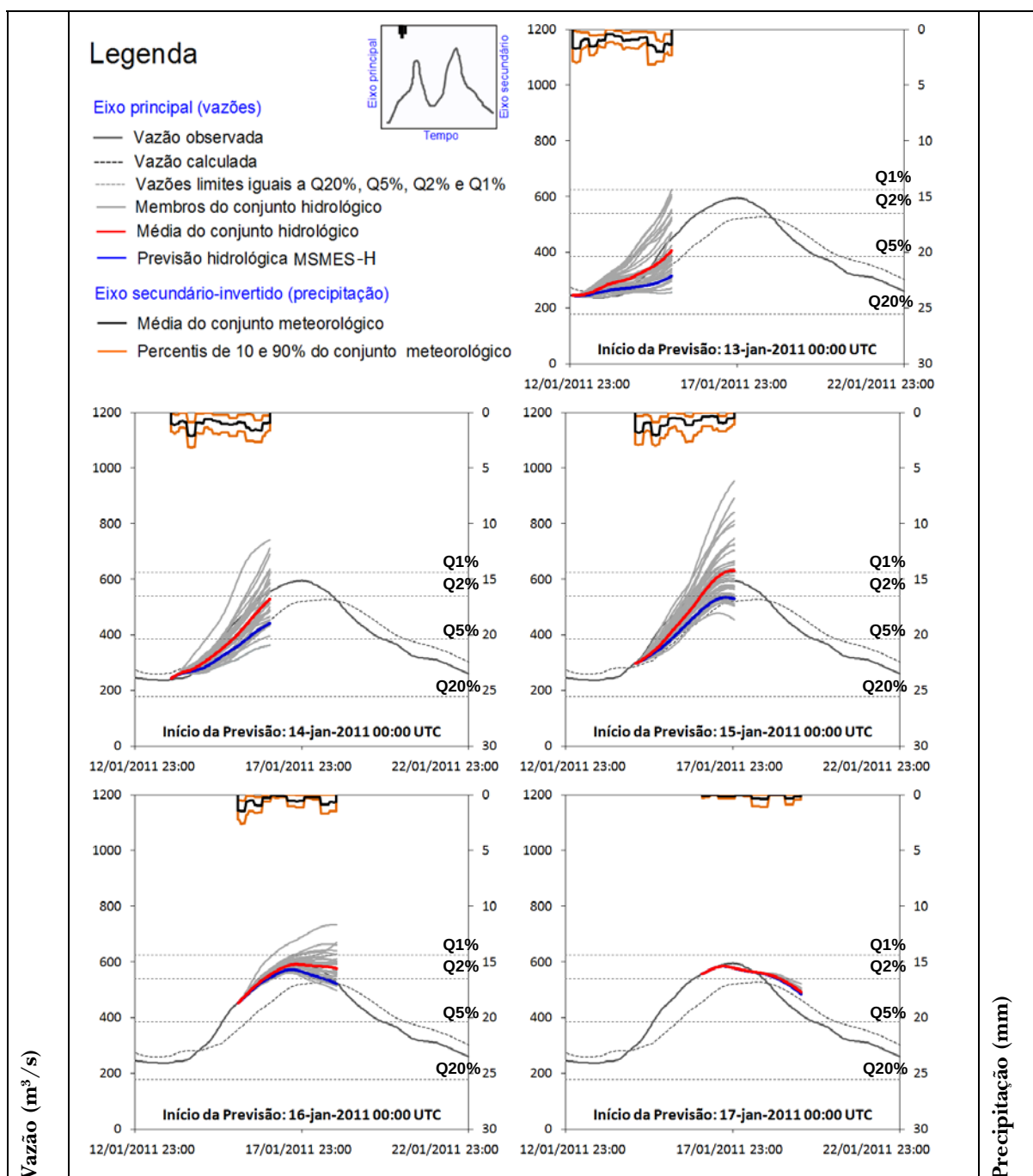


Figura 4 - Previsões de cheia por conjunto no período entre 13 e 17 de janeiro de 2011.

vazões horárias. O intuito principal da definição de valores limites é o de avaliar o desempenho das previsões hidrológicas em eventos do tipo dicótomos, que consideram a superação ou não de determinado nível de alerta de cheia. A Tabela 2 apresenta os limites estabelecidos e siglas utilizadas no texto.

A Figura 4 apresenta uma sequência de 5 previsões para o evento ocorrido entre os dias 13 e 22 de janeiro de 2011. No eixo principal das abscissas aparecem, entre outros, os hidrogramas da previsão hidrológica de todos os membros do conjunto (em cinza), o conjunto médio (em vermelho) e a

previsão determinística de referência MSMES-H (em azul), e no eixo secundário, a previsão de precipitação média do conjunto meteorológico sobre a bacia e o 1º e 9º decis do conjunto.

Tabela 2 - Vazões limites adotadas na avaliação das previsões de cheias.

