

Sobre o uso de previsões hidrológicas probabilísticas para tomada de decisão

On the use of probabilistic hydrological forecasts for decision making

Fernando Mainardi Fan¹, Maria-Helena Ramos² e Walter Collischonn³

^{1,3} Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

fernando.fan@ufrgs.br, maria-helena.ramos@irstea.fr

² Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture, Antony, France.

collischonn@uol.com.br

Recebido: 01/06/15 - Revisado: 22/06/15 - Aceito: 13/07/15

RESUMO

Previsões hidrológicas de curto e médio prazo normalmente estão associadas a muita incerteza, principalmente relacionadas com o uso de informações de previsões meteorológicas. Uma forma de considerar esta incerteza no processo de previsão e de tomada de decisão é o uso de previsões probabilísticas, obtidas na forma de previsões por conjunto (ou por ensemble). Nesta modalidade de previsões geralmente são gerados diversos cenários futuros possíveis, com o objetivo de quantificar as incertezas no processo de geração das previsões. Estudos recentes têm demonstrado benefícios promissores no uso de previsões por conjunto em detrimento de previsões determinísticas. O presente trabalho propõe uma abordagem complementar relacionada com o tema. Primeiramente é feita uma breve introdução sobre como previsões de vazão são utilizadas atualmente no Brasil, e como previsões por conjunto poderiam ser adotadas neste contexto. Em seguida é apresentada a análise dos resultados de um jogo realizado durante o XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos em 2013 na cidade de Bento Gonçalves (RS), que contou com a participação do público presente no evento no papel tomadores de decisão utilizando informações de previsão de vazão, usando e não utilizando informações de previsões probabilísticas. Os resultados do jogo apresentaram, de forma geral, que previsões com probabilidades levaram na maior parte dos casos a decisões melhores e mais coerentes entre múltiplas pessoas. Acredita-se que este argumento ajude a motivar desenvolvimentos de mais pesquisas e sistemas operacionais de previsão por conjunto no cenário brasileiro.

Palavras Chave: Previsão Hidrológica. Previsão Probabilística. Tomada de Decisão.

ABSTRACT

Short and medium term hydrological forecasts are usually associated with large uncertainty, especially concerning the use of information from numerical weather forecasts. One way to consider this uncertainty in the forecasting and decision-making process is the use of probabilistic predictions, obtained as ensemble forecasts. Usually at these kinds of forecasts several possible future scenarios are generated in order to quantify the uncertainties in the process. Recent studies have shown promising benefits on using ensemble forecasts rather than deterministic ones. This paper proposes a complementary approach related to the topic. First a brief introduction to streamflow forecasts current use in Brazil is made, and discussed how ensemble forecasts could be taken in this context. Then we present results of a game held during the XX Brazilian Symposium on Water Resources in 2013 in the city of Bento Gonçalves (RS), which had the public participation at the event playing the whole of decision makers that uses forecast information, using and not using information from probabilistic forecasts. The game results showed, in general, that probabilistic forecasts led in most cases to better and more consistent decisions among multiple persons. We believe that this argument helps to motivate the development of more research and more operational ensemble forecasting systems in the Brazilian scenario.

Keywords: Hydrological Forecasting. Probabilistic Forecast. Decision Making.

INTRODUÇÃO

A antecipação da condição de vazão em rios é muito valiosa para a mitigação de impactos negativos de eventos hidrológicos, pois permite a emissão de alertas, tomada de decisão na operação de obras hidráulicas, execução de planos de reposta a emergências, otimização do uso de recursos hídricos, entre outras preparações.

Para prover previsões de vazão de boa qualidade e em tempo apropriado é necessário prever corretamente o comportamento de um sistema natural complexo, modificado por ações humanas, que é uma bacia hidrográfica. Além disso, as previsões de vazões devem ser feitas utilizando informações incompletas e incertas de variáveis meteorológicas e hidrológicas (COLLISCHONN; TUCCI, 2005; PAGANO et al., 2014; SENE, 2010).

Desta forma, o processo de geração de previsões hidrológicas possui muitas incertezas, que se propagam pelo sistema e deveriam ser quantificadas. Essa quantificação depende de diferentes aspectos do sistema de previsão utilizado (BOURDIN; STULL, 2013; CLOKE; PAPPENBERGER, 2009; DEMIREL; BOOIJ; HOEKSTRA, 2013; FRANZ; HOGUE, 2011; HE et al., 2012; MANZIONE, 2014; VELÁZQUEZ et al., 2011). Dentre as incertezas de previsões, pode-se listar como exemplo: dados hidrológicos disponíveis em tempo real, dados meteorológicos disponíveis em tempo real, equacionamento do modelo hidrológico, calibração do modelo hidrológico, condições iniciais no momento da previsão, e informações de previsões meteorológicas usadas.

Uma das principais incertezas na previsão de vazões está relacionada com as previsões meteorológicas (CLOKE; PAPPENBERGER, 2009; CUO; PAGANO; WANG, 2011; KRZYSZTOFOWICZ, 2001; PAPPENBERGER et al., 2005; PAPPENBERGER et al., 2011). Os modelos de previsão do tempo são bastante sensíveis às condições iniciais da atmosfera no momento em que são iniciados os cálculos da previsão, de tal forma que, se inicializados com condições iniciais ligeiramente diferentes, em pouco tempo podem simular estados completamente diferentes da atmosfera, dependendo da situação meteorológica que esta sendo prevista (BUIZZA, 2008; COUTINHO, 1999; LORENZ, 1969; LEUTBECHER; PALMER, 2008; MENDONÇA; BONATTI, 2009; PALMER; ZANNA, 2013).

A necessidade de quantificar estas incertezas levou a meteorologia a desenvolver o conceito de previsão meteorológica por ensemble, ou por conjunto nos anos 90 (GEORGAKAKOS; KRZYSZTOFOWICZ, 2001; PALMER et al., 1997; TOTH; KALNAY, 1993). Em uma previsão por conjunto, a partir de diferentes parametrizações e/ou de diferentes condições iniciais, é gerado um conjunto de previsões, onde cada um dos membros do conjunto representa uma possível trajetória dos processos atmosféricos ao longo do horizonte de previsão (cenários equiprováveis).

Nos últimos 10 anos, este conceito de incorporação de incertezas através de previsões por conjunto vem também sendo adotado na hidrologia (SCHAAKE et al., 2007), principalmente através da aplicação de resultados de previsões por ensemble de variáveis meteorológicas em um modelo hidrológico tipo chuva-vazão para obter, da mesma forma, um conjunto de previsões

de vazão (CLOKE; PAPPENBERGER, 2009).

Exemplos conceituais do que seriam previsões hidrológicas por conjunto baseadas na incerteza meteorológica são dados pelas figuras 1 e 2. Na figura 1 é apresentado um hidrograma de previsão do tipo Spaghetti, onde são mostrados todos os membros que compõem as diferentes situações de vazão prevista. Na figura 2 é mostrado um hidrograma de previsão similar, porém ao invés de prognósticos dados por linhas, são usadas cores que representam as probabilidades de ocorrência dos valores de vazão. Nota-se, nos dois casos, que embora nem todos os prognósticos indiquem a ocorrência do limiar de cheia, alguns membros ou porcentagens sugerem a ocorrência do evento. Com base nesta informação, é possível tomar uma decisão baseada no risco.

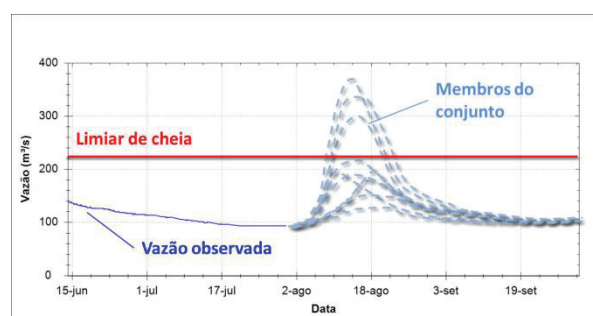


Figura 1 - Exemplo conceitual de uma previsão por conjunto na forma de um hidrograma de Spaghetti

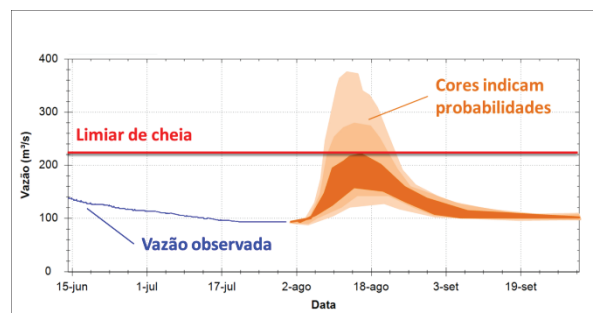


Figura 2 - Exemplo conceitual de uma previsão por conjunto na forma de probabilidades em um hidrograma

Além da incerteza meteorológica, outras incertezas têm sido progressivamente agregadas em sistemas de previsão hidrológica por ensemble, como as incertezas na parametrização, nas condições iniciais e na estrutura de modelos hidrológicos (ABEBE; PRICE, 2003; BOURDIN; STULL, 2013; BOURGIN et al., 2014; FRALEY; RAFTERY, 2010; FRANZ; HOGUE, 2011; DEMIREL; BOOIJ; HOEKSTRA, 2013; VELÁZQUEZ et al., 2011; ZALACHORI et al., 2012). Com isso, espera-se estar abrangendo nas previsões um maior número de fontes de erros.

