

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**PREVISÃO DE CHEIAS POR CONJUNTO EM CURTO A MÉDIO
PRAZO: BACIA DO TAQUARI-ANTAS/RS**

VINÍCIUS ALENCAR SIQUEIRA

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Orientador

Prof. Dr. Walter Collischonn - IPH/UFRGS

Banca Examinadora

Prof. Dr. Juan Martín Bravo - IPH/UFRGS

Prof. Dr. Carlos Ruberto Fragoso Jr. - CTEC/UFAL

Prof. Dr^a Sin Chan Chou - CPTEC/INPE

Porto Alegre, 21 de maio de 2015

AGRADECIMENTOS

À UFRGS e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), pelo acolhimento e oferecimento de um ambiente de estudo com reconhecido prestígio nacional e internacional;

Ao professor e orientador Dr. Walter Collischonn, um profissional extrovertido e ao mesmo tempo com grande seriedade no trabalho, sempre com ideias simples e inspiradoras para resolução dos problemas encontrados na pesquisa e demais atividades. Gostaria de deixar meu agradecimento pelo apoio incondicional independentemente do assunto tratado, sendo que este trabalho não teria sido possível sem este suporte;

Aos meus pais, Sílvio e Maria Inês, nos quais sempre me espelhei para encarar as dificuldades que a vida impõe e por terem me ensinado que esta deve ser vivida de maneira simples, com dignidade e respeito. Devo toda a minha educação a vocês, muito obrigado;

À minha namorada, amiga, prestativa e grande companheira Adriana Breda - exemplo de pessoa batalhadora, por quem fico plenamente grato pela compreensão, carinho e apoio nos momentos difíceis, mesmo estando a um oceano de distância durante boa parte do tempo dedicado a este trabalho;

Aos meus irmãos Vicente e Vagner pelo ótimo convívio durante os curtos períodos de reencontro, e tenho certeza que vocês serão motivo de orgulho para mim em um futuro próximo;

Ao amigo Dr. Juan Martín Bravo, um professor brilhante que pude acompanhar já desde a graduação, sempre me motivando nas atividades realizadas e oferecendo contribuições muito importantes para melhoria desta pesquisa e dos demais trabalhos;

À Dr^a Sin Chan Chou, pela participação na banca e suporte na área de meteorologia, por quem guardei desde já grande admiração em ambos os aspectos profissional e pessoal;

Ao Dr. Carlos Ruberto Fragoso Jr., pelas sugestões que certamente serão levadas para trabalhos posteriores e por ter aceitado o desafio de análise crítica deste trabalho em tempo relativamente curto, frente aos imprevistos que acabaram ocorrendo em última hora;

Ao professor e amigo Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva, pelas importantes contribuições fornecidas durante o Plano de Dissertação;

Um agradecimento especial à Josiane Bustamante (CPTEC) que, mesmo não tendo a oportunidade de conhecê-la - e infelizmente nunca terei, sempre me foi muito prestativa nos contatos via email e auxiliou com a geração e fornecimento de parte das informações de precipitação prevista utilizadas no presente estudo;

À SEDEC/MI e CEPED/UFRGS pelo apoio financeiro durante a pesquisa realizada;

Às instituições e profissionais envolvidos da CPRM, UNIVATES, INMET, CERAN, DRH/SEMA e CPTEC/INPE, pela disponibilização de dados necessários para o desenvolvimento deste trabalho;

Aos companheiros da sala de projetos: o recente doutor Fernando Fan, um dos mais determinados colegas que já pude acompanhar em minha carreira acadêmica, que certamente muito contribuiu para o desenvolvimento deste trabalho; Paulo Pontes e Mino Sorribas (doutores iminentes), dois grandes conhecedores nas áreas de hidrologia e hidráulica de rios, além de exímios programadores, com quem tive a oportunidade de conviver e aprender sobre o assunto; ao colega e mestrando Ayan Fleischmann, grande irmão e parceiro para todas as horas, que inclusive muito ajudou na aquisição, manipulação de dados e preparação do modelo hidrológico; aos colegas e/ou professores Rafael Kayser, Katiucia Adam, Margarita Pereira, Karena Quiroz, Fernando (bike), Diogo Buarque, Anderson Ruhoff, Adalberto Meller, Joel Goldenfum, Alfonso Risso, José Louzada, Olavo Pedrollo, Edith Camaño e Lawson Beltrame pelo bom convívio e discussões realizadas em relação aos trabalhos; aos bolsistas de graduação Pedro Jardim e Vitória Lopes, dois grandes aprendizes com quem sempre tive conversas saudáveis e que certamente serão ótimos profissionais e/ou pesquisadores na área acadêmica. A todos estes colegas (sendo boa parte de músicos) eu gostaria de deixar um grande agradecimento por todos os momentos de descontração e de contribuição ao trabalho realizado.

À MJ Engenharia e à Mariângela Laydner, por todo o reconhecimento e apoio oferecido para realização das atividades do mestrado;

À minha amiga e colega Bibiana Colossi, por sempre ter me ajudado durante os momentos de imprevisto ocorridos durante a pesquisa;

Aos velhos amigos da MJ e agregados, Igor Gaúcho, Carolina, Artur Francisco, Márcia, Reginatti, Caetano, Samantha, Bruno (Lebes) e Petra, devido aos vários momentos de encontro e descontração que se sucederam ao longo da realização deste estudo;

Ao grupo de futebol intitulado "*Amigos do Badanba*", bem como a todos os seus integrantes, pela garantia de muitos gols em todas as terças-feiras e inclusive churrascos com direito a fogos que nunca foram visualizados;

Aos demais amigos da pós-graduação, juntamente com os quais dividi momentos de bom convívio, ótimas conversas e lamentos inevitáveis em relação às atividades do mestrado: Ada, Amanda, Alejandro, Almir, Andrés, Arthur, Benício, Billy, Camila, Carolina, Carlos Henrique, Daniel, Daniela, Débora, Erick, Felipe, Fernando, Franciele, Gabriel, Gean, Gláucia, Joaquim, João Paulo, Jones, Juan Carlos, Juliana, Lina, Mildred, Pablo, Rafael, Rosane, Sly, Vinícius (Tambara e Didó) e Virgílio.

E a todos os demais que contribuíram direta- ou indiretamente com o desenvolvimento deste trabalho, que por algum equívoco eu tenha me esquecido de mencionar.

RESUMO

A previsão hidrológica possibilita a identificação antecipada de eventos de cheia potencialmente causadores de inundação, o que é de grande importância para a atuação de entidades como a Defesa Civil. Quando se deseja estender a antecedência no tempo em relação a estes eventos, principalmente nos casos onde a bacia de interesse é relativamente rápida, torna-se necessária a incorporação de previsões quantitativas de precipitação (QPF) na modelagem hidrológica, as quais podem ser obtidas a partir de modelos numéricos de previsão do tempo. Entretanto, a falta de acurácia atribuída a estas previsões de chuva, dadas de forma determinística, vem promovendo sua substituição por sistemas de previsão meteorológica por conjunto (EPS - *Ensemble Prediction Systems*), cuja finalidade é a geração de possíveis estados futuros da atmosfera para considerar as incertezas associadas ao seu estado inicial e às deficiências na representação física dos modelos de previsão do tempo. Neste contexto, o presente estudo teve por objetivo avaliar uma metodologia de previsão de cheias por conjunto na bacia do Taquari-Antas/RS até a cidade de Encantado (19.000 km²), localizada na região Sul do Brasil. Para tanto, foi utilizado o modelo hidrológico MGB-IPH acoplado a diferentes sistemas de previsão, sendo eles: (i) EPS Regional ETA, de curto prazo (até 72 horas) com 5 membros de diferentes parametrizações; (ii) EPS Global ECMWF de médio prazo (até 10 dias) com 50 membros de condições iniciais perturbadas, incluindo perturbação estocástica nos parâmetros de ajuste do modelo e; (iii) Previsão Determinística do Modelo Regional ETA (até 7 dias). A avaliação das previsões consistiu em dois *hindcastings* distintos, envolvendo uma análise visual de eventos singulares ocorridos em 06/06/2014 e 21/07/2011 além de uma análise estatística no período de Mar/2014 - Nov/2014. Durante a análise visual foi possível identificar, a partir de antecedências de 5 a 6 dias, uma persistência na previsão dada pelo crescente número de membros do conjunto de médio prazo (ECMWF) com superação dos limiares de referência, na medida em que se aproximavam os eventos de cheia. Apesar da grande incerteza na magnitude das previsões hidrológicas para o conjunto de curto prazo, a vazão máxima foi relativamente bem prevista por pelo menos 1 membro em quase todas as antecedências, enquanto que a previsão do *timing* dos eventos foi considerada de boa confiabilidade. Durante a avaliação estatística foi possível notar uma falta de espalhamento nos conjuntos, com tendência de subestimativa de acordo com o aumento da antecedência. Em uma comparação com previsões determinísticas, as previsões por conjunto demonstraram maior acurácia principalmente até 72 horas de antecedência, com destaque para a maior probabilidade de detecção dos limiares de referência e manutenção de falso alarme a níveis reduzidos. Além disso, verificou-se também que a agregação de previsões efetuadas em tempo anterior naquelas atuais acarreta em ligeira ampliação do espalhamento do conjunto e maiores probabilidades de detecção dos limiares de alerta para os membros mais elevados, apesar da redução no desempenho em termos de acurácia e viés. De forma geral, as previsões por conjunto apresentam potencial para servir como uma informação complementar em sistemas de alerta contra cheias, possibilitando uma melhor preparação dos agentes envolvidos durante a ocorrência destes eventos.

Palavras-chave: Previsão de cheias por conjunto, previsão hidrológica, curto a médio prazo, alerta contra cheias.

ABSTRACT

Hydrological forecasting plays an important role for issuing flood warnings, allowing for anticipation and better preparation of authorities at the occurrence of such events. In order to extend lead time in a flood forecast, especially when the catchment response time is relatively fast, it may be useful to couple a hydrological model to quantitative precipitation forecasts (QPF), usually obtained directly from numerical weather prediction (NWP). However, deterministic (i.e. single) QPF are usually referred to many errors and lack of accuracy, mainly caused by uncertainties on initial state of the atmosphere and on physical representation of weather forecasting models. To address these shortcomings, it becomes necessary to take into account the uncertainties associated to rain forecasts, which can be represented by Ensemble Prediction Systems (EPS). The purpose of such systems is to provide different trajectories of the atmosphere by perturbations on its initial condition and on parameterization schemes of the models, generating an ensemble of forecasts that can be used as input to hydrological modelling (HEPS). In this context, the present study aimed to assess a methodology of ensemble flood forecasting on Taquari-Antas basin up to the city of Encantado/RS (19.000 km²), located in southern Brazil. Therefore, the hydrological model MGB-IPH was coupled to different forecasting systems: (i) Short Range EPS ETA (up to 72 hours), a regional model with 5 members of different parameterization schemes; (ii) Medium Range EPS ECMWF (up to 10 days), a global model with 50 members of perturbed initial conditions and stochastic perturbation in the model parameters; (iii) Deterministic ETA Model (up to 7 days). The forecasts were evaluated by two different hindcastings, which includes a visual assessment of singular events occurred on 2011 and 2014 and a statistical analysis for the period between Mar/2014 and Nov/2014. It was possible to identify a forecast persistence on medium-range for the selected events, by the increasing number of members exceeding the reference thresholds from lead times up to 5 - 6 days. On the short range, although large uncertainties in the magnitude of hydrological forecasts were found, the peak discharge was well forecasted - at least for a single member - in nearly all lead times, whereas the prediction of the peak timing was considered reliable. Regarding to statistical evaluation, an inadequate spread in the ensemble was observed from short- to medium-range, with a tendency of underestimation for longer lead times. In a comparison with deterministic forecasts, the ensemble forecasts showed higher accuracy especially up to 72 hours in advance, including highlights on greater probability of detection (POD) above the reference thresholds even with low false alarm rates. It also was found that the a combination of previous forecasts on the recent ones leads to a slight increase of ensemble spread and POD for higher members, despite the performance reduction in terms of accuracy and bias. In summary, the hydrological ensemble forecasts demonstrated a good potential to serve as an additional information within a Flood Alert System.

Keywords: Ensemble Flood Forecasting, Hydrological Forecasting, Short- to Medium- Range, Flood Warning

SUMÁRIO

Capítulo 1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização do tema.....	1
1.2. Justificativa do estudo	1
1.3. Objetivos	2
Capítulo 2. Previsão hidrológica: conceitos e aplicações	5
2.1. Generalidades	5
2.2. Aspectos elementares relacionados a sistemas de alerta contra cheias	6
2.2.1. Definição.....	6
2.2.2. Exemplos de sistemas de alerta contra cheias em operação no Brasil.....	7
2.3. Modelagem hidrológica como instrumento de previsão.....	9
2.4. Critérios utilizados na previsão hidrológica	11
2.5. Sistemas de previsão baseados na propagação da onda de cheia.....	12
2.6. Sistemas de previsão baseados na chuva observada	13
2.7. Fundamentos e técnicas de assimilação de dados em tempo real	14
2.8. Considerações finais a respeito dos métodos de previsão baseados na propagação e na chuva observada.....	17
Capítulo 3. Aspectos acerca do acoplamento de previsões meteorológicas na modelagem hidrológica 19	
3.1. Introdução à previsão do tempo	19
3.2. Características acerca das previsões quantitativas de precipitação.....	19
3.3. Previsões probabilísticas do tempo.....	22
3.4. Sistemas de previsão com base na chuva prevista: uma abordagem determinística	26
3.5. Sistemas de previsão com base na chuva prevista: uma abordagem probabilística através do uso de <i>ensembles</i>	29
3.5.1. Contextualização e conceitos	29
3.5.2. Particularidades e aplicações dos Hydrological Ensemble Prediction Systems em estudos sobre previsão de cheias	32
3.5.3. Estudos com o uso de <i>ensembles</i> para previsão de cheias no contexto brasileiro	35
3.5.4. Tendências na utilização das previsões por conjunto em sistemas operacionais de alerta contra cheias.....	36
Capítulo 4. Formulação de etapas para preparação e avaliação de HEPS na bacia do Taquari-Antas.....	39
4.1. Considerações iniciais.....	39
4.2. Estrutura Metodológica	39

4.3.	Modelo hidrológico utilizado: MGB-IPH.....	41
4.3.1.	Estrutura do modelo MGB-IPH.....	41
4.3.2.	Avaliação das vazões simuladas pelo MGB-IPH: Calibração e Verificação	43
4.4.	Previsões quantitativas de precipitação.....	44
4.4.1.	Modelo Regional CPTEC/ETA determinístico	44
4.4.2.	EPS Regional CPTEC/ETA.....	45
4.4.3.	EPS Global do ECMWF.....	48
4.4.4.	Síntese quanto à fonte de dados de chuva prevista	50
4.5.	Geração e avaliação das previsões hidrológicas.....	51
4.5.1.	Avaliação de eventos singulares de cheia.....	52
4.5.2.	Avaliação estatística das previsões hidrológicas	58
Capítulo 5. Simulação hidrológica na bacia do Taquari-Antas/RS.....		64
5.1.	Descrição da área e aquisição de informações	64
5.1.1.	Fonte de dados quanto às características físicas da bacia	67
5.1.2.	Fonte de dados quanto às características hidrológicas da bacia.....	69
5.1.3.	Síntese das fontes de dados quanto às características físicas e hidroclimáticas na bacia.....	75
5.2.	Pré-processamento do MGB-IPH	76
5.2.1.	Definição das URHs	76
5.2.1.	Discretização do modelo e espacialização das informações pluviométricas.....	78
5.3.	Ajuste <i>off-line</i> : calibração e verificação do modelo hidrológico	78
5.3.1.	Calibração: período de Jun/2009 - Dez/2011.....	78
5.3.1.	Verificação: período de Jan/2012 - Dez/2013	85
Capítulo 6. Previsão hidrológica: verificação dos HEPS e da previsão determinística		88
6.1.	Hindcasting I - Análise de eventos de cheia singulares	89
6.1.1.	Descrição dos eventos analisados	89
6.1.2.	Avaliação da antecedência com base na chuva zero no horizonte de previsão	91
6.1.3.	Verificação da necessidade de atualização em tempo real nas previsões hidrológicas	93
6.1.4.	Resultados da análise de previsão hidrológica nos eventos singulares.....	99
6.2.	Hindcasting II - Análise estatística das previsões hidrológicas por conjunto e determinística 118	
6.2.1.	Erro Médio Relativo.....	119
6.2.2.	Erro Médio Absoluto.....	122
6.2.3.	Continuous Ranking Probability Score (CRPS)	125
6.2.4.	Brier Skill Score.....	128
6.2.5.	Curvas ROC - Relative Operating Characteristics	131
6.2.6.	Rank Histograms	135

Capítulo 7. Conclusões e Recomendações.....	140
Referências.....	146

LISTA DE SÍMBOLOS

AHPS	<i>Advanced Hydrological Prediction Service</i>
AHSUL	Administração de Hidrovias do Sul
ANA	Agência Nacional das Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AR	<i>Auto-Regressive</i>
ARMA	<i>Auto-Regressive Moving Average Model</i>
BFF	Betts-Miller-Janjic + Ferrier + ETA 40 km (Ferrier)
BFG	Betts-Miller-Janjic + Ferrier + GFS
BZZ	Betts-Miller-Janjic + Zhao + ETA 40 km (Zhao)
BSS	<i>Brier Skill Score</i>
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CEOPS	Centro de Operação do Sistema de Alerta da Bacia do Rio Itajaí
CERAN	Companhia Energética do Rio das Antas
CGIAR-CSI	<i>Consortium for Spatial Information of the Consultative Group for International Agricultural Research</i>
CI	Condição Inicial
COSMO	<i>Consortium for Small Scale Modelling</i>
C.P.	Curto Prazo
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CRPS	<i>Mean Continuous Ranked Probability Score</i>
D-ETA 15	Previsão hidrológica a partir do acoplamento da previsão determinística do ETA, de 15 km (7 dias)
DHSVM	<i>Distributed Hydrology Soil Vegetation Model</i>
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
ECMWF	<i>European Center of Medium Range Weather Forecasts</i>
ECMWF50	Previsão hidrológica por Conjunto, a partir do acoplamento do EPS ECMWF com 50 membros
EFAS	<i>European Flood Awareness System</i>
EFFS	<i>European Flood Forecasting System</i>
EMA	Erro Médio Absoluto
EMR	Erro Médio Relativo
EPS	<i>Ensemble Prediction System</i>
ETA	Modelo Regional Atmosférico ETA
ETA5	Previsão hidrológica por Conjunto, a partir do acoplamento do EPS ETA com 5 membros
ETA5-LAF	Previsão hidrológica por Conjunto, a partir do acoplamento do EPS ETA com 5 membros atuais + 5 membros defasados (LAF)
EVS	<i>Ensemble Verification System</i>
FCA	Fator de Correção
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler

FEWS	<i>Flood Early Warning System</i>
FURB	Universidade Regional de Blumenau
GEFS	<i>Global Ensemble Forecasting System</i>
GFS	<i>Global Forecasting System</i>
GloFAS	<i>Global Flood Awareness System</i>
HEFS	<i>Hydrologic Ensemble Forecasting Service</i>
HEPEX	<i>Hydrologic Ensemble Prediction Experiment</i>
HEPS	<i>Hydrological Ensemble Prediction System</i>
IAG/USP	Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas / Universidade de São Paulo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
INEA	Instituto do Meio Ambiente - RJ
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto de Pesquisas Espaciais
IQR	<i>Inter-Quartile Range</i>
JRC	<i>European Comission Joint Research Center</i>
KFG	Kain-Fritsch + Ferrier + GFS
KfmFG	Kain-Fritsch c/ inclusão de fluxo de momentum + Ferrier + GFS
LAF	<i>Lagged Averaged Forecast</i>
LEPS	<i>Local-area Ensemble Prediction System</i>
MASTER	Laboratório de Meteorologia Aplicada a Sistemas Regionais de Tempo
MCGA	Modelo de Circulação Geral Atmosférico
MDE	Modelo Digital de Elevação
MGB-IPH	Modelo de Grandes Bacias
M.P.	Médio Prazo
NCEP	<i>National Centers of Environmental Prediction</i>
NOAA-NWS	<i>National Oceanic Atmospheric Administration - National Weather Service</i>
NS	Índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe
NWP	<i>Numerical Weather Prediction</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PDF	<i>Probability Density Function</i>
POD	Probabilidade de Detecção
POFD	Probabilidade de Falsa Detecção
QPF	<i>Quantitative Precipitation Forecast</i>
RFC	<i>River Forecast Center</i>
ROC	<i>Relative Operating Characteristics</i>
SAC	Sistema de Alerta Contra Cheias
SACE-CPRM	Sistema de Alerta de Eventos Críticos operado pela CPRM
SIPAM	Sistema de Proteção da Amazônia
SISMADEN	Sistema de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TIGGE	<i>THORPEX Interactive Grand Global Ensemble</i>
UHE	Usina Hidrelétrica
UNIVATES	Centro Universitário UNIVATES

URH	Unidades de Resposta Hidrológica
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i>
VAREPS	<i>Variable Resolution Ensemble Prediction System</i>
WGNE	<i>Working Group on Numerical Experimentation</i>
WRF	<i>Weather and Research Forecasting</i>
WSF	<i>Weather Service Forecast</i>

Capítulo 1. Introdução

1.1. Contextualização do tema

Nas últimas décadas tem sido verificado um aumento nos prejuízos relacionados à ocorrência de desastres naturais a nível mundial, passando de aproximadamente U\$\$ 5 bilhões/ano em 1975 para U\$\$ 150 bilhões/ano em 2012 (EM-DAT, 2013). Dentre estes desastres, as inundações surgem como o de maior potencial de impacto na população (UN/ISDR, 2004) deixando em torno de 100 milhões de afetados anualmente (UN/ISDR, 2011), sendo responsável por mais de 50% dos eventos ocasionados e por cerca de 5% do número total de mortes (IFRC, 2011).

O Brasil encontra-se entre os 10 países do mundo com o maior número de acometimentos por inundações (EM-DAT, 2013), tendo registrado 94 desastres cadastrados no período de 1960 a 2008, com 5.720 mortes e mais de 15 milhões de pessoas desabrigadas/desalojadas (Tominaga, 2009). Embora atualmente as estiagens estejam, de longe, liderando o *ranking* do número de municípios atingidos, as inundações entram em cena quando os critérios analisados são o número de óbitos e a população afetada (Brasil 2011, 2012). Para ilustrar esse panorama, a população média a nível mundial situada em áreas de risco de inundação cresceu anualmente a uma taxa de 114% entre 1970 e 2010, ao mesmo tempo em que a população total aumentou em 83% (WMO, 2013). Esta situação demonstra que o aumento dos prejuízos relacionados a esses eventos está de certa forma associado pela maior exposição da população no momento em que as áreas ribeirinhas vão sendo gradativamente ocupadas.

Até o início deste século, medidas para minimização dos impactos das cheias no cenário brasileiro eram baseadas principalmente em ações de resposta, efetuadas após a ocorrência dos eventos e de forma totalmente equivocada (Tucci, 1999). Embora este cenário tenha sido lentamente alterado em função da crescente implementação de políticas de planejamento territorial, eventos críticos recentes, sobretudo os de precipitação extrema que desencadearam movimentos de massa do solo e inundações na Região Serrana do Rio de Janeiro, no ano de 2011, sinalizaram a necessidade de modificação do arranjo institucional relacionado à gestão de desastres no Brasil. Neste contexto, destaca-se a recente criação do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), operando desde dezembro de 2011 com o objetivo de monitorar o território brasileiro e emitir alertas sobre desastres naturais, com atenção especial para municípios de maior vulnerabilidade a eventos críticos de característica hidrológica (Soler *et al.*, 2013; Soriano *et al.*, 2013).

Neste sentido, Sistemas de Alerta contra Cheias (SAC) têm recebido um grande enfoque como mecanismos indispensáveis na preparação das autoridades, sobretudo nas ações de planejamento efetuadas por parte da Defesa Civil. Uma vez que um evento hidrológico potencialmente causador de inundação pode ser identificado com antecedência, medidas vinculadas a planos de emergência e evacuação podem ser tomadas antecipadamente pelos responsáveis, contribuindo para a remoção de pessoas em tempo adequado e até mesmo para o gerenciamento da infraestrutura a ser afetada. Seguindo esta lógica, os planos supracitados oferecem melhores resultados quando as ações podem ser iniciadas com um tempo considerável antes do evento, o que essencialmente requer sua identificação e caracterização com a maior antecedência possível.

1.2. Justificativa do estudo

Um dos elementos que assume um papel fundamental no contexto dos Sistemas de Alerta Contra Cheias é a previsão hidrológica. Esta previsão permite que informações como o nível ou a vazão do rio sejam bem estimadas com antecedência ao evento de cheia, o que normalmente é feito com base em medições destas variáveis a montante do local de interesse. Além disso, dependendo da antecedência desejada e de características da bacia como o tempo necessário para a transformação de chuva em escoamento superficial e o tempo de deslocamento da onda de cheia ao longo do rio, a previsão pode ainda requerer um modelo hidrológico acoplado à chuva observada ou até mesmo a previsões quantitativas de precipitação (QPF), sendo estas últimas geradas a partir de modelos de previsão numérica do tempo.

Entretanto, a utilização de modelos hidrológicos, sobretudo quando acoplados a previsões quantitativas de precipitação, acarretam em imprecisões que diminuem muito a confiabilidade nos resultados. Isso se deve ao fato de que existem grandes incertezas relacionadas tanto ao estado inicial da atmosfera como à representação dos processos físicos nos modelos de previsão do tempo, cujos erros acabam sendo rapidamente amplificados na medida em que se aumenta a antecedência na previsão. Embora existam também incertezas na própria modelagem hidrológica, as previsões de precipitação são constantemente consideradas como a principal fonte de incerteza, as quais usualmente se tornam dominantes após sua propagação para os sistemas hidrológicos. Até pouco tempo atrás, estas incertezas na previsão não eram consideradas nos sistemas de alerta operacionais, prevalecendo resultados de caráter determinístico, ou seja, levando-se apenas em conta valores pontuais das variáveis previstas para qualquer instante futuro (Krzysztofowicz, 2001; Gouweleeuw *et al.*, 2005; Cuo *et al.*, 2011).

Devido às deficiências nas previsões determinísticas, no âmbito da meteorologia, estas têm sido progressivamente substituídas por Sistemas de Previsão por *Ensemble* (EPS - *Ensemble Prediction Systems*) com abordagem probabilística, os quais fornecem um conjunto de possíveis estados futuros da atmosfera através de perturbações nas condições iniciais, da combinação de diferentes estruturas físicas nos modelos e, inclusive, a partir da união de previsões realizadas em tempos anteriores nas mais atuais. A ideia geral é que a incerteza representada pelo conjunto possa capturar as observações, apontando também para a possibilidade de ocorrência de eventos extremos. Estes sistemas têm reconhecidamente melhorado a habilidade dos modelos de previsão no que se refere à precipitação, o que direcionou pesquisas na área de hidrologia para o surgimento dos Sistemas de Previsão Hidrológica por Conjunto - HEPS (*Hydrological Ensemble Prediction Systems*).

Na comunidade científica, o acoplamento de EPS na modelagem hidrológica tem recebido enfoque para curto e médio prazo (até 10 dias de antecedência), sendo que, para esta escala de tempo, a abordagem por conjunto é consagrada como a única forma aceitável de se fazer uma previsão (de Roo *et al.*, 2003; Pappenberger *et al.*, 2011). Embora já exista um grande número de pesquisas e de sistemas de alerta envolvendo HEPS em outras partes do mundo (sobretudo na Europa) no Brasil esta área ainda é incipiente (e. g. Calvetti, 2011; Meller, 2012; Fan *et al.*, 2014), sendo marcado pela carência de estudos relacionados a bacias com rápido desenvolvimento de eventos de cheia. Na região Sul do Brasil, onde existem bacias com problemas de inundação causados por grandes variações de vazão em intervalos de tempo relativamente curtos - como a do Taquari-Antas/RS, ainda não se tem conhecimento da qualidade de previsões hidrológicas por conjunto especialmente se originadas a partir do acoplamento de EPS disponíveis em âmbito operacional.

1.3. Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o desempenho de uma metodologia de previsão de cheias por conjunto em curto a médio prazo para a bacia do Taquari-Antas, baseada no acoplamento de EPS na modelagem matemática distribuída do tipo chuva-vazão. Com base nesta abordagem, o presente estudo visa dar esclarecimento às seguintes questões de pesquisa:

- Caso tivessem sido utilizadas previamente, as previsões por conjunto permitiriam a identificação antecipada de eventos de cheia recentes nesta bacia? As incertezas associadas às previsões hidrológicas seriam adequadas para a estimativa de características importantes, como a magnitude e o tempo de pico (*timing*) nestes eventos?

- Qual o desempenho esperado das previsões por conjunto de forma contínua, com e sem a ocorrência de eventos? Qual é o ganho deste tipo de previsão em relação à abordagem determinística?
- É possível obter alguma vantagem a partir da incorporação de previsões hidrológicas por conjunto de tempos anteriores, na previsão mais atual?

Capítulo 2. Previsão hidrológica: conceitos e aplicações

2.1. Generalidades

O conceito de previsão no ambiente de recursos hídricos envolve a estimativa de variáveis hidrológicas como o nível e vazão para um determinado instante no futuro, oferecendo uma antecedência no tempo em relação a um instante definido. Este conceito difere da predição, a qual é baseada em dados históricos e se refere à estimativa futura das variáveis com determinado nível de probabilidade, porém sem referência a um intervalo de tempo específico (Lettenmaier e Wood, 1993; Tucci, 1998).

Existem duas características principais que descrevem a previsão, as quais são descritas pelas seguintes terminologias: frequência e horizonte. O primeiro termo refere-se, simplesmente, à frequência com que novas previsões são emitidas, enquanto que o horizonte é definido pelo alcance das mesmas a partir do instante inicial em que são realizadas (Meller, 2012). Ainda, conforme Krzysztofowicz (2001), a previsão pode ser também caracterizada como determinística, onde existe uma estimativa pontual da variável hidrológica prevista a cada intervalo de tempo, ou probabilística, um conjunto de soluções futuras - ou distribuição de probabilidades - que representa diferentes cenários possíveis para a variável hidrológica.

Quanto à classificação das previsões, de uma maneira geral estas podem ser consideradas de curto ou longo prazo. As primeiras se referem às previsões em *tempo real* e são aquelas cuja antecedência varia de poucas horas até alguns dias, enquanto que as de longo prazo, também conhecidas por *sazonais*, possuem antecedência na ordem de várias semanas ou meses (Collischonn e Tucci, 2005). Quando o horizonte é de longo prazo, o uso da previsão hidrológica pode gerar benefícios para o gerenciamento dos recursos hídricos e na minimização das incertezas inerentes ao clima futuro (e.g. Wood *et al.*, 2002; Silva *et al.*, 2006; Allasia, 2007). Já para o curto prazo, esta técnica pode ser empregada para o conhecimento das vazões afluentes para controle operacional de reservatórios e otimização da produção de energia (e.g. Mine e Tucci, 1999; Andreolli *et al.*, 2006, Bravo *et al.*, 2008), bem como para a previsão de cheias (e.g. Pedrollo, 2000).

Particularmente, segundo Moore *et al.* (2005) e WMO (2011), a previsão hidrológica é um elemento fundamental para a gestão de inundações, uma vez que medidas estruturais, como diques e reservatórios de amortecimento, ou de caráter preventivo, a exemplo de políticas de planejamento territorial, não são completamente efetivas. Esta técnica é usualmente empregada como instrumento

necessário para a emissão de avisos prévios em sistemas de alerta contra cheias, o que permite a preparação das autoridades especialmente em situações onde existe a possibilidade de inundação.

2.2. Aspectos elementares relacionados a sistemas de alerta contra cheias

2.2.1. Definição

Os sistemas de alerta contra cheias (SAC) constituem um importante instrumento para suporte às ações realizadas pela Defesa Civil. Conforme descrito por WMO (2011), estes sistemas em geral permitem que procedimentos emergenciais possam ser iniciados em tempo hábil, a exemplo de mobilização de equipes de atuação, alerta sobre local e momento de ocorrência do evento, antecipação de medidas preparatórias, bem como evacuação e realocação de moradores situados em áreas sujeitas à inundação. Por serem cada vez mais reconhecidos como ferramentas indispensáveis na proteção de vidas humanas, os SAC têm recebido grandes investimentos no contexto internacional e conseqüentemente contribuído para a construção de cidades resilientes, isto é, com capacidade de suportar impactos causados por desastres naturais.

A operação de um sistema de alerta é realizada com base em uma previsão hidrológica em tempo real. Para tanto, torna-se necessária a implementação de um sistema de monitoramento por rede telemétrica, constituído por medição de nível e índices pluviométricos, além de um centro de previsão, capaz de receber e processar estas informações (Figura 1). Com posse deste sistema, o monitoramento é realizado com base em determinados níveis de referência, conforme apresentado a seguir (Tucci, 2005):

1) **Nível de acompanhamento:** nível a partir do qual é iniciado um acompanhamento da elevação do rio com certa periodicidade. Nesse momento, é alertada a Defesa Civil sobre a iminência de uma enchente, dando-se início à previsão de níveis em tempo real; 2) **Nível de alerta:** cota a partir da qual é previsto um nível crítico a ser atingido, dentro de um horizonte de tempo da previsão. A população recebe o alerta e as orientações provenientes da Defesa Civil, a qual passa a receber previsões com certa frequência juntamente com os órgãos municipais; 3) **Nível de emergência:** nível no qual ocorrem prejuízos materiais e humanos. Informações como o nível atual e previsto são repassadas para a população, bem como o intervalo provável dos erros, obtidos dos modelos.

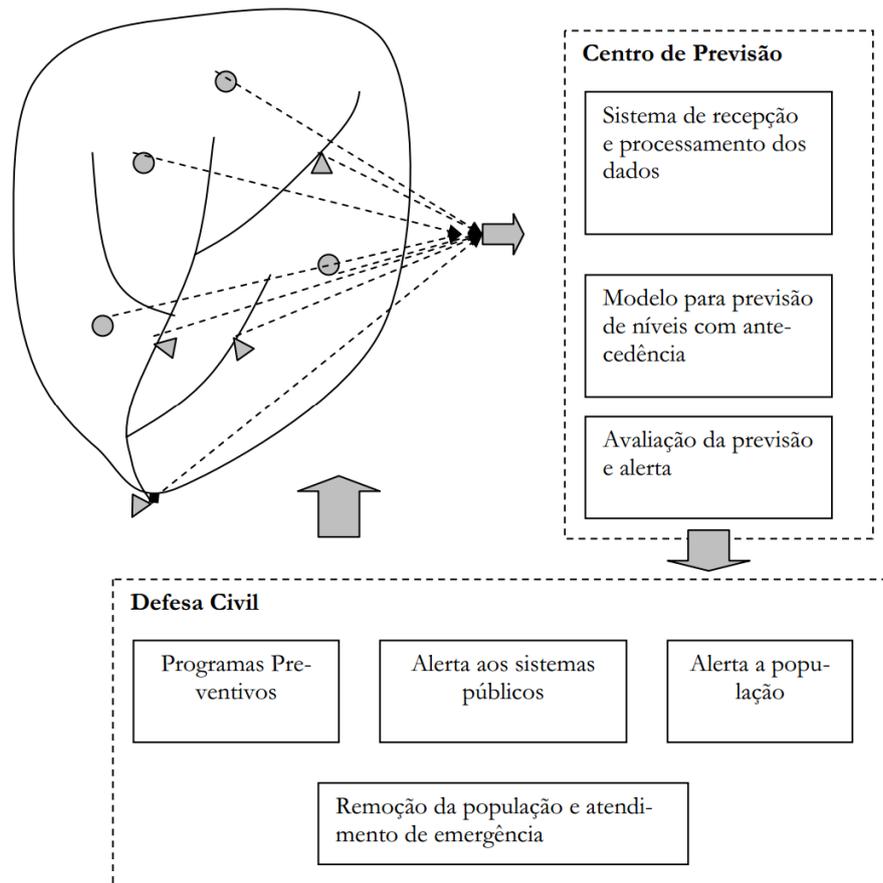


Figura 1. Representação esquemática de um sistema de alerta contra cheias. Fonte: Tucci (2005).