Vazão Limite/Sigla	Quantil*	Vazão (m³/s)
Q20%	80%	177,0 m³/s
Q5%	95%	382,5 m³/s
Q2%	98%	538,5 m³/s
Q1%	99%	623,5 m³/s

* definido com base na série de vazões horárias observadas na estação Porto do Mesquita no período entre 2000 e 2011.

Para o evento apresentado, na ascensão do hidrograma a previsão por conjunto apresenta um espalhamento que permite captar todas as observações ao longo do horizonte de previsão, sendo que a média do conjunto apresenta bons resultados, como mostram as previsões entre os dias 13 e 16 de janeiro de 2011. A previsão MSMES-H também apresenta resultados razoáveis, sobretudo na previsão do dia 16 de janeiro de 2011, no pico do evento de cheia.

Observa-se, ainda na Figura 4, que o espalhamento dos membros é menor nas antecedenças iniciais do horizonte de previsão, o que tem relação com o tempo de resposta da bacia. A ocorrência de espalhamento reduzido nessas antecedenças (“underspread”) faz com o conjunto capte uma menor proporção das observações, um problema tipicamente relatado na literatura (e.g. VELÁZQUEZ et al. 2009, 2011; BOUCHER et al., 2011; ALFIERI et al; 2012). Com o aumento da antecedença, há um aumento do espalhamento do conjunto, o que permite captar uma proporção maior das observações. Na antecedença de 72h o espalhamento é máximo, assim como a proporção de observações captadas pelo conjunto. Na recessão do hidrograma, onde as previsões de precipitação tendem a assumir valores próximos à zero, os membros do conjunto concordam, não havendo praticamente espalhamento do conjunto.

A Figura 5(i) e (ii) apresentam os resultados da avaliação determinística das previsões, em termos de CP e EMQ, para a média do conjunto hidrológico, a previsão MSMES-H (resultante da previsão com o produto MSMES-M) e as previsões com chuva zero e chuva perfeita. Os resultados são analisados apenas para faixas de magnitude de vazões observadas acima da Q20% (177m³/s), que representa um cenário

típico de cheias na estação Porto do Mesquita.

Para as duas medidas de desempenho avaliadas (Figura 5(i) e (ii)), todas as previsões apresentaram desempenhos similares até a antecedença de cerca de 30h. A partir dessa antecedença, as previsões de vazão com chuva perfeita e chuva zero apresentaram, respectivamente, o melhor e o pior desempenho nas previsões, como esperado. As previsões de vazão com precipitação prevista (média do conjunto e a previsão MSMES-H), por sua vez, apresentaram superioridade às previsões ingênua (persistência) e com chuva zero, principalmente nas maiores antecedenças, mostrando que existe benefício pela incorporação da previsão de precipitação na ampliação do horizonte de previsão de cheias.

Na Figura 5(i), são mostrados os resultados das previsões em termos de CP. Pode-se observar que existe benefício de todas as previsões sobre se prever o último valor observado (persistência) a partir da antecedença de 17h. O EMQ (Figura 5(ii)), mostra que desempenho das previsões diminui com o aumento da antecedença. Observa-se ainda que a previsão MSMES-H apresenta desempenho similar à média do conjunto para ambas as medidas de desempenho, mostrando ligeira superioridade sobre essa última nas antecedenças próximas do horizonte da previsão. Na antecedença de 72h a previsão MSMES-H é superior a média do conjunto em cerca 7% em termos de CP e cerca de 2% em termos de EMQ.

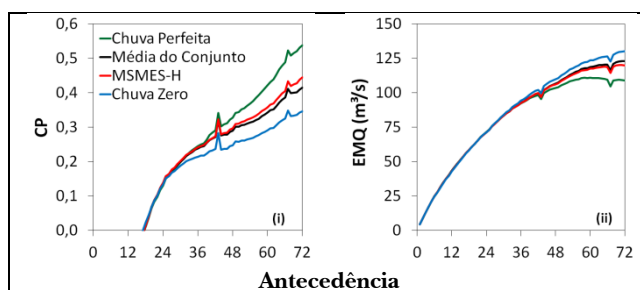


Figura 5 - Comparação dos resultados das previsões em termos de CP e EMQ para a média do conjunto hidrológico, a previsão MSMES-H e as previsões com chuva zero e com chuva perfeita, para vazões observadas acima da vazão limite Q20%, igual 177m³/s.

Em uma última análise determinística, o desempenho de cada um dos membros do conjunto foi comparado com a média do conjunto para faixas de magnitude de vazão acima da Q20%, através de CM. A Figura 6 mostra os resultados dessa comparação. Observa-se nessa figura que média do conjunto

possui desempenho superior a maior parte dos membros (colunas em azul), apresentando resultados similares, ligeiramente inferiores, às previsões de quatro membros do conjunto (colunas em vermelho). Isso mostra que, de modo geral, existe benefício do uso da média do conjunto sobre a utilização individual dos membros do conjunto nas previsões. É importante salientar que as amostras usadas no cálculo de CM para cada membro do conjunto são diferentes, já que nem todos os modelos estão disponíveis para todas as previsões realizadas durante o período considerado. Dessa forma, os resultados apresentados na Figura 6 não servem para comparar o desempenho dos modelos entre si.