Todas estas aplicações têm demonstrado benefícios no uso de previsões por conjunto em comparação com previsões determinísticas, o que inclusive tem motivado o desenvolvimento de diversos sistemas operacionais de previsão hidrológica por conjunto ao redor do mundo (PAGANO et al., 2014; PAPPENBERGER et al., 2013). Muitos dos desenvolvimentos têm suporte de iniciativas científicas, onde a mais notória é a

iniciativa internacional HEPEX – The Hydrologic Ensemble Prediction Experiment (SCHAAKE et al., 2007).

O HEPEX é uma comunidade que reúne hidrólogos, meteorologistas e usuários de previsões para fomentar as pesquisas na área e promover o uso operacional da previsão hidrológica por conjunto. A iniciativa foi lançada em 2004 e mantém um portal na internet (www.hepex.org), onde a comunidade participante interage em torno dos principais temas do HEPEX, que são: (i) Processamento de dados de entrada aos modelos hidrológicos de previsão; (ii) Técnicas de previsão por conjunto e modelagem de processos físicos; (iii) Assimilação de dados; (iv) Pós-processamento de previsões hidrológicas para correção de viés; (v) Verificação de previsões; (vi) Comunicação de previsões e uso na tomada de decisão.

A maioria dos trabalhos relacionados com previsões hidrológicas probabilísticas ainda se concentraram em pesquisas realizadas na Europa, América do Norte, China e Austrália. No Brasil, e em toda a América do Sul de uma forma geral, as pesquisas envolvendo previsões de vazão por conjunto com curto e médio prazo podem ser classificadas como iniciais. Os primeiros esforços preliminares de geração de previsões hidrológicas por conjunto para bacias brasileiras podem ser encontrados nos trabalhos de Calvetti (2011), Calvetti et al. (2013) e Calvetti e Pereira Filho (2014), bem como nos trabalhos apresentados por Meller (2012), Collischonn et al. (2013), e Meller et al. (2014) e, mais recentemente, nos trabalhos de Fan et al. (2014a), Fan et al. (2014b), Fan et al. (2015a) e Fan et al. (2015b), Negrão et al. (2013) e Siqueira (2015). Todos focaram na avaliação de previsões de vazão por conjunto tendo como estudo de caso bacias de médio e grande porte em território brasileiro. De maneira geral, as avaliações apresentaram resultados positivos no uso de previsões por ensemble na comparação com previsões determinísticas.

Este trabalho propõe uma abordagem complementar relacionada com a pesquisa do uso de previsões probabilísticas de vazão. Primeiramente, é feita uma breve discussão sobre como previsões de vazão são utilizadas atualmente no Brasil, e como previsões por conjunto poderiam ser adotadas neste contexto. Em seguida, é proposto um teste sobre os potenciais benefícios de previsões de vazão por conjunto para a tomada de decisão em recursos hídricos. Este teste é dado através da análise dos resultados de um jogo realizado durante o XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos em 2013 na cidade de Bento Gonçalves (RS), que contou com a participação do público presente no evento no papel de tomadores de decisão utilizando informações de previsão de vazão.

Espera-se que as discussões e os resultados aqui apresentados sirvam para motivar novas pesquisas na área, resultando na implantação de sistemas de previsão de vazão mais eficazes no território brasileiro e em melhoras dos sistemas existentes.

PRÁTICAS DE PREVISÃO DE CURTO E MÉDIO PRAZO NO BRASIL

As previsões de vazão de curto e médio prazo são basicamente utilizadas no contexto brasileiro para dois grandes

propósitos: (i) a programação da operação de reservatórios de usinas hidrelétricas; e (ii) a previsão de cheias para locais de risco. Embora a previsão de vazões sazonais e interanuais para sistemas de reservatórios de água potável, de gestão de recursos hídricos ou de controle de estiagens também tenha se desenvolvido no Brasil (ALVES; CAMPOS; SERVAIN, 2012; ALVES et al., 2007; COLLISCHONN; TUCCI, 2005; REIS; NASCIMENTO; MARTINS, 2007; SOUZA FILHO; LALL, 2004), esta requer técnicas específicas de previsão de longo prazo que não serão detalhadas neste artigo.

Previsão de vazões no setor hidroelétrico

No Brasil, o Operador Nacional do Sistema (ONS) é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Em situações normais de vazão o ONS utiliza previsões de vazões médias diárias com antecedências de até 14 dias para a programação da geração de energia hidrelétrica no sistema (ARAUJO et al., 2014; ONS, 2011a,b, 2012, 2013a,b, 2014).

As formas como as previsões são geradas para o setor hidroelétrico brasileiro variam bastante. Recentemente, o ONS organizou um trabalho de avaliação de diferentes alternativas para a previsão de vazões médias diárias a aproveitamentos hidroelétricos do SIN, visando melhorar a qualidade das previsões (GUILHON; ROCHA; MOREIRA, 2007). Os aproveitamentos hidroelétricos considerados estavam localizados nas bacias dos rios Iguaçu, Paraná e Paranaíba. No trabalho foram testados diversos métodos de previsão, abrangendo desde modelagem física com modelos conceituais concentrados e distribuídos, passando por metodologias híbridas e modelos estocásticos diversos, até técnicas de inteligência artificial e mineração de dados. Ao final do trabalho, chegou-se a conclusão de que os modelos avaliados tiveram um desempenho superior ao modelo PREVIVAZH, que é um modelo baseado na desagregação de previsão semanal a partir da tendência inferida das últimas vazões passadas e de séries sintéticas diárias de vazões naturais, utilizado por muitas usinas (GUILHON; ROCHA; MOREIRA, 2007; ONS, 2011a,b, 2012, 2013a,b, 2014). Nos trabalhos do ONS também se concluiu que a informação de previsão de precipitação resultou em um ganho de qualidade para a previsão de vazões (GUILHON; ROCHA; MOREIRA, 2007).

Principalmente depois deste trabalho, cada vez mais tem sido adotada uma maior diversidade de modelos para a previsão de vazão afluente a usinas hidrelétricas brasileiras. Também tem aumentando o uso da informação de previsões do tempo advinda de modelos meteorológicos. Por exemplo, na bacia do rio São Francisco, na UHE Três Marias, é usado um modelo baseado em redes neurais apresentado por Gomes, Montenegro e Valença (2010). Já na bacia do rio Paranaíba, para a UHE São Simão, é usado o modelo hidrológico distribuído MGB-IPH (COLLISCHONN et al., 2007). Para as bacias das UHEs Campos Novos e Barra Grande também é utilizado o modelo MGB-IPH (FAN et al., 2014b). Ainda assim, todos estes modelos utilizam previsões determinísticas, ou seja, con-

sideram um cenário único para o futuro em seus prognósticos, sem formalização da consideração das incertezas das previsões.

Em casos onde a situação da vazão afluente aos reservatórios do SIN não é considerada normal, e sim em estado de atenção, alerta ou emergência (definidas a partir da ocupação de volumes de espera e violação de restrições hidráulicas), a operação dos reservatórios não é mais controlada pelo ONS, e sim feita pelos agentes de geração locais, seguindo algumas diretrizes estabelecidas pelo ONS (ARAUJO et al., 2014; ONS, 2011a,b, 2012, 2013a,b, 2014). Nestes casos, a informação de previsões também é especialmente útil para sustentar a tomada de decisão, ainda mais quando se tratam de situações de altas vazões onde cada hora antecipada de um evento pode significar importantes ganhos no tempo para manobras com comportas.

Justamente para estes cenários, o desenvolvimento de sistemas de previsão de vazão específicos, que possam fornecer resultados detalhados, como em intervalo de tempo horário, é primordial. Estes podem subsidiar a tomada de decisão operacional e mitigar o risco de rompimento de restrições. Exemplos de sistemas de previsão desenvolvidos para estes fins são apresentados em Fan et al. (2014b). Novamente, apesar de estes sistemas utilizarem informação de chuva prevista, ela é ainda determinística.