2.2.2. Exemplos de sistemas de alerta contra cheias em operação no Brasil

2.2.2.1. *Sistemas de alerta operados pela Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais - CPRM*

Conforme informações da CPRM¹, atividades de monitoramento e previsão hidrológica vêm sendo realizadas a mais de 30 anos através do Sistema de Alerta de Cheias no Brasil (SACE), sendo que em caso de risco de inundação, avisos são dados através da emissão de boletins para a Defesa Civil (nacional, estadual e municipal), incluindo o CEMADEN, prefeituras, além de outras entidades. Nesta abordagem, diversas publicações da literatura remetem à operação em alguns rios específicos, como é o caso do Sistema de Alerta do Rio Doce (Castilho *et al.*, 2001; Castilho e Davis, 2003), do Rio Caí (Pedrollo *et al.*, 2011) e do sistema formado pelos rios Solimões/Amazonas/Negro, na cidade de Manaus (Oliveira *et al.*, 2009), conforme breve descrição realizada a seguir.

¹Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=3054&sid=48>>

Pode se destacar, inclusive, a existência de outros rios monitorados - bem como em fase de implantação dos equipamentos - em bacias com alta vulnerabilidade a inundações, cujas informações já estão disponíveis para acompanhamento na página *web* do SACE-CPRM. Tais sistemas de alerta incluem os rios Acre, Branco, Parnaíba, Muriaé e Taquari/RS.

- *Sistema de Alerta dos rios Solimões/ Amazonas/ Negro*

O Sistema de Alerta para a cidade de Manaus, contemplando os rios Solimões, Amazonas e Negro, foi iniciado no ano de 1989 e vem sendo operado com o apoio da Agência Nacional das Águas (ANA) e do Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM). O alerta, cuja importância é relevante devido a uma significativa população ribeirinha ou situada às margens dos igarapés, é baseado no acompanhamento dos níveis, da precipitação e das previsões de chuva nos principais rios da bacia amazônica. Os cotogramas do rio Negro, em Manaus, por apresentarem um pico anual com ascensão longa - cerca de 235 dias - possibilitam previsões da cota máxima com antecedências pré-determinadas em 75, 45 e 15 dias (Oliveira *et al.*, 2009).

- *Sistema de Alerta do Rio Doce*

O Sistema de Alerta contra enchentes na bacia do Rio Doce foi financiado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), após uma grande cheia ocorrida na bacia durante o ano de 1997. Desde então, este sistema vem sendo operado através de uma parceria entre a CPRM, ANA e o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) com um total de 16 municípios beneficiados. Para algumas cidades consideradas estratégicas foram definidas cotas de alerta, em função do tempo de subida dos hidrogramas durante a cheia de 1997, além de cotas de inundação, sendo estas superiores em, no mínimo, 40 cm em relação às cotas estabelecidas como de alerta. Quanto às previsões realizadas, estas possibilitam antecedências que variam entre 6 e 24 horas, dependendo da localidade de interesse (Castilho *et al.*, 2001; Castilho e Davis, 2003).

- *Sistema de Alerta do Rio Caí*

A implantação deste sistema foi concebida através de um projeto denominado "Sistema de Acompanhamento e Alerta Hidrológico na Bacia do Rio Caí", o qual teve sua operação iniciada no ano de 2010. A porção baixa da bacia é frequentemente atingida por inundações que ocorrem em alguns municípios, especialmente em grandes áreas urbanas nas cidades de Montenegro e São Sebastião do Caí. Dentre as principais atividades estão o acompanhamento da evolução dos eventos hidrológicos através de 7 pontos de monitoramento, visualização da situação através da geração de relatórios com gráficos e tabelas e envio de boletins periódicos. As previsões realizadas garantem

uma antecedência de 10 horas em relação à cheia para os pontos de Passo Montenegro e Barca do Caí, situados respectivamente nas principais cidades anteriormente citadas (Pedrollo *et al.*, 2011).

2.2.2.2. Sistema de Alerta do Rio Itajaí

Conforme apresentam Tachini (2003) e Cordero *et al.* (2011), o sistema de alerta de cheias na bacia do Itajaí foi implantado em 1984 pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), cuja operação é de responsabilidade do Centro de Operação do Sistema de Alerta da Bacia do Rio Itajaí (CEOPS) vinculado à Universidade Regional de Blumenau (FURB). As previsões, cujas antecedências são de até 8 horas, são realizadas principalmente para as cidades de Blumenau e Gaspar, sendo mais recentemente contemplada a cidade de Rio do Sul. A operação do sistema se dá em função de duas situações básicas: normal e especial. Na situação normal, são realizadas diariamente duas leituras automáticas em cada estação telemétrica, com aferição dos observadores. Já a situação especial ocorre quando o nível do rio se eleva até a cota de atenção ou quando a precipitação média na bacia supera 60 mm em 24 horas, sendo as leituras realizadas em intervalo de tempo horário.

2.2.2.3. Sistema de Alerta de Cheias do Estado do Rio de Janeiro

Segundo Viana *et al.* (2009, 2011), a operação do Sistema de Alerta de Cheias do estado do RJ é realizada pelo Instituto do Meio Ambiente (INEA-RJ). O sistema foi implantado no ano de 2008 para a região da Baixada Fluminense e desde então tem sido expandido para Nova Friburgo, bacia hidrográfica do rio Macaé e Região Serrana do RJ, sendo esta última região devido aos eventos hidrológicos extremos ocorridos no ano de 2011. As informações hidrometeorológicas são monitoradas por um conjunto de mais de 50 estações telemétricas (entre instaladas e previstas para instalação), visando a detecção de possíveis situações de alerta e emissão da informação às autoridades competentes. As condições atuais do tempo são informadas através de boletins hidrometeorológicos, os quais incluem a previsão de chuva para as próximas 24 horas e o prognóstico para 72 horas.

2.3. Modelagem hidrológica como instrumento de previsão

Segundo Tucci (1998), inicialmente as previsões eram realizadas utilizando-se métodos gráficos ou empíricos a partir da observação dos níveis e vazões, o que deu espaço para a introdução de modelos matemáticos hidrológicos a partir do surgimento dos computadores, no final da década de 50. Na literatura existem diversos ordenamentos dos modelos em função das suas variadas

características (Tucci, 1998; Xu, 2002), porém de forma geral estes podem ser divididos em empíricos, de base física e conceituais.

Conforme descrevem os autores supracitados, os modelos empíricos, chamados também de "caixa preta", possuem parâmetros que não contêm um significado físico direto e que podem ser estimados através de ajuste dos valores calculados aos dados observados. Segundo Pedrollo (2000), tradicionalmente tem-se nesta classificação os modelos Autorregressivos (AR), de médias móveis (MA) e Autorregressivos de médias móveis (ARMA), incluindo também os modelos empíricos baseados em redes neurais.

Os modelos de base física utilizam as principais equações diferenciais do sistema físico para representar os processos que ocorrem na bacia. Já os modelos conceituais situam-se na posição intermediária entre os modelos anteriormente citados, sendo que neste caso os parâmetros processos físicos são representados por formulações matemáticas bastante simplificadas. Estas terminologias podem variar conforme a literatura verificada, sendo que em alguns casos os modelos de base física são interpretados como conceituais, enquanto que estes últimos são dados como semi-conceituais.

Em termos de discretização espacial dos modelos hidrológicos, uma outra classificação importante pode ser ainda mencionada: (i) modelos concentrados, os quais tratam as variáveis de entrada de forma homogênea na bacia hidrográfica, como um todo; (ii) modelos semi-distribuídos, com divisão em áreas específicas ou sub-bacias que são tratadas internamente de maneira homogênea e; (iii) modelos distribuídos, onde toda a bacia é dividida em unidades elementares em forma de pontos ou células em grade.

Em geral, os modelos concentrados utilizam apenas o tempo como variável independente. Já os modelos distribuídos permitem incorporar, ainda, a variabilidade espacial de parâmetros como uso do solo, cobertura vegetal e distribuição da chuva na bacia, porém usualmente estão associados a um custo computacional elevado. Alguns exemplos de modelos distribuídos conhecidos na literatura são o SHE (*Systeme Hydrologique Europeen* - Abbot *et al.*, 1986), TOPMODEL (Beven e Kirby, 1979), LISFLOOD (de Roo *et al.*, 2000), e o MGB (Collischonn e Tucci, 2001), sendo este último especialmente desenvolvido para bacias de grande escala ($> 10.000 \text{ km}^2$).

Ainda, é importante citar a classificação que distingue modelos estocásticos dos determinísticos. No primeiro caso, o conceito de probabilidade é introduzido na formulação do modelo, ou seja, a relação entre a entrada e a saída dos dados assume um comportamento estatístico.

Já no segundo caso, o modelo sempre produz o mesmo resultado para uma mesma variável de entrada, sendo ignorada a probabilidade de ocorrência das variáveis envolvidas.

2.4. Critérios utilizados na previsão hidrológica

A previsão em tempo real pode ser classificada de acordo com a antecedência desejada e as características da bacia de interesse (Tucci, 1998), sendo estas características descritas fundamentalmente através de dois critérios básicos. Tais critérios podem ser definidos pelo *tempo de concentração da bacia*, dado pela soma do tempo de resposta da mesma a um evento de chuva (T_r) com o tempo de propagação da onda ao longo da rede de drenagem (T_p), e pela *razão entre a escala da bacia e a escala do evento de chuva* (R_s), conforme descrito por Lettenmaier e Wood (1993):

- $T_f < T_r + T_p$ e $T_r \ll T_p$: quando a antecedência desejada (T_f) é menor do que o tempo de concentração da bacia, sendo este dominado pelo tempo de propagação da onda da cheia no canal, a previsão de hidrológica pode ser realizada a partir de observações feitas em pontos a montante do local desejado;
- $T_f < T_r + T_p$ e $T_r \gg T_p$: quando a antecedência desejada é menor do que o tempo de concentração, porém este último é dominado pelo tempo de resposta da bacia, as observações de chuva em tempo real provenientes de rede telemétrica devem ser utilizadas para a previsão, sendo estas informações incorporadas a um modelo chuva-vazão combinado a um modelo de propagação da onda de cheia.
- $T_f > T_r + T_p$: caso a antecedência máxima da previsão seja maior do que o tempo de concentração, faz-se necessária, além da chuva observada, a incorporação da chuva prevista com base na previsão meteorológica ou na extrapolação dos padrões de chuva verificados por radar;
- $R_s < 0,7$: no momento em que a abrangência espacial do evento de precipitação é menor do que cerca de 70% da área da bacia, a atribuição de uma chuva uniforme na previsão baseada em modelos chuva-vazão pode acabar prejudicando muito os resultados, uma vez que apenas uma parte da bacia é coberta pelo evento de precipitação. De forma geral, este é um problema particular de grandes bacias devido à maior escala espacial, porém ocorre também em bacias menores quando os eventos de precipitação são intensos e ocorrem de forma localizada.

Embora a razão R_s tenha como principal finalidade identificar a necessidade de uma maior ou menor densidade de pontos de observação das variáveis hidrológicas (i.e níveis/vazão e precipitação), além de identificar limitações no uso de modelos concentrados, a antecedência desejada e o tempo de concentração da bacia acabam sendo preponderantes na definição do método de previsão a ser adotado, especialmente no caso da modelagem hidrológica distribuída. Estão descritas, na sequência, algumas particularidades dos sistemas baseados na propagação da onda da cheia e na transformação chuva-vazão, sendo os sistemas baseados na chuva prevista discutidos mais adiante.

2.5. Sistemas de previsão baseados na propagação da onda de cheia

Sistemas de previsão fundamentados na propagação da onda de cheia se baseiam na observação do estado das variáveis hidrológicas (nível ou vazão) em pontos localizados a montante do ponto de interesse. Este método de previsão tem sido utilizado com sucesso em grandes sistemas fluviais, como o rio Tocantins (Solomon *et al.*, 1986) e o rio São Francisco (Paiva e Acioli, 2007), onde boa parte da onda de cheia se forma na porção superior da bacia e seu tempo de propagação é relativamente longo até o ponto desejado para a previsão.

Conforme descrevem Lettenmaier e Wood (1993), o deslocamento da onda de cheia pode ser estimado pela modelagem hidráulica através das equações completas de Saint Venant ou em suas simplificações, a exemplo do método de Muskingum, do modelo de equação difusa e da onda cinemática. Além disso, Tucci (1998) ressalta que nesta mesma abordagem figuram os modelos lineares de característica empírica, os quais estabelecem equações do tipo regressão múltipla entre as variáveis hidrológicas no tempo atual e no futuro. No Brasil, sistemas operacionais de alerta contra cheias normalmente adotam modelos lineares com fundamentação empírica. Este é o caso, por exemplo, do sistema de previsão do rio Doce (Castilho *et al.*, 2001; Castilho e Davis, 2003) e do rio Negro (Oliveira *et al.*, 2009), ambos operados pela CPRM, bem como do sistema de previsão do rio Itajaí (Cordero *et al.*, 2011), operado pela CEOPS.

De uma maneira geral, a vantagem dos métodos de previsão baseados na propagação de cheias é que estes normalmente apresentam os menores erros, pois dependem de informações que podem ser medidas com precisão relativamente elevada (Bartholmes e Todini, 2005). Na grande maioria dos casos este método é preferido em virtude da sua simplicidade (Collischonn *et al.*, 2005), além de fornecer bons resultados justamente por minimizar as incertezas associadas às variáveis de entrada no modelo de previsão.

A principal desvantagem destes métodos é que a antecedência máxima da previsão fica limitada pelo tempo de viagem da onda de cheia entre o local de observação e o ponto de interesse (Bartholmes e Todini, 2005). Embora em grandes rios, como o Tocantins e o São Francisco, o tempo de viagem possa ser de alguns dias ou até mais de uma semana, em rios menores, especialmente em regiões montanhosas, o tempo de deslocamento pode ser reduzido a poucas horas. Uma situação real pode ser verificada no modelo de previsão de cheias do rio Itajaí para a cidade de Rio do Sul / SC (Cordero *et al.*, 2011), no qual o curto tempo de viagem da onda de cheia limitou a antecedência das previsões ao máximo de 8 horas.

Para contornar esta limitação, alguns sistemas de previsão de cheias utilizam também dados de precipitação, que podem ser medidos em rede telemétrica com transmissão automática de dados ou por estimativas de radar meteorológico (Moore *et al.*, 2005), cuja técnica pode ser empregada quando o tempo de resposta da bacia promove um ganho considerável na antecedência necessária ao evento de cheia.

2.6. Sistemas de previsão baseados na chuva observada

Quando é desejada uma antecedência maior nas previsões de vazão ou de nível, torna-se necessária a incorporação de dados de precipitação (Bartholmes e Todini, 2005). Neste caso, a antecedência tende a ser proporcional ao tempo de concentração da bacia, uma vez que este corresponde ao tempo decorrido para a transformação da chuva em escoamento superficial em adição ao tempo de propagação da onda de cheia no canal.

Alguns estudos com modelos empíricos de característica estocástica, a exemplo dos baseados em redes neurais, têm demonstrado um bom potencial de aplicação na previsão de cheias a partir da introdução da chuva observada (Campolo *et al.*, 1999, Pedrollo, 2000). Um exemplo de previsão de níveis fundamentado na utilização de redes neurais é aquele implantado recentemente no sistema de alerta do rio Caí (Pedrollo *et al.*, 2011), cuja operação é realizada pela CPRM. Contudo, uma limitação comum dos modelos de característica empírica ocorre em função da grande quantidade de dados necessários para seu ajuste, cuja carência de informações pode produzir fortes incertezas em eventos não enquadrados no intervalo para o qual foram ajustados (Brun e Tucci, 2001; Dornelles, 2007).

Neste contexto, uma das abordagens consagradas para se obter previsões com base na chuva observada é aquela que utiliza modelos hidrológicos determinísticos, do tipo chuva-vazão conceituais. Estes modelos, embora de maior dificuldade de atualização em tempo real do que os empíricos (ver próxima seção), possivelmente representam melhor a não linearidade dos processos

hidrológicos, o que inclui a resposta da bacia mesmo a eventos de precipitação não considerados durante a calibração dos parâmetros (Brun e Tucci, 2001; Bertoni *et al.*, 1992). Este tipo de abordagem vem sendo estudada para utilização no Sistema de Alerta Contra Cheias do Estado do Rio de Janeiro, devido à limitação do tempo de concentração em algumas bacias de interesse (Viana *et al.*, 2009).

Apesar disso, a incorporação da chuva observada em sistemas operacionais de previsão de cheias ainda é pouco adotada no Brasil. Um dos principais obstáculos é a baixa densidade dos postos pluviométricos com transmissão automática e a baixa disponibilidade de dados de radares meteorológicos, o que afeta a estimativa da chuva média numa bacia e a sua distribuição espacial (Andreolli *et al.*, 2004; Fan *et al.*, 2014). Já em países com uma boa cobertura de precipitação estimada por radar, este tipo de previsão é bastante utilizado (Moore *et al.*, 2005).

Para que a modelagem chuva-vazão possa ser empregada na estimativa futura das variáveis hidrológicas é preciso informar o valor da precipitação ocorrida em todos os intervalos de tempo, inclusive durante a previsão. Até o instante inicial da previsão a chuva é conhecida, contudo, após este intervalo de tempo, a informação é inexistente. Neste caso, um procedimento comum é assumir o valor de chuva zero após a última observação (Bertoni *et al.*, 1992), porém a previsão não pode ser realizada para antecedências muito longas devido à tendência de subestimativa das vazões no tempo futuro (Tucci, 1998). Outra alternativa é a utilização de um critério de persistência, para o qual adota-se que a chuva observada no último intervalo de tempo anterior à previsão persiste nos intervalos subsequentes (Habets *et al.*, 2004).

Entretanto, mesmo que toda a quantidade de chuva correspondesse às observações, ou seja, a precipitação cessasse imediatamente após o início da previsão, o aumento da antecedência proporcionado pela técnica da modelagem chuva-vazão normalmente é acompanhado de uma menor qualidade na previsão hidrológica. Isso ocorre em grande parte devido ao surgimento de erros inerentes aos dados de entrada e ao modelo hidrológico em si, o que pode ser melhorado através de um procedimento conhecido por assimilação de dados.

2.7. Fundamentos e técnicas de assimilação de dados em tempo real

Quando modelos hidrológicos são utilizados para a previsão em tempo real geralmente há uma certa dificuldade em se obter uma reprodução adequada das variáveis hidrológicas de interesse. Aprimorar a precisão destes modelos configura-se um ponto chave na previsão de cheias (Weisse *et al.*, 2003), o que é fundamental quando se trata de um elemento integrante a um sistema de alerta contra enchentes.

Existem duas configurações principais que indicam momentaneamente o estado de operação do modelo hidrológico sob a ótica da previsão de vazões: (a) *off-line* e (b) *online*. O modo *off-line* é caracterizado por um procedimento de calibração cujos parâmetros podem ser estimados por ajuste através de dados históricos ou representativos, como eventos de enchentes ou períodos contínuos de observações (Tucci, 1998; Shamseldin e O'Connor, 2001). Neste caso, diz-se que o modelo está operando apenas em modo de "simulação", sem levar em consideração novas informações de campo disponíveis até o momento inicial da previsão (Serban e Askew, 1991).

De forma complementar, na configuração *online* o modelo passa a operar em modo de "previsão" e o ajuste dos parâmetros ou do estado do modelo é realizado em tempo real a partir das informações mais recentes, cujo procedimento é conhecido como assimilação de dados ou, simplesmente, por atualização (Refsgaard, 1997; Tucci, 1998). A ideia parte do princípio de que se os resultados do modelo diferem das observações em um dado momento específico, existe pequena possibilidade das estimativas da previsão coincidirem às observações futuras (Aubert *et al.*, 2003; Weisse *et al.*, 2003), sendo que a presença de discrepâncias no instante inicial acaba prejudicando as estimativas já nos primeiros intervalos de tempo da previsão (Meller, 2012). Basicamente, o procedimento de atualização tem como finalidade a minimização dos erros que ocorrem durante a inicialização do modelo, aproximando, na medida do possível, os resultados calculados aos observados (Figura 2).

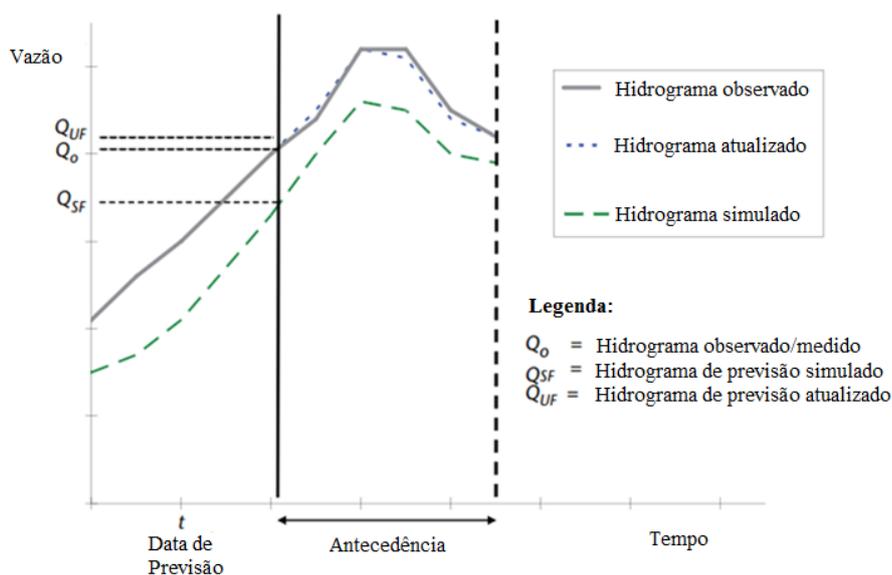


Figura 2. Correção dos resultados do modelo no instante inicial da previsão, com base na assimilação de dados (Adaptado de WMO, 2011).

A diferença entre os resultados do modelo e as observações de campo pode ser atribuída a diversos fatores. Usualmente, admitem-se erros associados às variáveis de entrada, má estimativa nos

parâmetros, problemas na inicialização e propagação das variáveis de estado (e.g. umidade do solo), representação inadequada dos processos físicos pelo modelo incluindo limitações na calibração em termos de insuficiência e qualidade de dados (Shamseldin e O'Connor, 2001; Vrugt *et al.*, 2005). Na maioria dos casos, as variáveis empregadas na etapa de atualização compõem-se da vazão ou do nível do rio, porém podem ser adotadas outras variáveis mensuráveis como a umidade do solo ou, até mesmo, níveis de água subterrâneos (Moore *et al.*, 2005).

Alguns métodos têm sido desenvolvidos no contexto da assimilação de dados (O'Connell e Clarke, 1981; WMO, 1992; Refsgaard, 1997; Babovic *et al.*, 2001), os quais podem ser empregados dependendo das variáveis a serem modificadas no processo: (i) Atualização das variáveis de entrada; (ii) Atualização nos parâmetros, (iii) Atualização nas variáveis de estado e; (iv) Atualização das variáveis da saída. Além disso, tais procedimentos de atualização podem ser realizados de forma manual, de caráter subjetivo e com base na experiência do previsor, como também através de técnicas de otimização (Serban e Askew, 1991). A Figura 3 representa um diagrama esquemático dos modos simulação e previsão que constituem a operação do modelo, incluindo os métodos de assimilação de dados acima mencionados.

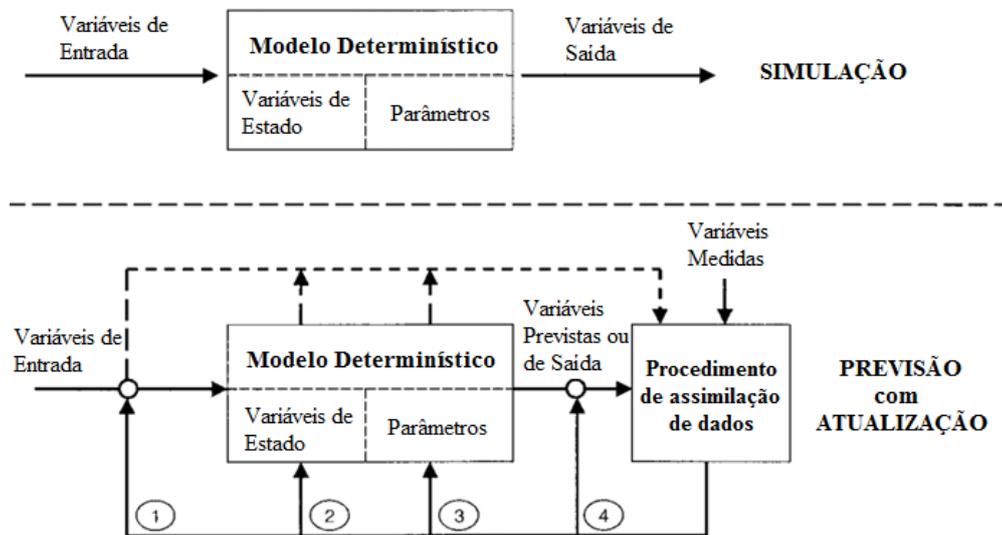


Figura 3. Diagrama esquemático dos modos "simulação" (off-line) e previsão (online), bem como identificação dos métodos de assimilação de dados. Adaptado de Refsgaard (1997) e Babovic *et al.* (2001)

Quando a atualização é feita levando em consideração as variáveis de entrada, é assumida a hipótese de que as incertezas associadas às variáveis de entrada são consideradas como a fonte de erro dominante no processo (Refsgaard, 1997; Babovic *et al.*, 2001). Usualmente, as variáveis atualizadas são a precipitação e a temperatura do ar, sendo que a técnica de atualização é baseada principalmente em métodos de tentativa e erro (Serban e Askew, 1991).

No caso de atualização dos parâmetros, é realizada uma nova calibração a cada momento em que novas informações hidrológicas tiverem sido disponibilizadas em tempo real (Meller, 2012). Entretanto, alguns modelos conceituais podem conter um número significativo de parâmetros para representar o comportamento dos processos, tornando impraticável a realização de um ajuste manual (Vrugt *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2012). Usualmente são adotadas técnicas de otimização automática a partir do cálculo de funções objetivo para toda a série de dados até o instante atual da previsão (O'Connell e Clarke, 1981), ou algoritmos de filtragem a exemplo do Filtro de Kalman, o qual possui como característica a flexibilidade na representação de diferentes modelos utilizados em hidrologia (Gomes e Mine, 1998). Contudo, alguns autores ressaltam que a atualização dos parâmetros em modelos conceituais não é muito aconselhável, uma vez que tais parâmetros não mudam significativamente em pequenos intervalos de tempo (Babovic *et al.*, 2001) e que sua alteração constante acaba compensando as deficiências na representação dos processos hidrológicos envolvidos (Moore *et al.*, 2005).

Quando o procedimento envolve a atualização das variáveis de estado, o objetivo é a modificação das variáveis que governam a geração de escoamento em um modelo chuva-vazão (Wohling *et al.*, 2006). Esta alteração é justificada pelo fato de que os erros na entrada do modelo são constantemente acumulados e transferidos para as variáveis que descrevem o estado dos reservatórios em modelos conceituais (Serban e Askew, 1991), a exemplo do volume de água disponível nos mesmos. Nesse sentido, Aubert *et al.* (2003) ressaltam a umidade do solo como elemento chave no processo de produção de escoamento, cuja atualização apresenta ganhos significativos na previsão principalmente quando realizada anteriormente a eventos de cheia.

Por fim, a atualização nas variáveis de saída parte do princípio de que erros de subestimativa ou superestimativa na série de vazões simulada no modelo hidrológico podem ser utilizados para prever erros futuros na previsão (Moore *et al.*, 2005). Neste caso, um novo modelo, também conhecido como de predição do erro, é calibrado a partir dos erros provenientes do modelo hidrológico original e posteriormente combinado com as vazões previstas, obtendo-se assim o valor corrigido para estas vazões (Xiong e O'Connor, 2002, Yu e Chen, 2005).

2.8. Considerações finais a respeito dos métodos de previsão baseados na propagação e na chuva observada

Até o momento, foram apresentados os tipos de previsão hidrológica que figuram nos sistemas de alerta contra cheias no cenário nacional. De modo geral, os sistemas que se baseiam na propagação da onda de cheia, principalmente com fundamentação empírica, são

preponderantemente utilizados no contexto brasileiro pela confiabilidade e simplicidade na sua implementação. Apesar disso, o sucesso na obtenção de antecedências de alguns dias - típico de rios extensos e pequena declividade - nem sempre é possível, o que pode tornar necessária a introdução da chuva observada no modelo de previsão. Entretanto, os sistemas fundamentados na modelagem chuva-vazão e que utilizam, exclusivamente, a precipitação observada até o momento inicial da previsão, acabam por incorporar informações completamente arbitradas nos intervalos de tempo subsequentes, ou seja, envolvendo a persistência da precipitação ou a atribuição de chuva zero ao longo de todo o horizonte da previsão.

Na medida em que se deseja estender ao máximo a antecedência a um evento de cheia, cuja informação é essencial para a efetividade das ações relacionadas a um sistema de alerta, estimativas futuras de chuva na bacia devem ser introduzidas no processo de previsão hidrológica.

Capítulo 3. Aspectos acerca do acoplamento de previsões meteorológicas na modelagem hidrológica

3.1. Introdução à previsão do tempo

A previsão do estado das variáveis que caracterizam as condições meteorológicas tem sua origem vinculada à previsão atmosférica, para a qual Silva *et al.* (2006) e Allasia (2007) ressaltam uma importante subdivisão dada através de dois termos distintos: previsão do tempo e previsão do clima. O primeiro termo se refere à estimativa das condições meteorológicas com até 14 dias de antecedência, enquanto que o segundo ocorre para horizontes mais longos, os quais podem se estender até vários meses no futuro.

Esta abordagem está diretamente relacionada ao conceito de previsibilidade atmosférica, ou seja, da capacidade da atmosfera em ser prevista (Allasia, 2007). Segundo Lorenz (1963, 1969), mesmo as técnicas de observação e de previsão da atmosfera sendo constantemente melhoradas, o sucesso frequente das mesmas era compartilhado por falhas significativas. Isto seria explicado pelo fato dos fenômenos atmosféricos possuírem um comportamento caótico e da impossibilidade de prever a evolução sequencial dos eventos meteorológicos para longos períodos no futuro, sendo o limite para esta previsibilidade de, aproximadamente, duas semanas.

No que se refere à previsão do tempo, de todas as variáveis relacionadas e que são disponibilizadas para o público em geral, a precipitação é provavelmente aquela que desperta o maior interesse (Damrath *et al.*, 2000; Ebert e McBride, 2000). Invariavelmente, em sistemas de previsão de cheias, estimativas de chuva para algumas horas ou poucos dias à frente são elementos fundamentais a serem conhecidos, cujo acoplamento na modelagem hidrológica requer o uso destas informações na forma de previsões quantitativas de precipitação (QPF).

3.2. Características acerca das previsões quantitativas de precipitação

Segundo Collier e Krzysztofowicz (2000), os rápidos avanços no entendimento dos processos relacionados à formação da precipitação, no desenvolvimento de ferramentas estatísticas bem como na própria modelagem atmosférica (Damrath *et al.*, 2000; Golding, 2000; Ebert e McBride, 2000; Simons e Hollingsworth, 2002) promoveram um grande interesse por parte da hidrologia nas previsões quantitativas de precipitação, durante a década de 90. Em termos gerais, a QPF pode ser formada através de métodos estocásticos, baseados na análise de séries temporais das variáveis climáticas com uso de técnicas como redes neurais e modelos de regressão (French *et al.*, 1992; Toth *et al.*, 2000), como também por métodos determinísticos, a partir dos resultados

provenientes da previsão numérica do tempo (NWP - *Numerical Weather Prediction*) (Golding, 2000; Ebert e McBride, 2000) ou da extrapolação dos padrões de chuva recentes identificados por radar meteorológico (e.g. Vivoni et al., 2006).

Atualmente, é bastante comum a adoção de métodos determinísticos como os NWP para a geração de previsões quantitativas de precipitação. Nos modelos de previsão numérica do tempo, também utilizados para a previsão de clima, os processos físicos que governam a circulação da atmosfera são representados pelas equações tradicionais da mecânica dos fluidos e da termodinâmica (Kalnay, 2003; Allasia, 2007; Cuo *et al.*, 2011; Golding, 2014), as quais são resolvidas sobre pontos de uma grade tridimensional com resolução horizontal e número de camadas verticais definidas (Figura 4). Além disso, os processos físicos que ocorrem em escalas muito pequenas como microfísica de nuvens ou fluxos convectivos são referidos como de "sub-grade", os quais são representados através de esquemas de parametrização (Kalnay, 2003). Na escala de abrangência global, estes modelos são denominados de Circulação Geral Atmosférica (MCGA), sendo que para a previsão do clima é utilizada também uma configuração "acoplada" considerando interações oceano-atmosfera (Chou *et al.*, 2000).

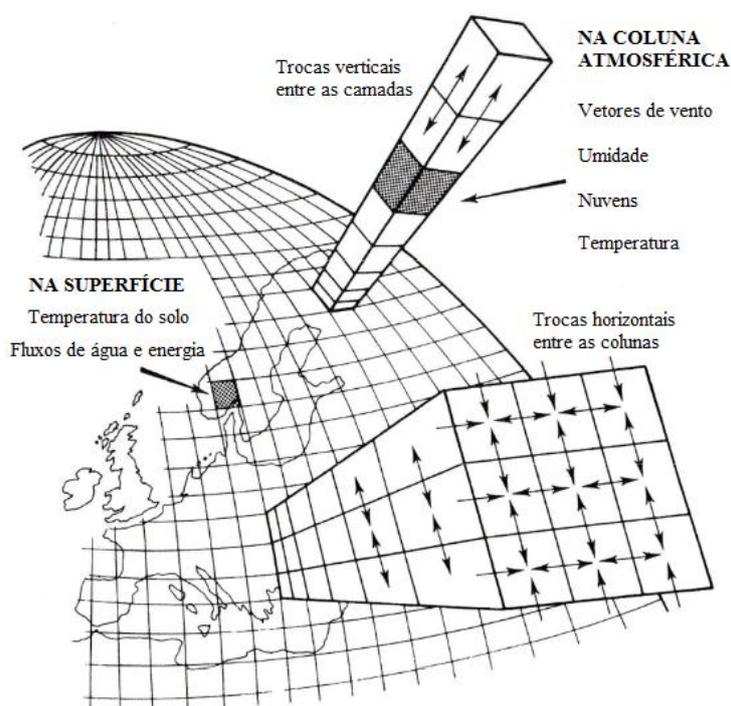


Figura 4. Grade regular tridimensional em um Modelo de Circulação Geral Atmosférico. Fonte: weather.unl.edu²

² Disponível em <http://weather.unl.edu/RCM/IDB_Mexico/PDF/gcm.pdf> Acesso em 13/04/2015.