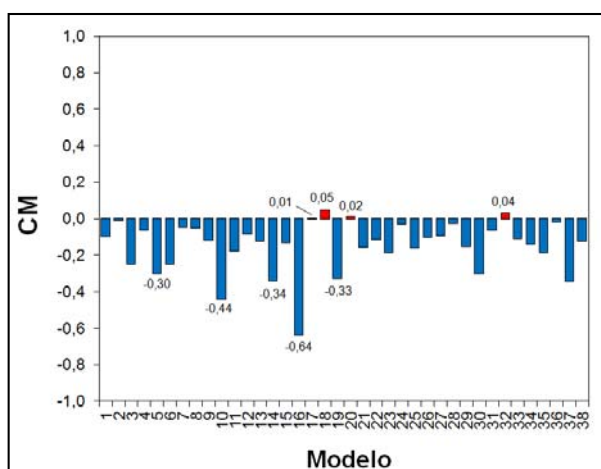


Figura 6 - Comparação dos resultados das previsões entre os membros do conjunto hidrológico e o conjunto médio através de CM, para vazões observadas acima da vazão limite Q20%, igual 177m³/s. As colunas na cor azul indicam melhor desempenho da média do conjunto. As colunas em vermelho indicam melhor desempenho do membro do conjunto avaliado.

A Figura 7 apresenta diagramas de dispersão das previsões, onde são graficados os pares vazão observada *versus* vazão prevista, para todos os membros do conjunto, nas antecedências de 12, 24, 48 e 72h. De modo geral, observa-se uma superestimativa das previsões, que aumenta com a antecedência, sobretudo para faixas de magnitude de vazões observadas acima de 600m³/s. Observa-se ainda uma maior dispersão ou espalhamento dos membros do conjunto do conjunto para maiores antecedências.

As Figuras 8 e 9 apresentam o Diagrama ROC, para todas as vazões limite, nas antecedências de 48 e 72h. Nessas figuras são apresentados os resultados em termos de POD e POFD para o 1º, 5º e

9º decis do conjunto (respectivamente os quadrados inferior, intermediário e superior no gráfico), para o conjunto médio (ponto na cor vermelha) e para a previsão de referência MSMES-H (ponto na cor preta).

Tomando como exemplo a vazão limite Q2% na antecedência de 48h (Figura 8(iii)), o 1º, 5º e 9º decil do conjunto apresentam valores de POD, nesta ordem, de 0,73, 0,81 e 0,97 para valores correspondentes de POFD de 0,01, 0,01 e 0,03. A previsão determinística MSMES-H apresenta valores de POD e POFD, respectivamente, de 0,73 e 0,01. A média do conjunto, por sua vez, apresenta valores de POD e POFD de, respectivamente, de 0,81 e 0,01. Percebe-se, que a utilização de quantis superiores do conjunto, representados pelo 9º decil, permite aumentar POD de 0,73 da previsão MSMES-H para 0,97, em detrimento de um pequeno aumento do valor de POFD, de 0,01 para 0,03. A utilização do 9º decil mostra benefício em relação aos demais decis e mesmo sobre a média do conjunto. Para as previsões que consideram as demais vazões limites, a vantagem pelo uso do 9º decil se mantém, embora o benefício seja um pouco menor.

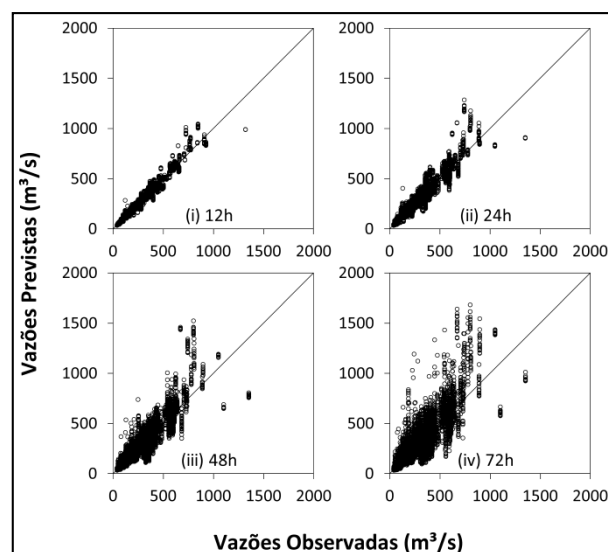


Figura 7 - Vazões observadas *versus* vazões previstas para os períodos chuvosos (out-abr) entre 2008 e 2011, nas antecedências de 12, 24, 48 e 72h.