Previsão de vazões para o alerta de cheias

Além do uso preponderante no setor elétrico, a previsão de cheias associadas com impactos sociais, econômicos e sanitários tem ganhado espaço no cenário brasileiro. Dentre os diversos tipos de desastres naturais (terremotos, deslizamentos de terra, tempestades, inundações, secas e estiagens), as inundações ocupam papel significativo no Brasil. De acordo com o Banco de Dados Internacional de Desastres EM-DAT (CRED, 2012), o Brasil está entre os dez países mais atingidos por inundações no mundo. Estas representaram cerca de 56% do total de desastres naturais no Brasil no período entre 1990 e 2011, sendo que, somente em 2011, cerca de um milhão de pessoas foram afetadas por eventos extremos de inundações no país.

A recente criação do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), em 2012, ilustra a preocupação crescente em desenvolver, testar e implementar sistemas de previsão de ocorrência de desastres naturais em áreas suscetíveis de todo o Brasil.

O CEMADEN está em fase de desenvolvimento de sistemas de previsão e alerta de cheias para todo o país, mas iniciativas locais e regionais também existem. Para grandes rios, a maior parte dos sistemas de previsão de cheias em operação atualmente no Brasil é mantida pela CPRM (Serviço Geológico do Brasil). Atualmente, este órgão opera sistemas para as bacias dos rios Doce (MG), Cai (RS), Taquari (RS), Parnaíba (Piauí), Muriaé (RJ e MG), Negro (AM), Acre (AC) e Branco (RR). A CPRM mantém um portal na internet (<http://www.cprm.gov.br/>) chamado SACE - Sistema de Alerta Contra Enchentes, onde podem ser acessadas as previsões recentes. Os modelos usados são baseados em dados observados de chuvas e vazões à montante, com horizonte de previsão geralmente curto, menor que

três dias. Exemplos de resultados com o modelo do Rio Doce da CPRM são encontrados no trabalho de Matos et al. (2014).

Outro sistema de previsão em operação contra cheias é o do rio Itajaí, mantido pelo comitê de bacias do rio Itajaí no Estado de Santa Catarina, com resultados divulgados em: <http://www.comiteitajai.org.br/alerta/>. Esse modelo também possui horizonte de previsão menor que três dias (CORDERO; MOMO; SEVERO, 2011; PINHEIRO, 2003). Um exemplo adicional de sistema de previsão é mostrado por Silva et al. (2014), que é o sistema MAVEN (Monitor AVançado de ENchentes), um sistema de previsão para sub-bacias do estado de Pernambuco.

No combate a enchentes urbanas, destaca-se ainda o SAISP, Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo, baseado em monitoramento em tempo real de redes telemétricas e dados de radar meteorológico (OLIVEIRA et al., 2014). Sistemas de previsão e alerta similares, cobrindo áreas sujeitas a alagamentos e deslizamentos de encostas por chuvas intensas, tem se desenvolvido em várias cidades brasileiras densamente urbanizadas, como no caso de Belo Horizonte e do Rio de Janeiro (DOLIF et al., 2013).

Em termos técnicos, pode-se considerar que ainda existem muitas possibilidades a serem avaliadas e métodos a serem testados no que concerne o desenvolvimento de sistemas hidrometeorológicos de previsão de vazões e alerta de cheias no Brasil. Apesar da eficiência demonstrada de técnicas já testadas, o uso de previsões de modelos meteorológicos, e mais ainda, por ensemble, ainda não faz parte de grande parte do cenário operacional.

Mais atividades de pesquisa e transferência de resultados para o setor operacional ainda precisam ser feitas para que sejam usadas mais adequadamente as previsões de modelos meteorológicos por ensemble como dado de entrada para modelos hidrológicos e proporcionar assim um aumento do tempo na antecedência de cheias previstas.

Este avanço relativamente lento do desenvolvimento tecnológico e científico em território nacional em comparação com outros locais do mundo é de certa forma antagônico com o potencial benefício esperado que previsões de vazão com boa qualidade possam trazer para a tomada de decisão e a diminuição do impacto de eventos hidrológicos locais. O Brasil é dependente dos seus recursos hídricos para a geração de energia, ao mesmo tempo em que cheias causam danos a populações ribeirinhas em múltiplas regiões. E mesmo assim ainda estão em estado inicial os conhecimentos sobre o desempenho da utilização de técnicas de previsão consideradas como estado-da-arte em relação a bacias hidrográficas brasileiras.

DESAFIOS NO USO DE PREVISÕES PROBABILÍSTICAS

A despeito das vantagens, a previsão hidrológica por conjunto conta atualmente também com uma série de desafios a serem superados. Entre eles, pode-se citar (BOUCHER et al., 2011; CLOKE; PAPPENBERGER, 2009; MANZIONE, 2014; MELLER, 2012; PAGANO et al., 2014; RAMOS et al., 2010; SCHAAKE, 2006):

- A montagem de um experimento ou de um sistema de previsão por conjunto é muito mais custosa e complexa que a elaboração de um sistema para previsões determinísticas. O volume de dados a processar é significativamente maior, o que exige um grande espaço de armazenamento e rotinas computacionais capazes de lidar com toda a complexidade imposta pelas múltiplas dimensões trabalhadas;
- A quantidade de dados disponíveis para a realização de experimentos de alta complexidade é limitada. Isto acontece por diversos motivos, incluindo: pouco tempo de existência da linha de pesquisa, alto custo computacional para a geração de previsões meteorológicas por conjunto de períodos passados (“hindcastsings”), tempo e mão de obra especializada necessários para a preparação de reanálises de versões específicas de modelos, entre outros. Por estes motivos, muitos estudos de previsão por ensemble avaliam apenas previsões para eventos específicos, o que limita a aplicabilidade das previsões probabilísticas;
- A avaliação dos resultados de previsões probabilísticas exige técnicas específicas. Como a previsão apresenta-se sob a forma de vários cenários futuros equiprováveis, a avaliação das previsões precisa considerar não somente o erro médio da média dos cenários (membros) do conjunto, mas também a boa calibração das probabilidades emitidas pela previsão do conjunto. A análise de espalhamento, concentração de membros, e cenários mais prováveis, é mais complexa que a interpretação de resultados de previsões determinísticas.
- A interpretação e aceitação por parte de operadores de sistemas de previsão e de tomadores de decisão das incertezas associadas às previsões fornecidas por um sistema de previsão por conjunto ainda não é imediata. Isso ocorre principalmente pela falta de conhecimento das técnicas utilizadas e pela maior dificuldade na interpretação e uso dos resultados probabilísticos.
- Os sistemas de previsão por conjunto nem sempre apresentam desempenho suficiente se considerados imediatamente como saem dos modelos matemáticos. Em vários casos é preciso aplicar técnicas de pós-processamento estatístico para tratar possíveis erros sistemáticos. O pós-processamento pode considerar o aumento da resolução espacial da previsão de precipitações (técnicas de desagregação), o aumento do número de membros (por exemplo, abordagens multi-modelos), as incertezas de parametrização ou das condições iniciais do modelo hidrológico ou o tratamento de erros sistemáticos e de espalhamento das saídas dos modelos.
- Não se tem uma compreensão completa do benefício e da necessidade da consideração de todas as incertezas existentes no processo de previsão nos sistemas hidrológicos de previsão por conjunto a serem desenvolvidos. Quantificações econômicas dos benefícios de sistemas probabilísticos são, ainda, raras na literatura (PAPPENBERGER et al., 2015) e trabalhos de pesquisa específicos para setores econômicos dependentes de condições climáticas futuras (hidroeletricidade, irrigação, navegação, etc.) ainda precisam ser mais encorajados.

PREVISÕES PROBABILÍSTICAS PARA MELHORES DECISÕES

A dificuldade em implementar e utilizar previsões probabilísticas vem muitas vezes do fato de previsores ou tomadores de decisão não estarem certos sobre como a informação pode realmente ser útil no processo de avaliação e tomada de decisões. Como a decisão é sempre vista no seu resultado final, como uma escolha específica, um sim ou não, o uso de uma informação que se apresenta sob a forma de probabilidades (e.g., existe uma probabilidade de 30% de serem observadas vazões acima de um determinado nível crítico) não é imediato.

Uma das maneiras existentes para abordar esta questão consiste em simular tomadas de decisão com o uso (ou não) de informações probabilísticas. Como a simulação de situações operacionais reais de alerta de cheias é impossível, utilizam-se jogos e experimentos que permitem recriar situações e discutir posicionamentos tomados. Um destes jogos é apresentado em Ramos, Van Andel e Pappenberger (2013) e foi reproduzido com o público do XX SBRH (Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos) no dia 18 de novembro de 2013 em seção especial da mesa redonda denominada “Previsão hidrológica e incertezas: métodos e tomada de decisão”. Os resultados coletados foram processados e são apresentados aqui.