No entanto, algumas considerações sobre a QPF gerada através da modelagem numérica do tempo são importantes para sua utilização na previsão de cheias. Embora os modelos globais sejam providos de resolução horizontal cada vez maiores, normalmente estes possuem grandes limitações quanto à representação de processos sob influência da variabilidade topográfica (Golding, 2014), o que muitas vezes os tornam incompatíveis com a escala de estudos hidrológicos (Allasia, 2007). Além disso, há de se considerar também a resolução temporal destes modelos, já que a resposta da bacia pode ocorrer em intervalos de tempo menores que um dia e depender do *timing* da precipitação (Shrestha *et al.*, 2013). Especialmente em bacias com esta característica, dados de chuva prevista fornecidos em intervalo de tempo horário podem ser importantes para caracterizar eventos extremos potencialmente causadores de inundação (Wetterhall *et al.*, 2011).

Sendo assim, para os casos em que a introdução da QPF é de particular importância para previsão de cheias, torna-se necessária a adequação da escala do modelo NWP à escala da bacia hidrográfica em estudo, podendo ser conseguida através do aumento da resolução espacial e temporal. Todavia, o custo computacional das previsões geradas através um modelo global de alta resolução é muito alto, o que torna necessária a realização de um processo conhecido por *downscaling* dinâmico (Allasia, 2007). Este processo é caracterizado pelo aninhamento de um modelo regional para uma determinada região de interesse, cujas condições de contorno podem ser obtidas a partir de um modelo de circulação atmosférica global (Golding, 2014).

Segundo Kalnay (2003), o modelo regional atua como uma espécie de "lente de aumento" sobre o modelo global, possibilitando interações entre fluxos atmosféricos de larga escala e forçantes de menor escala, a exemplo de orografia e variações na umidade do solo. Desta forma, o modelo regional tende a representar com um maior nível de detalhamento alguns fenômenos meteorológicos, o que acaba trazendo benefícios na escala da modelagem hidrológica (Meller, 2012). Ao longo dos últimos anos, estes modelos tem sido contemplados com resoluções espaciais cada vez mais finas, as quais atualmente são menores do que 5 km quando classificadas sob o critério de "alta resolução" (Golding, 2009, 2014).

Quanto à classificação das previsões de chuva, esta pode ser definida de acordo com a antecedência para qual é projetada, variando de poucas horas até alguns dias (Damrath *et al.*, 2000). A previsão realizada com antecedência de até 6h costuma ser chamada de *nowcasting* ou previsão de curtíssimo prazo (Toth *et al.*, 2000; Meller, 2012). Previsões com esta antecedência podem ser utilizadas para emitir alertas sobre a iminência de inundações bruscas (*flash floods*) a partir da incorporação da chuva observada por radar (Toth *et al.*, 2000), uma vez que as resoluções espacial e temporal são compatíveis com os processos convectivos de formação das tormentas (Golding,

2000). Conforme descrevem Golding (2000) e Cuo *et al.* (2011), a previsão com até 72 horas de antecedência é conhecida como de curto prazo. Porém, este horizonte é em algumas ocasiões definido até 48 horas, sendo que as previsões neste prazo usualmente oferecem uma boa identificação de eventos de maior escala, a exemplo daqueles associados a chuvas frontais. Na sequência, a previsão de médio prazo é considerada até 10 dias no futuro, situação em que predomina uma faixa de possíveis cenários de evolução atmosférica. Neste horizonte, as incertezas associadas já exercem uma grande influência na qualidade da chuva prevista, sendo que após 10 dias, a previsão já pode ser considerada de longo prazo.

Na literatura, constantemente a chuva é considerada como uma das variáveis meteorológicas mais difíceis de se conhecer no futuro (French *et al.*, 1992; Collier e Krzysztofowicz, 2000; Stensrud *et al.*, 2000; Golding, 2000; Ebert, 2001; Habets *et al.*, 2004), sendo que as melhorias relacionadas à previsão determinística não necessariamente trouxeram resultados muito promissores. Ebert *et al.* (2003), por exemplo, realizaram uma análise de modelos globais e regionais gerados a partir de 8 centros operacionais, através de um grupo de trabalho intitulado por *Working Group on Numerical Experimentation* (WGNE). As análises foram realizadas entre os anos de 1997 e 2000 em diferentes regiões do mundo, particularmente para os Estados Unidos, Austrália e Alemanha. Os autores concluíram que, embora para as latitudes médias a habilidade de previsão dos modelos tenha apresentado alguns resultados até interessantes, melhorias significativas na QPF em função dos avanços realizados sobre os NWP não puderam ser claramente identificadas.

Embora esforços significativos tenham sido realizados no contexto das previsões quantitativas de precipitação, o paradigma criado pela existência de incertezas e diferentes cenários de evolução da atmosfera acabou culminando em questionamentos a respeito da sua utilização em hidrologia, principalmente para situações particulares como a ocorrência de eventos extremos. Neste caso, previsões determinísticas podem não atender as expectativas da sociedade por alertas confiáveis (Krzysztofowicz, 2001), o que tem motivado a adoção de conjunto para geração de previsões com caráter probabilístico.

3.3. Previsões probabilísticas do tempo

Conforme verificado nos últimos quarenta anos, ainda não existe uma solução que possibilite gerar previsões do tempo totalmente confiáveis (Allasia, 2007), o que pode ser atribuído a limites teóricos, tecnológicos e, inclusive, econômicos (Krzysztofowicz, 2001). Usualmente não se dispõe de um conhecimento pleno do estado inicial da atmosfera no início da previsão (Kalnay, 2003), o que se

deve a deficiências relacionadas à rede de observação e aos métodos utilizados para assimilação de dados nos modelos (Golding, 2000; Wandishin *et al.*, 2001).

Algumas dificuldades inerentes à representação realística da atmosfera e à capacidade computacional necessária para lidar com a complexidade do sistema devem também ser consideradas. Atualmente, sabe-se que os processos físicos que governam a evolução das condições atmosféricas não são perfeitamente representados pelos modelos numéricos de previsão do tempo (Mendonça e Bonatti, 2002), dada a grande variação das escalas espacial e temporal vinculada aos fenômenos meteorológicos (Bustamante, 2009). De forma geral, a estrutura física de um modelo é sujeita a grandes erros na representação da dinâmica e fluxo da atmosfera, na parametrização dos processos convectivos e, inclusive, nos processos influenciados pela topografia da superfície (Ebert e McBride, 2000; Wandishin *et al.*, 2001). Inevitavelmente, erros que ocorrem em escala menor do que a de truncamento do modelo - a nível de sub-grade - acabam se propagando para dimensões maiores, influenciando significativamente as previsões do tempo (Palmer, 1999; Leutbecher e Palmer, 2008).

Além dos fatores limitantes à previsibilidade supracitados, outro aspecto importante refere-se às considerações de Lorenz (1963, 1969), o qual percebeu que uma pequena perturbação nas condições iniciais da atmosfera poderia levar a uma grande diferença após um certo intervalo de tempo, a partir do momento de integração inicial do modelo. Entre outras palavras, Kalnay (2003, p. 25) resume as conclusões de Lorenz da seguinte maneira: "*mesmo que as observações e os modelos fossem perfeitos, a natureza caótica da atmosfera limitaria a sua previsibilidade em aproximadamente duas semanas*".

O comportamento caótico da atmosfera, aliado à inconsistência no estado inicial e à imperfeição na representação física dos processos envolvidos, torna necessária a substituição de uma previsão determinística por um conjunto de diferentes previsões de maneira a refletir as incertezas associadas (Kalnay, 2003). Nesse contexto, surge à tona o conceito de "*Ensemble Forecasting*", na qual várias previsões são realizadas a partir da introdução de perturbações nas condições iniciais ou na própria formulação dos modelos de previsão do tempo (Palmer, 1999; Kalnay, 2003). Os sistemas de previsão por *ensemble* (EPS) partem do princípio de que o conhecimento aproximado do estado da atmosfera, somado às deficiências do modelo, acarreta em erros que crescem rapidamente à medida em que aumenta o horizonte de previsão (Molteni *et al.*, 1996; Leutbecher e Palmer, 2008).

Fundamentalmente, os EPS admitem a presença de incertezas inevitáveis que devem ser representadas através de uma função densidade de probabilidade (PDF - *Probability Density Function*), a qual é originada a partir da análise do erro nas condições iniciais (Molteni *et al.*, 1996). As

diferentes previsões, também chamadas de membros, são produzidas a partir de amostras da PDF inicial - ou incerteza inicial - (Stensrud *et al.*, 2000), sendo que as propriedades da PDF nos intervalos subsequentes são descritas pelas estatísticas da amostra calculadas na integração do modelo (Molteni *et al.*, 1996). Deste modo, a finalidade de uma previsão por conjunto é prever, de maneira quantificável, a densidade de probabilidade do estado da atmosfera nos instantes futuros (Buizza, 1997; Leutebecher e Palmer, 2008).

Para ilustrar esta abordagem, na Figura 5 é apresentado um diagrama esquemático onde a PDF_0 representa a densidade de probabilidade gerada em função das incertezas iniciais. A partir da melhor estimativa destas condições, uma única previsão determinística é obtida, a qual superestima significativamente o evento observado. Um *ensemble* de previsões "perturbadas" é então formado pelas diferentes condições iniciais, gerando uma estimativa da probabilidade dos estados futuros (PDF_t). Sendo assim, o valor máximo da PDF indica uma maior probabilidade de ocorrer o estado da atmosfera que é representado por este mesmo valor, para um intervalo de tempo qualquer.

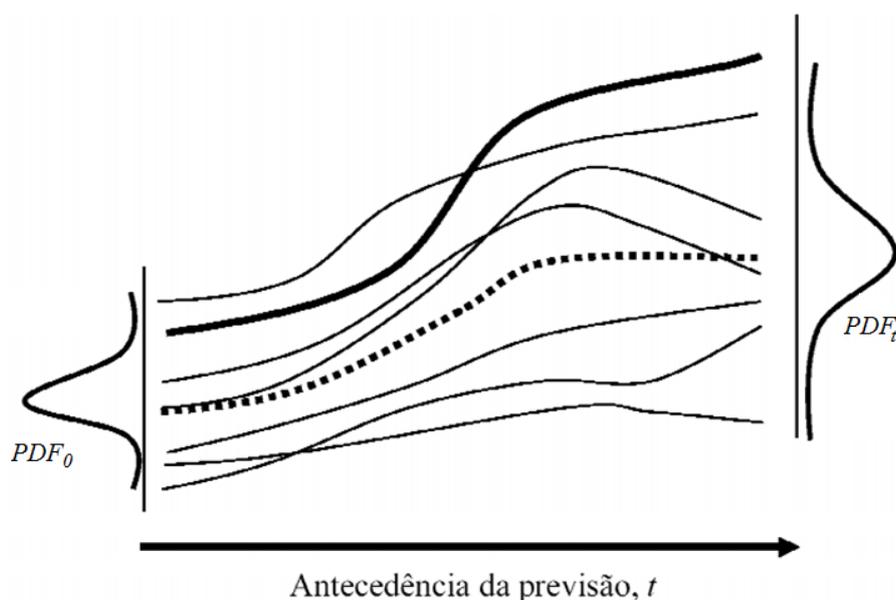


Figura 5. Representação esquemática da previsão por conjunto, formulada em termos de uma Função Densidade de Probabilidade (PDF). Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2006) e Buizza³

A técnica de previsão de tempo por ensemble surgiu como uma tentativa de aumentar a previsibilidade dos modelos atmosféricos (Mendonça e Bonatti, 2002). Em geral, admite-se que a média dos conjunto deve fornecer resultados melhores do que os membros individuais após os primeiros dias, uma vez que os erros das previsões acabam por se cancelar mutuamente (Tracton e

³ Disponível em: <http://nwmstest.ecmwf.int/staff/roberto_buizza/Work/Selected_articles/Ensemble_Prediction/index.html>. Acesso em 21/05/2014.

Kalnay, 1993; Kalnay, 2003). Além disso, estes sistemas não são fundamentados em prever somente o cenário de previsão mais provável, mas sim a probabilidade de ocorrência de qualquer evento (Buizza, 2008).

A geração dos membros da previsão por conjunto pode ser realizada através da perturbação das condições iniciais de uma análise central, denominada de previsão ou membro de controle (Buizza, 1997; Stensrud *et al.*, 2000; Cloke e Pappenberger, 2009). A distância média entre estes membros e a previsão de controle (ou a média do conjunto) é definida pelo termo espalhamento - *spread* (Buizza, 1997; Kalnay, 2003), o qual pode ser considerado um indicativo da habilidade de previsão dos modelos (Toth e Kalnay, 1995). Usualmente, um maior espalhamento sugere a existência de uma maior incerteza e menor confiabilidade na previsão (Ebert, 2001), porém o realismo do mesmo depende da maneira como as incertezas são representadas nos EPS (Leutbecher e Palmer, 2008).

Neste sentido, as perturbações devem representar o espaço amostral de erros de uma maneira realística, embora possa levar a custos computacionais significativos e limitar o número de membros gerados (Toth e Kalnay, 1995). Diversas técnicas de perturbação foram desenvolvidas a partir da identificação das direções no espaço onde predominam fortes instabilidades dinâmicas, uma vez que estas tendem a dominar o erro na previsão após um ou dois dias (Molteni *et al.*, 1996). Dentre os métodos de perturbação das condições iniciais podem ser citados o *Breeding Growing Vectors* (Toth e Kalnay, 1995), *Singular Vectors* (Buizza e Palmer, 1995), *Empirical Orthogonal Functions - EOF* (Zhang e Krishnamurti, 1999), além de técnicas mais recentes como o *Ensemble Transform Kalman Filter* (Wei *et al.*, 2006).

Normalmente se admite que os erros nas condições iniciais são dominantes em relação àqueles relacionados à representação física do modelo, assumindo desta forma que os mesmos são "perfeitos" (Buizza *et al.*, 1999b). Contudo, no que se refere à perturbação das condições iniciais a partir de um único modelo, Stensrud *et al.* (2000) chamam a atenção para a possibilidade de grande correlação dos erros sistemáticos entre os membros, o que tende a desviar todas as previsões em relação à evolução real da atmosfera. Wandishin *et al.* (2001), por exemplo, mostraram que a configuração do modelo (física) pode ser mais importante do que a perturbação na condição inicial, sendo que em seu estudo de caso somente 5 membros - de diferentes parametrizações físicas - foram necessários para se obter uma melhor habilidade na previsão, frente a um modelo determinístico de alta resolução. Já Bustamante (2009) identificou que a perturbação de física diminui tendências na superestimativa ou subestimativa das previsões de precipitação, se comparado à abordagem das condições iniciais. Apesar das constatações feitas pelos autores supracitados, é

importante ressaltar que as as mesmas se referem a estudos voltados ao horizonte de curto prazo, porém não podem ser completamente ignoradas mesmo quando o foco passa a ser de médio prazo (Buizza *et al.*, 1999b).

Os membros de uma previsão por conjunto podem ser também formados a partir de modelos atmosféricos de diferentes centros de previsão do tempo, cujo termo é conhecido como *Poor Man's Ensemble* (Arribas *et al.*, 2005). Neste caso, além do conjunto ser produzido sem grandes custos computacionais, são consideradas incertezas nas condições iniciais e na formulação dos modelos devido à variação nos dados de entrada e às diferentes metodologias utilizadas nas previsões (Ebert, 2001). Ainda, uma outra possibilidade de redução no custo computacional reside na incorporação dos chamados *Lagged Averaged Forecast Ensembles* (LAFs), os quais podem ser gerados através da combinação entre as previsões recentes e aquelas feitas em tempos anteriores (Hoffmann e Kalnay, 1983 apud Dietrich *et al.*, 2008). Este tipo de técnica pode contribuir para o aumento de espalhamento no conjunto, consequentemente reduzindo a subdispersão do sistema (Machado *et al.*, 2010).

A previsão meteorológica por conjunto tem sido utilizada há mais de 20 anos em centros operacionais como o NCEP - *National Centers of Environmental Prediction* (Tracton e Kalnay, 1993) e o ECMWF - *European Center of Medium Range Weather Forecasts* (Molteni *et al.*, 1996). Em outubro de 2001, o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) iniciou operacionalmente a previsão de tempo por *ensemble*, utilizando um modelo global composto por 14 membros de condições iniciais perturbadas (Mendonça e Bonatti, 2002). Além disso, pelo menos outros dez centros de previsão localizados em diversos países rodam EPS globais com antecedências de até 10 dias (Buizza, 2008).

De maneira geral, diversos estudos têm mostrado que a técnica de *Ensemble Forecasting* melhora a habilidade dos modelos de previsão do tempo, incluindo melhorias nas previsões quantitativas de precipitação (e.g. Du *et al.*, 1997; Buizza *et al.*, 1999a; Ebert, 2001).

3.4.Sistemas de previsão hidrológica com base na chuva prevista: uma abordagem determinística

Sistemas de previsão de cheias baseados na QPF utilizam modelos hidrológicos chuva-vazão, cuja condição de contorno é dada pela chuva observada ou estimada por radar, até o instante atual, e a chuva prevista a partir deste instante até o final do horizonte da previsão (Habets *et al.*, 2004). Além de possibilitar antecedências maiores, a introdução da QPF pode ser também interessante quando o tempo decorrido entre o início da precipitação e a resposta da bacia é

relativamente pequeno (Toth *et al.*, 2000; Koussis *et al.*, 2003), situação em que a chuva observada em tempo real pode não ser suficiente para se fazer uma previsão da cheia com a antecedência apropriada. A Figura 6 mostra um exemplo do acoplamento da chuva prevista após o último registro observado e o comparativo em relação à hipótese de chuva zero, ou seja, quando esta é simplesmente ignorada para os intervalos de tempo futuros.

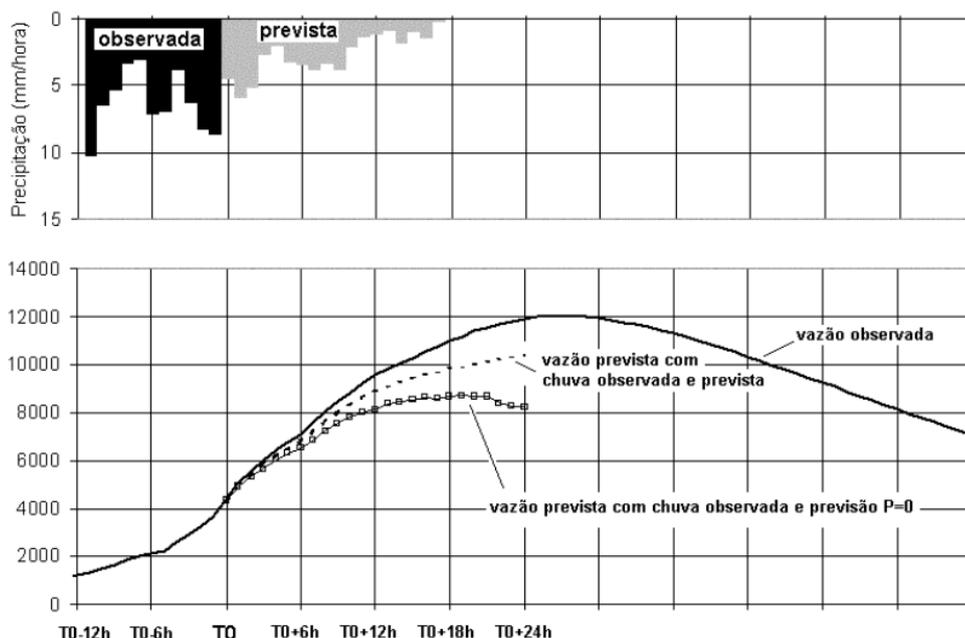


Figura 6. Previsão de chuva acoplada à previsão de vazão. (Fonte: Allasia, 2007)

No Brasil, previsões quantitativas de precipitação baseadas em modelos meteorológicos tem se tornado cada vez mais utilizadas com o intuito de estender a antecedência da previsão de vazão afluente a reservatórios (Collischonn *et al.*, 2005; Tucci *et al.*, 2008; Bravo *et al.*, 2008), se tornando inclusive operacionais no caso do Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS (Castanharo *et al.*, 2007; Collischonn *et al.*, 2007). Entretanto, as previsões de precipitação são praticamente inutilizadas no caso dos sistemas de alerta brasileiros, normalmente associado a uma certa carência de informações de chuva e vazão em tempo real com resolução espacial e temporal adequadas (Meller, 2012).

Algumas pesquisas destacaram os benefícios da incorporação da QPF determinística na previsão de cheias, porém com ressalvas. Benoit *et al.* (2003), aplicando a QPF nas cabeceira dos rios Danúbio, Reno e Po, na região dos Alpes, verificaram que as previsões de vazão geradas poderiam ser utilizadas como um alerta inicial desde que erros na parametrização de microfísica do modelo meteorológico fossem levados em consideração. Ainda na região dos Alpes, Verbunt *et al.* (2006) identificaram que erros no *timing* e na quantidade de precipitação conduziam à não detecção do evento de cheia ou à emissão de alarmes falsos, concluindo que seria necessária uma metodologia de

previsão para quantificar as incertezas inerentes ao modelo NWP utilizado. Collischonn *et al.* (2005), analisando a QPF como subsídio para a previsão hidrológica no rio Uruguai, atentaram para erros de posicionamento nas previsões de chuva adicionalmente aos erros de *timing*, indicando que ambos devem ser explorados para melhor conhecimento das incertezas associadas. A partir do desenvolvimento de um sistema de previsão de cheias em uma grande bacia urbana de Atenas, na Grécia, Koussis *et al.* (2003) apontaram que, embora promissora, a integração de modelos hidrometeorológicos não se mostrou suficientemente adequada mesmo através de procedimentos para correção de erros na quantidade da QPF.

Dentre os estudos mais recentes feitos no cenário brasileiro, Kruk *et al.* (2013) acoplaram previsões quantitativas de precipitação ao modelo hidrológico DHSVM para uma bacia com área de 251 km² localizada na Serra do Mar, no estado de São Paulo. As previsões de chuva foram geradas para três eventos extremos através do modelo regional ETA, cuja resolução horizontal foi amplificada (10 km para 2 km) por meio de um procedimento de *downscaling*. Os resultados indicaram que o aumento da resolução do modelo regional não ocasionou efeitos significativos nas previsões hidrológicas, sendo que a qualidade das mesmas dependeu prioritariamente da qualidade da chuva prevista.

De forma geral, as pesquisas apresentadas demonstram obstáculos pertinentes em relação ao uso restrito de previsões determinísticas de precipitação no contexto de sistemas de alerta contra cheias, o que indiretamente remete às considerações de Krzysztofowicz (2001) de que "não deveria existir outro tipo de previsão a não ser a probabilística". Segundo Arduino *et al.* (2005), a emissão de um alerta deve estar associada a uma medida de incerteza para que tenha, de fato, um valor agregado, enquanto Moore *et al.* (2005) acrescentam que um dos grandes desafios envolve o desenvolvimento de metodologias capazes de incorporar as incertezas no processo de tomada de decisão. Na tentativa de contornar estes obstáculos, um grande número de centros operacionais e de pesquisa, em diversas aplicações e escalas temporais, tem direcionado o foco para a abordagem de conjunto (Pappenberger *et al.*, 2008; Cloke e Pappenberger, 2009; Thielen *et al.*, 2009b), a qual tem sido consagrada como a única forma aceitável em se adquirir maiores antecedências na previsão de cheias (de Roo *et al.*, 2003; Pappenberger *et al.*, 2011).

3.5. Sistemas de previsão hidrológica com base na chuva prevista: uma abordagem probabilística através do uso de *ensembles*

3.5.1. Contextualização e conceitos

O acoplamento hidrometeorológico com abordagem probabilística, no contexto da previsão de cheias em tempo real, começou a ser utilizado a partir da década de 90, nos Estados Unidos. Segundo Krzysztofowicz (1998), um projeto piloto foi realizado entre os anos de 1991 e 1996 através da Universidade de Virgínia em parceria com o *Weather Service Forecast (WSF)*, na Pensilvânia, e o *River Forecast Center (RFC)*, em Ohio, com o objetivo de produzir tanto previsões quantitativas de precipitação como previsões de níveis de uma maneira probabilística. Para tanto, uma teoria Bayesiana foi utilizada para decomposição das incertezas provenientes do modelo hidrológico e das informações meteorológicas, as quais foram quantificadas e posteriormente combinadas na forma de uma função densidade preditiva. Esta metodologia permitiu a identificação da probabilidade de excedência em relação ao nível previsto com os métodos convencionais (determinísticos), o que demonstrou perspectivas à tomada de decisão e ao mesmo tempo desafios quanto à interpretação e comunicação dos novos resultados aos usuários finais.

Já na Europa, os impactos de cheia causados pelos rios Mosa (*Meuse River*) e Reno no ano de 1995, sobre grandes áreas no Reino Unido, em 1999, e na bacia dos rios Elba (*Elbe River*) e Danúbio, em 2003, destacaram a necessidade de melhoria dos sistemas de previsão até então existentes (de Roo *et al.*, 2003; Arduino *et al.*, 2005; Thielen *et al.*, 2009a). Nesse sentido, estudos pioneiros feitos por de Roo *et al.* (2003), através de um projeto intitulado EFFS - *European Flood Forecasting System*, partiram de questionamentos sobre qual seria a habilidade dos modelos previsão caso fossem utilizados durante a cheia do rio Mosa em 1995, dada a utilização de produtos meteorológicos como os EPS. Os autores concluíram que, para a cidade de Borgharen na Holanda (21.300 km²), foi possível obter uma boa representação do evento até o 5º dia após o início da previsão, além de uma avaliação probabilística de picos extremos para horizontes na faixa entre 5 e 10 dias.

Os resultados promissores obtidos levaram ao surgimento dos HEPS - *Hydrological Ensemble Prediction Systems* (e.g. de Roo *et al.*, 2003; Gouweleeuw *et al.*, 2005; Rouling e Vannitsen, 2005; Cloke e Pappenberger, 2009; Cloke *et al.*, 2013), promovendo um grande número de pesquisas e aproximando especialmente as áreas de hidrologia e meteorologia. A interface entre estas diferentes áreas tem sido promovida desde o ano de 2004 através da iniciativa HEPEX – *Hydrologic Ensemble Prediction EXperiment* (Schaake *et al.*, 2007; Demeritt *et al.*, 2007; Buizza, 2008; Cloke e Pappenberger, 2009), na qual a comunidade científica expressa as experiências vivenciadas através do uso de EPS

na previsão de eventos hidrológicos, incluindo situações de caráter operacional. Ao longo dos últimos anos, a iniciativa HEPEX tem concentrado esforços no desenvolvimento de projetos - *Test bed projects* - em diversas áreas afins e em várias partes do mundo, buscando obter resultados de uma maneira rápida através do compartilhamento de dados e informações. No Brasil, um destes projetos tem sido implementado na bacia do rio Grande, nos estados de São Paulo e Minas Gerais, com foco direcionado ao planejamento e operação de reservatórios em usinas hidrelétricas (Tucci *et al.*, 2008).

Fundamentalmente, os sistemas de previsão de cheias por *ensemble*, ao invés de disponibilizarem apenas uma previsão determinística pontual, proporcionam uma análise de caráter probabilístico através da geração de diferentes cenários hidrológicos para os instantes futuros (Demeritt *et al.*, 2007; Cloke *et al.*, 2013). Além de permitir a visualização do cenário mais provável dentre as previsões realizadas, estes sistemas têm a vantagem de possibilitar a identificação de eventos raros e extremos de cheia (Buizza, 2008; Cloke e Pappenberger, 2009; Weterhall *et al.*, 2013) a partir da avaliação individual dos membros gerados na previsão (Pappenberger *et al.*, 2011). Particularmente neste caso, Thielen *et al.* (2009a) afirmam que hidrogramas contendo apenas a estimativa de vazão, a cada instante no futuro não necessariamente representam previsões de cheia, devendo estar associados a um determinado limiar de excedência (Figura 7).

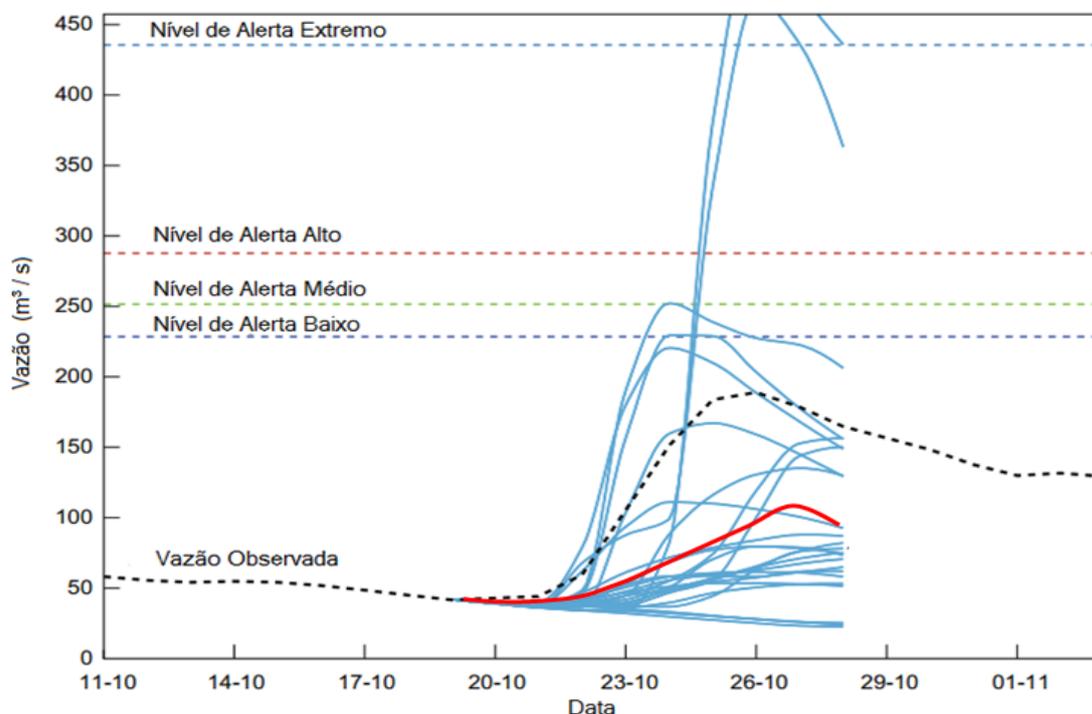


Figura 7. Hidrograma no formato de "spaghetti". A linha vermelha representa a previsão determinística, enquanto que as linhas azuis indicam os membros da previsão hidrológica por conjunto (Adaptado de Cloke e Pappenberger, 2009).

O conjunto - ou *ensemble* - de previsões hidrológicas é produzido através da propagação das fontes de incerteza através do sistema (Krzysztofowicz, 2001; Arduino *et al.*, 2005; Pappenberger *et*

al., 2005; Xuan *et al.*, 2009), o qual geralmente é representado através de um EPS como informação de entrada a um modelo hidrológico (Cloke e Pappenberger, 2009). Os HEPS tem sido desenvolvidos para utilizar diretamente *ensembles* meteorológicos globais ou regionais (Buizza, 2008), sendo comum, nesse caso, a adoção de uma classificação baseada no horizonte associado ao EPS. Nesse sentido, o termo designado por curto prazo tem sido utilizado para horizontes de, no máximo, 72 horas (Thirel *et al.*, 2008; Cuo *et al.*, 2011; Meller, 2012; Abaza *et al.*, 2013), enquanto que o médio prazo é usualmente referido a horizontes que se estendem até 10 dias no futuro (de Roo *et al.*, 2003; Gouweleeuw *et al.*, 2005; Rouling e Vannitsen, 2005; Voisin *et al.*, 2011). Em geral, as incertezas são amplificadas na medida em que cresce o horizonte de previsão (Arduino *et al.*, 2005), devendo ser consideradas de acordo com o benefício desejado (Figura 8).

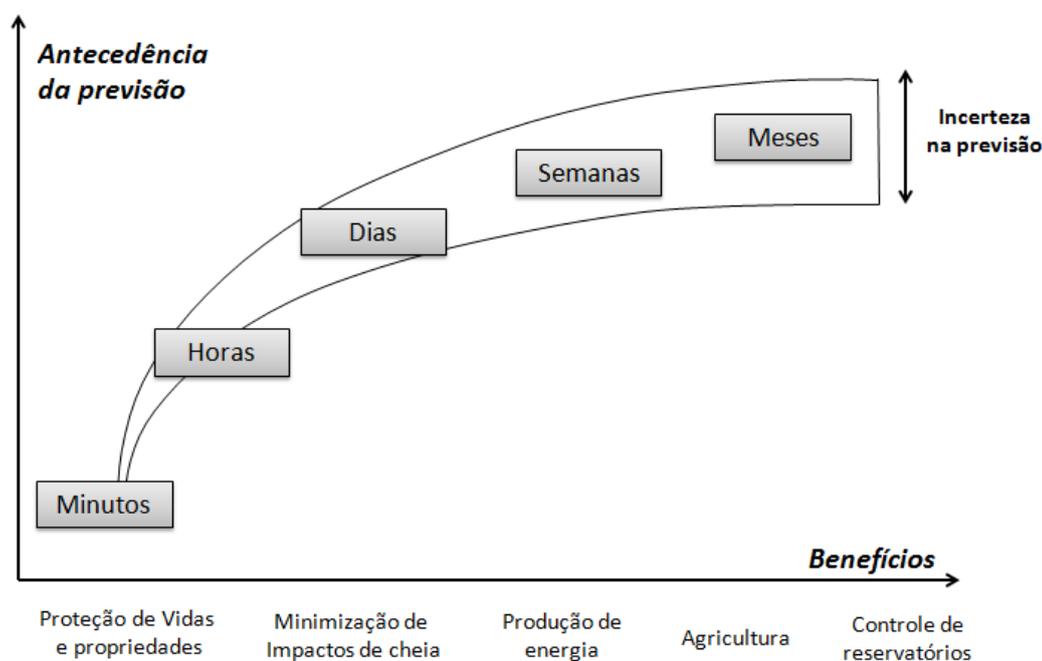


Figura 8. Representação do aumento das incertezas de acordo com o horizonte de previsão. Fonte: Adaptado de NOAA - NWS⁴

Além das incertezas relacionadas às previsões meteorológicas, admite-se também a presença daquelas associadas aos modelos hidrológicos, as quais podem estar vinculadas a erros nas condições iniciais, estimativa dos parâmetros, bem como na representação dos processos físicos envolvidos (Pappenberger *et al.*, 2005; Xuan *et al.*, 2009; Cloke *et al.*, 2013). Apesar de não se mostrar muito clara a relevância de cada um destes componentes (Schaake *et al.*, 2007), a previsão de precipitação com base na modelagem atmosférica tem sido por diversas vezes apontada como a fonte dominante de

⁴Disponível em <http://www.nws.noaa.gov/ohd/hrl/hsmb/hydrologic_ensembles/index.html> Acesso em 11/06/2014.

incertezas (Roulling e Vannitsen, 2005; Pappenberger *et al.*, 2008; Davolio *et al.*, 2013; Shrestha *et al.*, 2013), principalmente quando o horizonte é superior à 2 ou 3 dias (Thielen *et al.*, 2009a; Cloke e Pappenberger, 2009; Ramos *et al.*, 2010).