Para a antecedência de 72h (Figura 9), a previsão por conjunto dada pelo 9º decil apresenta resultados superiores a todas outras previsões, parti-

cularmente para as vazões limites $Q2\%$ e $Q1\%$ (Figura 9(iii) e (iv)), consideradas mais importantes no contexto de prevenção de cheias. No caso das previsões que consideram a vazão limite $Q2\%$ (Figura 9(iii)), é possível aumentar os valores de POD de 0,61 da previsão MSMES-H para 0,95 com o uso no 9º decil da previsão por conjunto, em detrimento de um aumento de POFD de 0,01 para 0,05. De maneira análoga, para as previsões que consideram a $Q1\%$ como limite (Figura 9(iv)), é possível elevar o valor de POD de 0,79 para 0,95 com um aumento de POFD de 0,01 para 0,05.

Em resumo, os resultados obtidos das análises envolvendo previsões de eventos do tipo dicótomos são considerados satisfatórios e mostram que existe benefício pelo uso dos quantis superiores do conjunto em relação ao uso de previsões determinísticas. Resultados semelhantes foram obtidos por Komma et al. (2007) e Thirel et al. (2010).

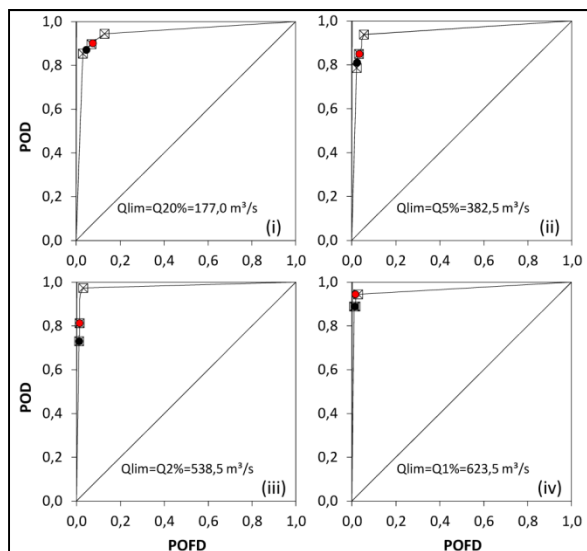


Figura 8 - Diagrama ROC para a antecedência de 48h. Os quadrados inferior, intermediário e superior representam respectivamente, o 1º, 5º e 9º decis do conjunto. Os pontos em vermelho e preto representam, respectivamente, o conjunto médio e a previsão de referência MSMES-H.

CONCLUSÕES

Nesse trabalho é proposta e avaliada uma metodologia para previsão de cheias por conjunto, que utiliza a modelagem hidrológica conceitual com o modelo MGB-IPH associada a um conjunto de

previsões de precipitação. Como parâmetro de referência nas análises, foi utilizada uma previsão hidrológica determinística (MSMES-H), obtida a partir do uso de uma previsão de precipitação única resultante da composição ótima de saídas de diferentes modelos meteorológicos, denominada MSMES-M.

A análise dos resultados das previsões de cheia foi realizada para três períodos chuvosos (out-abr) entre os anos de 2008 e 2011. As previsões por conjunto foram avaliadas através de uma representação determinística, considerando a média do conjunto hidrológico, assim como através de uma representação probabilística, através do Diagrama ROC. As previsões foram realizadas com intervalo de tempo horário e horizonte de 72h.

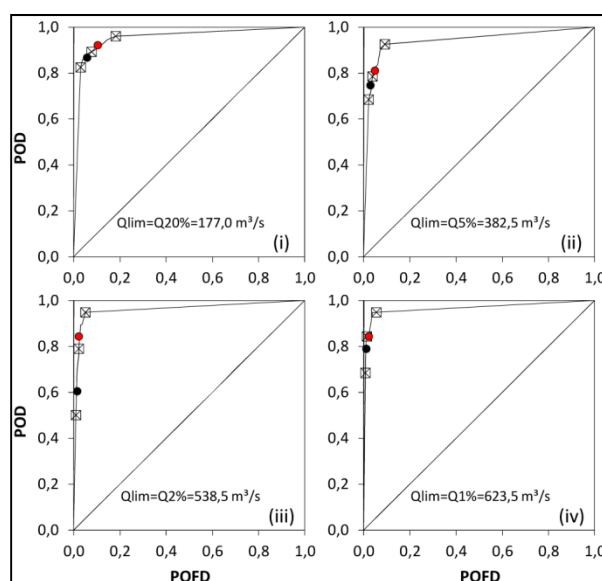


Figura 9 - Diagrama ROC para a antecedência de 72h. Os quadrados inferior, intermediário e superior representam respectivamente, o 1º, 5º e 9º decis do conjunto. Os pontos em vermelho e preto representam, respectivamente, o conjunto médio e a previsão de referência MSMES-H.

Na avaliação determinística, a média do conjunto hidrológico apresentou resultados similares aos obtido com a previsão determinística de referência, embora tenha apresentado benefício significativo em relação a maior parte dos membros do conjunto. As previsões com precipitação prevista (média do conjunto e a previsão MSMES-H) apresentaram ainda superioridade em relação às previsões ingênuas (persistência) e com chuva zero, principalmente nas maiores antecedências, mostrando que existe benefício pela incorporação da previsão

de precipitação na ampliação do horizonte de previsão de cheias.