O jogo é descrito em detalhes em Ramos, Van Andel e Pappenberger (2013). Trata-se de simular a tomada de decisão relativa a abrir ou não uma comporta que serve como proteção contra eventos de cheias em uma cidade localizada a jusante da comporta. Se o jogador decide abrir a comporta, ele protege a cidade, mas inunda uma área de produção agrícola e tem que pagar 2,000 tokens para os fazendeiros. Se o jogador decide não abrir a comporta, ele não inunda a área de produção agrícola, mas, caso uma cheia ocorra ele inundará a cidade a jusante e deverá pagar mais caro, 7,000 tokens. Se, neste caso, não ocorrer cheia, o jogador não paga nada.

Todos os jogadores são informados que para cada decisão serão fornecidas as previsões de nível do curso d’água. Também foi dado como informação inicial o nível crítico do curso d’água acima do qual ocorrerá inundação (valor fixo). Os jogadores do XX SBRH jogaram seis casos (ou seja, tomaram seis decisões) em dois jogos distintos. Cada jogo foi independente, ou seja, no início de cada jogo o jogador dispunha de 30,000 tokens, soma da qual ele deveria deduzir os gastos efetuados em cada caso de tomada de decisão do jogo em questão. Uma vez a decisão tomada (abrir ou não a comporta), foi fornecido aos jogadores o que realmente ocorreu em cada caso, ou seja, se houve cheia ou não. Em função deste resultado e da decisão tomada, o jogador deduziu, se pertinente, a quantia correspondente do seu montante inicial de dinheiro.

Durante o primeiro jogo foram fornecidas previsões probabilísticas: nível previsto com um intervalo de erro associado e probabilidade de exceder o nível crítico (veja Tabela 1). No início do jogo, o que os jogadores não sabiam é que no segundo jogo somente o nível previsto seria fornecido, sem nenhuma informação de erro ou probabilidade. No mais, os casos do jogo 2 foram idênticos aos do jogo 1, mas apresentados em ordem (ou Rounds) diferente (veja Tabela 1). O jogador deveria

tomar as decisões com as informações que dispunha e ao final comparar se ele perdeu mais ou menos dinheiro ao final do jogo 2, quando teve que jogar sem as informações probabilísticas.

Para marcar as decisões e gastos, uma planilha foi fornecida. No XX SBRH ela foi fornecida em português. A versão original em inglês pode ser recuperada a partir do site do HEPEX (veja: Flood control game: <http://hepex.irstea.fr/resources/#gamestraining>). Os resultados coletados durante o jogo no XX SBRH são apresentados a seguir.

Tabela 1 - Casos apresentados aos participantes com a indicação da posição em que eles apareceram em cada jogo (Round), e se a cheia ocorreu ou não. O nível de cheia era de 3,9m

Caso	Previsão +- erro estimado; probabilidade de cheia	Round no Jogo 1	Round no Jogo 2	Ocorreu a cheia?
1	3,81+-0,07; 9,74%	1	2	Não
2	3,89+-0,25; 48,27%	2	6	Não
3	3,71+-0,16; 12,53%	3	4	Não
4	3,52+-0,51; 23,59%	4	3	Não
5	3,58+-0,37; 20,10%	5	1	Sim
6	3,94+-0,61; 53,17%	6	5	Sim

RESULTADOS

Foram coletadas ao total 187 fichas com os resultados dos participantes do jogo, das quais somente 8 não estavam completas ou estavam rasuradas. Assim, aqui são apresentados os resultados de 179 jogadores.

A primeira visão geral dos resultados é apresentada na tabela 2, que mostra o número de participantes nos Jogos 1 e 2 de acordo com o número de respostas “sim” e “não” (isto é,

Tabela 2 - Número de participantes no Jogo 1 e no Jogo 2 em função do número de respostas “sim” (pagar para abrir a comporta, mas proteger a cidade) durante os seis Rounds de cada jogo

Número de respostas “sim” durante os 6 Rounds	Número de participantes do Jogo 1	Número de participantes do Jogo 2	Interpretação
0	2	4	Sempre decidiu não abrir a comporta
1	15	12	Mais frequentemente decidiu não abrir a comporta
2	63	25	
3	52	43	Decidiu abrir e decidiu não abrir com a mesma frequência
4	34	46	Mais frequentemente decidiu abrir a comporta
5	8	32	
6	5	17	Sempre decidiu abrir a comporta
Total	179	179	

número de decisões sobre abrir a comporta). Tomando como exemplo a linha correspondente a duas respostas sim (terceira linha da tabela), podemos exemplificar como a tabela 2 pode ser interpretada. Nela aparece que 63 participantes no jogo 1 responderam duas vezes “sim” (pagar para abrir a comporta, mas proteger a cidade), enquanto que no jogo 2 esta resposta “sim” duas vezes foi dada por 25 participantes. Ou seja, mais frequentemente duas vezes a resposta “sim” foi dada pelos participantes do jogo 1. Isto também significa que mais frequentemente a resposta “não” (não abrir a comporta) foi dada quatro vezes pelos participantes do jogo 1.

Esta tabela 2 fornece uma visão sobre as diferentes atitudes dos jogadores em relação ao risco durante um jogo. Um jogador que respondeu mais vezes “sim” (ou seja, pagar para abrir a comporta e assim garantir a proteção da cidade) pode ser considerado mais ‘avesso ao risco’, enquanto que um jogador que respondeu mais vezes “não” pode ser considerado mais ‘propenso ao risco’.

O principal resultado verificado na tabela 2 é que durante o jogo 1 (com probabilidades) os jogadores tiveram uma atitude muito mais propensa ao risco, pois as decisões de não abrir a comporta foram tomadas mais vezes (ao total 80 pessoas mais frequentemente decidiram não abrir a comporta ou optaram por nunca abrir a comporta). No jogo 2 (sem probabilidades), este número foi de apenas 41 jogadores. No jogo 2, no entanto, o perfil dos jogadores foi muito mais avesso ao risco, ou seja, eles optaram por abrir mais vezes a comporta. No jogo 2, ao total 95 pessoas mais frequentemente decidiram abrir a comporta ou optaram por sempre abrir a comporta. No jogo 1, este número foi de apenas 47 jogadores.

Acredita-se que este resultado seja proveniente do fato que a falta de conhecimento das incertezas nas previsões deixou os tomadores de decisão menos confiantes em relação ao futuro, e assim a atitude em relação a abrir as comportas foi sempre mais comedida. Ou seja, mais vezes os jogadores optaram pela garantia de proteção da cidade oferecida pela abertura da comporta, embora ela também significasse um gasto de dinheiro.

A figura 3 (para o jogo 1 – com probabilidades) e a figura 4 (para o jogo 2 – sem probabilidades) mostram a frequência relativa de respostas “sim” e “não” para a tomada de decisão sobre abrir ou não a comporta para cada um dos seis casos apresentados em cada um dos jogos (para a descrição dos casos, ver a Tabela 1). As respostas são apresentadas nos gráficos considerando os mesmos casos (1,2,3,4,5,6 conforme a Tabela 1) para permitir a comparação entre a decisão com probabilidades (jogo 1) e sem probabilidades (jogo 2). O eixo vertical dos gráficos apresenta, no entanto, os números correspondentes aos Rounds (ordem em que os casos foram apresentados em cada jogo).

As decisões ótimas a serem tomadas no jogo seriam responder “não” para a abertura de comportas nos casos de não ocorrência da cheia (casos 1 a 4), e responder “sim” para a abertura das comportas nos casos de ocorrência das cheias (casos 5 e 6). Nos resultados nota-se que durante o jogo 1 (com probabilidades) a maioria dos participantes seguiu a resposta ótima em quatro casos (1, 3, 4 e 6). No entanto, no jogo 2 (sem probabilidades) a decisão ótima só foi tomada pela maioria em dois casos (4 e 6).

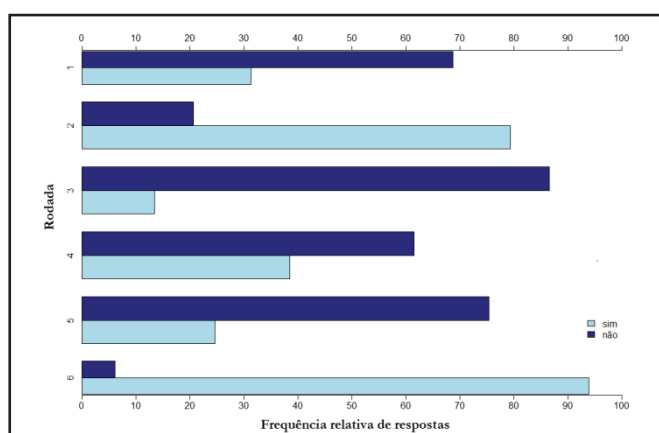


Figura 3 - Frequência relativa de respostas “sim” e “não” para a tomada de decisão no Jogo1 (com probabilidades)