3.5.2. Particularidades e aplicações dos Hydrological Ensemble Prediction Systems em estudos sobre previsão de cheias

Existem na literatura diversas abordagens que envolvem o uso de EPS na área da previsão hidrológica, especialmente quando as previsões meteorológicas são levadas em consideração como a principal fonte de incerteza. Para a realização destas pesquisas, Cloke e Pappenberger (2009) citam que um procedimento comum é a utilização da técnica de *hindcasting*, na qual são realizadas previsões para um período específico no passado englobando um evento singular, a exemplo de uma cheia, ou um período longo de forma a possibilitar avaliações estatísticas das previsões.

Alguns estudos tem verificado a aplicabilidade de *ensembles* globais de médio prazo na previsão de cheias, em comparação ao uso de previsões determinísticas. Complementarmente aos estudos no rio Mosa feitos por de Roo *et al.* (2003), Gouweleeuw *et al.* (2005) realizaram *hindcasts* para a cheia no rio Oder (59.162 km²), ocorrida no ano de 1997. O modelo hidrológico utilizado foi o LISFLOOD, alimentado por previsões de médio prazo a partir do EPS global do ECMWF. Os autores apontaram que as previsões probabilísticas ao menos indicaram a possibilidade de um evento extremo com aproximadamente uma semana de antecedência, concluindo que as previsões originadas dos EPS proporcionam um valor adicional às previsões determinísticas.

Em um estudo na bacia do rio Po (37.000 km²), na Itália, Bartholmes e Todini (2005) verificaram a previsibilidade de uma cheia de 100 anos de tempo de retorno ocorrida em novembro de 1994, utilizando o modelo hidrológico TOPKAPI e previsões meteorológicas do EPS global do ECMWF. Os resultados mostraram que o tempo de pico (*timing*) foi bem previsto, com erros em torno de 12 horas para uma antecedência de 7 dias, porém com erros de magnitude consideráveis - cerca de 50% - no que se refere à média do conjunto.

Roulling e Vannitsen (2005) analisaram 6 anos de previsões a partir do EPS global do ECMWF de forma a avaliar um sistema de previsão hidrológica por *ensemble*, na Bélgica. As áreas selecionadas para estudo de caso foram as bacias dos rios Demer (1.775 km²) e Ourthe (1.616 km²), simuladas através do modelo hidrológico *Integrated Runoff Model F. Bultot* (IRMB). Na comparação entre previsões por *ensemble* e determinísticas, os resultados demonstraram a existência de uma habilidade significativa do HEPS até o 9º dia de previsão, especialmente para os períodos de inverno. Os autores avaliaram, inclusive, o impacto do aumento da resolução do EPS global de 120 km para

80 km, destacando que uma melhoria pôde ser observada na antecedência entre 3 e 6 dias, também para o inverno.

Apesar dos benefícios proporcionados, uma situação comum verificada na maioria dos estudos anteriores é a necessidade de correção da chuva prevista devido a subestimativas, usualmente associadas à diferença de escala entre a modelagem hidrológica e meteorológica. Em face a esta deficiência, algumas pesquisas se basearam na utilização de EPS de mesoescala (e.g. LEPS - *Local-area Ensemble Prediction Systems*) a partir de procedimentos de *downscaling* de conjuntos meteorológicos globais de médio prazo (e.g. Verbunt *et al.*, 2007; Voisin *et al.*, 2011). Em outras ocasiões esta abordagem é utilizada também para curto prazo (e.g. Dietrich *et al.*, 2008; Thirel *et al.*, 2008; Jaun e Ahrens, 2009; Xuan *et al.*, 2009; Abaza *et al.*, 2013), principalmente quando a área de estudo compreende bacias de pequena a média escala (1.000 a 10.000 km²). Para a adoção dos LEPS é comum a seleção de alguns membros representativos dos EPS globais através de técnicas como o *clustering* (Molteni *et al.*, 2001 apud Dietrich *et al.*, 2008), uma vez que a capacidade computacional acaba limitando o processamento de uma grande quantidade de membros em alta resolução (Jaun e Ahrens, 2009). De forma geral, os HEPS baseados em modelos de mesoescala (i.e regionais) oferecem um maior espalhamento dos membros na previsão, oferecendo assim indicativos quanto à possibilidade de cheias extremas em condições de baixa previsibilidade do tempo (Verbunt *et al.*, 2007, Jaun e Ahrens, 2009; Abaza *et al.*, 2013).

Alguns autores verificaram ainda o desempenho da abordagem multimodelo nas previsões hidrológicas, com o uso de diferentes estruturas físicas e esquemas de parametrização nos EPS meteorológicos. Neste contexto, Davolio *et al.* (2008) avaliaram dois episódios de cheia nas cabeceiras do rio Reno (5.000 km²), datados em novembro de 1999 e janeiro de 2003. Neste estudo, a ocorrência dos eventos foi prevista com uma antecedência adequada, inclusive com erros de *timing* pouco significativos (4 - 6 horas) para a antecedência considerada na previsão (48 horas). Além disso, os autores concluíram que a magnitude da cheia também foi adequadamente prevista, sugerindo o uso desta abordagem para fins operacionais e tomada de decisão por parte da Defesa Civil local.

Em um estudo similar, ainda na bacia do rio Reno, Davolio *et al.* (2013) compararam previsões baseadas em multimodelo com outras geradas por um único modelo de condições iniciais perturbadas - o COSMO-LEPS (*CO*nsortium for *S*mall-scale *MO*deling). Ambos os modelos foram formados por um conjunto de membros representativos do EPS global do ECMWF, sendo 5 membros para o EPS multimodelo e 16 membros para o EPS singular. Para tanto, dois eventos de cheia foram avaliados no período compreendido entre 29 de novembro e 2 de dezembro de 2008,

sendo que o EPS multimodelo forneceu melhores resultados em termos de identificação, magnitude e *timing* dos picos de vazão. Além da intercomparação entre as abordagens multimodelo e singular, as previsões do EPS global, utilizado na inicialização dos modelos anteriores, também foram analisadas. Na previsão de médio prazo, o EPS global não obteve sucesso na identificação dos eventos de cheia, enquanto que os EPS regionais apontaram picos elevados 4 a 5 dias antes da ocorrência dos mesmos, embora subestimando as vazões observadas.

Renner *et al.* (2009) avaliaram o desempenho de um sistema de previsão de vazões composto por um EPS global de médio prazo (ECMWF) e um EPS singular (COSMO-LEPS) com 16 membros representativos do anterior, através da plataforma Delft-FEWS (Delft *Flood Early Warning System*). O estudo foi realizado na bacia do rio Reno entre os postos de Maxau, na parte alta da bacia, e Lobith, na fronteira da Alemanha com a Holanda (50.000 - 160.000 km²), no período entre janeiro e outubro de 2007. Para a realização das previsões foi utilizado o modelo hidrológico HBV adaptado com atualização nas vazões de saída, baseada em um modelo de erro do tipo auto-regressivo. Os resultados mostraram que o EPS global não foi suficiente para representar a variabilidade da precipitação na bacia, porém a utilização do EPS de mesoescala melhorou a habilidade de previsão principalmente para o horizonte de curto prazo. Todavia, os autores destacaram que a avaliação foi realizada com o uso de limiares baseados em percentis das vazões observadas, ao invés da adoção de limiares de alerta propriamente ditos. Esta abordagem foi adotada devido ao curto período de dados disponível, o que limitou o estudo pelo fato de não ser avaliado, de forma clara, o desempenho na detecção de eventos extremos.

Dietrich *et al.* (2008) demonstraram benefícios inclusive na incorporação de *Lagged Averaged Forecasts* (LAF) na previsão hidrológica, através de *hindcasting* de um evento de cheia extremo no rio Mulde ocorrido no ano de 2002, na Alemanha. Os autores destacaram que as previsões mais recentes não necessariamente resultavam na melhor estimativa das vazões observadas, o que ressaltava a necessidade de utilização desta abordagem para melhoria no desempenho do sistema de alerta contra cheias. A técnica do LAF, além de não acarretar em um custo computacional, pode ser promissora sob o ponto de vista da persistência (Cloke e Pappenberger, 2009), para a qual deve haver uma concordância entre as previsões anteriores e as atuais como condição básica para identificação de um evento de cheia.

Alguns estudos focaram inclusive na utilização de um conjunto formado a partir de vários EPS meteorológicos para representação de um maior gama de incertezas, cuja abordagem é conhecida como *grand-ensemble ou super-ensemble* (Cloke e Pappenberger, 2009). Segundo Pappenberger *et al.* (2008), estudos com esta característica podem ser realizados a partir da base de dados do

THORPEX *Interactive Grand Global Ensemble* (TIGGE), onde são armazenadas previsões de um grande número de EPS provenientes de diversos centros de previsão de todo o mundo, desde o ano de 2006.

3.5.3. Estudos com o uso de *ensembles* para previsão de cheias no contexto brasileiro

Embora nos últimos 10 anos tenham surgido diversas pesquisas mostrando benefícios do uso de EPS na previsão de cheias, especialmente na Europa, estudos realizados no Brasil ainda são muito recentes. Nesse sentido, Calvetti (2011) avaliou, para eventos críticos ocorridos no período entre 2005 e 2009, previsões probabilísticas hidrometeorológicas na bacia do rio Iguaçu até a cidade de União da Vitória (24.000 km²), localizada no estado do Paraná. Os modelos hidrológico e meteorológico utilizados para a realização das previsões foram, respectivamente, o TopModel e o WRF (*Weather and Research Forecasting*), sendo este último composto por 10 membros com perturbação na defasagem temporal das condições iniciais, além de incluir diferentes esquemas de parametrização dos processos convectivos e de microfísica. A resolução horizontal adotada para o modelo WRF foi de 5 km, com intervalo de tempo horário e horizonte de 48 horas. Em relação aos resultados, foi obtido um maior índice de acertos nas previsões por conjunto (60 - 90%) do que qualquer previsão determinística (50 - 80%), enquanto que na categoria de chuva mais frequente - com precipitações de 1 a 5 mm - estas diferenças foram de até 40%. O autor destacou, no entanto, erros preponderantes em relação ao *timing* dos eventos, sugerindo a necessidade de considerar a defasagem temporal de alguns membros no que tange ao uso das previsões probabilísticas em um sistema operacional de previsão de cheias.

Meller (2012) propôs uma metodologia para previsão de cheias por conjunto em curto prazo utilizando o modelo hidrológico MGB-IPH. Para esta metodologia, foram adequadas informações oriundas das previsões de chuva em relação à discretização do modelo hidrológico, como resolução temporal e espacial, enquanto um procedimento de assimilação de dados em tempo real foi realizado através da modificação das variáveis de estado, conforme descrito nos trabalhos de Paz *et al.* (2007) e Collischonn *et al.* (2007). A análise dos resultados foi feita em termos determinísticos e probabilísticos, sendo as previsões determinísticas obtidas tanto a partir de uma previsão de referência como da média entre os membros do conjunto utilizado.

De maneira a avaliar a metodologia proposta, a mesma foi aplicada na bacia do rio Paraopeba (12.150 km²), na região sudeste do Brasil, cujas previsões foram realizadas para o período chuvoso compreendido entre agosto de 2008 e maio de 2011. A chuva prevista foi obtida do Laboratório de Meteorologia Aplicada a Sistemas Regionais de Tempo - MASTER /IAG-USP, o

qual mantém operacionalmente um EPS constituído de 40 - 50 membros com diferentes modelos, parametrizações e condições iniciais (Silva Dias *et al.*, 2006 apud Meller, 2012). Os resultados, em termos de excedência ou não excedência de limiares de alerta, mostraram que as previsões por conjunto tiveram um desempenho superior às determinísticas para os quantis superiores do *ensemble*. Além disso, foi identificado um aumento na proporção de previsões corretas e uma menor incidência de alarmes falsos principalmente para limiares altos e horizontes maiores, os quais são particularmente importantes para a minimização dos impactos de cheias.

Fan *et al.* (2014), utilizando uma abordagem semelhante à de Meller (2012), avaliaram a aplicabilidade de um HEPS na bacia de drenagem da cidade de Pirapora (60.000 km² de área), localizada na porção alta do rio São Francisco 120 km a jusante da usina hidrelétrica de Três Marias. As previsões hidrológicas foram realizadas através do modelo MGB-IPH para os períodos chuvosos entre 2010 e 2013, sendo a chuva prevista proveniente do modelo meteorológico global GEFS - *Global Ensemble Forecasting System* - do NCEP, com resolução espacial de 1° e horizonte de 16 dias. Erros sistemáticos foram corrigidos nas previsões de chuva através de curvas de frequência acumulada, enquanto que erros na inicialização do modelo hidrológico foram reduzidos através do procedimento de assimilação de dados nas variáveis de estado e de saída. Os resultados indicaram que o uso de *ensembles* pode atuar como uma ferramenta interessante para a antecipação de grandes cheias na região, embora haja uma dependência de escala a partir de uma bacia contribuinte (rio Abaeté) a jusante da barragem. Entretanto, os autores destacaram que em todas as situações analisadas o evento de cheia foi previsto por pelo menos um dos membros do conjunto, e que ambos aumento na rede de observações e utilização de *ensembles* com maior resolução (i.e. regionais) poderiam trazer benefícios quanto às previsões realizadas.

3.5.4. Tendências na utilização das previsões por conjunto em sistemas operacionais de alerta contra cheias

Apesar dos resultados promissores verificados através das pesquisas realizadas, o processo de migração da técnica de *ensemble* para a situação prática não tem sido uma tarefa muito simples. Um dos grandes problemas associados se reflete na enorme quantidade de informações geradas nestas previsões (Demeritt, *et al.* 2007), o que acaba diminuindo a utilidade das previsões probabilísticas no processo de tomada de decisão. Atualmente, a apresentação destas informações com base na comunicação das incertezas, de uma forma acessível, tem sido encarada como um dos maiores desafios da comunidade científica (Demeritt *et al.* 2007; Thielen *et al.*, 2009b; Ramos *et al.*, 2010), o que vem impulsionando diversas pesquisas e *workshops* com participação de pessoas experientes na área de previsão de cheias (e.g. Ramos *et al.*, 2010; Pappenberger *et al.*, 2013; Wetterhall *et al.*, 2013).

Dentre alguns exemplos de apresentação dos resultados podem ser citados os diagramas de excedência, mapas de limiares (Ramos *et al.*, 2007; Younis *et al.*, 2008), *Box Plots* e inclusive técnicas mais recentes como o "*Peak Box*" (Zappa *et al.*, 2013).

Os esforços direcionados para a comunicação das incertezas têm levado alguns centros operacionais de previsão a disponibilizam produtos originados a partir dos EPS. Segundo McEnery *et al.* (2005) o *Advanced Hydrological Prediction Service* - AHPS, nos Estados Unidos, após muitos anos fornecendo apenas previsões sazonais por conjunto com base em observações históricas de precipitação e temperatura, deu início a um novo sistema operacional de maneira a possibilitar a incorporação de *ensembles* meteorológicos nas previsões, a nível nacional. Conforme citam Demargne *et al.* (2014), este novo sistema é conhecido por *Hydrologic Ensemble Forecast Service* - HEFS, o qual vem sendo atualmente implantado de forma complementar ao AHPS. A metodologia utilizada no ambiente do HEFS consiste basicamente na correção de erros sistemáticos das previsões através de um processamento das informações meteorológicas e hidrológicas, sendo as incertezas quantificadas para cada um destes componentes e posteriormente utilizadas para geração de produtos específicos para os usuários finais. Dentre estes produtos, podem ser citados gráficos no formato *spaghetti*, gráficos em barra com a demonstração da probabilidade de excedência para faixas de vazões/níveis, gráficos com descrição da distribuição do *ensemble* - valor mínimo, máximo, média do conjunto e desvio padrão, entre outros.

Já na Europa, destaca-se o sistema de previsão intitulado por *European Flood Awareness System* - EFAS. Segundo Thielen *et al.* (2009a, 2009b), o projeto EFAS foi iniciado no ano de 2003 na forma de um protótipo do *European Commission Joint Research Centre* - JRC, com o objetivo de melhorar a preparação dos agentes envolvidos e reduzir o impacto de cheias a nível transnacional com base em informações de alerta com até 10 dias de antecedência. Atualmente, o EFAS incorpora o EPS global do ECMWF e previsões determinísticas oriundas de alguns centros de meteorologia da Europa em um modelo hidrológico distribuído - LISFLOOD (de Roo *et al.*, 2000), para determinação das previsões de cheia em larga escala. Além destas previsões, o EFAS possui uma plataforma de comunicação que possibilita diferentes usuários, incluindo previsores de centros operacionais e público geral, a receberem informações específicas de acordo com o seu nível de atuação, promovendo uma plataforma de *feedback* entre os produtos oferecidos e as ações tomadas por estes usuários.

O sucesso do EFAS, na Europa, promoveu a expansão do sistema para uma abrangência global através do desenvolvimento de uma plataforma com estrutura similar chamada GloFAS - *Global Flood Awareness System* (Alfieri *et al.*, 2013), rodando operacionalmente desde 2011 em âmbito

do JRC. Conforme ainda citam Alfieri *et al.* (2013), os resultados do sistema atualmente são utilizados para testes e pesquisa em instituições parceiras, a exemplo do próprio CEMADEN. Diversos outros sistemas operacionais em centros regionais vem utilizando EPS para a previsão de cheias, conforme pode ser verificado nos levantamentos feitos por Cloke e Pappenberger (2009) e Wetterhall *et al.* (2013).

As experiências recentes com os HEPS, no âmbito internacional, trazem novas possibilidades à gestão de inundações no contexto brasileiro, porém apontam para a necessidade de um maior número de estudos de maneira a avaliar o seu uso potencial em sistemas de alerta contra cheias. De qualquer forma, esta abordagem pode ser vista estando em consonância à nova Legislação com enfoque na prevenção e preparação contra eventos extremos - Lei 12.608/2012, sendo que os benefícios gerados pela obtenção de antecedências maiores podem ser sintetizados através das seguintes ações (Golding, 2009):

- 3 – 5 dias de antecedência: emissão de um aviso de "período de risco aumentado", comunicação através da mídia para consciência da população sobre a possibilidade da cheia, planejamento e organização das atividades necessárias ao atendimento de grupos vulneráveis além do compartilhamento de informações entre os diversos atores envolvidos. Além disso, pode ser realizada a verificação dos equipamentos necessários para monitoramento em tempo real, garantindo a sua plena funcionalidade caso o evento de cheia seja confirmado posteriormente;
- 1 – 2 dias de antecedência: emissão de um aviso preliminar ou de observação, acionamento de medidas mitigatórias para minimização dos impactos e proteção da infraestrutura a ser potencialmente afetada, atendimento prioritário a grupos vulneráveis localizados em áreas de maior risco;
- < 1 dia de antecedência: emissão de alerta de inundação e realização de procedimentos de resposta emergencial, com evacuação da população a ser atingida.

Capítulo 4. Formulação de etapas para preparação e avaliação de HEPS na bacia do Taquari-Antas

4.1. Considerações iniciais

Nos capítulos anteriores discutiu-se a respeito da importância da previsão hidrológica nos sistemas de alerta contra cheias, sendo destacados os principais conceitos, aplicabilidade e limitações dos métodos disponíveis para esta finalidade. Adicionalmente, foram apontados alguns estudos e inclusive tendências em relação às técnicas de previsão recentemente implementadas no cenário internacional, cujo enfoque tem sido horizontes de curto a médio prazo com até 10 dias de antecedência em relação a eventos de cheia. Neste contexto, foi demonstrado que para a maximização da antecedência se torna fundamental a incorporação da chuva prevista sob o conceito de *Ensemble Prediction System* (EPS) na modelagem hidrológica (HEPS), na qual a previsão passa a assumir um caráter probabilístico devido às incertezas que crescem à medida que aumenta o horizonte da previsão. Com base nesta abordagem, as incertezas podem ser comunicadas à Defesa Civil na forma de informações complementares à experiência dos previsores, de maneira a auxiliar na identificação e caracterização das cheias bem como alertar para a possibilidade de eventos extremos.

4.2. Estrutura Metodológica

Nesta seção é apresentada a estrutura metodológica para preparação e avaliação de HEPS na bacia do Taquari-Antas, região Sul do Brasil, através da modelagem matemática de chuva-vazão acoplada à previsão determinística e a dois EPS distintos: (i) EPS regional de curto prazo (até 72 horas), de alta resolução e; (ii) EPS global de médio prazo (até 10 dias), de menor resolução. Conforme já mencionado, apesar de existirem diversas fontes de incerteza inerentes à previsão hidrológica, é comum a adoção da chuva prevista baseada em modelos meteorológicos como sendo a fonte predominante das mesmas. Analogamente, esta hipótese é assumida no presente estudo, sendo desconsideradas as incertezas associadas aos parâmetros e à representação dos processos físicos no modelo hidrológico utilizado.

A metodologia adotada é baseada naquela proposta por Meller (2012), porém com algumas adaptações, sendo basicamente dividida em duas etapas: simulação e previsão hidrológica (Figura 9). Para a modelagem hidrológica, diversas informações compreendendo modelo digital de elevação, uso e tipo do solo, cobertura vegetal, bem como dados climatológicos e hidrológicos, são coletadas para a bacia de estudo e conseqüentemente utilizadas para preparação do modelo conceitual MGB-

IPH. O modelo é então calibrado e verificado para períodos específicos através do modo simulação (*off-line*), objetivando representar adequadamente os processos físicos que ocorrem na bacia através da aproximação dos dados calculados aos observados.

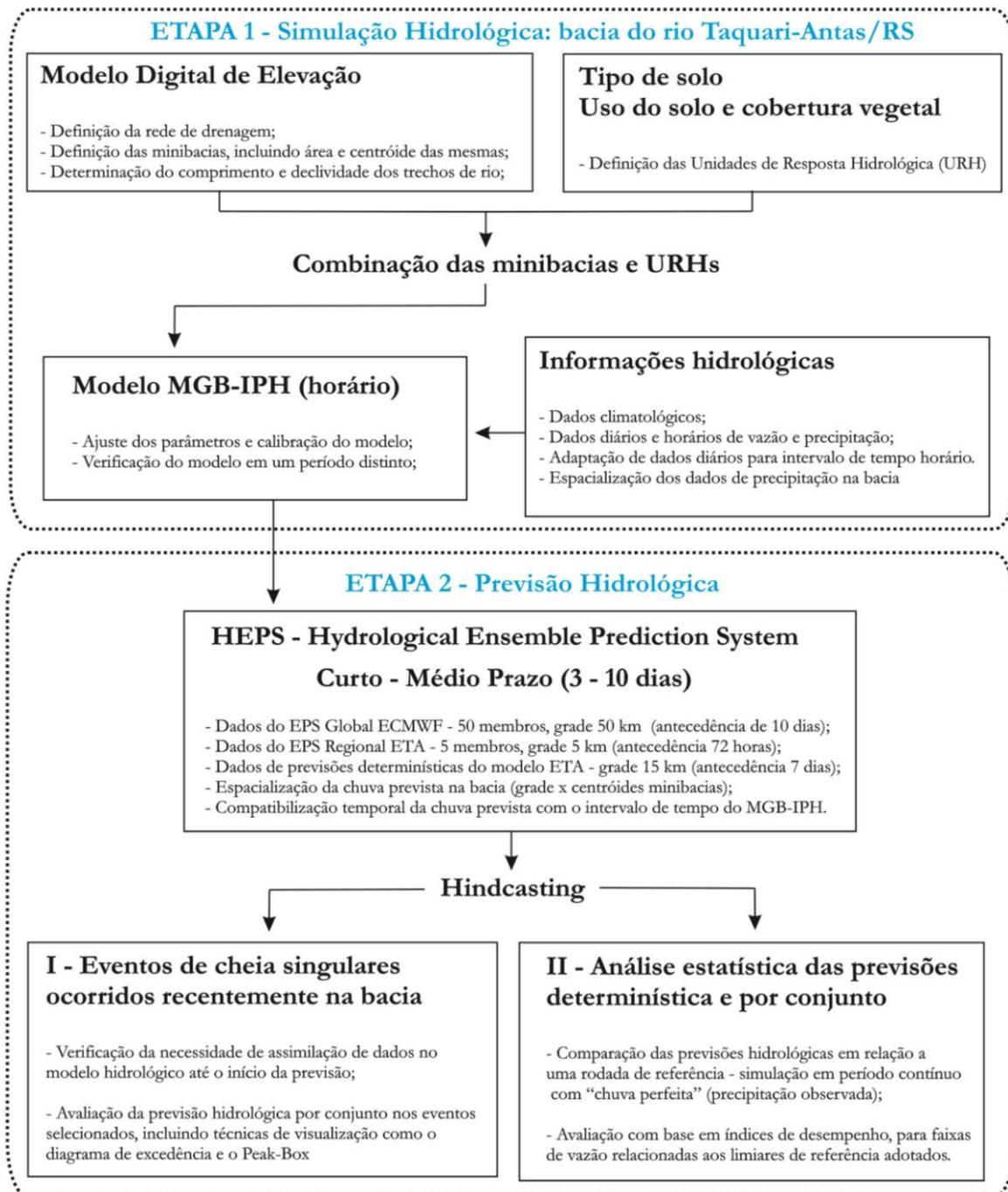


Figura 9. Fluxograma esquemático da estrutura metodológica utilizada no presente estudo.

Para a etapa de previsão hidrológica as previsões determinísticas e aquelas originadas de EPS, com horizontes de curto e médio prazo, são obtidas em formato de grade regular, sendo então processadas para a bacia do Taquari-Antas e posteriormente acopladas ao MGB-IPH de modo a

gerar previsões hidrológicas pontuais e probabilísticas (conjunto). Este procedimento resulta na preparação de diferentes HEPS, cuja avaliação se dá através de duas formas distintas: (i) *hindcasting* baseado em eventos de cheia singulares e (ii) *hindcasting* de maior período com análise estatística. No primeiro caso, os resultados das previsões são avaliados qualitativamente com base nos hidrogramas gerados e em métodos de visualização específicos, sendo o foco voltado para a interpretação das incertezas relacionadas à identificação, *timing* e magnitude das cheias. Já no segundo caso, algumas medidas estatísticas são utilizadas para avaliar o desempenho das previsões hidrológicas - por conjunto e determinística - em relação a uma rodada de referência, considerando um período contínuo que engloba tanto a ocorrência como a não ocorrência de eventos de cheia.

A seleção desta bacia hidrográfica como região de estudo foi decorrente do projeto intitulado "Desenvolvimento e Apoio à Implantação de uma Estratégia Integrada de Prevenção de Riscos Associados a Regimes Hidrológicos na Bacia do Taquari-Antas-RS", coordenado pelo Centro de Pesquisas e Estudos sobre Desastres (CEPED-RS/UFRGS) em parceria com o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH).

4.3. Modelo hidrológico utilizado: MGB-IPH

4.3.1. Estrutura do modelo MGB-IPH

O MGB-IPH (Collischonn e Tucci, 2001) é um modelo hidrológico distribuído composto de módulos específicos para o cálculo dos processos físicos em nível de bacia, incluindo balanço hídrico no solo, evapotranspiração, interceptação, escoamento superficial, sub-superficial, subterrâneo e propagação do escoamento na rede de drenagem (Paiva, 2009). Sua estrutura foi baseada no modelo LARSIM, com algumas adaptações (Collischonn e Tucci, 2001), tendo sido aplicado em diversos trabalhos relacionados à previsão de vazões (Collischonn *et al.*, 2005; Andreolli *et al.*, 2006; Silva *et al.*, 2006; Collischonn *et al.*, 2007; Tucci *et al.*, 2008), incluindo um pequeno número de estudos baseados na abordagem de *ensembles* (e. g. Meller, 2012; Fan *et al.*, 2014).

Na versão inicial do modelo a representação topológica da bacia hidrográfica era feita a partir da sua subdivisão em células quadradas, ligadas entre si por canais de drenagem (Collischonn e Tucci, 2001). Entretanto, a partir da integração de técnicas de geoprocessamento, a discretização da bacia na forma de células foi substituída por unidades elementares denominadas minibacias, as quais são pequenas subdivisões definidas nos pontos de confluência entre dois trechos de rios ou em pontos específicos de interesse. Cada uma destas minibacias é composta por regiões - blocos - resultantes da combinação de uso do solo, cobertura vegetal e tipo de solo, representados em termos de uma fração da área total, porém sem considerar a localização no interior das mesmas (Figura 10).

Os blocos são também denominados de Unidades de Resposta Hidrológica - URHs, cuja função é proporcionar uma variabilidade no interior das minibacias através da atribuição de áreas com comportamento hidrológico similar, o qual é explicado por características físicas relacionadas aos solos e à cobertura vegetal.

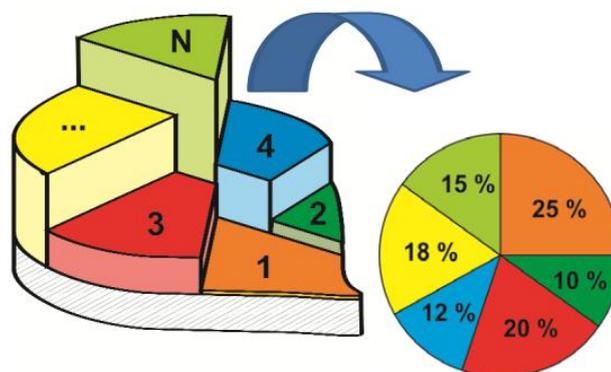


Figura 10. Representação topológica das URHs no interior da minibacia. Fonte: Meller (2012).

A caracterização física das URHs pode ser obtida a partir de imagem de satélite, modelos digitais de elevação (MDE) e mapas digitalizados (Paiva, 2009), cujo procedimento é definido como pré-processamento. Devido ao MGB-IPH ser um modelo conceitual, com simplificação de alguns processos físicos que ocorrem na bacia, existem diversos parâmetros específicos que se dividem em fixos e calibráveis. Segundo Collischonn e Tucci (2001), os parâmetros fixos se referem a valores que podem ser medidos ou que não interferem significativamente no resultado, como por exemplo, índice de área foliar, albedo, resistência superficial e altura das árvores. Já os parâmetros calibráveis podem ser modificados em cada uma das URHs, incluindo aspectos como armazenamento máximo no solo, condutividade hidráulica em meio saturado, tempo de retardo dos reservatórios, entre outros. A calibração dos parâmetros pode ser realizada manualmente ou, ainda, de forma automática, a partir de um algoritmo de otimização multi-objetivo.

Os processos físicos são representados no modelo através de fluxos verticais e horizontais (Figura 11), no interior de cada uma das minibacias. O balanço de água no solo é realizado através da geração de escoamento superficial (D_{sup}) por excesso de capacidade de armazenamento, porém com uma relação probabilística entre a umidade do solo e a fração de área de solo saturada (Collischonn e Tucci, 2005). No caso da interceptação, esta é representada por um reservatório cujo volume depende da cobertura vegetal, expressa em termos de índice de área foliar. Já a estimativa da evapotranspiração (ET) é calculada pelo método de Penman-Monteith, o qual é também utilizado para determinar a evaporação potencial da lâmina interceptada (EI). Por fim, a geração dos escoamentos subterrâneo (D_{bas}) e sub-superficial (D_{int}) são obtidas, respectivamente, por meio de

relações de caráter linear e não-linear de acordo com o armazenamento de água no solo (Paiva, 2009).

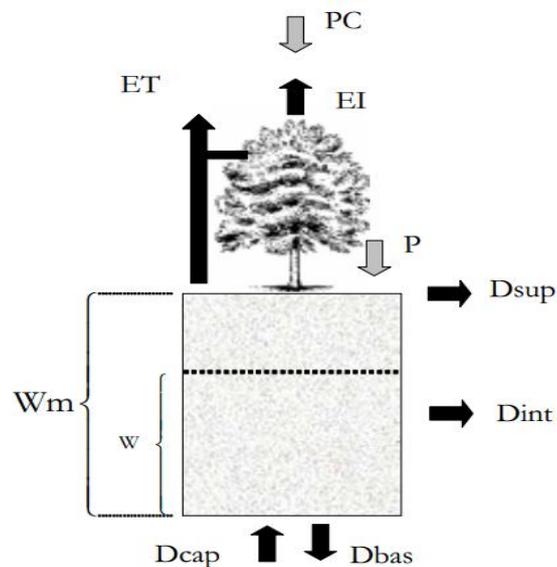


Figura 11. Diagrama esquemático dos processos físicos no MGB-IPH, representados pelos fluxos horizontais e verticais. Adaptado de Paiva (2009).

Entretanto, os termos que se referem ao escoamento superficial, sub-superficial e subterrâneo não atingem diretamente a rede de drenagem, sofrendo retardo e amortecimento ainda no interior da minibacia (Collischonn e Tucci, 2001). Estes efeitos são representados através da propagação em reservatórios lineares para cada um dos escoamentos supracitados, dada por uma relação entre o volume de água armazenado e um parâmetro de retardo - em unidade de dias, ou horas - associado a estes reservatórios. Após a propagação no interior da minibacia, o modelo realiza a propagação nos trechos de rio através do método de Muskingum-Cunge (Tucci, 1998), cujos parâmetros são calculados com base nos dados de comprimento, declividade, rugosidade e largura média da seção.

Uma descrição mais detalhada do modelo MGB-IPH, incluindo as formulações para cada módulo de cálculo, podem ser vistas nos trabalhos de Collischonn e Tucci (2001) e Paiva (2009).

4.3.2. Avaliação das vazões simuladas pelo MGB-IPH: Calibração e Verificação

De forma a avaliar a eficiência do modelo durante a simulação (modo *offline*), algumas métricas específicas são apresentadas. O Índice de Eficiência de Nash e Sutcliffe indica o quanto as previsões do modelo são melhores do que outro que prevê simplesmente a média dos dados observados, cuja equação é dada por:

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum (Q_{obs}(t) - Q_{calc}(t))^2}{\sum (Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}})^2} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde: E_{NSlog} é o Índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe [adimensional]; $Q_{obs}(t)$ é a vazão observada no tempo t ; $Q_{calc}(t)$ é a vazão calculada no tempo t ; $\overline{Q_{obs}}$ é a média das vazões observadas; Σ é o somatório para todos os intervalos de tempo. Valores de $E_{NS} = 1$ indicam dados simulados e observados em perfeita concordância, enquanto que valores negativos indicam que a média dos dados observados é um melhor preditor do que os resultados do modelo.