A avaliação das previsões de cheia por conjunto, por sua vez, mostrou a existência de uma superestimativa dos membros em relação às observações. Observou-se ainda que o espalhamento entre os membros é menor nas antecedenças iniciais do horizonte de previsão, o que tem relação com o tempo de resposta da bacia. Nessas antecedenças, o conjunto captou uma menor proporção das observações. Com o aumento da antecedença, houve um aumento no espalhamento do conjunto, o que permitiu captar uma proporção maior das observações.

Na comparação dos resultados das previsões em eventos do tipo dicótomos, que consideram a superação ou não de vazões limites de alerta, o 9º decil das previsões por conjunto mostrou superioridade em relação à previsão determinística de referência e mesmo a média do conjunto, sendo possível obter, na maior parte dos casos analisados, um aumento significativo na proporção de eventos corretamente previstos mantendo as taxas de alarmes falsos em níveis reduzidos. Esse benefício foi, de modo geral, maior para maiores antecedenças e vazões limites, que são as situações mais importantes num contexto de prevenção de cheias.

Acredita-se, com base nos resultados obtidos nessa pesquisa, que a utilização da abordagem probabilística representa uma perspectiva promissora na detecção e antecipação de cheias, apresentando benefício sobre previsões determinísticas, sobretudo em previsões de eventos do tipo dicótomos, importantes na emissão de alertas de cheias. Possíveis linhas de investigação que surgem como perspectiva futura e complementar a essa pesquisa são:

- avaliação de abordagens que considerem outras fontes de incerteza nas previsões de cheia por conjunto, tais como incertezas nas condições iniciais do modelo hidrológico ou em sua estrutura/parâmetros, ou ainda o uso de métodos para correção de erros sistemáticos e do espalhamento do conjunto nos dados de entrada (e.g. previsões de precipitação) ou nos resultados da previsão de vazões;
- avaliação de Sistemas de Previsão por Conjunto (EPSs) que possuam maior resolução temporal/espacial e com um maior número de membros.
- investigação dos benefícios associados ao uso das previsões de cheia por conjunto na otimização da operação de reservatórios.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Amauri Silva pela atenção em disponibilizar e dirimir as dúvidas a respeito das previsões de precipitação utilizadas. O primeiro autor agradece a Agência Nacional de Águas pela concessão de licença para doutorado. No estudo foram utilizados dados hidrológicos disponibilizados pela Cemig no âmbito do projeto de pesquisa P&D-353 intitulado “Desenvolvimento de Sistema de Previsão de Vazões com Base na Integração de Sistema de Telemetria a Modelos Hidrológicos e de Previsão Climática”.

REFERÊNCIAS

- ALFIERI, L.; THIELEN, J. & PAPPENBERGER, F. *Ensemble hydro-meteorological simulation for flash flood early detection in southern Switzerland*. *Journal of Hydrology*, v.424–425, p.143–153, 2012.
- ANDEL, S.J.V.; WEERTS, A.; SCHAAKE, J. & BOGNER, K. *Post-processing hydrological ensemble predictions intercomparison experiment*. *Hydrological Processes*. *Accepted Article*, 2012.
- BACCHI, B. & RANZI, R. *Hydrological and meteorological aspects of floods in the Alps: an overview*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(6), p.784-798, 2003.
- BAO, H.-J.; ZHAO, L.-N., HE, Y.; LI, Z.-J.; WETTERHALL, F.; CLOKE, H. L.; PAPPENBERGER, F. & MANFUL, D. *Coupling ensemble weather predictions based on TIGGE database with Grid-Xinjiang model for flood forecast*. *Adv. Geosci.*, 29, p.61–67, 2011.
- BOUCHER, M.A.; ANCTIL, F.; PERREAULT, L.; TREMBLAY, D. *A comparison between ensemble and deterministic hydrological forecasts in an operational context*. *Advances in Geosciences*, 29, p.85-94, 2011.
- BROWN, J.D. *Ensemble verification refresher*. *Second Verification Workshop*, CBRFC, 11/18/08, 2008.
- BROWN, J.D. & SEO, D. *A Nonparametric Postprocessor for Bias Correction of Hydrometeorological and Hydrologic Ensemble Forecasts*. *Journal of Hydrometeorology*, v. 11, p.642-665, 2010.
- CALVETTI, L. *Previsão hidrometeorológica probabilística na*

Bacia do Alto Iguaçu-PR com os modelos WRF e TopModel. Tese de Doutorado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade Federal de São Paulo, 141p, 2011.

CASTANHARO, G.; GIBERTONI, R.F.C.; MÜLLER, I.I.; ANDRIOLO, M.V.; KAVISKI, E.; GUILHON, L.G.F. & ROCHA, V.F. Previsão de Vazões na Bacia do Rio Iguaçu Baseada no Modelo SMAP e com Incorporação de Informações de Precipitação. RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.12, n.3 Jul/Set 2007, p.57-68, 2007.