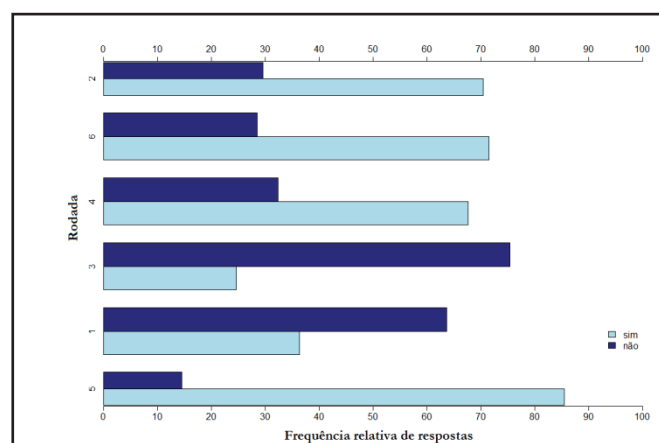


Figura 4 - Frequência relativa de respostas “sim” e “não” para a tomada de decisão no Jogo2 (sem probabilidades)

Outro resultado interessante é o sugerido pela comparação do caso 1 entre o jogo 1 e o jogo 2. Neste caso, no jogo 1 todas as informações de probabilidades de limites da previsão estavam disponíveis, enquanto que no jogo 2 nada estava disponível. Assim, enquanto que no jogo 1 31% das pessoas responderam “sim”, no jogo 2 esse percentual subiu para 70%. Isto reforça a conclusão de que o fato de dispor de uma maior quantidade de informação na previsão (jogo 1) fez com que as pessoas respondessem de maneira mais propensa ao risco, enquanto que a menor quantidade de informação disponível (jogo 2) deixou as pessoas mais avessas ao risco de cheia.

Isto também é similar ao que foi observado nos casos 3 e 4. No jogo 1 os casos 3 e 4 apresentaram um alto índice de “não” (88% e 60%, respectivamente). Já no jogo 2 o Round 3 apresentou um alto índice de “sim” (70%), enquanto o Round 4 seguiu apresentando um alto índice de “não” (76%), inclusive maior do que o do jogo 1. Isto provavelmente aconteceu por que nestes casos as previsões não mostraram as incertezas e as probabilidades no jogo 2, e, dessa forma, todas as decisões foram baseadas nos valores únicos mostrados (nível previsto), e muitas pessoas optaram por abrir a comporta no caso 3. A falta de informação provavelmente sugeriu uma grande aversão ao risco. Já no jogo 1, como as previsões tinham uma pequena faixa

de incerteza e baixa probabilidade, muitas pessoas se sentiram confortáveis com o risco e marcaram corretamente o “não”.

A tabela 3 apresenta informações sobre a sequência de respostas (sim/não) mais comum em cada jogo tendo em vista os seis casos apresentados, o número de respostas diferentes encontradas em cada situação, e o montante de dinheiro final com a resposta mais comum que ocorreu com mais frequência.

Tabela 3 - Informações sobre a sequência de respostas mais comum em cada jogo (tendo em vista os seis casos), e o número de respostas diferentes encontradas em cada situação

Variável	Jogo 1	Jogo2
Resposta mais comum (moda)	Não, Sim, Não, Não, Não, Sim	Não, Sim, Não, Sim, Sim, Sim
Repetição da resposta mais comum	49	33
Número de respostas diferentes	32	41
Dinheiro final com a resposta mais comum (moda)	19000	15000

Nota-se na tabela 3 que a sequência de respostas mais comum (ou a moda da sequência de respostas de todos os jogadores) se repetiu mais vezes no jogo com informação de probabilidades (jogo 1), do que no jogo sem probabilidades. Ao mesmo tempo, o jogo 1, com probabilidades, também teve um menor número de respostas diferentes, comparativamente ao jogo 2. Estas duas constatações sugerem que a informação de probabilidades nas previsões pode ter feito com que a tomada de decisão seja mais “concordante” entre os jogadores, pois estes tiveram tendência a convergir com mais frequência para uma mesma sequência de decisões. Já no jogo 2, com as previsões sem informação de probabilidades, a tendência é de encontrar decisões mais divergentes entre os jogadores.

Na tabela 3, observa-se também que o dinheiro final com a resposta mais comum é mais alto no jogo 1 (19000) do que no jogo 2 (15000), indicando que o benefício econômico médio final foi maior com o uso das previsões com probabilidades. A análise dos resultados individuais de cada jogador mostrou que 103 jogadores (56%) terminaram o jogo 1 com mais dinheiro que o montante final obtido no jogo 2. Somente 58 (32%) dos jogadores terminaram o jogo 2 com mais dinheiro, enquanto que 17 jogadores terminaram os dois jogos com o mesmo montante. Uma análise da distribuição dos valores finais obtidos nos jogos 1 e 2 pelos participantes é apresentada através dos resultados das figuras 5, 6 e 7.

Na figura 5 são mostrados os histogramas com a distribuição dos montantes finais de dinheiro entre os participantes para o jogo 1 (com probabilidades), e o jogo 2 (sem probabilidades). A maioria dos participantes apresentou um pior desempenho econômico quando as decisões foram tomadas sem as informações de incerteza. Nota-se um deslocamento no histograma do jogo 1 para a direita (maiores montantes), em comparação com o histograma do jogo 2, que está mais deslocado para a esquerda (menores montantes). Em geral, o maior número de ocorrências

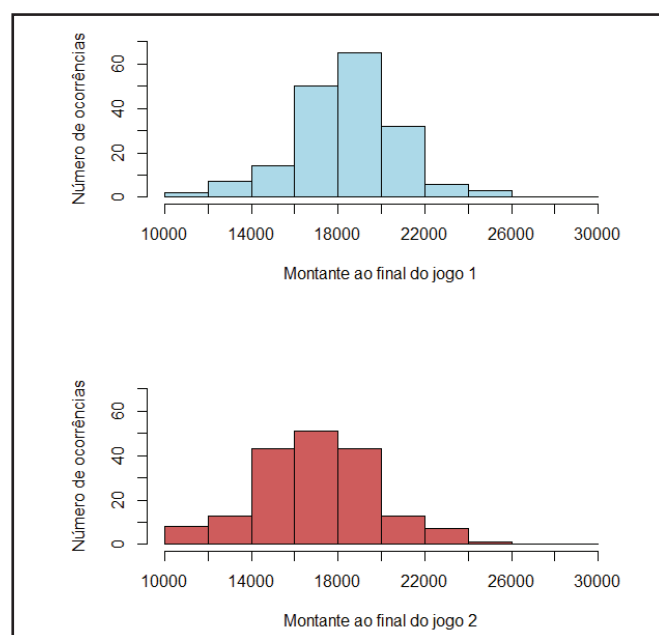


Figura 5 - Histogramas do montante final de dinheiro no Jogo 1, com probabilidades (painel superior), e no Jogo 2, sem probabilidades (painel inferior), computados com os dados dos 179 participantes. O valor inicial disponível era de 30000

do jogo 1 se concentrou em montantes entre 16000 e 22000, com maior frequência em torno de 19000 (média de 18670). Já o maior número de ocorrências do jogo 2 se concentrou entre 14000 e 20000, com maior frequência em torno de 17000 (média de 17407). O montante final dos jogadores no Jogo 1 foi, em média, 1263 mais alto do que no jogo 2.

A figura 6 mostra a distribuição (box-plots) do montante final de dinheiro no jogo 1 (esquerda) e no jogo 2 (direita). O resultado sugere igualmente que a perda financeira foi menor no jogo 1, já que a mediana da distribuição é maior (19000) do que no jogo2 (17000). Observa-se também que a distância entre

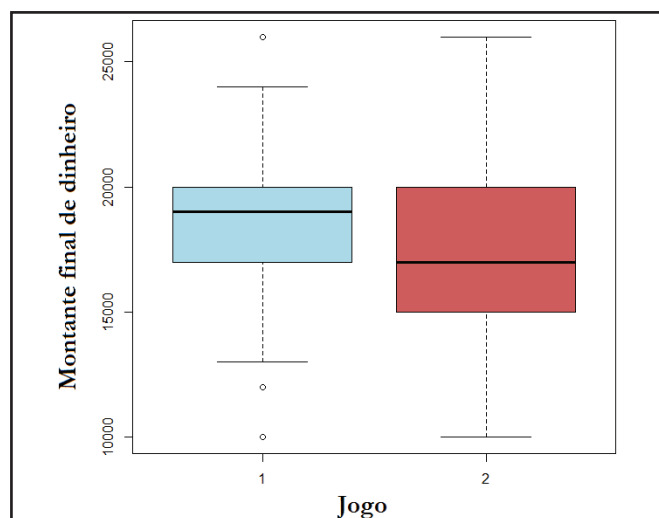


Figura 6 - Box-plots do montante final de dinheiro no Jogo 1, com probabilidades (esquerda em azul), e no Jogo 2, sem probabilidades (direita em vermelho), computados com os dados dos 179 participantes

os quartis dos montantes finais é menor nos resultados obtidos com a previsão com probabilidades (jogo 1). E a distribuição dos resultados com probabilidades foi menos dispersa a ponto de que as ocorrências de valores mais extremos, de 25000 e 10000 tokens ao final do jogo 1, foram outliers. Este resultado ilustra o fato que as decisões usando as previsões com probabilidades além de resultarem em média em menores perdas financeiras também foram mais concordantes entre si, ou seja, elas se situaram dentro de uma faixa menor de variação.