Entretanto, devido à diferença da ordem de grandeza entre vazões mínimas e máximas que ocorre em grande parte dos casos, pode ocorrer supressão dos erros associados às vazões de estiagem pelo índice de eficiência E_{NS} . Desta forma, o desempenho do modelo no que se refere às vazões mínimas pode ser avaliado através do Índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões, equacionado por:

$$E_{NSlog} = 1 - \frac{\sum (\log(Q_{obs}(t)) - \log(Q_{calc}(t)))^2}{\sum (\log(Q_{obs}(t)) - \log(\overline{Q_{obs}}))^2} \quad \text{Eq. 2}$$

Por fim, a avaliação de outros aspectos como, perdas de água por evapotranspiração (Collischonn, 2001), pode ser feita através da diferença entre os volumes observados e calculados, expressa por:

$$\Delta V = \frac{\sum(Q_{cal}(t)) - \sum(Q_{obs}(t))}{\sum(Q_{obs}(t))} \cdot 100 \quad \text{Eq. 3}$$

Onde: ΔV é o erro de volume [%].

4.4. Previsões quantitativas de precipitação

4.4.1. Modelo Regional CPTEC/ETA determinístico

As previsões de precipitação utilizadas para geração das previsões hidrológicas determinísticas são provenientes do modelo atmosférico ETA. Segundo informações do CPTEC, o ETA é um modelo de grade regular com área limitada (mesoescala) desenvolvido pela Universidade de Belgrado em conjunto com o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia, o qual foi instalado no CPTEC no ano de 1996 com a finalidade de complementar a previsão numérica do tempo realizada, até aquele momento, através do modelo de circulação geral atmosférico MCGA/CPTEC.

A versão operacional do modelo ETA possui uma resolução horizontal de 40 km além de 38 camadas verticais, sendo disponibilizadas ainda versões com resolução de 5, 10 e 15 km. Conforme citado por Chou *et al.* (2005), uma das principais características deste modelo é a representação das equações primitivas através de uma coordenada vertical (Mesinger *et al.*, 2012), a qual exerce uma influência importante em regiões de orografia complexa a exemplo da Cordilheira dos Andes, na América do Sul. A representação dos processos físicos de sub-grade é tratada através de esquemas de parametrização, estando entre estes o esquema de Betts-Miller-Janjic (Janjic, 1994) para precipitação convectiva e o esquema de (Ferrier *et al.*, 2002) para microfísica de nuvens e precipitação estratiforme. Durante a integração do modelo, as variáveis prognósticas são definidas pela temperatura, umidade, vento horizontal, pressão à superfície, energia cinética turbulenta, hidrometeoros, umidade e temperatura do solo, realizadas para cada ponto da grade. Uma visão detalhada do modelo ETA original encontra-se disponível em Black (1994), enquanto que a versão mais atualizada - em âmbito do CPTEC - é descrita no trabalho de Mesinger *et al.* (2012).

O domínio do modelo cobre toda a América do Sul incluindo parte dos oceanos no entorno, o qual é compreendido entre as latitudes de 58°S e 16°N e longitudes de 86° e 19° W. Entretanto, as versões operacionais de 5 e 10 km possuem domínios mais restritos em relação às versões de 15 e 40 km, sendo que as primeiras abrangem apenas as regiões sudeste e nordeste do Brasil, respectivamente. Para o presente estudo foi selecionada apenas a versão com resolução espacial de 15 km, a qual é amplamente utilizada pelos usuários do *software* SISMADEN (Sistema de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais), desenvolvido pelo INPE.

Ainda, segundo Bustamante (2009), o modelo regional ETA atualmente fornece previsões com horizonte de até 168 horas (7 dias) e frequência a cada 12 horas (00 e 12 UTC). Usualmente, as condições iniciais são obtidas a partir da análise proveniente do NCEP, enquanto que as condições de contorno laterais são fornecidas pelo modelo global CPTEC, atualizadas a cada 6 horas. Além disso, a resolução temporal do modelo é de 3 horas, ou seja, a precipitação prevista é acumulada para as horas 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 e 21 UTC. As previsões estão disponíveis para download no link <<ftp://ftp1.cptec.inpe.br/modelos/io/tempo/regional/Eta15km/sismaden/>>

4.4.2. EPS Regional CPTEC/ETA

O CPTEC possui, como produto especial, um EPS regional de curto prazo originado do projeto de pesquisa "Estudos da previsibilidade de eventos meteorológicos extremos na Serra do Mar", realizado entre os anos de 2005 e 2009. O projeto foi concebido de modo a desenvolver um sistema de monitoramento e previsão de riscos para a região da Serra do Mar, envolvendo

subprojetos em diversas áreas temáticas integradas incluindo modelagem atmosférica de alta resolução e previsão por conjunto.

Este EPS possui 5 membros gerados com base na perturbação de física, sendo desenvolvido a partir do modelo ETA com resolução horizontal de 5 km e estruturado com diferentes esquemas de parametrização e condições iniciais/laterais (Figura 12). Os esquemas utilizados para a parametrização de microfísica de nuvens são o Ferrier (Ferrier *et al.*, 2002) e Zhao (Zhao e Carr, 1997), enquanto que para precipitação convectiva são utilizados o Betts-Miller-Janjic (Janjic, 1994) e o Kain-Fritsch (Kain, 2004). Além disso, este último esquema de parametrização recebe também uma versão com introdução de fluxo de momentum, o que tende a mudar aspectos como tempo de ocorrência do evento e distribuição da área de precipitação, porém sem alterar significativamente a quantidade de precipitação ao longo desta área (Bustamante, 2009; Mesinger *et al.*, 2012). Além disso, para fornecimento das condições iniciais e de contorno são utilizadas a previsão de controle do modelo ETA 40 km e a do NCEP/GFS, sendo gerados os membros conforme apresentado a seguir:

- **Membro 1 (BFF)** - Esquema de convecção Betts-Miller-Janjic - Microfísica de Ferrier - Condição inicial/contorno do modelo Regional CPTEC/ETA (40 km);
- **Membro 2 (BFG)** - Esquema de convecção Betts-Miller-Janjic - Microfísica de Ferrier - Condição inicial/contorno do modelo Global NCEP/GFS (100km);
- **Membro 3 (BZZ)** - Esquema de convecção Betts-Miller-Janjic - Microfísica de Zhao - Condição inicial/contorno do modelo Regional CPTEC/ETA (40 km);
- **Membro 4 (KFG)** - Esquema de convecção Kain-Fritsch original - Microfísica de Ferrier - Condição inicial/contorno do modelo Global NCEP/GFS (100 km);
- **Membro 5 (KfmFG)** - Esquema de convecção Kain-Fritsch com a inclusão da parametrização de fluxo de momentum convectivo - Microfísica de Ferrier - Condição inicial/contorno do modelo Global NCEP/GFS (100 km);

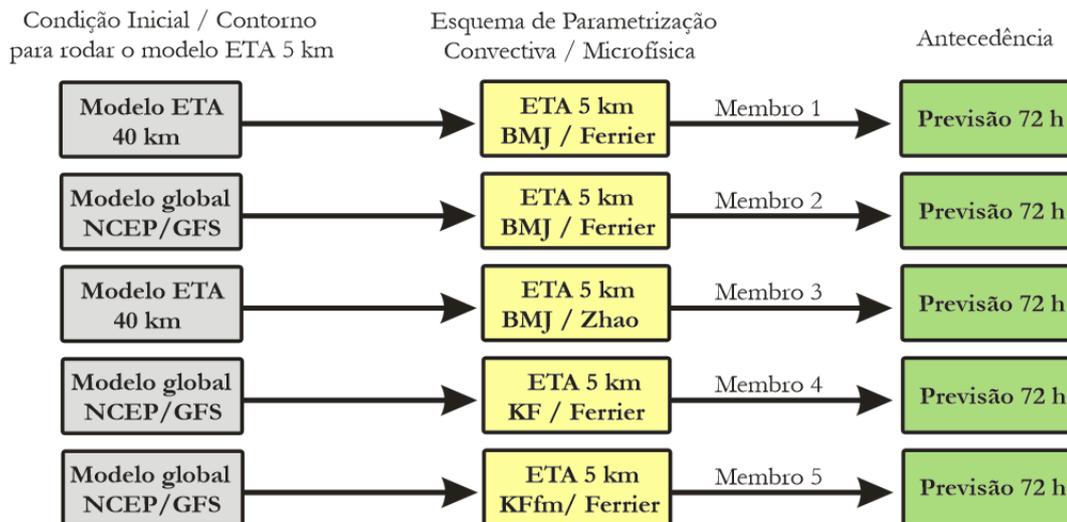


Figura 12. Inicialização e configuração dos membros do modelo ETA Ensemble 5km - CPTEC. Fonte: Adaptado de Bustamante (2013)

O domínio do EPS regional cobre grande parte do território do Brasil na região compreendida entre as latitudes de 34° e 14° S e longitudes de 61° e 36° W, envolvendo a bacia do Taquari-Antas conforme demonstrado na Figura 13. As previsões são fornecidas com a mesma frequência do modelo ETA determinístico, ou seja, iniciando no horário 00 UTC e realizadas a cada 12 horas. Entretanto, a resolução temporal deste EPS é de 1 hora. As previsões podem ser obtidas no link <ftp://ftp1.cptec.inpe.br/modelos/io/tempo/regional/oens_Eta/SSE_05km/>

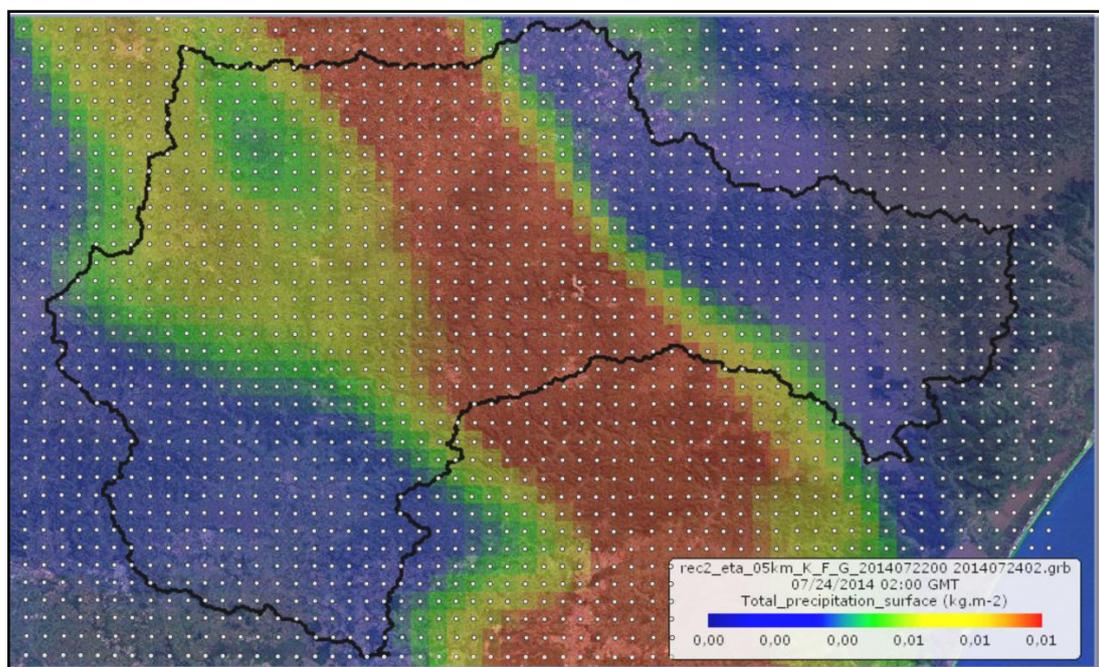


Figura 13. Representação da grade regular do EPS regional ETA (5 km de resolução) sobre a bacia do Taquari-Antas. No exemplo acima, os pontos brancos indicam os centros das células da grade, enquanto as cores mostram o campo de precipitação acumulada de um dos membros do *ensemble*.

4.4.3. EPS Global do ECMWF

A previsão do tempo global por conjunto tem sido adotada desde o ano de 1992 no modelo geral de circulação atmosférico do ECMWF - *European Center of Medium Range Weather Prediction* (Molteni *et al.*, 1996), realizada para o horizonte de médio prazo com até 10 dias de antecedência. Até meados do ano de 1996, a versão operacional do EPS possuía codificação T63L19 com resolução espacial de 200 km e 19 camadas verticais, consistindo em uma previsão de controle e 32 membros de condições iniciais perturbadas. A técnica utilizada para esta perturbação é a de *Singular Vectors* (Buizza e Palmer, 1995), a qual identifica as direções a partir da incerteza inicial que são responsáveis pela maior incerteza ao final de um intervalo de tempo finito, de aproximadamente 2 dias, definido como intervalo de otimização. Em outras palavras, pequenos erros nas condições iniciais, na direção destas perturbações, são amplificados mais rapidamente e tendem a gerar um *ensemble* com dispersão adequada das incertezas (Buizza, 2005; Leutbecher e Palmer, 2008).

Segundo Buizza (2005), em dezembro de 1996 o EPS global do ECMWF passou de 32 para 50 membros perturbados, além de ter recebido outras melhorias a exemplo do aumento da resolução horizontal para 125 km e do número de camadas verticais para 31. Além disso, incertezas relacionadas ao modelo de previsão foram inclusas a partir de outubro de 1998, através da introdução de perturbações estocásticas de modo a simular erros gerados na parametrização dos processos físicos (Figura 14). Dentre outras atualizações posteriores destaca-se a versão VAREPS - *Variable Resolution* EPS (Buizza, 2008) implementada no ano de 2006, ampliando o horizonte de previsão de 10 para 15 dias e modificando a configuração da grade do modelo para uma resolução variável. Esta configuração era caracterizada pela resolução horizontal de 50 km, para o intervalo entre o início e o 10º dia de previsão, e de 80 km para o intervalo compreendido entre o 10º e o 15º dia, com 62 níveis verticais em ambas as situações.

Atualmente, de acordo com as atualizações feitas no modelo nos anos de 2010 e 2013⁵, a codificação do VAREPS global do ECMWF para os primeiros 10 dias de integração do modelo é a T639L91 (resolução horizontal - 32 km), enquanto que após este período a codificação passa a ser T319L91 (63 km). As previsões são fornecidas com frequência de 12 horas, para as 00 UTC e 12 UTC, com resolução temporal de 6 horas. As previsões do EPS global do ECMWF podem ser obtidas a partir da base de dados do TIGGE (<http://tigge.ecmwf.int/>), a qual armazena registros

⁵Disponível em < http://old.ecmwf.int/products/data/operational_system/evolution/evolution_2013.html>. Acesso em 24/06/2014.

provenientes de 10 centros operacionais de previsão do tempo desde o ano 2006 e cujos dados são direcionados à pesquisa científica.

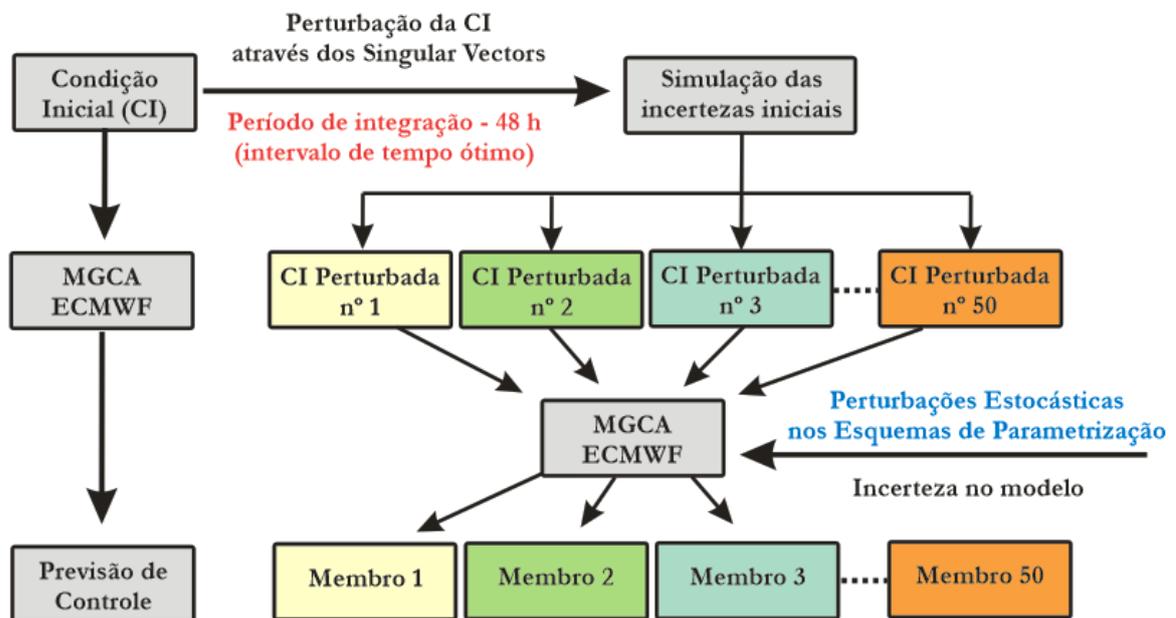


Figura 14. Diagrama esquemático da inicialização dos membros do EPS do ECMWF. (Fonte: Autor)

Entretanto, mesmo com as últimas atualizações do VAREPS, é importante destacar que as previsões armazenadas no TIGGE são geradas com uma configuração do modelo para resolução espacial de 50 km, conforme pode ser visualizado na representação esquemática sobre a bacia do Taquari-Antas (Figura 15). Os principais aspectos na escolha do ECMWF é o seu grande número de membros - 50, os quais incluem perturbações nas condições iniciais e, estocasticamente, nas parametrizações associadas à representação dos processos físicos, bem como sua resolução espacial (50 km), considerada muito boa pela quantidade de membros e pela abrangência global.

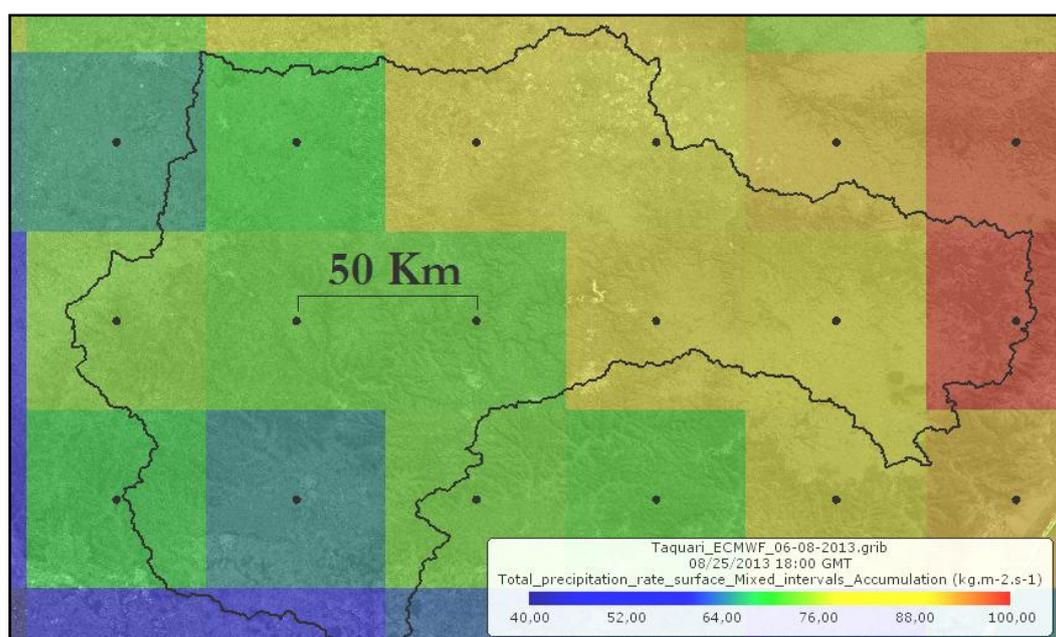


Figura 15. Representação da grade regular do ECMWF (50 km de resolução) sobre a bacia do Taquari-Antas. No exemplo acima, os pontos em preto indicam os centros das células da grade, enquanto as cores mostram o campo de precipitação acumulada prevista por um dos membros do *ensemble*.

4.4.4. Síntese quanto à fonte de dados de chuva prevista

A seguir é apresentada uma tabela resumo com a configuração de cada um dos EPS utilizados, incluindo a previsão determinística. É importante ressaltar que para o último caso citado é existente apenas a previsão de controle, já que não há qualquer técnica de perturbação no modelo.

Tabela 1. Resumo das configurações dos EPS meteorológicos utilizados como fonte de dados para o presente estudo.

Horizonte de previsão	Modelo	Escala	Resolução horizontal	Resolução temporal	Tipo de Perturbação	Número de membros
Curto Prazo (72h)	EPS ETA CPTEC	Regional	5 km	1 h	- Diferentes parametrizações convecção/microfísica - Diferentes condições iniciais e de contorno (NCEP/GFS ou ETA/CPTEC)	5
Médio prazo (10 dias)	EPS ECMWF	Global	50 km	6 h	- Perturbação nas condições iniciais (técnica <i>Singular Vectors</i>) - Perturbação estocástica nos parâmetros de física do modelo	50
Médio prazo (7 dias)	ETA CPTEC	Regional	15 km	3 h	- Apenas previsão de controle (determinística)	-

4.5. Geração e avaliação das previsões hidrológicas

As informações de chuva prevista, no formato de grade, são compatibilizadas no tempo e no espaço respectivamente através de uma distribuição homogênea para cada hora e por meio de interpolação pelo inverso da distância ao quadrado (e. g. Meller, 2012; Fan *et al.*, 2014), sendo finalmente acopladas ao modelo MGB-IPH para estimar a vazão nos intervalos de tempo futuros. O procedimento consiste em realizar diversas rodadas do modelo hidrológico de maneira a se obter as previsões de vazão correspondentes, definidas pelas previsões hidrológicas do ETA (determinística) e por cada um dos membros dos conjuntos HEPS ETA (5 membros) e HEPS ECMWF (50 membros). Além dos sistemas de previsão anteriormente citados, é gerado também uma versão adicional do HEPS ETA com ampliação do número de membros sem custo computacional, baseado na agregação de previsões defasadas no tempo às atuais (*Lagged Averaged Forecasts* - LAF).

O procedimento de defasagem aqui utilizado é similar àquele apresentado por Machado *et al.* (2010), sendo que no presente caso as previsões hidrológicas do HEPS ETA 5 km realizadas nas 12 horas anteriores ($t-12h$) compõem os 5 novos membros que serão agregados ao conjunto atual (t). A Figura 16 apresenta um exemplo esquemático da adição das previsões hidrológicas defasadas, cujos resultados são agregados para antecedências de 12 em 12 horas até o final do horizonte de curto prazo (72 horas). Contudo, é importante ressaltar que as previsões defasadas ($t-12h$) possuem a influência da chuva prevista até a antecedência de 60 horas se tomadas como referência as previsões atuais, sendo que o resultado para as 72 horas decorre apenas dos tempos de resposta e propagação na bacia (chuva zero para as últimas 12 horas).

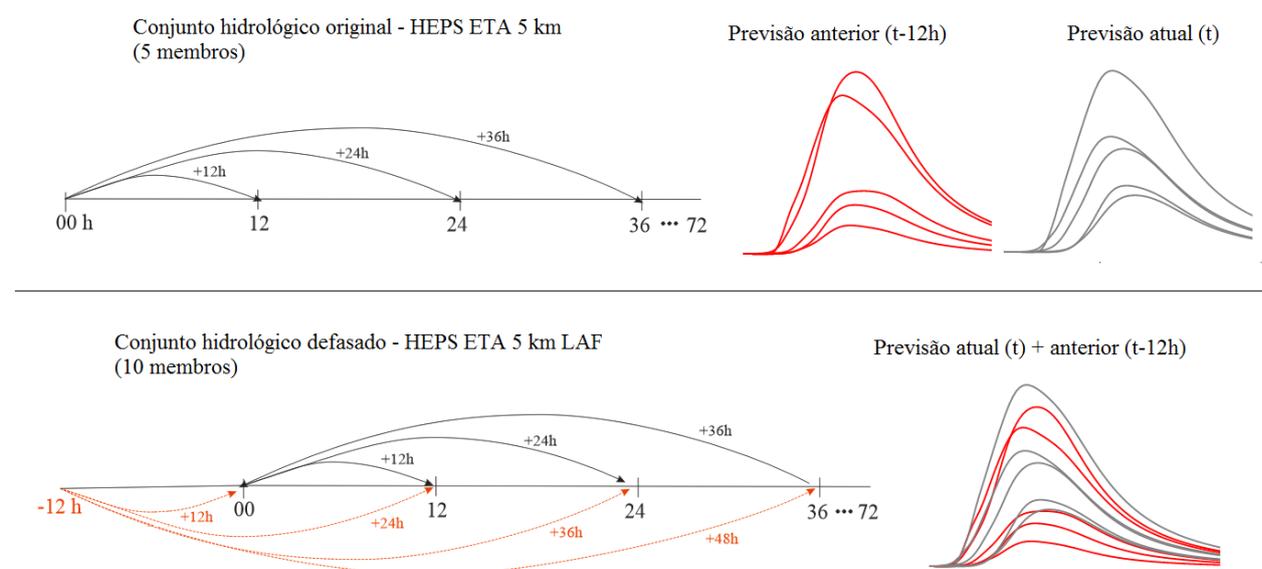


Figura 16. Exemplo esquemático do procedimento de geração do HEPS ETA 5 km - LAF (*Lagged Averaged Forecasts*). Adaptado de Machado *et al.* (2010)

O fluxograma mostrado na Figura 17 mostra a sequência de passos para geração das previsões hidrológicas. Ao final, estas previsões são avaliadas com base em dois *hindcastings* distintos, envolvendo respectivamente análise de caráter visual, em eventos de cheia singulares, e análise estatística em um período contínuo.

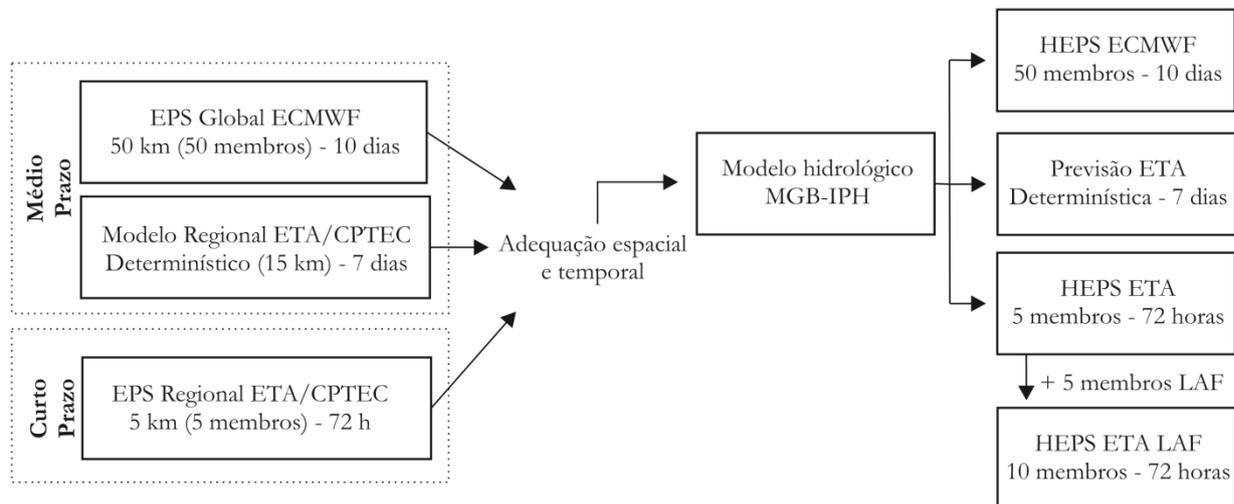


Figura 17. Fluxograma de geração das previsões hidrológicas, a partir do acoplamento da chuva prevista no MGB-IPH.

4.5.1. Avaliação de eventos singulares de cheia

A primeira etapa de avaliação das previsões hidrológicas é dada a partir da realização de um *hindcasting* de eventos singulares de cheia com magnitudes baixa e extrema, ocorridos recentemente na bacia do Taquari-Antas. Esta seleção quanto à magnitude dos eventos foi realizada de maneira a avaliar o comportamento dos conjuntos em situações com a maior distinção possível entre si.

Inicialmente foi verificada a necessidade de uma técnica de assimilação de dados para ajuste *online* das condições iniciais do modelo MGB-IPH, sendo avaliada a existência ou não do seu benefício até o instante imediatamente anterior ao início da previsão nestes eventos, para horizontes de curto a médio prazo. Na sequência, as previsões hidrológicas foram então avaliadas qualitativamente, utilizando-se inclusive técnicas de visualização como o diagrama de excedência (Ramos *et al.*, 2007; Younis *et al.*, 2008) e o *Peak-box* (Zappa *et al.*, 2013), ambas descritas posteriormente.

4.5.1.1. *Assimilação de dados no modelo hidrológico*

O procedimento de atualização do modelo MGB-IPH utilizado no presente estudo é o método empírico apresentado em Collischonn *et al.* (2005) e modificado no trabalho de Paz *et al.* (2007), o qual tem sido adotado com sucesso em diversos estudos anteriores de previsão hidrológica (e.g. Collischonn *et al.*, 2007; Meller, 2012; Fan *et al.*, 2014). Basicamente, este procedimento utiliza

dados de vazão disponibilizados em diversas partes da bacia para atualizar vazões na rede de drenagem e algumas variáveis de estado, expressas pelo volume de água nos reservatórios conceituais superficial, sub-superficial e subterrâneo em cada uma das minibacias. As vazões observadas e calculadas são comparadas ao longo de um período de "aquecimento" - *warming up* - no modelo e que antecede o momento inicial de previsão, obtendo-se, para cada posto fluviométrico p com disponibilidade de dados, um fator de correção (FCA) expresso por:

$$FCA_p = \frac{\sum_{t=t_0-t_a}^{t_0} Q_{obs}}{\sum_{t=t_0-t_a}^{t_0} Q_{calc}} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde: Q_{obs} e Q_{calc} são as vazões observadas e calculadas [m^3/s]; t é o passo de tempo de cálculo; t_0 é o intervalo de tempo no qual é iniciada a previsão; t_a é o intervalo de tempo de aquecimento do modelo.

O período de aquecimento do modelo deve considerar possíveis ruídos nas vazões observadas, a exemplo daqueles provenientes da operação de reservatórios, de maneira a evitar o surgimento de instabilidades no processo de atualização (Collischonn *et al.*, 2007). Apesar de intervalos de tempo curtos, como alguns dias, já serem suficientes para o aquecimento, a presença de ruídos pode requerer períodos maiores para o cálculo do FCA, os quais podem ser, inclusive, da ordem de alguns meses.

Após sua determinação, o FCA é aplicado de modo a corrigir as vazões calculadas para a rede de drenagem em cada minibacia, desde que a mesma esteja localizada a montante do posto p . As vazões atualizadas são ponderadas de acordo com a relevância do posto fluviométrico a partir do qual é feita a assimilação, assumindo-se que a representatividade deste seja maior para minibacias próximas, localizadas sobre a drenagem principal, e menor para minibacias mais distantes ou situadas na região hidrográfica dos afluentes. A ponderação é dada através de um quociente entre as áreas de drenagem a montante da minibacia e a montante do posto de interesse, conforme a equação apresentada a seguir:

$$Q_{at_{ip}} = FCA_p \cdot Q_{calc_i} \cdot \left(\frac{A_i}{A_p}\right)^{ebac} + Q_{calc_i} \cdot \left[1 - \left(\frac{A_i}{A_p}\right)^{ebac}\right] \quad \text{Eq. 5}$$

Onde: $Q_{at_{ip}}$ é a vazão atualizada na minibacia i , a montante de estação fluviométrica p [m^3/s]; A_i e A_p são as áreas de drenagem acumuladas a montante da minibacia i e estação p respectivamente [km^2]; $ebac$ é um parâmetro de atualização que varia entre 0 e 1, o qual pode ser ajustado de modo a melhorar a concordância entre as vazões calculadas e observadas [adimensional].

Da mesma forma que as vazões referentes à rede de drenagem nas minibacias, o volume de água nos reservatórios conceituais do modelo hidrológico, em cada um destes elementos, é também atualizado através do FCA dado anteriormente. Entretanto, neste caso a assimilação não considera a ponderação que relaciona as áreas de drenagem a montante da minibacia e a do posto fluviométrico de interesse, mas sim a parcela da vazão que é proveniente do escoamento de base na minibacia. Para tanto, ao longo do período de aquecimento o modelo calcula a fração da vazão na rede de drenagem oriunda de cada reservatório linear - superficial, sub-superficial e subterrâneo, realizando a correção nos volumes de acordo com o seguinte equacionamento:

$$\text{Se } PB_i > PB_{lim} \text{ então } VBat_{i,p} = (FCA_p)^{bx} \cdot VB_i \cdot (PB_i) + VB_i \cdot (1 - PB_i) \quad \text{Eq. 6}$$

$$\text{Se } PB_i \leq PB_{lim} \text{ então } VBat_{i,p} = VB_i \quad \text{Eq. 7}$$

Onde: $VBat_{i,p}$ é o volume atualizado no reservatório conceitual na minibacia i situada a montante do posto p [m^3]; VB_i é o volume calculado do reservatório conceitual na minibacia i [m^3]; PB_i é a fração da vazão na rede de drenagem originária do reservatório conceitual; PB_{lim} é a fração mínima de água necessária para que haja correção nos reservatórios conceituais do modelo e bx é um parâmetro de atualização com valores entre 0 e 1, o qual deve ser definido de forma a encontrar uma boa concordância entre os dados observados e calculados.

4.5.1.2. Diagramas de excedência - avaliação para HEPS de médio prazo

Uma das maneiras mais simples e já consagradas para sintetizar a grande quantidade de informações geradas nas previsões probabilísticas é através do uso de um diagrama de excedência. Esta técnica, chamada também de diagrama de persistência (Alfieri *et al.*, 2013), foi desenvolvida para proporcionar a extração das informações essenciais das previsões oriundas do sistema EFAS - *European Flood Awareness System*, aliada a uma fácil interpretação dos resultados por parte dos usuários finais (Ramos *et al.*, 2007; Thielen *et al.*, 2009a).