CLOKE, H.L. & PAPPENBERGER, F. *Ensemble flood forecasting: A review. Journal of Hydrology*, v.375, Issues 3–4, p.613–626, 2009.

COLLISCHONN, W. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Pesquisas Hidráulicas. 277p, 2001.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T.; CHOU, S.C.; GUILHON, L.G.; CATALDI, M.; ALLASIA, D. *Medium-range reservoir inflow predictions based on quantitative precipitation forecasts. Journal of Hydrology*, v.344, p. 112-122, 2007.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T.; CORBO, M.D.; SILVA, B.C.; COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D. & PAZ, A.R. Modelo Hidrológico Distribuído para Previsão de Vazões Incrementais na Bacia do Rio Paranaíba entre Itumbiara e São Simão. RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.12, n.3 Jul/Set 2007, p.43-55, 2007.

COMET *Introduction to verification forecasts - On-line course. The Cooperative Program for Operational Meteorology, Education and Training. University Corporation for Atmospheric Research's (UCAR's)*. Disponível em <<https://www.meted.ucar.edu/>>, 2008. Acessado em 2008.

COUTINHO, M.M. Previsão por conjuntos utilizando perturbações baseadas em componentes principais. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 136p., 1999.

DANCE, S.L. & ZOU, Q.P. *Ensembles, uncertainty and flood prediction. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 7, p.3591-3611, 2010.

DAVOLIO, S.; MIGLIETTA, M.M.; DIOMEDE, T.; MARSIGLI, C.; MORGILLO, A. & MOSCATELLO, A. *A meteo-hydrological prediction system based on a multi-model approach for precipitation forecasting, Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, p.143-159, 2008.

DEMERRITT, D.; CLOKE, H.; PAPPENBERGER, F., THIELEN, J.; BARTHOLMES, J. & RAMOS, M.-H. *Ensemble predictions and perceptions of risk, uncertainty, and error in flood forecasting. Environmental Hazards*, 7, p.115–127, 2007.

DIETRICH, J.; SCHUMANN, A.H.; REDETZKY, M.; WALTHER, J.; DENHARD, M.; WANG, Y.; PFUTZNER, B.; BUTTNER, U. *Assessing uncertainties in flood forecasts for decision making: prototype of an operational flood management system integrating ensemble predictions. Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, p.1529–1540, 2009.

EBERT, E.E. *Ability of a Poor Man's Ensemble to Predict the Probability and Distribution of Precipitation. Monthly Weather Review*, v.129, p.2461-2480, 2000.

EVA, H.D.; BELLA, C.M.; GOND, V.; HUBER, O.; SGRENZAROLI, M.; JONES, S.; COUTINHO, A.; DORADO, A.; GUIMARÃES, M.; ELVIDGE, C.; ACHARD, F.; BELWARD, A.S.; BARTHOLOMÉ, E.; BARALDI, A.; DE GRANDI, G.; VOGT, P.; FRITZ, S. E HARTLEY, A. *A vegetation Map of South America*. EU 20159, European Commission, Luxembourg, 2002.

FARR, T.G., CARO, E., CRIPPEN, R., DUREN, R., HENSLEY, S., KOBRICK, M., PALLER, M., RODRIGUEZ, E., ROSEN, P., ROTH, L., SEAL, D., SHAFFER, S., SHIMADA, J., UMLAND, J., WERNER, M., BURBANK, D., OSKIN, M., AND ALSDORF, D. *The shuttle radar topography mission. Reviews of Geophysics*, 45(2), 2007

GUILHON, L.G.F.; ROCHA, V.F. & MOREIRA, J.C. Comparação de Métodos de Previsão de Vazões Naturais Afluentes a Aproveitamentos Hidroelétricos. RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.12, n.3 Jul/Set 2007, p.13-20, 2007.

GOUWEELEEUW, B. T., THIELEN, J., FRANCHELLO, G., DE ROO, A. P. J., & BUIZZA, R. *Flood forecasting using medium-range probabilistic weather prediction, Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v.9, p.365–380, 2005.

HABETS, F.; LEMOIGNE, P. & NOILHAN, J. *On the utility of operational precipitation forecasts to serve as input for streamflow forecasting. Journal of Hydrology*, n.293, p.270-288, 2004.

HAPUARACHCHI ; H.A.P.; Q. J. WANG; PAGANO, T. C. A review of advances in flash flood forecasting. *Hydrological Processes*, v.25, p.2771–2784, 2011.

HE, M.; HOGUE, T.S.; MARGULIS, S.A. & FRANZ, K.J. *An integrated uncertainty and ensemble-based data assimilation approach for improved operational streamflow predictions. Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, p.815–831, 2012.

- IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapa de Climas do Brasil, 2002. Disponível em <ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/mapas_murais/>. Acessado em outubro de 2012.
- KITANIDIS, P.K. & BRAS, R.L. *Real time forecasting with a conceptual hydrologic model 2: applications and results*. *Water Resources Research*, 16 (6), p.1034–1044, 1980.
- KOMMA, J.; RESZLER, C.; BLOSCHL, G. & HAIDEN, T. *Ensemble prediction of floods– catchment non-linearity and forecast probabilities*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7, p.431–444, 2007.
- KOUWEN, N.; SOULIS, E.D.; PIETRONIRO, A.; DONALD, J.; HARRINGTON, R.A. *Grouped Response Units for Distributed Hydrologic Modeling*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 119, n.3, p.289-305, 1993.
- KRISHNAMURTI, T.N.; KISHTAWAL, C.M.; LAROW, T.E.; BACHIOCHI, D.R.; ZHANG, Z.; WILLIFORD, C.E.; GADGIL, S. & SURENDRAN, S. *Improved Weather and Seasonal Climate Forecasts from Multimodel Superensemble*. *Science*, v.285, p.1548-1550, 1999.
- LORENZ, E.N. *Three approaches to atmospheric predictability*. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v.50, p.345-351, 1969.
- MACHADO, L.H.R.; MENDONÇA, A.M.; MENDONÇA, R.W.B. & BONATTI, J.P. Impacto da utilização de previsões “defasadas” no sistema de previsão de tempo por conjunto do CP-TEC/INPE. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.25, n.1, 54 - 69, 2010.
- MELLER, A. *Previsão de Cheias por Conjunto em Curto Prazo*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Pesquisas Hidráulicas. 224p, 2012. Disponível em < http://www.lume.ufrgs.br/>.
- MENDES, C.A. & CIRILO, J.A. *Geoprocessamento em recursos hídricos: Princípios, integração e aplicação*. ABRH, Porto Alegre, 536p., 2001.
- MOORE, R.J.; BELL, V.A. & JONES, D.A. *Forecasting for flood warning*. *Comptes Rendus Geoscience*, v.337, issue 1, p.203-217, 2005.
- NOBERT, S., DEMERITT, D. & CLOKE, H. *Informing operational flood management with ensemble predictions: lessons from Sweden*. *Journal of Flood Risk Management*, 3, p.72–79, 2010.
- PAIVA, R.C.D. *Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias*. Estudo de caso: Bacia do Rio Solimões. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 168 p, 2009.
- PAPPENBERGER, F.; BARTHOLMES, J.; THIELEN, J.; CLOKE, H.L.; BUIZZA, R. & DE ROO, A. *New dimensions in early flood warning across the globe using grand-ensemble weather predictions*. *Geophysical Research Letters*, v.35, 7p., 2008.
- PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T. & ALLASIA, D. *Data Assimilation in a large-scale distributed hydrological model for medium-range flow forecasts*. In: *Proceedings of Symposium HS2004 at IUGG2007*, Perugia, July 2007. IAHS Publi. 313, p.471-478, 2007.
- PLATE, E. *Early warning and flood forecasting for large rivers with the lower Mekong as example*. *Journal of Hydro-environment Research*, v.1, Issue 2, p.80-94, 2007.
- ROSSA, A., LIECHTI, K., ZAPPA, M., BRUEN, M., GERMANN, U., HAASE, G., KEIL, C. & KRAHE, P. *The COST 731 action: a review on uncertainty propagation in advanced hydrometeorological forecast systems*, *Atmos. Res.*, v.100, p.150–167, 2011.
- ROTACH, M. W.; ARPAGAU, M.; DORNINGER, M.; HEGG, C.; MONTANI, A. & RANZI, R. *Uncertainty propagation for flood forecasting in the Alps: different views and impacts from MAP D-PHASE*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, p.2439–2448, 2012.
- SILVA, B.C.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T. & CORBO, M.D. *Previsão Hidroclimática de Vazão de Curto Prazo na Bacia do Rio São Francisco*. *RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.12, n.3 Jul/Set 2007, p.31-41, 2007.
- SILVA DIAS, P.L.; MOREIRA, D.S. & DOLIF NETO, G. *The Master Super Model Ensemble System (MSMES)*. *Proceedings of 8 ICSHMO*, Foz do Iguaçu, Brazil, April 24-28, p.1751-1757, 2006.
- SCHAAKE, J.; FRANZ, K.; BRADLEY, A. & BUIZZA, R. *The Hydrologic Ensemble Prediction EXperiment (HEPEX)*. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 3, p.3321–3332, 2006.
- SHELLEKENS, J.; WEERTS, A.H.; MOORE, R.J.; PIERCE, C.E. & HILDON, S. *The use of MOGREPS ensemble rainfall forecasts in operational flood forecasting systems across England and Wales*. *Adv. Geosci.*, 29, p.77–84, 2011.
- SHUTTLEWORTH, W.J. *Evaporation*. In: *Handbook of Hydrology*, editor: David Maidment, McGraw-Hill, New York, 1993.

THIELEN, J.; BARTHOLMES, J.; RAMOS, M.-H. & DE ROO, A. The European flood alert system – Part 1: concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13 (2), p.125–140, 2009.