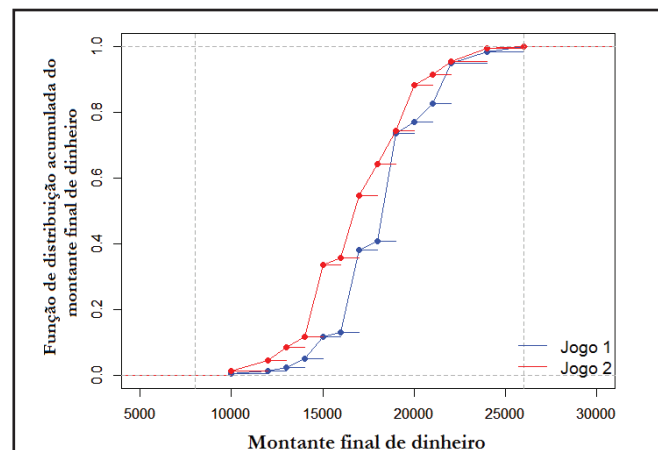


Figura 7 - Função de distribuição acumulada do montante final de dinheiro no Jogo 1, com probabilidades (azul), e no Jogo 2, sem probabilidades (vermelha), computadas em função da porcentagem de participantes

Finalmente, a figura 7 mostra a função de distribuição acumulada do montante final para os dois jogos. Neste resultado observa-se que a curva formada pelo jogo 2 (sem probabilidades) em geral ficou acima da curva formada pelo Jogo 1 (com probabilidades). Esta figura complementa as análises anteriores, pois ela mostra que para um dado montante a frequência total de jogadores com quantidades iguais ou menores de dinheiro foi geralmente menor no jogo 1 do que no jogo 2. Como exemplo, considerando o montante de 15000, observa-se que 10% dos jogadores terminaram com valores iguais ou menores a este no jogo 1, enquanto que 38% dos jogadores terminaram com montantes iguais ou menores a este no jogo 2.

Todos os resultados encontrados foram de maneira geral concordantes com os resultados apresentados em Ramos, Van Andel e Pappenberger (2013). Por exemplo, o fato que a maioria terminou com mais dinheiro no jogo 1 é concordante com os resultados de experimentos anteriores como os de Ramos, Van Andel e Pappenberger (2013), embora no estudo dos autores citados os valores percentuais tenham sido mais diferentes entre si, 73% e 14%. Na análise de Ramos, Van Andel e Pappenberger (2013) os fatos de os tomadores de decisão serem mais propensos ao risco e de as decisões serem mais concordantes entre si com a existência da informação de probabilidades também foram sugeridos. Contudo, no caso de Ramos, Van Andel e Pappenberger (2013) o número de jogadores era de 98 pessoas, o que representa pouco mais da metade do número de jogadores no XXSBRH em Bento Gonçalves. Ou seja, a amostra utilizada no presente trabalho foi maior.

CONCLUSÕES

Este estudo apresentou uma breve discussão sobre como previsões de vazão de curto e médio prazo são usadas atualmente no Brasil, e discutiu que o uso de previsões por conjunto poderia ser inserido neste cenário.

Espera-se que tanto setores de previsão e alerta de cheias como setores de gestão de recursos hídricos (incluindo otimização de reservatórios) possam se beneficiar com a utilização de técnicas de previsão por ensemble, consideradas atualmente como estado-da-arte em hidrometeorologia. No caso de previsões de cheias, acredita-se que as previsões por conjunto podem se destacar na previsão antecipada da ultrapassagem de limiares para uma maior antecipação de situações de emergência, como mostrado por Meller et al. (2014). Já na operação dos reservatórios, além do benefício que a detecção de cheias pode fornecer no controle de restrições, acredita-se que as previsões por conjunto consideradas em sequência possam levar a melhores desempenhos operacionais, já que elas permitem a consideração de todas as incertezas no futuro e podem servir de entrada a modelos de decisão. Este tipo de benefício é comentado, por exemplo, nos trabalhos de Boucher et al. (2012), Raso et al. (2013), Fan et al. (2014a,b, 2015a,b), Schwanenberg et al. (2015) e Zhao, Ximing e Dawen (2011).

Visando contribuir para o estudo dos benefícios do uso de informações probabilísticas na tomada de decisão, este artigo apresentou os resultados de um jogo realizado pelos autores durante o XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos em 2013, com a participação do público. Os resultados do jogo apontaram para as seguintes considerações finais:

- A existência da informação de incerteza e probabilidade influencia na decisão das pessoas. Observou-se que, para casos iguais, porém um deles mostrado com informação de incerteza e o outro não, a distribuição das respostas dadas pelas pessoas foi diferente;

- Sem a informação de incerteza os participantes seguiram uma atitude mais avessa ao risco, enquanto que com a informação de incerteza disponível as tomadas de decisão foram mais propensas ao risco;

- A presença da informação de incerteza e probabilidade resultou em melhores sequências de decisões, com menores perdas econômicas finais;

- A presença de informações de incerteza e probabilidade também fez com que as decisões fossem mais coerentes entre os participantes, com um maior número de tomadores de decisão tomando decisões similares, em uma faixa menor de variação;

- Já as decisões sem a informação de incerteza e probabilidade resultaram em média em maiores perdas econômicas, e em decisões mais incoerentes entre os participantes.

É válido destacar que os resultados aqui apresentados não sugerem que não seja possível tomar boas decisões usando somente previsões determinísticas. Ou que não seja impossível tomar decisões erradas mesmo usando as previsões probabilísticas. Os resultados sugerem que, em média, melhores decisões foram tomadas usando previsões probabilísticas, pois estas trazem mais informações para os tomadores de decisão. Outros fatores, no entanto, também influem a tomada de decisão e não foram aqui

considerados, como, por exemplo, a experiência de previsores e tomadores de decisão e questões socioeconômicas envolvidas.

Enfim, espera-se que o estudo aqui apresentado contribua para incentivar novos estudos e novas práticas no uso de previsões hidrológicas no Brasil, assim como para instigar a criatividade na elaboração de pesquisas relacionadas com seus benefícios.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos colegas Paulo Pontes, Margaritha Pereira, Karena Quiroz, e Mino Sorribas pelo apoio durante a aplicação do jogo de tomada de decisão no SRBH 2013 em Bento Gonçalves (RS).

O primeiro autor agradece ao Irstea e à Universidade de Duisburg-Essen pelo apoio como pesquisador visitante no Irstea de Antony em julho de 2014. E a CAPES pelo financiamento de sua pesquisa de doutorado sanduíche.

O jogo aqui descrito encontra-se disponível no site internet do HEPEX: <http://hepex.org/>

REFERÊNCIAS

- ABEBE, A. J.; PRICE, R. K. Managing uncertainty in hydrological models using complementary models. *Hydrol. Sci.*, v. 48, n. 5, p. 679-692, 2003.
- ALVES, J. M. B.; CAMPOS, J. N. B.; SERVAIN, J. Reservoir Management Using Coupled Atmospheric and Hydrological Models: The Brazilian Semi-Arid Case. *Water Resour. Manag.*, v. 26, n. 5, p. 1365-1385, Mar. 2012.
- ALVES, J. M. B.; COSTA, A. A.; SOMBRA, S. S.; CAMPOS, J. N. B.; SOUZA FILHO, F. A.; MARTINS, E. S. P. R.; SILVA, E. M.; SANTOS, A. C. S.; BARBOSA, H. A.; MELCIADES, W. L. B.; MONCUNNIL, D. F. Um estudo inter-comparativo de previsão sazonal estatística-dinâmica de precipitação no nordeste do Brasil. *Rev. Bras. Meteorol.*, v. 22, n. 3, p. 354-372, dez. 2007.
- ARAUJO, A. N.; BREDA, A.; FREITAS, C.; LEITE, E. A.; GONÇALVES, J. E.; CALVETTI, L.; ALMEIDA, M. I.; SILVEIRA, R. B. *Hydrological and Meteorological Forecast Combined Systems for Flood Alerts and Reservoir Management: The Iguaçu River Basin Case*. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLOOD MANAGEMENT - ICFM, 6., 2014, São Paulo. Proceedings... Porto Alegre: SBRH, 2014. ref. PAP014749.
- BOUCHER, M.-A.; ANCTIL, F.; PERREAULT, L.; TREMBLAY, D. A comparison between ensemble and deterministic hydrological forecasts in an operational context. *Adv. Geosci.*, v. 29, p. 85-94, Mar. 2011. doi:10.5194/adgeo-29-85-2011.
- BOUCHER, M.-A.; TREMBLAY, D.; DELORME, L.; PERREAULT, L.; ANCTIL, F. Hydro-economic assessment of hydrological forecasting systems. *J. Hydrol.*, v. 416-417, p.