Neste diagrama, as previsões hidrológicas são avaliadas em termos de excedência de limiares (thresholds) de vazão pré-estabelecidos. O valor adicional que é proporcionado é dado especialmente através da evolução temporal das previsões, na qual pode ser verificada a persistência - ou não - das mesmas à medida que o evento se aproxima (Younis *et al.*, 2008). A Figura 18 apresenta um exemplo do diagrama utilizado para a presente pesquisa, elaborado com base nos diagramas apresentados por Meller (2012) e Alfieri *et al.* (2013). O diagrama contém diversas caixas sequenciais, as quais indicam o percentual de membros do conjunto que excede um determinado limiar de

referência. As datas apresentadas na coluna à esquerda do diagrama representam a data de início da previsão, enquanto que a linha superior indica as datas para as quais a previsão realizada é válida. A linha na parte inferior corresponde às datas do evento observado, para o qual é marcado um "X" nos dias em que vazões acima do limiar analisado realmente ocorreram.

		Previsão para a data														
		1/5	2/5	3/5	4/5	5/5	6/5	7/5	8/5	9/5	10/5	11/5	12/5	13/5	14/5	15/5
Data de início da Previsão	01/05/2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	02/05/2015		-	-	-	-	-	-	-	4%	5%	8%	4%	-	-	-
	03/05/2015			-	-	-	-	-	-	2%	16%	15%	8%	4%	-	-
	04/05/2015				-	-	-	-	-	2%	16%	15%	10%	22%	22%	-
	05/05/2015					-	-	-	-	2%	16%	14%	30%	32%	28%	4%
	06/05/2015						-	-	-	4%	36%	36%	52%	54%	20%	6%
	07/05/2015							-	-	14%	50%	56%	76%	48%	20%	6%
	08/05/2015								-	26%	70%	72%	72%	46%	16%	-
	09/05/2015									30%	86%	84%	84%	32%	12%	-
Observado		-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	-	-	-

Escala de cor

1% - 19%
20% - 39%
40% - 69%
70% - 100%

Figura 18. Exemplo de um diagrama de excedência utilizado para o presente estudo. Na medida em que vão sendo disponibilizadas novas previsões, é possível identificar uma certa persistência entre os dias 09/05 e 14/05, sugerindo grande possibilidade de superação do limiar no período.

A partir do diagrama excedência, pode ser feita a previsão de uma forma qualitativa, de acordo com a persistência de um maior ou menor número de membros superando o limiar de interesse. No presente estudo, são utilizados limiares de referência provenientes do sistema SACE-CPRM, atualmente em implantação na bacia do Taquari-Antas, o qual apresenta cotas específicas de atenção, alerta e inundação para algumas estações fluviométricas na bacia.

O diagrama aqui é utilizado apenas para o HEPS de médio prazo, já que para maiores horizontes e menor resolução do modelo torna-se interessante identificar a possibilidade de ocorrência de um evento para os próximos dias e, inclusive, a possibilidade de superação dos limiares pré-definidos, sem necessariamente apresentar um indicativo da incerteza associada ao instante de ocorrência do pico de cheia.

4.5.1.3. Diagrama "Peak-box" - avaliação para HEPS de curto prazo

Embora técnicas de visualização como o diagrama de excedência possam ser úteis para avaliar a possibilidade de ocorrência de cheia nos intervalos de tempo futuros, a interpretação de incertezas associadas a características importantes como magnitude e, especialmente, instante do pico (*timing*), acaba sendo bastante simplificada ou até mesmo suprimida em função da informação resultante depender apenas da superação - ou não - de limiares de vazão pré-definidos. De forma a possibilitar uma estimativa destas incertezas através da visualização das previsões é utilizada a técnica

do "Peak-Box" (Zappa *et al.*, 2013), uma ferramenta de visualização fundamentada em uma variação de box-plots (Figura 19) e que pode ser representada através de quatro elementos principais:

- (i) Um retângulo - o "Peak-Box" propriamente dito - é formado pelos pontos mais extremos dentre os membros do conjunto no que se refere à vazão de pico e *timing* da cheia, nos eixos vertical e horizontal, respectivamente. Sendo assim, a coordenada do canto inferior esquerdo do retângulo é definida pelo tempo mínimo em que é prevista uma vazão de pico (t_0) e pela menor vazão máxima resultante (p_0) do conjunto, considerando todo o horizonte de previsão. Analogamente, a coordenada do canto superior direito é representada pelo maior tempo em que é prevista uma vazão de pico (t_{100}) e pela vazão de maior magnitude (p_{100}) dentre os membros disponíveis. É importante deixar claro que as variáveis p e t que compõem qualquer uma das coordenadas do retângulo não necessariamente se referem ao mesmo membro do conjunto;
- (ii) Enquanto o *Peak-Box* visa representar todo o espectro do conjunto em relação ao tempo e pico da cheia, um segundo retângulo - denominado "IQR-Box" - é estabelecido de forma a destacar apenas a região interquartil destas informações. Para tanto, a coordenada do canto inferior esquerdo é atribuída ao percentil 25% do tempo de pico (t_{25}) e ao percentil 25% das vazões de pico (p_{25}), sendo o canto superior direito definido pelo percentil 75% do tempo de pico (t_{75}) e ao percentil 75% das vazões de pico (p_{75}) identificados dentre todos os membros componentes do conjunto;
- (iii) Uma linha horizontal, para representação da mediana das vazões de pico dentre os membros da previsão (p_{50}), situada entre os limites de t_0 e t_{100} ;
- (iv) Uma linha vertical, para representação da mediana dos tempos de pico dentre os membros da previsão (t_{50}), situada entre os limites de p_0 e p_{100} .

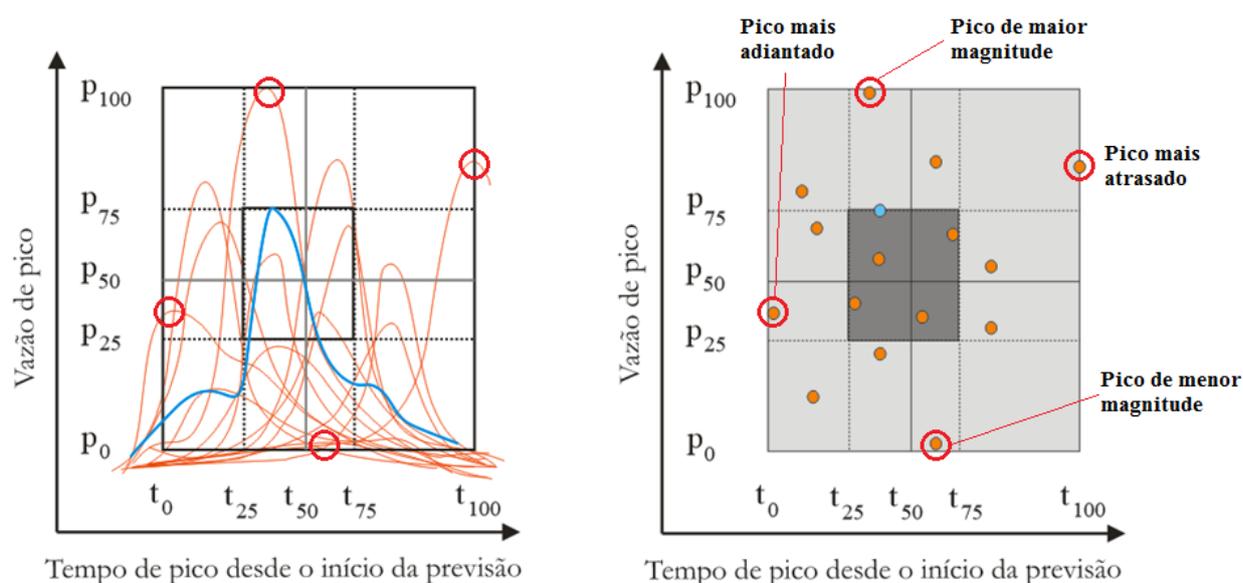


Figura 19. Visualização das incertezas na previsão por conjunto sobre a magnitude e no tempo de pico da cheia, através da técnica do *Peak-Box*. Os pontos em destaque representam as coordenadas de formação do retângulo, referentes aos membros mais extremos do conjunto. Fonte: Adaptado de Zappa *et al.* (2013).

A Figura 19 acima ilustra os elementos que compõem a estrutura do *Peak-Box*. No painel à esquerda, é apresentado um exemplo de implementação com as coordenadas dos retângulos externo e interno - *Peak-Box* e IQR-Box, respectivamente - atribuídas de acordo com as considerações supracitadas. Nesta figura, as linhas em cor laranja representam cada membro da previsão por conjunto, enquanto que a linha azul mostra o hidrograma observado. Além disso, t_{xx} e p_{yy} representam os quartis 0%, 25%, 50%, 75% e 100% do tempo e da vazão de pico, respectivamente, nos eixos 'x' e 'y'. No painel à direita é mostrada uma com extração das informações essenciais, sendo que os pequenos círculos representam a posição do pico de cada um dos membros (e do hidrograma observado), enquanto que a área escura engloba apenas os membros situados em ambas regiões interquartis (pico e *timing* da cheia).

Esta técnica é aqui utilizada para a visualização das incertezas apenas no HEPS de curto prazo, uma vez que a proximidade no tempo em relação a um evento requer uma avaliação mais precisa quanto às suas possíveis características, a exemplo da magnitude e do instante de estabilização do pico de cheia. A avaliação é feita partir da inclusão dos resultados de previsões em tempos anteriores na previsão atual do evento de cheia - uma espécie de atualização no *Peak-Box* à medida que novas previsões são disponibilizadas - proporcionando que as mesmas possam ser avaliadas de uma forma conjunta na interpretação de incertezas.

4.5.2. Avaliação estatística das previsões hidrológicas

O conhecimento do desempenho das previsões hidrológicas é fundamental para a correta interpretação dos resultados gerados, o que é um aspecto muito importante quando se tem interesse em avaliar a utilidade das previsões hidrológicas como informação complementar em sistemas de alerta contra cheias. No presente estudo, os resultados das previsões são comparados a uma rodada de referência a partir da simulação com a "chuva perfeita" e sem assimilação de dados (e.g. Thirel *et al.*, 2008; Pappenberger *et al.*, 2008; Bartholmes *et al.*, 2009; Alfieri *et al.*, 2013), de maneira que possíveis erros associados tanto ao modelo hidrológico como às vazões observadas não sejam considerados durante a avaliação. Os seguintes índices de desempenho são utilizados para verificação do desempenho das previsões (Jolliffe e Stephenson, 2003; Wilks, 2006):

(i) Erro Médio Relativo (EMR):

Este índice, também interpretado como viés relativo, mede a diferença média entre as variáveis previstas e observadas, dividido pela média das observações. Aqui ele é utilizado para medir a diferença média relativa entre as previsões (determinística e média dos HEPS) e as observações:

$$EMR = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{prev_i} - Q_{obs_i})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs_i}} \quad \text{Eq. 8}$$

Onde: n é o número de observações; Q_{obs_i} é vazão observada no instante de tempo i e Q_{prev_i} é a vazão dada pela média do conjunto, no instante de tempo i .

É importante destacar que EMR positivos e negativos podem acabar se compensando nos resultados, ou seja, um erro relativo nulo não necessariamente implica na inexistência de discrepâncias entre as vazões previstas e observadas. Entretanto o EMR fornece uma medida do viés de primeira ordem nas previsões, ou seja, se estas últimas possuem uma tendência a superestimar ou subestimar as vazões observadas.

(ii) Erro Médio Absoluto (EMA)

Este índice mede a diferença absoluta média entre as variáveis previstas e observadas. Aqui ele é utilizado como uma medida do erro entre as previsões (determinística e média dos HEPS) e as observações ou seja, o valor médio de quanto as primeiras tendem a desviar dos valores observados, em termos absolutos:

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_{obs_i} - Q_{prev_i}| \quad \text{Eq. 9}$$

Onde: n é o número de observações; Q_{obs_i} é vazão observada no instante de tempo i e Q_{prev_i} é a vazão dada pela média do conjunto, no instante de tempo i .

Em outras palavras, o EMA fornece uma medida de acurácia do sistema de previsão, sendo que esta é maior para erros médios absolutos menores em relação a observação.

(iii) Mean Continuous Ranked Probability Score (CRPS):

Este índice mede a qualidade de uma previsão probabilística contínua, resumindo esta a um valor singular (único). Em outras palavras, ele mede a integral das diferenças quadráticas entre a função cumulativa de probabilidades previstas e a respectiva função cumulativa das probabilidades observadas:

$$CRPS = \int_{-\infty}^{\infty} [F(y) - F_0(y)]^2 dy, \text{ sendo:} \quad \text{Eq. 10}$$

$$F_0(y) = \begin{cases} 0, & y < \text{valor observado} \\ 1, & y \geq \text{valor observado} \end{cases} \quad \text{Eq. 11}$$

Onde: $F_0(y)$ é a função cumulativa de probabilidades observadas, que assume valores de 0 ou 1 para as faixas, respectivamente, abaixo e acima do valor observado; e $F(y)$ é a função cumulativa de probabilidades da previsão por conjunto;

Embora o CRPS não seja muito interpretável diretamente pelo seu valor, em termos absolutos, este índice é o equivalente probabilístico do erro médio absoluto (EMA) para as previsões determinísticas, o que torna ambas abordagens diretamente comparáveis (Figura 20). É calculado como a média do índice CRPS para todos os pares de previsões e respectivas observações, sendo equacionado da seguinte forma:

$$CRPS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n CRPS_i \quad \text{Eq. 12}$$

Onde: n é o número de intervalos de tempo e $CRPS_i$ é a medida deste índice para o intervalo de tempo i .

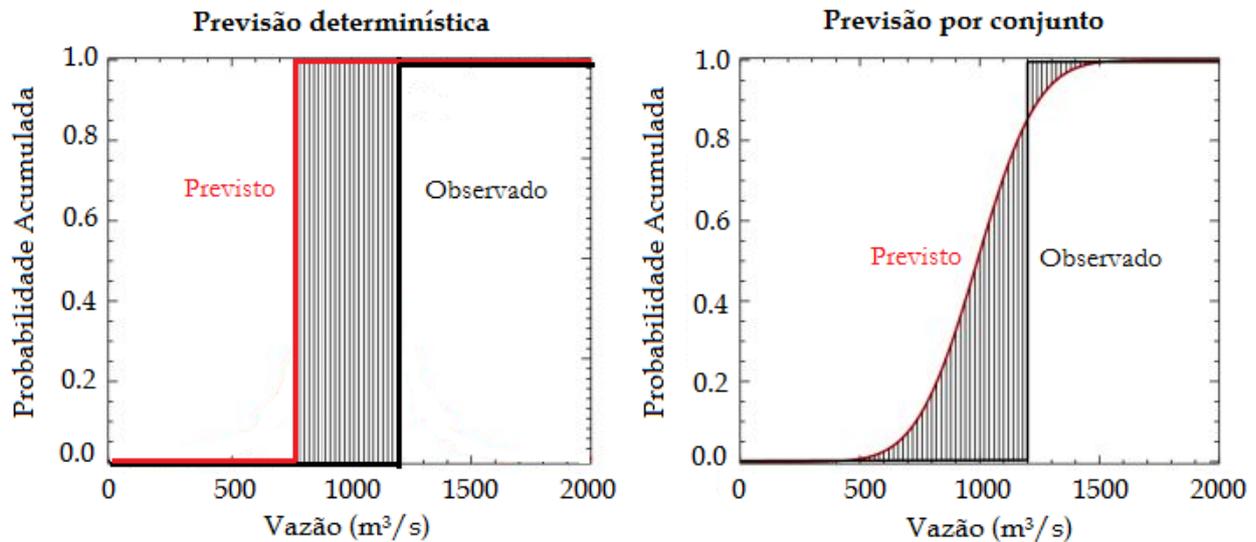


Figura 20. Interpretação do índice CRPS para as previsões determinística e por conjunto. Fonte: Adaptado de www.eumetcal.org

(iv) Brier Skill Score (BSS):

O índice Brier Score mede o erro médio quadrático da probabilidade para a ocorrência de um evento discreto, o qual pode ser um determinado limiar de referência. Este índice é análogo ao erro médio quadrático de uma previsão determinística, porém as observações, bem como as unidades de erro, são dadas em termos de probabilidades.

$$BS(L) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (pp_i - po_i)^2 \tag{Eq. 13}$$

Onde: L é o limiar de referência analisado; pp_i é a probabilidade prevista para o instante i , neste caso a fração do número total de membros que superam o limiar de vazão L para o dado instante; po_i é a probabilidade observada no instante i , a qual assume os valores 1 ou 0 respectivamente para os casos onde houve ou não a ocorrência do evento (superação do limiar L).

Uma previsão que possui resultados perfeitos em relação à excedência dos limiares de referência, tem valores de BS iguais a 0. Entretanto, eventos mais raros em termos de superação do limiar facilitam a obtenção de valores considerados bons para o índice BS, o que pode levar a uma falsa impressão do desempenho da previsão. Por este motivo, o Brier Skill Score (BSS) é preferido ao BS nesta situação, o qual fornece uma medida de destreza do sistema em comparação a uma previsão de referência (p.ex. climatologia).

$$BSS = \frac{BS_{prev} - BS_{ref}}{BS_{perf} - BS_{ref}} = 1 - \frac{BS_{prev}}{BS_{ref}} \tag{Eq. 14}$$

A destreza (ou habilidade) de um sistema de previsão sempre é dada em relação ao sistema de referência analisado e pode ser entendida como o valor agregado do primeiro em relação ao segundo, neste caso em termos de indicação de vazões acima ou abaixo de um determinado limiar. No presente estudo, a previsão determinística é utilizada como referência (BS_{ref}), de maneira a verificar a destreza da previsão por conjunto em relação à anterior.

(v) Diagrama ROC (Relative Operating Characteristics)

O diagrama ROC mede a capacidade de um sistema de previsão por conjunto em discriminar entre eventos ocorridos ou não, de acordo com um limiar de vazão específico. Neste caso, as vazões previstas não são analisadas como variáveis contínuas, mas sim reduzidas a eventos binários - dicótomos - de excedência ou não-excedência de um determinado limiar. Para tanto, é necessária a elaboração de uma tabela de contingência 2 x 2 para descrever a distribuição conjunta de previsões e observações, conforme apresentado na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2. Tabela de contingência (2x2) para eventos dicótomos. Fonte: Adaptado de Wilks (2006) e Bartholmes *et al.* (2009).

		Observado	
		Sim	Não
Previsto	Sim	a (Acerto)	b (Falso Alarme)
	Não	c (Não Detecção)	d (Correta Rejeição)

Com base na tabela de contingência acima, podem ser extraídos índices como a Probabilidade de Detecção (POD) e a Probabilidade de Falsa Detecção. A POD indica a frequência de previsões corretas, dado que o evento foi observado, enquanto que a POFD indica a frequência dos eventos que não ocorreram, mas que foram previstos:

$$POD = \frac{a}{a + c} \text{ (melhor = 1);} \tag{Eq. 15}$$

$$POFD = \frac{b}{b + d} \text{ (melhor = 0);} \tag{Eq. 16}$$

No diagrama ROC (Figura 21), são plotados os pares Probabilidade de Detecção x Probabilidade de Falsa Detecção, com a POD no eixo das ordenadas e a POFD no eixo das abscissas. Usualmente, estes pares (POD, POFD) são ordenados a partir dos valores do membro mais baixo para o mais elevado, produzindo um resultado na forma de uma curva para cada limiar. Além disso, a linha com inclinação igual à unidade representa o limite para o qual existe alguma destreza na previsão. Curvas abaixo desta linha indicam que o sistema tende a emitir um número

maior de falsos alarmes do que a correta detecção dos eventos, ocorrendo justamente o contrário para curvas acima da linha mencionada.

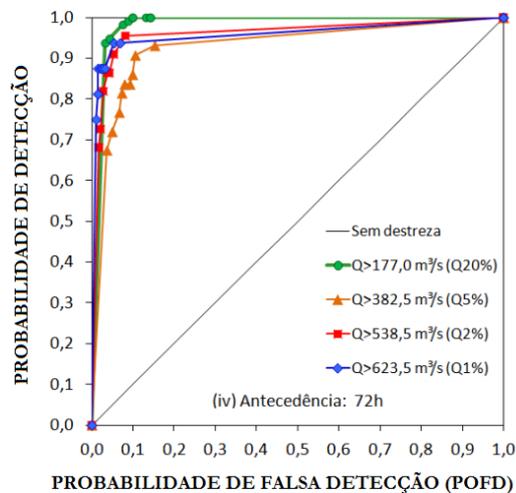


Figura 21. Exemplo de um diagrama Relative Operating Characteristics (ROC) para a previsão por conjunto. Fonte: Meller (2012).

(vi) Rank Histogram

O Rank Histogram, também denominado de *Talagrand Histogram*, permite avaliar se o espalhamento do mesmo representa bem a variabilidade das observações. O histograma (Figura 22) é elaborado a partir da contagem da fração das observações que caem entre quaisquer membros ordenados da distribuição de previsões, sendo que cada faixa intermediária entre os membros do conjunto é denominada de *Rank* (ou classe, caso os membros estiverem agrupados em decis). O número de *Ranks* - ou classes - é sempre igual ao número de membros da previsão por conjunto (ou decis) mais um, já que os extremos representam a fração das observações que caem abaixo e acima, respectivamente, do menor e do maior membro.

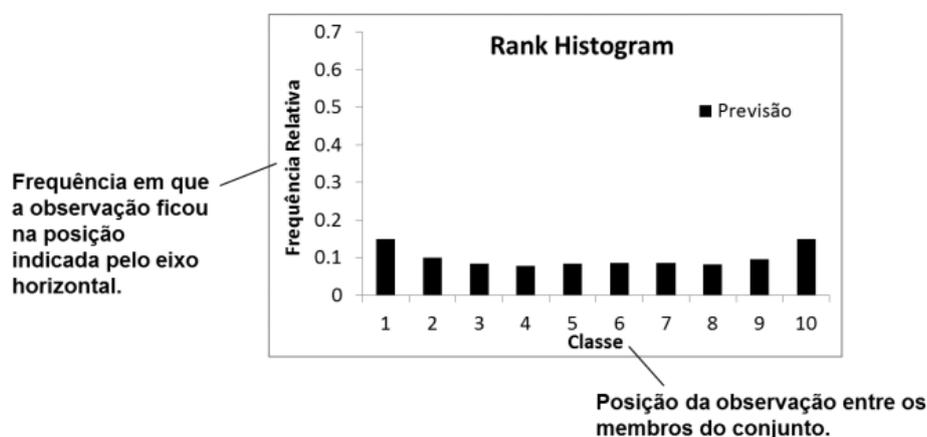


Figura 22. Exemplo de um Rank Histogram para a previsão por conjunto.

Um conjunto com espalhamento adequado deve apresentar um histograma aproximadamente uniforme. Quando o histograma possui um formato próximo de "U", significa que existe uma condição de subespalhamento dos membros, já que boa parte das observações tende a situar-se tanto abaixo do membro inferior como acima do membro superior do conjunto. Analogamente, um histograma com forma de pirâmide indica um excesso de espalhamento, já que a maior parte das observações tende a se concentrar nos membros médios da previsão e praticamente nunca nos extremos.

Além disso, o Rank Histogram permite também avaliar o viés condicional das previsões. Histogramas com a forma de "L" e "L invertido", representam respectivamente subestimativa e superestimativa nas vazões previstas, já que uma maior parte das observações tende a cair entre os membros mais elevados ("L invertido") ou entre os membros mais baixos ("L") do conjunto.

Capítulo 5. Simulação hidrológica na bacia do Taquari-Antas/RS

5.1. Descrição da área de estudo e aquisição de informações

A bacia do rio Taquari-Antas localiza-se na região Sul do Brasil entre as latitudes $28^{\circ} 10'$ e $29^{\circ} 57' S$ e longitudes $49^{\circ} 56'$ e $52^{\circ} 38' W$, integrando a região hidrográfica do Atlântico Sudeste conforme a classificação oficial da ANA. Em dimensões territoriais, a bacia possui uma área de drenagem de 26.415 km^2 , sendo que o seu rio principal percorre uma extensão total de cerca de 530 km até a foz no rio Jacuí. Segundo Ferri e Togni (2012), suas nascentes - no rio das Antas - ocorrem nos municípios de Cambará do Sul e Bom Jesus em altitudes de aproximadamente 1.200 m próximo às escarpas da Serra Geral, recebendo o nome de rio Taquari logo após a confluência com o rio Carreiro. Além deste último, dentre os principais afluentes estão os rios da Prata, Guaporé, Forqueta e Taquari-Mirim, pela margem direita, e rios Tainhas, Camisas e Lajeado Grande, pela margem esquerda (Figura 23).

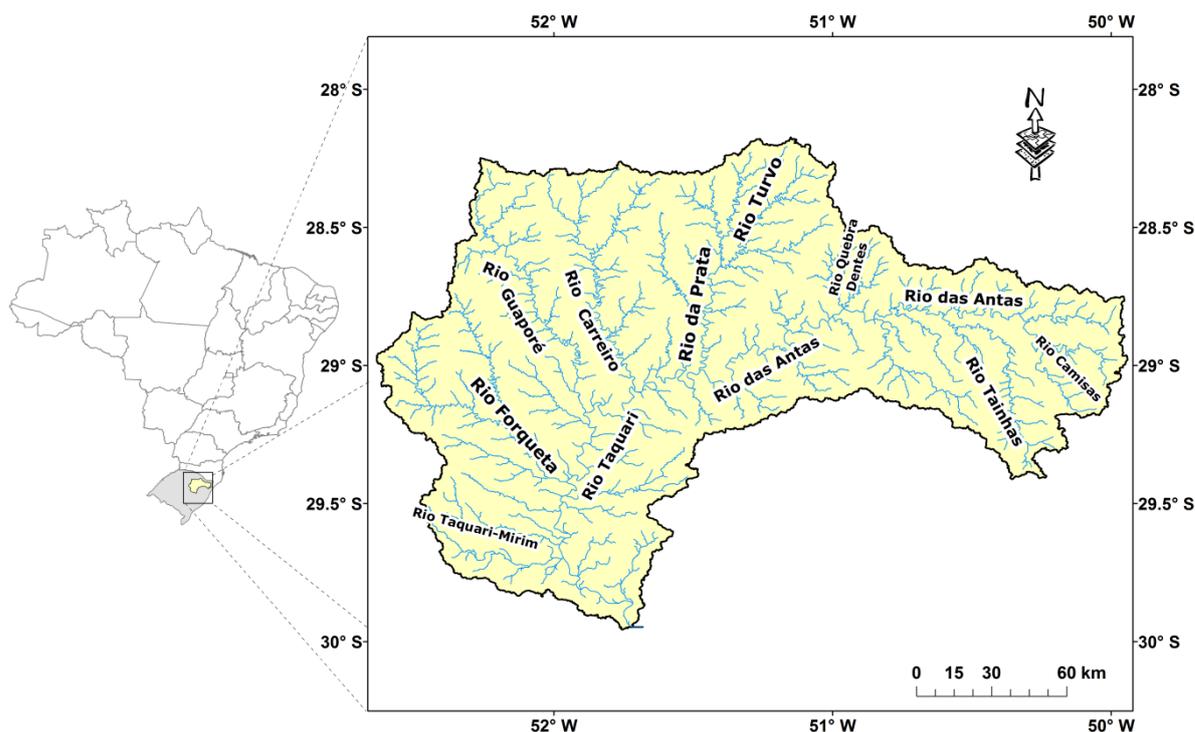


Figura 23. Localização geográfica da bacia do Taquari-Antas, na região Sul do Brasil.

De acordo com informações da FEPAM, a bacia é dividida em três regiões distintas em função das características topográficas, as quais são denominadas de Alto, Médio e Baixo Taquari-Antas. O trecho do rio principal correspondente ao Alto Taquari-Antas possui 183 km de extensão e é compreendido entre as nascentes e a confluência do rio Quebra-Dentes com o rio das Antas,

possuindo uma declividade média acentuada - 4,8 m/km - rios encaixados e muitas corredeiras. O segundo trecho, localizado no Médio Taquari-Antas com uma distância longitudinal de 207 km, situa-se entre a foz dos rios Quebra-Dentes e Guaporé e caracteriza-se por uma declividade menos acentuada - média de 1,6 m/km - porém ainda apresentando vales encaixados e algumas corredeiras. Neste trecho localiza-se o complexo de usinas hidrelétricas a fio d'água do CERAN (Companhia Energética do Rio das Antas) com as UHEs Castro Alves, Monte Claro e 14 de Julho, totalizando 12,4 km² de área alagada em seus reservatórios e 360 MW de capacidade instalada. O complexo de usinas teve sua construção iniciada no ano de 2004, sendo concluído em dezembro de 2008 com o início da operação da UHE 14 de Julho.

Por fim, o trecho do Baixo Taquari-Antas, já com a denominação de rio Taquari, segue por uma extensão de 140 km até sua foz no rio Jacuí, possuindo característica de rio de planície com declividade média de 0,2 m/km. Outro aspecto importante é a barragem-eclusa de Bom Retiro do Sul localizada aproximadamente 65 km a montante da foz, a qual foi construída no ano de 1976 para garantir condições de navegabilidade no rio Taquari até o Porto Fluvial de Estrela. Conforme informações da Administração de Hidrovias do Sul (AHSUL), a cota de represamento estabelecida para a operação da barragem é de 13 m, cujo remanso se estende cerca de 30 km até a confluência com o Rio Forqueta.

A precipitação anual média na bacia do Taquari-Antas é relativamente bem distribuída ao longo do ano, com variações na faixa entre 1.600 mm a 1.800 mm. Quanto à variabilidade da temperatura, a bacia possui valores típicos de clima temperado, com média anual em torno de 16,5°C e valores médios para os meses mais frio e mais quente de, respectivamente, 8,1°C e 27,1°C (DRH/SEMA, 2011).

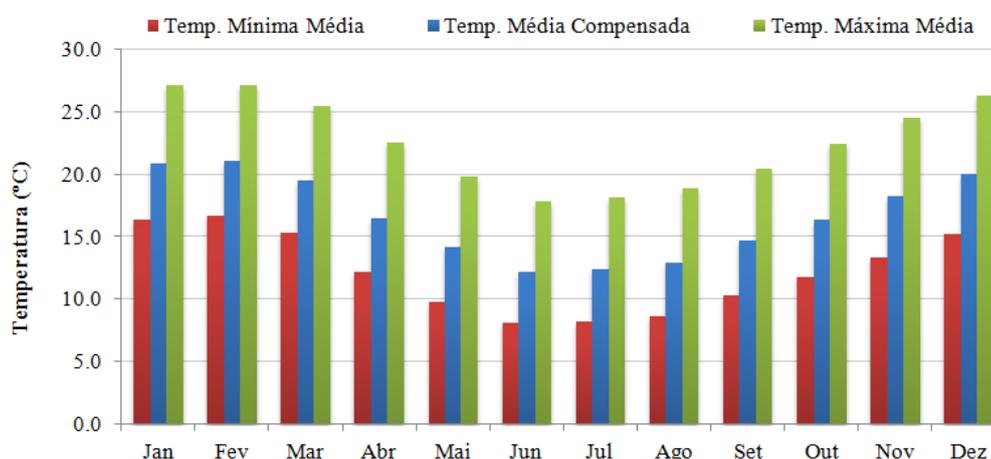


Figura 24. Gráfico apresentando as temperaturas mínima, máxima e média compensada, com base nas estações climatológicas do INMET. Adaptado de DRH/SEMA (2011)

Segundo informações da FEPAM, a bacia pode ser caracterizada por regimes torrenciais com escoamentos superficiais rápidos e bruscas variações de vazão, cuja ocorrência é atribuída a fatores como rede de drenagem densa com tendência radial (Collischonn, 2001), declividade média elevada, pouca profundidade e baixa permeabilidade dos solos. Tais características acarretam em cheias com situação de inundação desde a confluência dos rios das Antas e Carreiro, no município de São Valentim do Sul, até a foz no rio Jacuí, sendo o trecho mais crítico localizado entre os municípios de Encantado e Bom Retiro do Sul (DRH/SEMA, 2011). As enchentes acontecem com frequência quase anual na bacia, porém em alguns casos ocorrem mais de uma vez no ano a exemplo das cheias recentes de 2007, 2009, 2010 (Ferri e Togni, 2012) e 2011. O rio Taquari inundou a região mais baixa da bacia - o Vale do Taquari - 44 vezes no período compreendido entre 1940 e 2010, sendo que as maiores cheias registradas ocorreram nos anos de 1873, 1912 e 1941 (Ferri e Togni, 2012).

Neste contexto, a ANA lançou recentemente o Atlas de Vulnerabilidade a Inundações focado nos eventos de inundações graduais, cuja característica principal é a subida e descida paulatina dos níveis dos rios. Os mapas foram elaborados para cada uma das 5 regiões geográficas do Brasil, contando com a participação dos estados através de entrevistas realizadas com diversos atores envolvidos com a prevenção e o registro das inundações. A Figura 25 apresenta uma compilação das informações obtidas do Atlas quanto à vulnerabilidade na bacia de estudo, destacando-se a criticidade do trecho situado na região do Baixo Taquari-Antas.

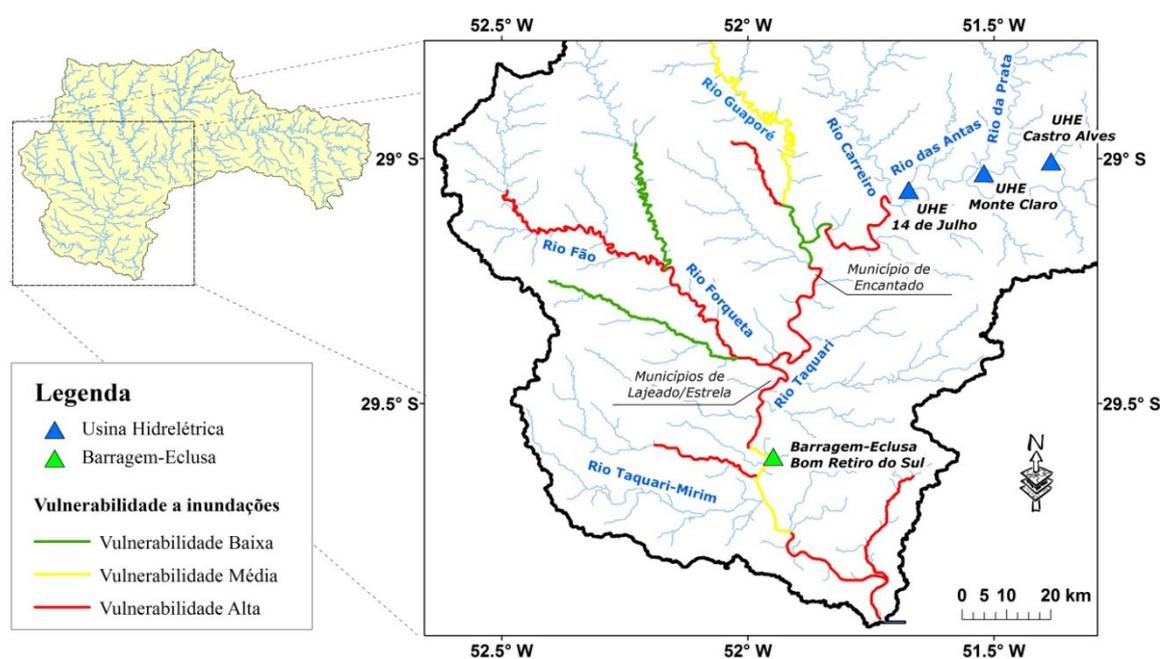


Figura 25. Síntese das informações quanto à vulnerabilidade a inundações na bacia do Taquari-Antas.