THIEMIG, V.; PAPPENBERGER, F.; THIELEN, J.; GADAIN, H.; DE ROO, A.; BODIS, K.; DEL MEDICO, M. & MUTHUSI, F. *Ensemble flood forecasting in Africa: a feasibility study in the Juba–Shabelle river basin*. *Atmos. Sci. Let.*, p.123–131, 2010.

THIREL, G.; MARTIN, E.; MAHFOUF, J.-F.; MASSART, S.; RICCI, S.; REGIMBEAU, F. & HABETS, F. A past discharge assimilation system for ensemble streamflow forecasts over France – Part 2: Impact on the ensemble streamflow. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, p.1639–1653, 2010.

VELÁZQUEZ, J.A.; PETIT, C.; LAVOIE, A.; BOUCHER, M.-A., TURCOTTE, R.; FORTIN, V. & ANCTIL, F. An evaluation of the Canadian global meteorological ensemble prediction system for short-term hydrological forecasting. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, p.2221–2231, 2009.

VELÁZQUEZ, J.A.; ANCTIL, F.; RAMOS, M.H. & PERRIN, C. Can a multi-model approach improve hydrological ensemble forecasting? A study on 29 French catchments using 16 hydrological model structures. *Adv. Geosci.*, 29, p.33–42, 2011.

VERBUNT, M.; WALSER, A.; GURTZ, J.; MONTANI, A.; SCHÄR, C. Probabilistic runoff forecasting with limited-area ensemble prediction system: selected case studies. *Journal of Hydrometeorology*, p.897–909, 2007.

VOISIN, N., PAPPENBERGER, F.; LETTENMAIER, D.P.; BUIZZA, R. & SCHAAKE, J.C. Application of a Medium-Range Global Hydrologic Probabilistic Forecast Scheme to the Ohio River Basin. *Wea. Forecasting*, 26, p.425–446, 2011.

XUAN, Y.; CLUCKIE, I.D. & WANG, Y. Uncertainty analysis of hydrological ensemble forecasts in a distributed model utilising short-range rainfall prediction. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 13, p.293–303, 2009.

YAPO, P.O.; GUPTA, H.V. & SOROOSHIAN, S. Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of Hydrology*, v.204, issues 1–4, p. 83–97, 1998.

YOUNIS, J.; RAMOS, M.-H.; THIELEN, J. EFAS forecasts for the March–April 2006 flood in the Czech part of the Elbe River Basin – a case study. *Atmospheric Science Letters*, 9, p.88–94, 2008.

ZALACHORI, I.; RAMOS, M.-H.; GARÇON, R.; MATHEVET, T. & GAILHARD, J. Statistical processing of forecasts for hy-

drological ensemble prediction: a comparative study of different bias correction strategies. *Advances in Science & Research*, v. 8, p.135–141, 2012.

ZAPPA, M.; JAUN, S.; GERMAN, U.; WALSER, A. & FUNDEL, F. Superposition of three sources of uncertainties in operational flood forecasting chains. *Atmospheric Research*, 100, p.246–262, 2011.

WERNER, M., REGGIANI, P.; DE ROO, A.; BATES, P. & SPROKKEREEF, E. Flood Forecasting and Warning at the River Basin and at the European Scale. *Natural Hazards*, v.36, p.25–42, 2005.

WILKS, D.S. *Statistical Methods in the Atmosphere Sciences*. Academic Press, 2^o ed., 627p. 2006.

Short Term Ensemble Flood Forecasting

ABSTRACT

The forecasting and issuing of early warnings are a key element to prevent the impact of flood events. An alternative to extend the forecasting horizon is the use of rainfall-runoff modeling coupled with precipitation forecasts derived from numerical weather prediction (NWP) models. The present research assesses the performance of short term ensemble flood forecasting in a medium size tropical basin, based on data and streamflow forecasting tools available in operational mode in Brazil. The Paraopeba River basin (12,150 km²), located in the upper portion of the São Francisco River basin, in Southeastern Brazil, was selected as a case study. The proposed methodology used the MGB-IPH hydrological model coupled to an ensemble of precipitation forecasts generated by several NWP models with different initial conditions and parameterizations. The results are several scenarios of streamflow forecasts. A single deterministic streamflow forecast, based on a quantitative precipitation forecast derived from the optimal combination of several outputs of NWP models, was used as a reference to assess the performance of the streamflow ensemble forecasts. The results of the ensemble flood forecasting were assessed by deterministic and probabilistic performance measures, with the ensemble mean being used by the former, and specific assessment measured by the latter. Based on the deterministic assessment, the ensemble mean showed similar results to those obtained by the deterministic reference forecast, although presenting a better performance over most of the ensemble members. Based on the probabilistic performance measures, results for predictions of dichotomous events which consider whether warning limit flows are surpassed or not, showed that the

9th decile of the ensemble was superior to the deterministic forecast and even the ensemble mean. In most cases, an increase was observed in the proportion of correctly forecasted events while keeping false alarm rates at low levels. This benefit was generally higher for higher flow thresholds and for longer lead times, which are the most important parameters for flood mitigation.

Key-words: ensemble flood forecasting, quantitative precipitation forecast, hydrologic modeling.