133-144, Jan. 2012.

BOURDIN, D. R.; STULL, R. B. Bias-Corrected Short-Range Member-to-Member Ensemble Forecasts of Reservoir Inflow. *J. Hydrol.*, v. 502, p. 77-88, Oct. 2013. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.028.

BOURGIN, F. M.-H.; RAMOS, G.; THIREL, ANDRÉASSIAN, V. Investigating the interactions between data assimilation and post-processing in hydrological ensemble forecasting. *J. Hydrol.*, v. 519, Part D, p. 2775–2784, Nov. 2014. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.07.054.

BUIZZA, R. The value of probabilistic prediction. *Atmos. Sci. Lett.*, v. 9, n. 2, p. 36-42, Apr./June 2008.

CALVETTI, L. *Previsão hidrometeorológica probabilística na Bacia do Alto Iguaçu-PR com os modelos WRF e TopModel*. 2011. 141 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2011.

CALVETTI, L.; PEREIRA FILHO, A. J. Ensemble Hydrometeorological Forecasts Using WRF Hourly QPF and TopModel for a Middle Watershed. *Adv. Meteorol.*, v. 2014, p. 1-12, 2014.

CALVETTI, L.; PEREIRA FILHO, A. J.; BENETI, C.; NEUNDORF, R. Previsão de Vazão utilizando Previsões de Precipitação por Conjuntos (Ensemble). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves, RS. *Anais...* Porto Alegre: SBRH, 2013.

CLOKE, H. L.; PAPPENBERGER, F. Ensemble flood forecasting: a review. *J. Hydrol.*, v. 375, n. 3-4, p. 613-626, 2009.

COLLISCHONN, W.; MELLER, A.; FAN, F.; MOREIRA, D. S.; SILVA DIAS, P. L.; BUARQUE, D.; BRAVO, J. M. Short-term Ensemble Flood Forecasting Experiments in Brazil. *Geophys. Res. Abs.*, v. 15, p. 11910, 2013.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Previsão Sazonal de vazão na bacia do rio Uruguai 1: Ajuste e verificação do modelo hidrológico distribuído. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 10, n.4, p. 43-59, out./dez. 2005.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; DELGADO, M. C.; SILVA, B. C.; COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D. G.; PAZ, A. R. Modelo hidrológico distribuído para previsão de vazões incrementais na bacia do rio Paranaíba entre Itumbiara e São Simão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 12, n. 3, p. 43-56, jul.set. 2007.

CORDERO, A.; MOMO, M. R.; SEVERO, D. L. Previsão de cheia em tempo atual, com um Modelo Armax, para a cidade de Rio do Sul-SC. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió, AL. *Anais...* Porto Alegre:

SBRH, 2011.

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

CRED - Center for Research on the epidemiology of Disasters. EM-DAT - *The International Disaster Database*. Brussels: Université Catholique de Louvain, 2012. Disponível em: http://www.emdat.be/. Acesso em: 23 jan. 2015.

CUO L.; PAGANO T. C.; WANG, Q. J. A review of quantitative precipitation forecasts and their use in short- to medium-range streamflow forecasting. *J. Hydrometeor.*, v. 12, p. 713-728, Oct. 2011.

DEMIREL, M. C.; BOOIJ, M. J.; HOEKSTRA, A. Y. Effect of different uncertainty sources on the skill of 10 day ensemble low flow forecasts for two hydrological models. *Water Resour. Res.*, v. 49, n. 7, p. 4035-4053, July 2013. doi:10.1002/wrcr.20294.

DOLIF, G.; ENGELBRECHT, A.; JATOBÁ, A.; DA SILVA, A. J. D.; GOMES, J. O.; BORGES, M. R. S.; NOBRE, C. A.; CARVALHO, P.; VICTOR R. Resilience and brittleness in the ALERTA RIO system: a field study about the decision-making of forecasters. *Natural Hazards (Dordrecht Online)*, v. 65, n. 3, p. 1831-1847, Feb. 2013.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; MELLER, A.; BOTELHO, L. C. Ensemble streamflow forecasting experiments in a tropical basin: The São Francisco river case study. *J. Hydrol.*, v. 519, pt. D, p. 2906-2919, Nov. 2014a. doi:10.1016/j.jhydr.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; QUIROZ, K.; SORRIBAS, M. V.; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A. Flood forecasting on the Tocantins River using ensemble rainfall forecasts and real-time satellite rainfall estimates. *J. Flood Risk Manag.*, June 2015a. doi:10.1111/jfr3.12177.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; QUIROZ, K.; SORRIBAS, M. V.; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A. Ensemble flood forecasting on the Tocantins River - Brazil. *Geoph. Res. Abst.*, v. 16, p. 1818, 2014b.

FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; BELTRAME, L. F. S.; COLLISCHONN W.; BUARQUE, D. C. Operational Flood Forecasting System to the Uruguay River Basin Using the Hydrological Model MGB-IPH. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLOOD MANAGEMENT - ICFM, 6., 2014, São Paulo. *Proceedings...* Porto Alegre: SBRH, 2014c.

FAN, F. M.; SCHWANENBERG, D.; COLLISCHONN, W.; WEERTS, A. Verification of Inflow into Hydropower Reservoirs using Ensemble Forecasts of the TIGGE Database for Large Scale Basins in Brazil. *J. Hydrol.: regional studies*, v. 4, pt. B, p. 196-227, Sept. 2015b.

- FRALEY, C.; RAFTERY, A. E. Calibrating Multimodel Forecast Ensembles with Exchangeable and Missing Members Using Bayesian Model Averaging. *Monthly Weather Rev.*, v. 138, n. 1, p. 190-202, Jan. 2010.
- FRANZ, K. J.; HOGUE, T. S. Evaluating uncertainty estimates in hydrologic models: borrowing measures from the forecast verification community. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 15, p. 3367-3382, 2011.
- GEORGAKAKOS, K. P.; KRZYSZTOFOWICZ, R. Probabilistic and ensemble forecasting. *J. Hydrol.*, v. 249, p. 1-196, 2001. Special issue.
- GOMES, L. F. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; VALENÇA, M. J. S. Modelo Baseado na Técnica de Redes Neurais para Previsão de Vazões na Bacia do Rio São Francisco. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 15, n. 1, p. 5-15, jan./mar. 2010.
- 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, p. 13-20, 2007.
- 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.*, v. 16, p. 815-831, 2012. doi:10.5194/hess-16-815-2012, 2012.
- KRZYSZTOFOWICZ, R. The case for probabilistic forecasting in hydrology. *J. Hydrol.*, v. 249, n. 1-4, p. 2-9, Aug. 2001.
- LEUTBECHER, M.; PALMER, T. N. Ensemble forecasting. *J. Comp. Phys.*, v. 227, n. 7, p. 3515-3539, Mar. 2008.
- LORENZ, E. N. The predictability of a flow which possesses many scales of motion. *Tellus*, v. 21, n. 3, p. 289-307, June 1969.
- MANZIONE, R. L. Incorporação de incertezas associadas À predição de modelos hidrológicos aos instrumentos de gestão em recursos hídricos. *Cad. Prudentino Geograf.*, v. especial, n. 36, p. 215-227, 2014.
- MATOS, A. J. S.; DAVIS, E. G.; SILVA, A. J.; ALMEIDA, I. S.; CANDIDO, M. O. Assessment Of A Real-Time Flood Forecasting at the Doce River Basin: Summer 2013 Event. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLOOD MANAGEMENT, 6., 2014, São Paulo. *Proceedings...* Porto Alegre: SBRH, 2014.
- MELLER, A. *Previsão de cheias por conjunto em curto prazo*. 2012. 224 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- MELLER, A.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C. D.; SILVA DIAS, P.; MOREIRA, D. Previsão de Cheias por Conjunto em Curto Prazo. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 19, n. 3, p. 33-49, jul./set. 2014.
- MENDONÇA, A. M.; BONATTI, J. P. Experiments with EOF-Based perturbation methods and their impact on the CPTEC/INPE Ensemble Prediction System. *Monthly Weather Rev.*, v. 137, n. 4, p. 1438-1459, Apr. 2009.
- NEGRÃO, A. C.; LEITE, E.; BREDA, Â. Previsão Hidrológica Probabilística Derivada da Modelagem Dos Erros e da Aproximação Meta-Gaussiana. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. *Anais...* Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Recursos Hídricos, 2013.
- OLIVEIRA, C. P. M.; SILVA, C. V. F.; SOSNOSKI, A. S. K. B.; BOZZINI, P. L.; ROSSI, D. M.; UEMURA, S.; CONDE, F. Warning System Based On Real-Time Flood Forecasts In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLOOD MANAGEMENT, 6., 2014, São Paulo. *Proceedings...* Porto Alegre: SBRH, 2014.
- ONS – Operador Nacional do Sistema. *Diretrizes para as Regras de Operação de Controle de Cheias: Bacia do Rio Iguaçu* (Ciclo 2013-2014). Rio de Janeiro: ONS, 2014. (ONS RE 3/0064/2014).
- ONS – Operador Nacional do Sistema. *Diretrizes para as Regras de Operação de Controle de Cheias: Bacia do Rio Jacuí* (Ciclo 2011-2012). Rio de Janeiro: ONS, 2011b. (ONS RE 3/217/2011).
- ONS – Operador Nacional do Sistema. *Diretrizes para as Regras de Operação de Controle de Cheias: Bacia do Rio Parnaíba* (Ciclo 2013-2014). Rio de Janeiro: ONS, 2013a. (ONS RE 3/137/2013).
- ONS – Operador Nacional do Sistema. *Diretrizes para as Regras de Operação de Controle de Cheias: Bacia do Rio Paraíba do Sul* (Ciclo 2013-2014). Rio de Janeiro: ONS, 2013b. (ONS RE 3/0131/2013).
- ONS – Operador Nacional do Sistema. *Diretrizes para as Regras de Operação de Controle de Cheias: Bacia do Rio São Francisco* (Ciclo 2012-2013). Rio de Janeiro: ONS, 2012. (ONS RE 3/166/2012).
- ONS – Operador Nacional do Sistema. *Procedimentos de Rede Submódulo 9.5: previsão de vazões e geração de cenários de aflúências*. Rio de Janeiro: ONS, 2011a. v. 2.
- PAGANO, T. C.; WOOD, A. W.; RAMOS, M.-H.; CLOKE, H. L.; PAPPENBERGER, F.; CLARK, M. P.; CRANSTON, M.; KAVETSKI, D.; MATHEVET, T.; SOROOSHIAN, S.; VERKADE, J. S. Challenges of Operational River Forecasting. *J. Hydrometeorol.*, v. 15, n. 4, p. 1692-1707, Aug. 2014. doi:10.1175/JHM-D-13-0188.1.
- PALMER, T. N.; BARKMEIJER, J.; BUIZZA, R.; PETROLIAGIS, T. The ECMWF Ensemble Prediction System. *Meteorol. Appl.*, v. 4, p. 301-304, 1997.