5.1.1. Fonte de dados quanto às características físicas da bacia

5.1.1.1. Informações a respeito do tipo de solo, uso do solo e cobertura vegetal

O mapa de solos utilizado para a bacia do Rio Taquari-Antas foi obtido a partir da base de dados geográfica do Plano de Bacia Hidrográfica, elaborado pela empresa STE (DRH/SEMA, 2011). Este mapa teve como base os levantamentos exploratórios do projeto RADAMBrasil desenvolvido ao longo dos anos de 1970 e 1980, sendo posteriormente complementado por estudos mais detalhados produzidos pela Embrapa Solos e pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Através da Figura 26, é possível identificar que a maior parte da bacia é formada por Argissolos e Neossolos - aproximadamente 50% da área, principalmente na região central. Já na região norte, o tipo de solo é distinto com predominância de Latossolo, enquanto que na área ao leste, região das nascentes do Rio das Antas, o Cambissolo caracteriza-se pelo tipo de solo mais usual. Na Tabela 3 estão apresentados os percentuais de cada tipo de solo verificado na área de estudo.

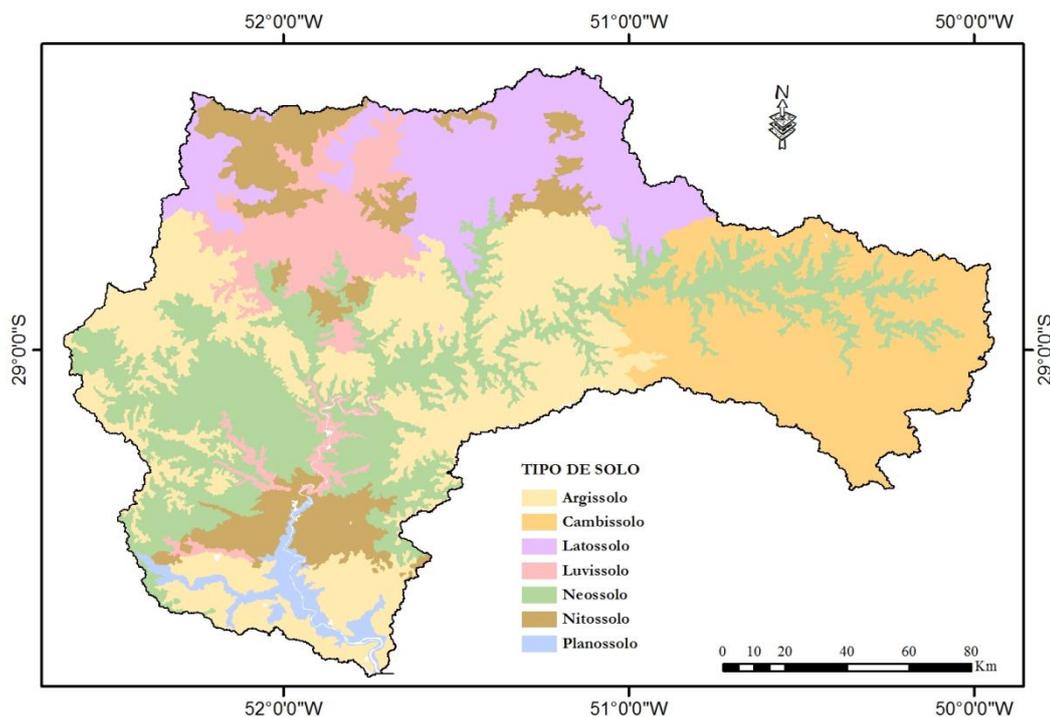


Figura 26. Mapa de solos para a bacia do Taquari-Antas. Fonte: IBGE/Embrapa Solos - DRH/SEMA (2011).

Tabela 3. Tipos de solo identificados na bacia do Taquari-Antas.

Tipo de solo	Percentual da área da bacia (%)
Argissolo	25,5
Luvissolo	8,2
Neossolo	23,7
Latossolo	13,75

Tipo de solo	Percentual da área da bacia (%)
Nitossolo	9,35
Planossolo	2,0
Cambissolo	17,5

Da mesma forma que o tipo de solo, o mapa de uso do solo e cobertura vegetal foi obtido a partir do banco de dados disponível no Plano de Bacia. Conforme descrito por DRH/SEMA (2011), o desenvolvimento deste mapa envolveu a utilização de imagens de satélite CBERS – Satélite Sino Brasileiro de Recursos Terrestres - 2B com resolução espacial de 20 m, sendo as imagens obtidas no período compreendido entre janeiro de 2008 e fevereiro de 2009. O mapeamento resultou na atribuição de 11 classes de uso e cobertura vegetal (Tabela 4), conforme apresentado na Figura 27 a seguir.

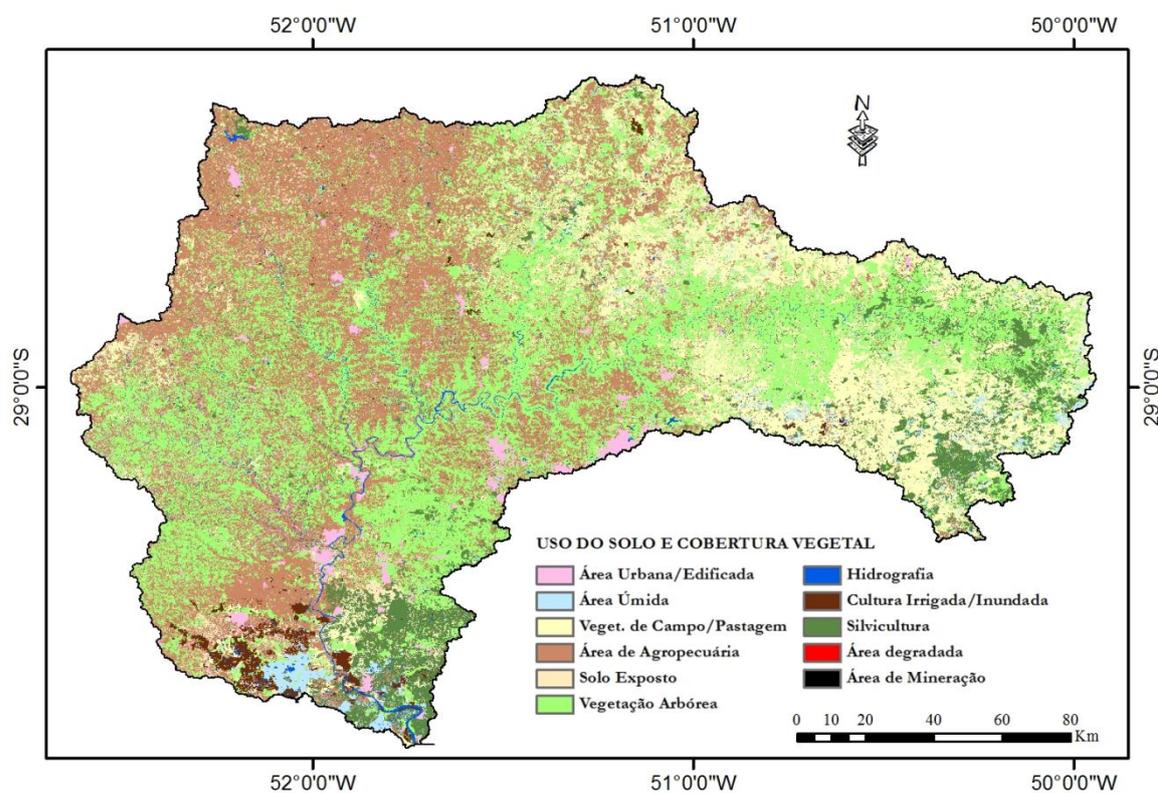


Figura 27. Mapa de uso do solo e cobertura vegetal para a bacia do Taquari-Antas. Fonte: DRH/SEMA

Tabela 4. Classes de uso e ocupação do solo/cobertura vegetal identificadas na bacia do Taquari-Antas.

ID	Classe de uso e cobertura vegetal	Percentual da área (%)
1	Área Urbana/Edificada	1,73
2	Área Úmida	2,92
3	Vegetação de campo/pastagem	16,49
4	Área de agropecuária	32,58
5	Solo exposto	2,93
6	Vegetação arbórea	33,54

ID	Classe de uso e cobertura vegetal	Percentual da área (%)
7	Hidrografia	1,18
8	Cultura Irrigada/Inundada	1,36
9	Silvicultura	7,21
10	Área degradada	0,03
11	Área de Mineração	0,03
TOTAL		100,00

De acordo com a tabela acima, as áreas de agropecuária e vegetação arbórea correspondem por cerca de 65% da região de estudo. A presença de áreas com vegetação de campo e pastagem (16,7%) além de silvicultura (7,21%) também possuem um percentual relativamente significativo, enquanto que áreas edificadas compõem menos de 2% da bacia e apontam para um baixo índice de urbanização.

5.1.1.1. Modelo Digital de Elevação (MDE)

O Modelo Digital de Elevação para a região da bacia do Taquari-Antas foi obtido a partir do *website* do *Consortium for Spatial Information of the Consultative Group for International Agricultural Research* (CGIAR-CSI). Os dados disponibilizados se referem ao pós-processamento dos produtos oriundos do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com remoção de vazios e correção das elevações sobre trechos hidrográficos de maior relevância. Estes dados são disponíveis em unidades elementares (células) com medida de 3 arcossegundos, cuja resolução espacial é de aproximadamente 90 m.

5.1.2. Fonte de dados quanto às características hidrológicas da bacia

Quando o modelo hidrológico é utilizado para previsão hidrológica, é importante que o mesmo possua um intervalo de tempo de cálculo compatível com as características da bacia de interesse, a exemplo dos tempos de resposta e de propagação da onda de cheia ao longo da rede de drenagem. Apesar das previsões serem de curto a médio prazo, a bacia do Taquari-Antas é caracterizada por bruscas variações de vazão mesmo em pequenos intervalos de tempo, sendo que um único valor diário muitas vezes acaba por suprimir o instante e a magnitude real do pico das cheias. Desta forma, o MGB-IPH foi configurado para intervalo de tempo horário, simulando uma situação na qual informações da rede telemétrica são fornecidas para atualização do modelo de previsão em tempo real. Particularmente, as informações hidrológicas de entrada ao MGB-IPH em intervalo de tempo horário compõem-se da precipitação e da vazão, sendo que as informações climatológicas (i.e. temperatura, umidade relativa, insolação, vento e pressão) podem ser fornecidas através da média de longo período (normais) para cada uma das variáveis.

5.1.2.1. Informações pluviométricas

As informações pluviométricas em intervalo de tempo horário identificadas (Tabela 5) são provenientes de três diferentes entidades, sendo estas o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a CPRM e a Unidade Integrada Vale do Taquari de Ensino Superior (UNIVATES):

- No caso do INMET, foram selecionadas 8 estações automáticas com representatividade na bacia do Taquari-Antas, cujos dados foram solicitados para o período entre junho de 2009 e dezembro de 2013. Para as datas posteriores, os dados são adquiridos diretamente do sistema de informações, disponíveis no próprio *website* do INMET;
- A CPRM possui atualmente 6 estações telemétricas instaladas desde o final do ano de 2013 (Outubro/Novembro), tendo em vista a futura operação do Sistema de Alerta contra Cheias - SACE na bacia do Taquari-Antas. Estas informações foram requisitadas no contexto do presente projeto e encontram-se disponibilizadas em um servidor ftp para *download*;
- A UNIVATES, em coordenação conjunta com a AHSUL, operou um sistema de monitoramento de níveis em tempo real na bacia entre os anos de 2003 e 2007, o qual foi desativado neste mesmo ano devido à alterações na tecnologia de transmissão de dados (Both *et al.*, 2008). Recentemente, o sistema foi reativado através de um projeto intitulado **“Revitalização do sistema de previsão e alerta de inundações do Vale do Taquari”**, recebendo inclusive equipamentos de medição automática de precipitação. Os dados são disponibilizados em um *website* para fins de acompanhamento das informações hidrológicas na bacia, cujo endereço é http://netsenses.univates.br/station_map.php

Tabela 5. Estações telemétricas com envio de dados de precipitação em tempo real, na bacia do rio Taquari-Antas.

Nº	Nome da Estação Telemétrica	Responsável	Latitude (°)	Longitude (°)	Período de dados
1	Encantado	CPRM	-29,2344	-51,8551	Nov/2013 - Atual
2	Estrela	CPRM	-29,4733	-51,9601	Out/2013 - Atual
3	Muçum	CPRM	-29,1672	-51,8686	Nov/2013 - Atual
4	Santa Lúcia	CPRM	-29,1194	-51,9122	Out/2013 - Atual
5	Linha José Julho	CPRM	-29,0977	-51,6996	Nov/2013 - Atual
6	Passo Tainhas	CPRM	-28,8640	-50,4232	Out - Dez/2013
7	Bento Gonçalves	INMET	-29,1672	-51,5347	Jun/2009 - Atual
8	Canela	INMET	-29,3688	-50,8274	Jun/2009 - Atual
9	Lagoa Vermelha	INMET	-28,2219	-51,5122	Jun/2009 - Atual
10	Passo Fundo	INMET	-28,2294	-52,4039	Jun/2009 - Atual
11	São José dos Ausentes	INMET	-28,7514	-50,0583	Jun/2009 - Atual

Nº	Nome da Estação Telemétrica	Responsável	Latitude (°)	Longitude (°)	Período de dados
12	Soledade	INMET	-28,8536	-52,5417	Jun/2009 - Atual
13	Teutônia	INMET	-29,4501	-51,8242	Ago/2012 - Atual
14	Vacaria	INMET	-28,5136	-50,8828	Jun/2009 - Atual
15	André da Rocha	UNIVATES	-28,6306	-51,5765	Mar/2014 - Atual
16	Anta Gorda	UNIVATES	-28,9832	-52,0004	Mar/2014 - Atual
17	Fontoura Xavier	UNIVATES	-28,9814	-52,3465	Mar/2014 - Atual
18	Marau	UNIVATES	-28,4503	-52,1991	Mar/2014 - Atual
19	Marques de Souza	UNIVATES	-29,3256	-52,0954	Mar/2014 - Atual
20	Monte Alegre dos Campos	UNIVATES	-28,6858	-50,7814	Mar/2014 - Atual
21	Rio das Antas	UNIVATES	-29,0455	-51,5698	Mar/2014 - Atual
22	São Marcos	UNIVATES	-28,9677	-51,0653	Mar/2014 - Atual

Embora a quantidade de estações telemétricas existentes na bacia seja relativamente suficiente para uma boa cobertura da precipitação, a baixa disponibilidade de registros históricos com transmissão em tempo real identificada acaba prejudicando o ajuste do modelo hidrológico para intervalos de tempo menores do que 1 dia. Observando a tabela acima, apenas as estações do INMET fornecem um período de dados suficiente para a calibração, as quais se encontram localizadas principalmente nas proximidades do divisor de águas, sobretudo na região das cabeceiras de drenagem. Para aumentar a quantidade de informações nos pontos intermediários da bacia, um procedimento de adequação dos dados de entrada foi realizado considerando a desagregação horária a partir de dados diários. As informações de chuva em intervalo de tempo diário foram selecionadas através do sistema Hidroweb/ANA, sendo identificados um total de 27 postos pluviométricos (Tabela 6) para a região de estudo no período correspondente às estações do INMET (2009 - 2013).

Tabela 6. Postos pluviométricos com dados diários selecionados, no período 2009-2013.

Nº	Código da Estação	Latitude (°)	Longitude (°)
1	02849019	-28,8350	-49,8377
2	02849035	-28,6263	-49,9333
3	02850006	-28,4494	-50,2963
4	02850009	-28,8675	-50,4561
5	02850016	-28,9375	-50,6540
6	02850020	-28,6833	-50,7808
7	02851003	-28,8533	-51,2844
8	02851021	-28,8677	-51,4483
9	02851022	-28,6194	-51,8666
10	02851024	-28,7561	-51,6280
11	02851044	-28,8444	-51,8791
12	02851051	-28,3238	-51,2111
13	02851052	-28,4619	-51,5377

Nº	Código da Estação	Latitude (°)	Longitude (°)
14	02852030	-28,5613	-52,5527
15	02852031	-28,4666	-52,3666
16	02852052	-28,3263	-52,0538
17	02852053	-28,8130	-52,5113
18	02950063	-29,2769	-50,3105
19	02951022	-29,3357	-51,1902
20	02951027	-29,3663	-51,3711
21	02850004	-28,1522	-50,4408
22	02952035	-29,4538	-52,6325
23	02952036	-29,3125	-52,4225
24	02952037	-29,4702	-52,2497
25	02952038	-29,0405	-52,2847
26	03051005	-30,0897	-51,6305
27	03051031	-30,1588	-51,9311

Para a desagregação, o procedimento foi realizado de maneira similar ao método aplicado no estudo de Andreolli *et al.* (2006). Os registros diários das estações pluviométricas são transformados para intervalo de tempo horário com base na estação telemétrica mais próxima do INMET e com disponibilidade de dados, assumindo-se esta como sendo representativa da distribuição temporal da chuva. É importante ressaltar que a precipitação diária nos postos pluviométricos, com base nos padrões da Agência Nacional de Águas - ANA, refere-se a duas medições consecutivas realizadas às 9:00, para o dia anterior e o atual. Por este motivo, foram considerados os dados das estações telemétricas entre as 9:00 do dia atual e às 8:00 do dia seguinte, o que possibilita a compatibilização das informações diária x horária.

Ainda, para os casos onde não é possível identificar o padrão temporal da chuva devido a uma eventual falha em todas as estações telemétricas, uma distribuição temporal homogênea da precipitação total é adotada, considerando a mesma fração da chuva para cada hora do dia. Outras distribuições foram também testadas porém resultaram em diferenças muito pequenas, uma vez que falhas em todas as estações telemétricas aconteceram em menos de 2% da série. A Figura 28 mostra a distribuição espacial dos postos de chuva utilizados no estudo.

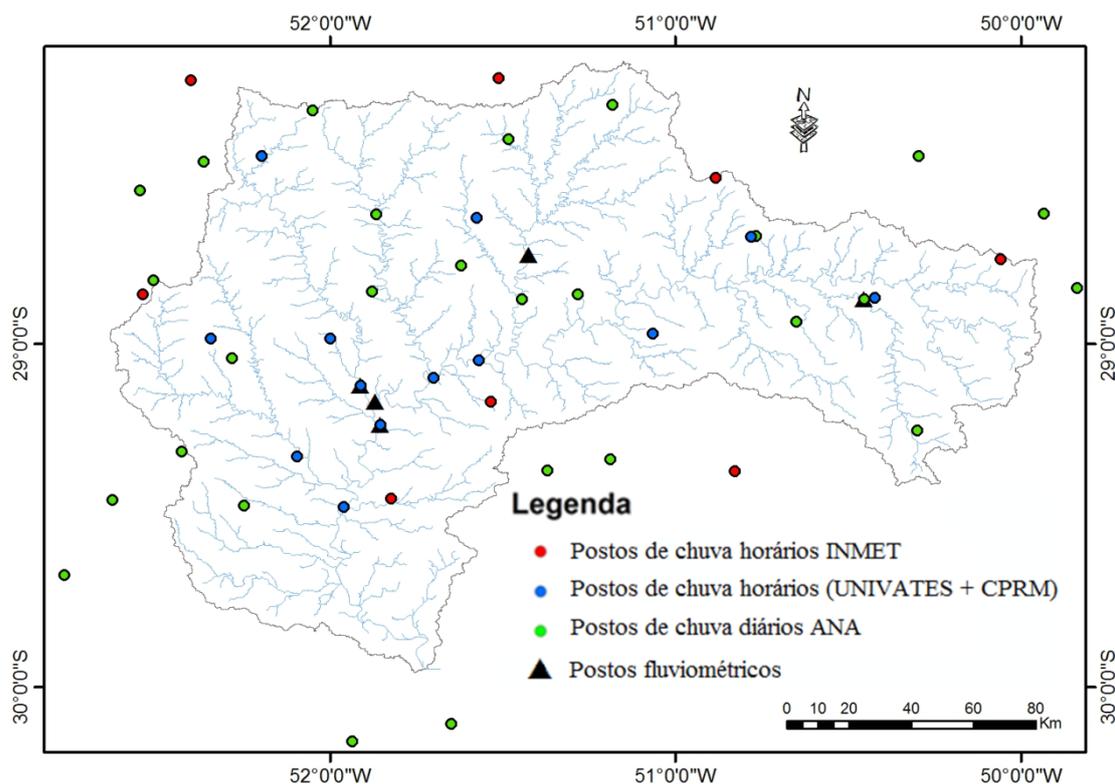


Figura 28. Distribuição espacial dos postos horários e diários utilizados na bacia do Taquari-Antas.

5.1.2.2. Informações de vazão e nível

As estações fluviométricas com transmissão de dados em tempo real na bacia do Taquari-Antas fazem parte da rede telemétrica da CPRM e da UNIVATES, em sua grande maioria posicionadas juntamente com as estações automáticas de medição de precipitação. Entretanto, foram selecionadas somente aquelas estações com a existência de curva-chave (Tabela 7), uma vez que a telemetria fornece apenas a informação referente ao nível do rio no local. Além disso, são obtidos também dados de vazão horária defluente das 3 usinas hidrelétricas existentes no Rio das Antas (Tabela 8) - Castro Alves, Monte Claro e 14 de Julho, os quais são estimados pela CERAN a partir de equações locais de vertedor, descarregador de fundo e vazão turbinada nas UHEs.

Tabela 7. Estações telemétricas com transmissão automática de informação de níveis.

Nº	Nome da Estação Telemétrica	Responsável	Latitude	Longitude	Período de dados
1	Encantado	CPRM	-29,2344	-51,8551	Nov/2013 - Atual
2	Muçum	CPRM	-29,1672	-51,8686	Out/2013 - Atual
3	Santa Lúcia	CPRM	-29,1194	-51,9122	Out/2013 - Atual

Tabela 8. Informações referentes à vazão defluente nas usinas hidrelétricas da CERAN.

Nº	UHE	Responsável	Latitude	Longitude	Período de dados
1	Castro Alves	CERAN	-29,2344	-51,8551	Abr/2014 - Atual
2	Monte Claro	CERAN	-29,0310	-51,5209	Abr/2014 - Atual
3	14 de Julho	CERAN	-29,1194	-51,9122	Abr/2014 - Atual

Entretanto, o período de dados com informações horárias atualmente disponível, da mesma forma que a grande maioria dos dados de precipitação, é bastante limitado. Por este motivo, cotas da dupla medição diária - 7:00 e 17:00 - de algumas estações fluviométricas na bacia (Tabela 9) foram obtidas a partir da CPRM para o período entre 2009 e 2013, buscando-se adequar à disponibilidade de dados pluviométricos horários do INMET. As medições duplas foram submetidas a um procedimento de interpolação linear de modo a estimar os níveis nos demais instantes, cujas vazões correspondentes foram determinadas através das equações de curvas-chave existentes para os postos nestes locais.

Tabela 9. Postos fluviométricos com dados de dupla medição de níveis (7:00 e 17:00).

Nº	Código	Nome do posto	Localização	Latitude	Longitude
1	86720000	Encantado	Rio Taquari	-29,2344	-51,8551
2	86510000	Muçum	Rio Taquari	-29,1672	-51,8686
3	86580000	Santa Lúcia	Rio Guaporé	-29,1194	-51,9122
4	86410000	Passo Barra do Guaiaveira	Rio da Prata	-28,7391	-51,4250
5	86160000	Passo Tainhas	Rio Tainhas	-28,8640	-50,4232

É importante destacar que as curvas-chave destas estações fluviométricas recentemente foram atualizadas pela CPRM com exceção do posto de Passo Barra do Guaiaveira, que encontra-se em processo de revisão⁶. Outro aspecto a ser mencionado se refere à não existência de registros horários para a cheia do ano de 2011, fato pelo qual foram obtidas informações da Defesa Civil sobre o nível máximo e instante de ocorrência desses eventos.

5.1.2.3. Informações climatológicas

As variáveis climáticas na bacia do Taquari-Antas foram obtidas a partir das Normais Climatológicas determinadas no ano de 1992 pelo INMET, as quais foram posteriormente revisadas

⁶ (CPRM, 2014) Comunicação verbal.

e ampliadas através de um projeto específico para esta finalidade, concluído no final de 2009⁷. As estações meteorológicas selecionadas para a bacia do Taquari-Antas são apresentadas na Tabela 10 a seguir.

Tabela 10. Informações a respeito dos postos climatológicos na bacia do Taquari-Antas.

Código	Estação	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
83941	Bento Gonçalves	-29,1500	-51,5200	619
83919	Bom Jesus	-28,6700	-50,4300	1.048
83914	Passo Fundo	-28,2200	-52,4000	684
83942	Caxias do Sul	-29,1700	-51,2000	759
83918	Vacaria	-28,5500	-50,8700	955
83916	Lagoa Vermelha	-28,2200	-51,5000	830
83915	Guaporé	-28,9200	-51,9000	471

5.1.3. Síntese das fontes de dados quanto às características físicas e hidroclimáticas na bacia

Tabela 11. Síntese dos informações adquiridas para a bacia de estudo.

Informação	Fonte	Detalhes adicionais
Mapa de uso do solo e cobertura vegetal	Base de dados geográficos DRH/SEMA (2011)	Classificação de imagens do satélite CBERS referentes ao ano de 2009 - Plano de Bacia
Mapa do tipo de solo	Base de dados geográficos DRH/SEMA (2011)	Levantamento exploratório do projeto RADAMBrasil (1986) - Embrapa e IBGE
Modelo Digital de Elevação (90 m)	CGIAR-CSI	Dados com pós-processamento do SRTM - remoção de vazios e correção de trechos de rio
Dados horários de precipitação	Rede telemétrica do INMET, CPRM e UNIVATES	-
Dados diários de precipitação e nível	Banco de dados ANA/Hidroweb e CPRM	-
Dados horários de níveis	CPRM	Conversão para vazão com respectivas curvas-chave das estações
Dados horários de vazão	CERAN	Vazões defluentes das UHEs Castro Alves, Monte Claro e 14 de Julho
Dados climatológicos	INMET	Normais climatológicas (1992)

⁷<http://www.inmet.gov.br/webcdp/climatologia/normais/imagens/normais/textos/apresentacao.pdf>. Acesso em 02/08/2014.

5.2. Pré-processamento do MGB-IPH

5.2.1. Definição das URHs

Para o pré-processamento, as características físicas da bacia anteriormente levantadas foram reclassificadas com a finalidade de unir zonas similares quanto à produção de escoamento, reduzindo assim o número de conjuntos de parâmetros necessários para posterior calibração. No caso do uso de solo e cobertura vegetal, a reclassificação resultou na obtenção de 6 classes distintas, conforme verificado na Tabela 12. No que se refere à pedologia, o critério utilizado para a reclassificação foi a profundidade relacionada a cada um dos tipos de solo existentes, bem como suas subdivisões, cuja informação é proveniente do levantamento exploratório de solos RADAMBrasil e disponível na base de dados geográficos utilizada. Para solos com profundidade inferior a 150 cm foi atribuído a classificação de solos rasos, com alto potencial de geração de escoamento superficial; já para solos com profundidades acima de 150 cm, ou inferiores desde que com boa drenagem, a atribuição foi de médio potencial de geração de escoamento superficial, cujo resultado pode ser verificado na Tabela 13.

Tabela 12. Reclassificação das imagens de uso do solo e cobertura vegetal

Uso reclassificado	Classes de uso do solo e cobertura vegetal
Agricultura	Área de Agropecuária
Campo	Vegetação de campo/Pastagem, Solo exposto
Floresta	Vegetação arbórea, Silvicultura
Áreas Semi-Impermeáveis	Área Urbana/Edificada, Área degradada, Área de mineração
Várzeas Inundáveis	Área Úmida, Cultura irrigada/inundada
Água	Água

Tabela 13. Reclassificação do tipo de solo de acordo com as profundidades associadas (RADAMBrasil).

Tipo do solo reclassificado (quanto à produção de escoamento superficial)	Profundidade	Tipos de solo que se enquadram na classificação de profundidade
Alta produção de escoamento superficial (solos rasos)	< 50 cm	- Neossolo
	< 100 cm	- Argissolo Amarelo alítico
	< 150 cm - drenagem moderada	- Argissolo Vermelho aluminoso
Média produção de escoamento superficial (solos profundos)	< 150 cm - boa drenagem	- Luvisolo

Tipo do solo reclassificado (quanto à produção de escoamento superficial)	Profundidade	Tipos de solo que se enquadram na classificação de profundidade
	> 150 cm	- Nitossolo Bruno alumínico - Nitossolo Vermelho eutoférico - Cambissolo - Argissolo Bruno-acinzentado
	> 200 cm	- Planossolo - Argissolo Vermelho-amarelo distrófico
	> 250 cm	- Latossolo - Nitossolo Vermelho Alumínico

Por fim, as informações reclassificadas a respeito do uso do solo e cobertura vegetal, além do tipo de solo, foram agrupadas em Unidades de Resposta Hidrológica (URHs), compondo o conjunto final de parâmetros a serem calibrados no MGB-IPH. Entretanto, algumas combinações foram retiradas pelo fato de não serem diferenciáveis (ex: classe "água" em solo profundo ou raso e "água" com qualquer tipo de classe de cobertura vegetal), ou por simplesmente não ocorrer na prática, seja por acaso ou devido a certos tipos de vegetação ou uso da terra incompatíveis com alguns tipos de solos. A partir dessas premissas, o procedimento de reclassificação resultou na obtenção de nove blocos distintos, sendo estes: 1) Agricultura em solos rasos; 2) Agricultura em solos profundos; 3) Campo em solos rasos; 4) Campo em solos profundos; 5) Florestas em solos rasos; 6) Florestas em solos profundos; 7) Várzeas inundáveis; 8) Áreas Semi-Impermeáveis e; 9) Água. A representação espacial das URHs na bacia do rio Taquari-Antas, é apresentada na Figura 29.

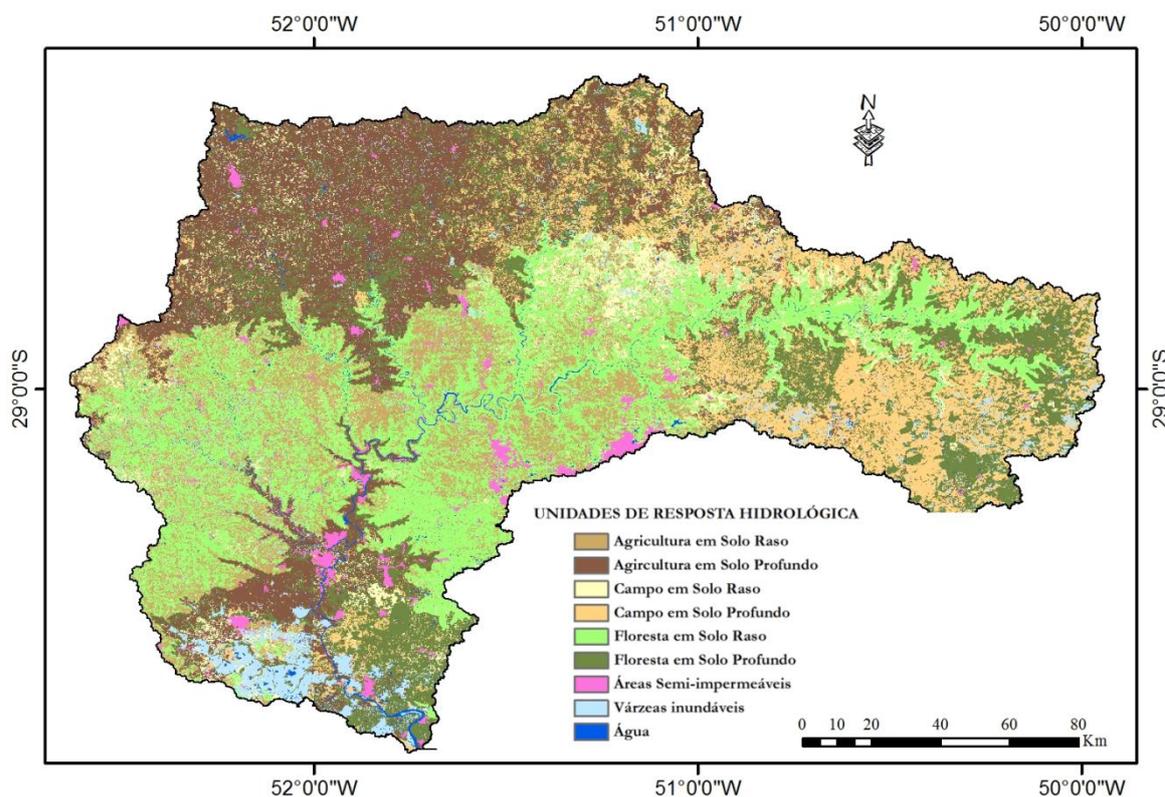


Figura 29. Mapa final com a definição de Unidades de Resposta Hidrológica (URH) para a bacia do Taquari-Antas.

5.2.1. Discretização do modelo e espacialização das informações pluviométricas

Para este procedimento utilizou-se o ArcHydro, um conjunto de ferramentas desenvolvido pela Universidade do Texas em parceria com a empresa ESRI que opera internamente ao *software* de geoprocessamento ArcGIS. Esta mesma ferramenta foi utilizada para realização de todas as etapas necessárias para discretização do modelo MGB-IPH, tendo como resultado final a geração de 980 minibacias. Posteriormente, as informações das URHs definidas na etapa anterior foram acopladas às minibacias geradas, sendo que para cada um destes elementos foram calculadas características da topologia hídrica, como comprimento, declividade e área de drenagem. A espacialização da chuva para os centróides das minibacias deu-se através da interpolação pelo método do inverso da distância ao quadrado, considerando os dados das estações telemétricas e as informações horarizadas a partir dos postos pluviométricos com intervalo de tempo diário.

5.3. Ajuste *off-line*: calibração e verificação do modelo hidrológico

5.3.1. Avaliação preliminar dos dados de precipitação

Inicialmente, procedeu-se a uma comparação entre a chuva observada na rede telemétrica do INMET e a rede pluviométrica da ANA, buscando identificar possíveis inconsistências nas informações disponibilizadas. A comparação foi realizada a partir da interpolação da chuva

observada nos pluviômetros para os locais das estações telemétricas, com base na ponderação pelo inverso da distância ao quadrado. Sendo assim, durante a interpolação foram retirados os postos da telemetria, buscando determinar os valores de chuva para estes locais apenas a partir da rede pluviométrica da ANA. Este procedimento possibilitou a geração de curvas de frequência acumulada para ambas fontes de informação no período entre junho de 2009 e dezembro de 2013, conforme apresentado na a seguir.