- PALMER T. N.; ZANNA L. Singular Vectors, Predictability and Ensemble Prediction for Weather and Climate. *J. Physics A: Math. Theor.*, v. 46, n. 25, p. 254018, 2013.
- PAPPENBERGER, F.; BEVEN, K. J.; HUNTER, N. M.; BATES, P. D.; GOUWELLEUW, B. T.; THIELEN, J.; DE ROO, A. P. J. Cascading model uncertainty from medium range weather forecasts (10 days) through a rainfall-runoff model to flood inundation predictions within the European Flood Forecasting System (EFFS). *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 35, p. 381-393, 2005.
- PAPPENBERGER, F.; CLOKE, H. L.; PARKER, D. J.; WETTERHALL, F.; RICHARDSON D. S.; THIELEN J. The monetary benefit of early flood warnings in Europe. *Environ. Sci. Policy*, v. 51, p. 278-291, Aug. 2015. doi:10.1016/j.envsci.2015.04.016.
- PAPPENBERGER, F.; CLOKE, H. L.; PERSSON, A.; DEMERITT, D. HESS Opinions "On forecast (in)consistency in a hydro-meteorological chain: curse or blessing?", *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, v. 8, p. 1225-1245, 2011. doi:10.5194/hessd-8-1225-2011.
- PAPPENBERGER, F.; STEPHENS, L.; VAN ANDEL, S. J.; VERKADE, J. S.; RAMOS, M. H.; ALFIERI, L.; BROWN, J. D.; ZAPPA, M.; RICCIARDI, G.; WOOD, A.; PAGANO, T.; MARTY, R.; COLLISCHONN, W.; LE LAY, M.; BROCHERO, D.; CRANSTON, M.; MEISSNER, D. *Operational HEPS systems around the globe*. [S.l.]: Hepex, 2013. Disponível em: <http://hepex.irstea.fr/operational-heps-systems-aRound-the-globe/#comment-791>. Acesso em: 15 jun. 2014.
- PINHEIRO, A. Modelos de previsão de cheias. In: FRANK, B.; PINHEIRO, A. *Enchentes na bacia do rio Itajaí: 20 anos de experiências*. Blumenau: EDIFURB, 2003.
- RAMOS, M. H.; MATHEVET, T.; THIELEN, J.; PAPPENBERGER, F. Communicating uncertainty in hydro-meteorological forecasts: mission impossible? *Meteorol. Appl.*, v. 17, n. 2, p. 223-235, 2010.
- RAMOS, M. H.; VAN ANDEL, S. J.; PAPPENBERGER, F. Do probabilistic forecasts lead to better decisions? *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 9, n. 17, p. 2219-2232, 2013. doi:10.5194/hess-17-2219-2013.
- RASO, L.; VAN DE GIESEN, N.; STIVE, P.; SCHWANENBERG, D.; VAN OVERLOOP, P. J. Tree Structure Generation from Ensemble Forecasts for Real Time Control. *Hydrol. Process*, v. 27, n. 1, p. 75-82, Jan. 2013.
- REIS, D. S. Jr ; NASCIMENTO, L. S. V.; MARTINS, E. S. P. R. Avaliação do ensemble da previsão climática de chuva no Estado do Ceará com base em modelos numéricos de clima. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2007.
- SCHAAKE, J. *Hydrologic ensemble prediction: past, present and opportunities for the future, ensemble predictions and uncertainties in flood forecasting*. In: International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin, 2006, Bern, Switzerland. Workshop... Bern, Switzerland: [s.n.], 2006.
- SCHAAKE, J.; DEMARGNE, J.; HARTMAN, R.; MULLUSKY, M.; WELLES, E.; WU, L.; HERR, H.; FAN, X.; SEO, D. J. Precipitation and temperature ensemble forecasts from single-value forecasts. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 4, p. 655-717, 2007.
- SCHWANENBERG, D.; FAN, F. M.; NAUMANN, S.; KUWAJIMA, J. I.; ALVARADO, R.; REIS, A. A. Short-Term Reservoir Optimization for Flood Mitigation under Meteorological and Hydrological Forecast Uncertainty. *Water Resour. Manag.*, v. 29, n. 5, p. 1635-1651, Mar. 2015.
- SENE, K. *Hydrometeorology: forecasting and applications*. New York: Springer, 2010.
- SILVA, E. R.; OFICIALDEGUI, E.; CIRILO, J. A.; RIBEIRO NETO, A.; DANTAS, C. E. O.; SANTOS, K. A. Monitor avançado de enchentes (maven): a hidroclimatologic computational framework for early flood alert systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLOOD MANAGEMENT, 6., 2014, São Paulo. *Proceedings...* Porto Alegre: SBRH, 2014.
- SIQUEIRA, V. A. *Previsão de cheias por conjunto em curto a médio prazo: Bacia do Taquari-Antas/RS. 2015*. 164 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- SOUZA FILHO, F. A.; LALL, U. Modelo de Previsão de Vazões Sazonais e Interanuais. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 9, n. 2, p. 61-74, abr./jun. 2004.
- TOTH, Z.; KALNAY, E. Ensemble Forecasting at NMC: The Generation of Perturbations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v. 74, n. 12, p. 2317-2330, Dec. 1993.
- 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.*, v. 29, p. 33-42, 2011.
- ZALACHORI, I.; RAMOS, M. H.; GARÇON, R.; MATHEVET, T.; GAILHARD, J. Statistical processing of forecasts for hydrological ensemble prediction: a comparative study of different bias correction strategies. *Adv. Sci. Res.*, v. 8, p. 135-141, 2012. doi:10.5194/asr-8-135-2012.
- ZHAO, T.; XIMING, C.; DAWEN, Y. Effect of streamflow forecast uncertainty on real-time reservoir operation. *Adv. Water Resour.*, v. 34, n. 4, p. 495-504, Apr. 2011.

Contribuição dos autores:

Fernando Mainardi Fan: Preparou material e auxiliou a aplicação do jogo durante o XX SBRH em Bento Gonçalves. Trabalhou na compilação dos dados, na análise dos resultados e elaboração do texto.

Maria-Helena Ramos: Preparou material e comandou a aplicação do jogo durante o XX SBRH em Bento Gonçalves. Trabalhou na análise dos resultados e elaboração do texto.

Walter Collischonn: Organizou a sessão onde o jogo foi aplicado durante o XX SBRH em Bento Gonçalves. Auxiliou na análise dos resultados e na elaboração do texto.