De uma maneira geral, é possível verificar que as curvas de frequência acumulada são compatíveis entre si. Na maior parte dos casos, a chuva da ANA possui ligeiramente uma menor frequência de não superação para volumes muito pequenos de precipitação (< 1 mm), o que pode ter sido influenciado pelo próprio processo de interpolação dos dados. No caso do posto de Canela, nota-se uma maior frequência de valores de precipitação para a estação telemétrica na faixa de 10 a 50 mm, o que pode estar indicando uma pequena subestimativa da chuva diária devido à interpolação. Já na comparação para o posto de Teutônia, diferenças maiores nas curvas de frequência foram encontradas. Entretanto, ressalta-se que este posto somente foi instalado em outubro de 2012, ou seja, uma menor quantidade de dados foi utilizada para comparação da chuva neste caso. De qualquer forma, esta estação fica localizada na parte mais baixa da bacia, onde a relevância para a formação das cheias acaba sendo menor.

5.3.2. Calibração: período de Jun/2009 - Dez/2011

Para a calibração do MGB-IPH na bacia foi selecionado o período compreendido entre junho de 2009 e dezembro de 2011, cuja escolha (curto período) se deu em função da baixa disponibilidade de dados verificada anteriormente além de fatores como presença de grandes índices pluviométricos e eventos de cheia de diferentes magnitudes, para este período.

Quanto às vazões observadas neste período, no ano de 2009 os picos foram elevados entre os meses de agosto e outubro na estação de Encantado, atingindo um máximo de cerca de 10.800 m³/s no dia 12 de setembro. Em janeiro de 2010, parte da bacia foi atingida por um sistema convectivo de mesoescala (Rosa *et al.*, 2011), ocasionando um evento extremo em afluentes como o rio Forqueta e vazões elevadas no rio Taquari, em plena estação de verão. Já o ano de 2011 foi marcado por dois eventos de cheia importantes nos meses de julho e agosto, sendo o primeiro caracterizado por um pico extremo acima de 13.500 m³/s e o segundo por aproximadamente 9.000 m³/s, sendo ambas vazões observadas na estação de Encantado.

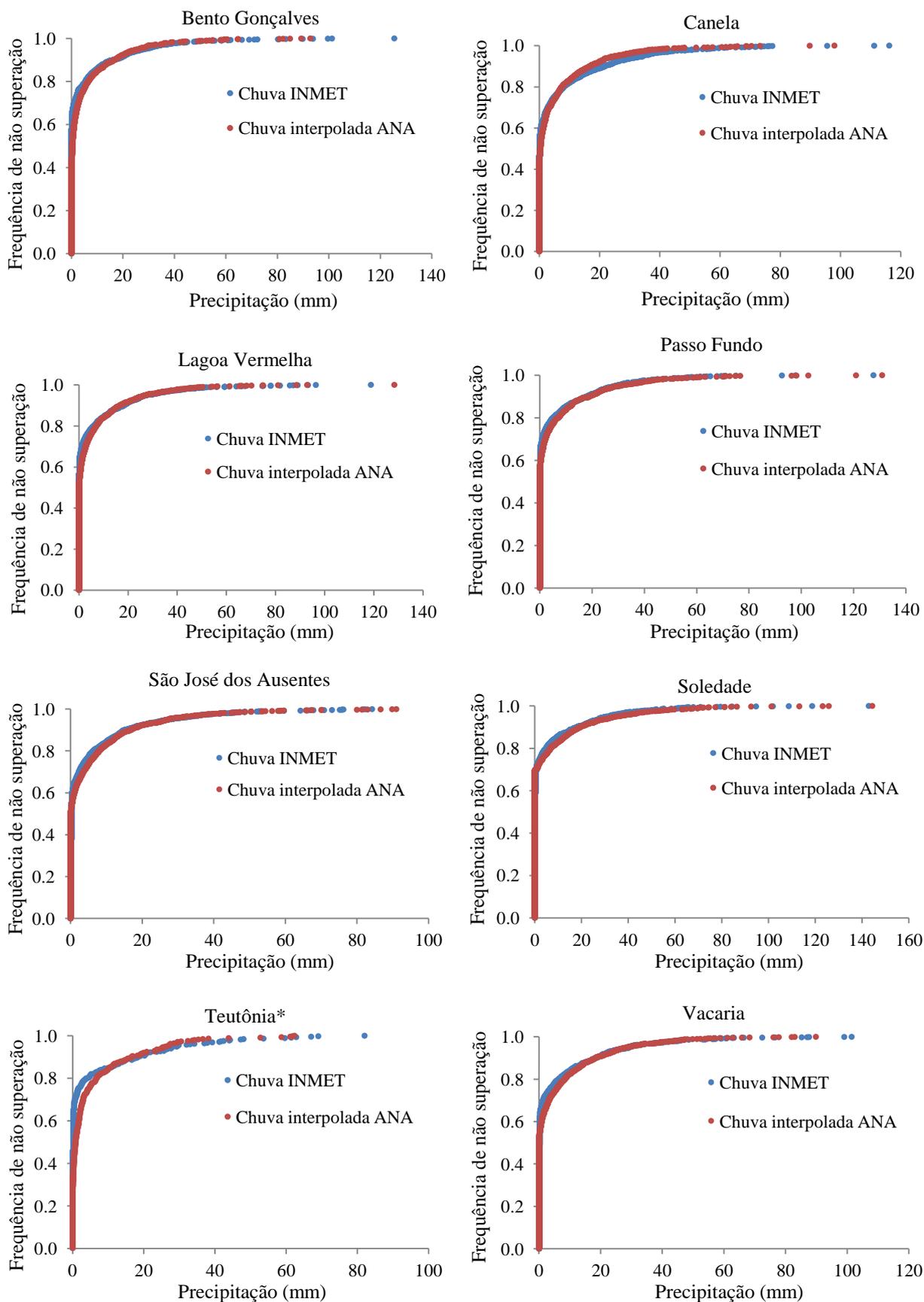


Figura 30. Curvas de frequência acumulada de precipitação no período compreendido entre Jun/2009 e Dez/2013 - Rede Telemétrica INMET x Pluviômetros ANA (interpolação). *Dados disponíveis somente a partir de Agosto/2012

Para a calibração propriamente dita, primeiramente utilizou-se uma estimativa inicial dos parâmetros com base nos valores apresentados por Collischonn (2001), os quais tiveram um bom desempenho na calibração diária efetuada pelo autor para o período entre 1971 e 1975, na bacia do Taquari-Antas. Posteriormente, os parâmetros foram ajustados manualmente em relação aos 5 postos fluviométricos com dados de dupla medição de níveis, interpolados em intervalo de tempo horário e convertidos através das respectivas curvas-chave. Entretanto, os resultados iniciais do modelo hidrológico apresentaram atenuação e atraso - aproximadamente 20 horas (Figura 31) - nos picos de cheia para os postos localizados no rio Taquari, sendo que este efeito não foi muito significativo para os postos situados nos afluentes do mesmo.

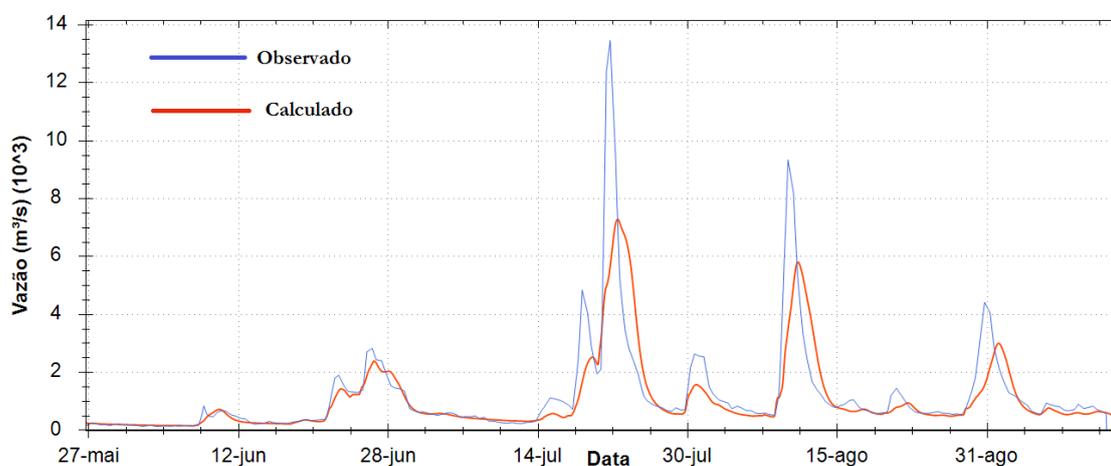


Figura 31. Atenuação e atraso nos hidrogramas calculados pelo MGB-IPH (jun-ago/2011), para o posto fluviométrico de Encantado.

Entretanto, não foi possível corrigir este efeito através da modificação nos parâmetros calibráveis do modelo hidrológico, o que pode estar relacionado ao método de propagação de vazões - Muskingum Cunge Linear - implementado no modelo MGB-IPH. O atraso nos hidrogramas de cheia indica uma possível deficiência na representação da celeridade da onda durante vazões elevadas, fato pelo qual foi realizada uma calibração adicional em elementos que afetam a propagação, como a declividade de alguns trechos e a vazão de referência. O ajuste foi feito com base no comportamento de uma cheia ocorrida no dia 06/06/2014, sendo estimados os tempos de propagação (Tabela 14) entre a UHE Castro Alves e o posto de Encantado a partir dos dados horários de vazão da CERAN, CPRM e inclusive informações da Defesa Civil.

Tabela 14. Estimativa dos tempos de propagação da onda de cheia nos trechos intermediários entre a UHE Castro Alves - Encantado, para a cheia de 06/06/2014.

Trecho	Distância	Tempo de propagação da onda	Velocidade aprox. da onda de cheia
UHE Castro Alves - UHE Monte Claro	29,5 km	3 horas	2,7 m/s
UHE Monte Claro - UHE 14 de Julho	47 km	3 horas	4,3 m/s
UHE 14 de Julho - Muçum	58 km	4 horas	4,0 m/s
Muçum - Encantado	13,5 km	1 hora	3,75 m/s
TOTAL	148 km	11 horas	3,7 m/s

Para o caso particular, a propagação da onda de cheia (06/06/2014) através de uma extensão de 148 km levou um tempo aproximado de 11 horas, com uma maior velocidade a partir da UHE de Monte Claro, após a contribuição do rio da Prata. A modificação em ambos os fatores, isto é, declividade ao longo dos trechos intermediários e vazão de referência do método de Muskingum-Cunge Linear, foi realizada de maneira que o tempo de propagação das cheias nos hidrogramas calculados fosse o mais próximo possível das estimativas apresentadas, em cada um dos trechos considerados. Para tanto, este evento foi simulado no MGB-IPH fazendo-se o uso de todas as informações telemétricas disponíveis (UNIVATES, CPRM e CERAN), porém sendo mantidos os parâmetros calibráveis inicialmente ajustados. A Figura 32 mostra o efeito do ajuste ocasionado no período de calibração, indicando uma melhoria considerável na magnitude e *timing* dos picos durante as maiores cheias porém uma aceleração exagerada na recessão dos hidrogramas. Apesar disso, esta aceleração era esperada, uma vez que a propagação tende a ocorrer de maneira mais lenta durante vazões mais baixas. Destaca-se que o ajuste pode ser considerado válido apenas para a melhor representação dos eventos de cheia na bacia (objetivo deste estudo), desde que enquadrado na faixa de vazões observadas ao longo do período de calibração adotado.

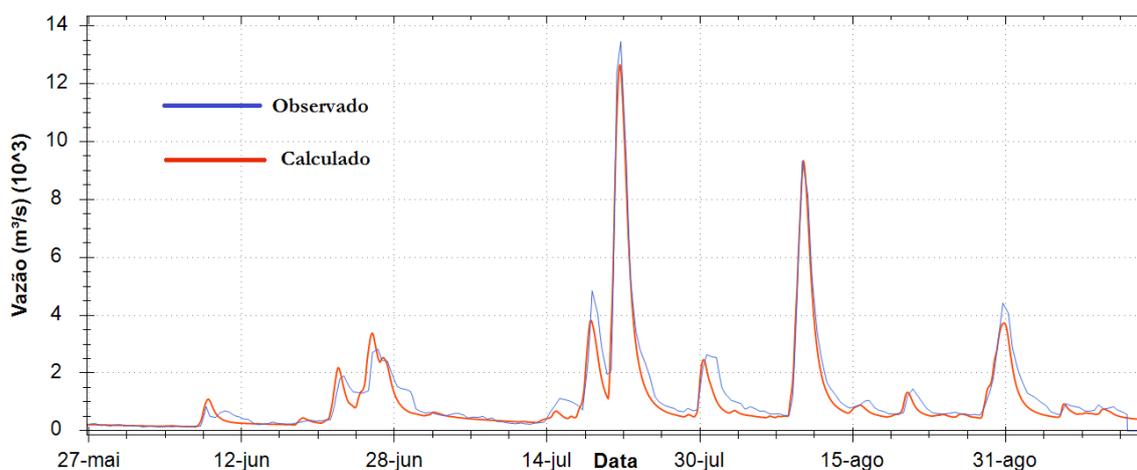


Figura 32. Resultado do hidrograma para o posto de Encantado (jun-ago/2011), após ajuste manual de declividades e vazão de referência.

Por fim, ressalta-se que a calibração automática do MGB-IPH não foi efetuada, já que erros devidos à horarização de dados diários e incertezas relacionadas ao ajuste no método de propagação do modelo hidrológico poderiam ser indevidamente incorporadas durante a otimização dos parâmetros calibráveis. Quanto aos resultados finais da calibração (Tabela 15), estes podem ser considerados bons em termos dos índices de eficiência NS e NS_{LOG} , os quais apresentaram valores acima de 0,81 com exceção do posto de Passo Tainhas, localizado na região das cabeceiras próximo às nascentes do rio das Antas. Entretanto, os erros de volume entre os hidrogramas calculado e observado foram um pouco expressivos, chegando a valores negativos na ordem de 20%. Este resultado pode estar indicando uma subestimativa nas medições de chuva de modo geral, visto que o período de 2009 a 2011 foi bastante chuvoso.

Tabela 15. Índices de eficiência do MGB-IPH para a bacia do Taquari-Antas - período de calibração.

Código	Nome da Estação	Nash-Sutcliffe	Log Nash-Sutcliffe	ΔV
86160000	Passo Tainhas	0,685	0,797	-15.8%
86410000	Passo Barra do Guaiaveira	0,817	0,880	-20.6%
86580000	Santa Lúcia	0,834	0,910	-13.9%
86510000	Muçum	0,869	0,843	-13.9%
86720000	Encantado	0,923	0,890	-9.2%

O resultado visual da calibração do MGB-IPH, no período de junho/2009 a dezembro/2011, pode ser verificado nas Figuras 33 a 37 a seguir.

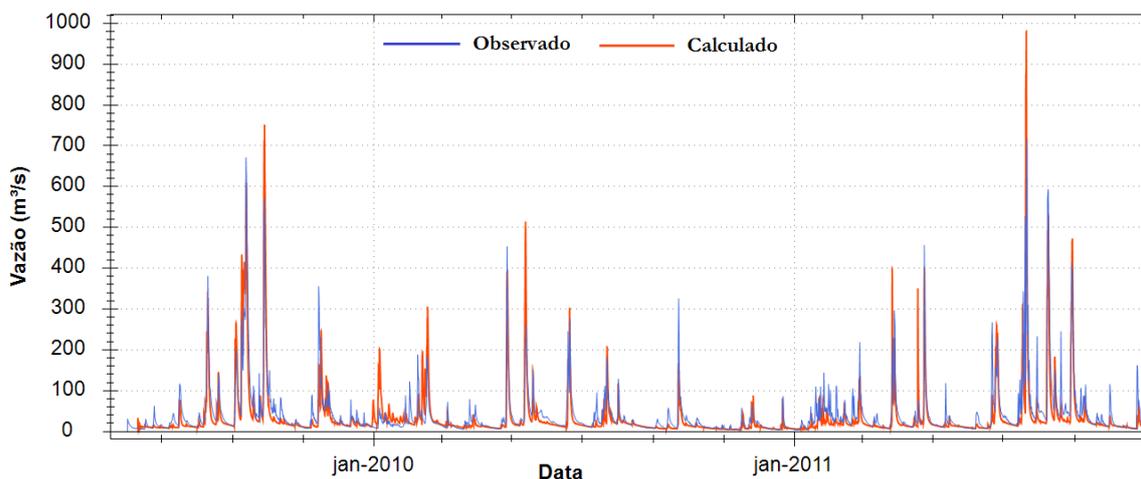


Figura 33 - Resultado final da calibração horária para o posto de Passo Tainhas (86410000), no Rio Tainhas, período de junho/2009 a dezembro/2011.

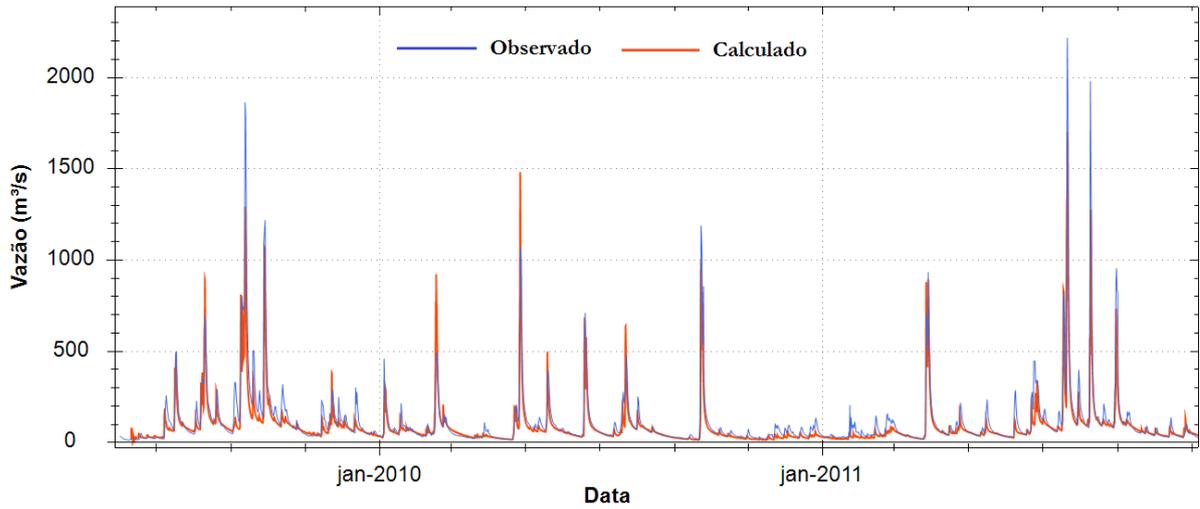


Figura 34. Resultado final da calibração horária para o posto de Passo Barra do Guaiaveira (86410000), no Rio da Prata, período de junho/2009 a dezembro/2011.

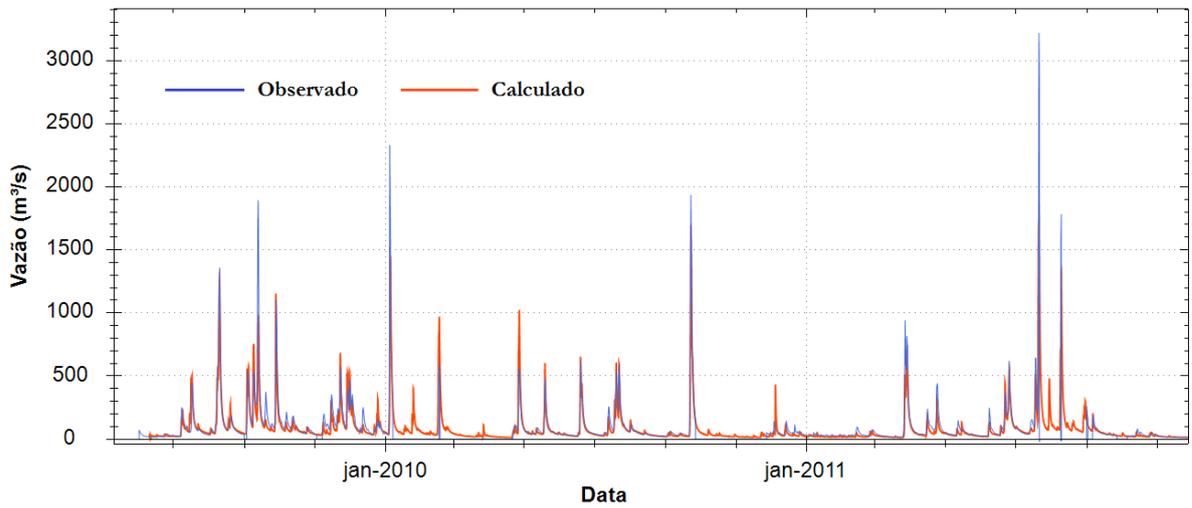


Figura 35. Resultado final da calibração horária para o posto de Santa Lúcia (86580000), no rio Guaporé, período de junho/2009 a dezembro/2011.

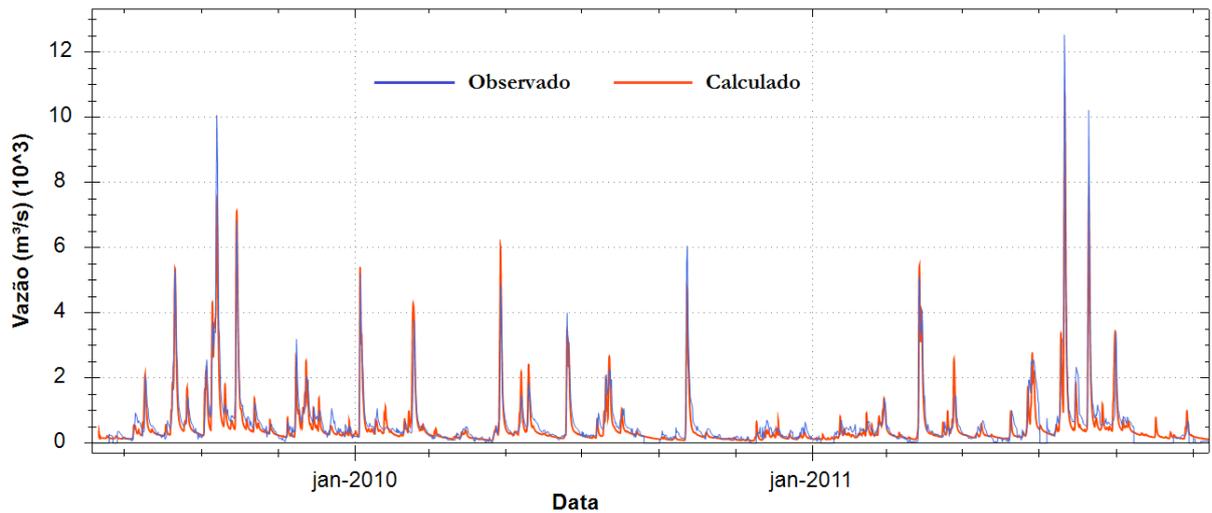


Figura 36. Resultado final da calibração horária para o posto de Muçum (86510000), no período de junho/2009 a dezembro/2011.

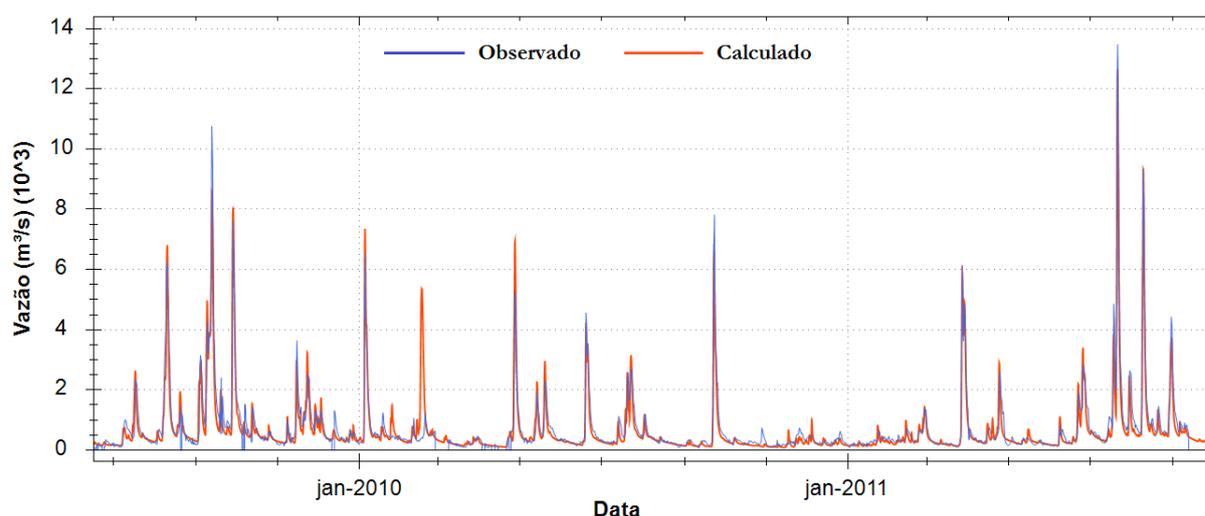


Figura 37. Resultado final da calibração horária para o posto de Encantado (86720000), no período de junho/2009 a dezembro/2011.

5.3.1. Verificação: período de Jan/2012 - Dez/2013

Para a verificação do MGB-IPH na bacia foi selecionado o período compreendido entre janeiro de 2012 e dezembro de 2013. Quanto aos resultados (Tabela 16), com exceção do posto de Passo Tainhas, os índices de eficiência NS e NS_{LOG} foram um pouco abaixo daqueles identificados na calibração do modelo, sobretudo no que se refere à estação fluviométrica de Muçum. Particularmente, os dados observados nesta última estação foram considerados menos confiáveis no período, visto a falta de concordância com o posto de Encantado em algumas ocasiões. De modo geral, apesar da pequena diminuição nos coeficientes de Nash-Sutcliffe, os erros de volume entre os hidrogramas calculado e observado diminuíram significativamente, com a maioria dos valores estando inferior a 7%.

Tabela 16. Índices de eficiência do MGB-IPH para a bacia do Taquari-Antas - período de verificação.

Código	Nome da Estação	Nash-Sutcliffe	Log Nash-Sutcliffe	ΔV
86160000	Passo Tainhas	0,818	0,841	-4,6%
86410000	Passo Barra do Guaiaveira	0,817	0,855	-10,0%
86580000	Santa Lúcia	0,873	0,752	-6,7%
86510000	Muçum	0,700	0,740	-1,5%
86720000	Encantado	0,854	0,793	-2,1%

O resultado visual da verificação do MGB-IPH, no período de janeiro/2012 a dezembro/2013, pode ser verificado nas Figuras 38 a 42 a seguir.

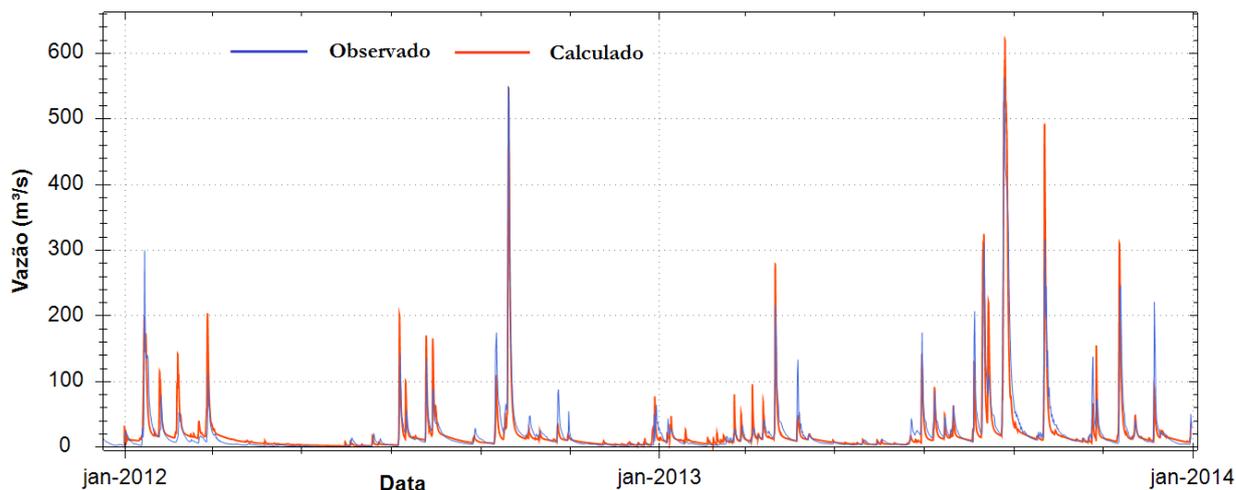


Figura 38 - Resultado da verificação para o posto de Passo Tainhas (86160000), no Rio Tainhas, período de janeiro/2012 a dezembro/2013.

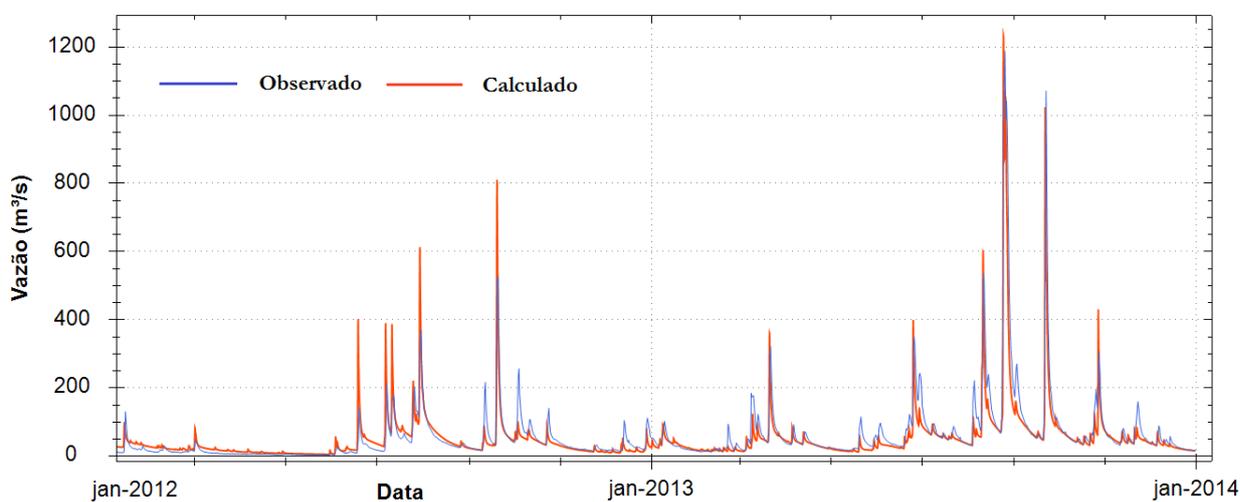


Figura 39. Resultado da verificação para o posto de Passo Barra do Guaiaveira (86410000), no Rio da Prata, período de janeiro/2012 a dezembro/2013.

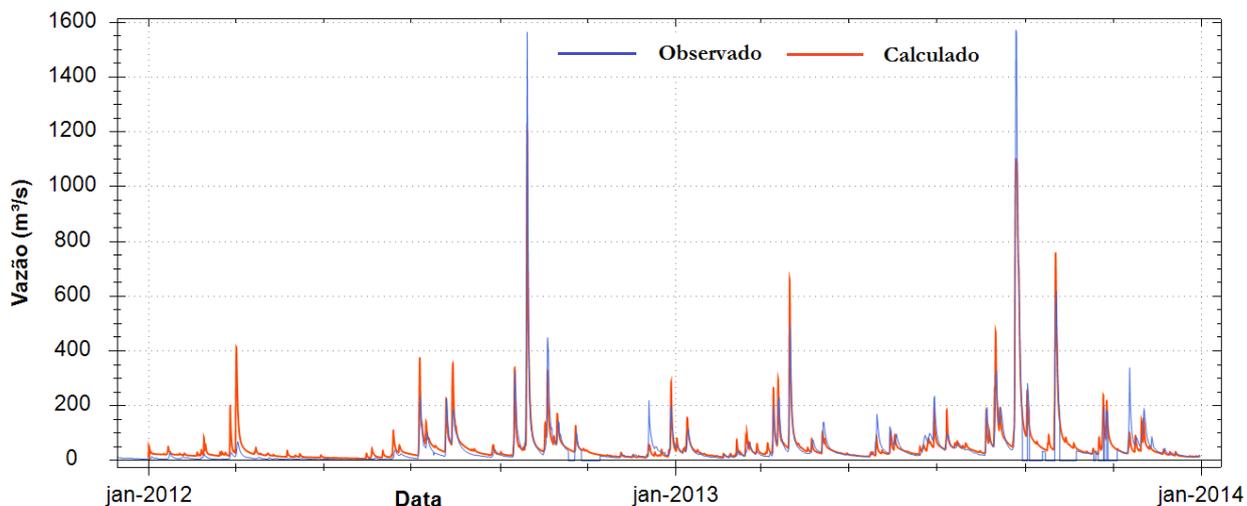


Figura 40. Resultado da verificação para o posto de Santa Lúcia (86580000), no rio Guaporé, período de janeiro/2012 a dezembro/2013.

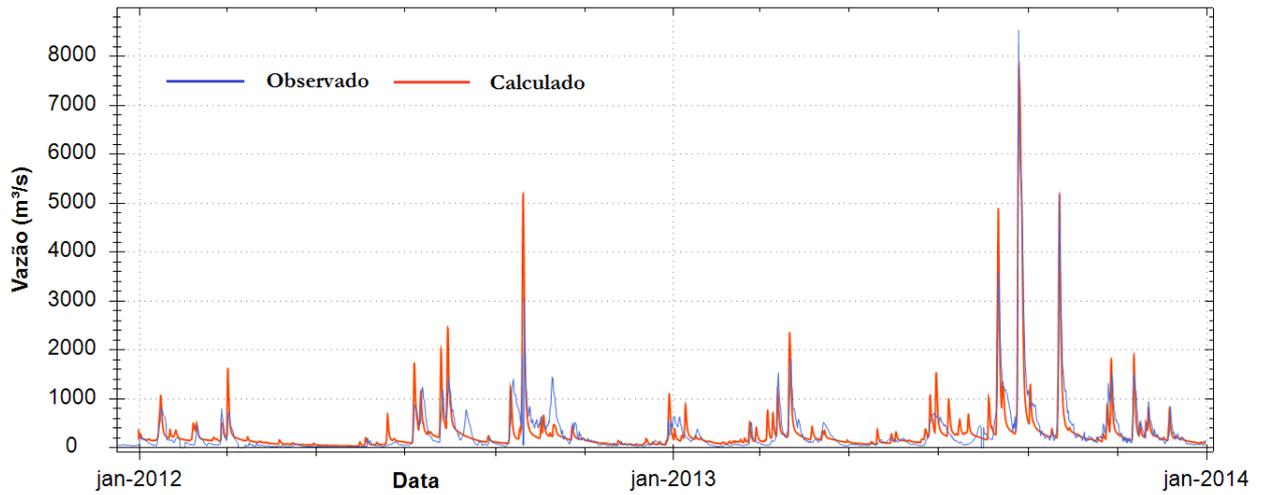


Figura 41. Resultado da verificação para o posto de Muçum (86510000), no período de janeiro/2012 a dezembro/2013.

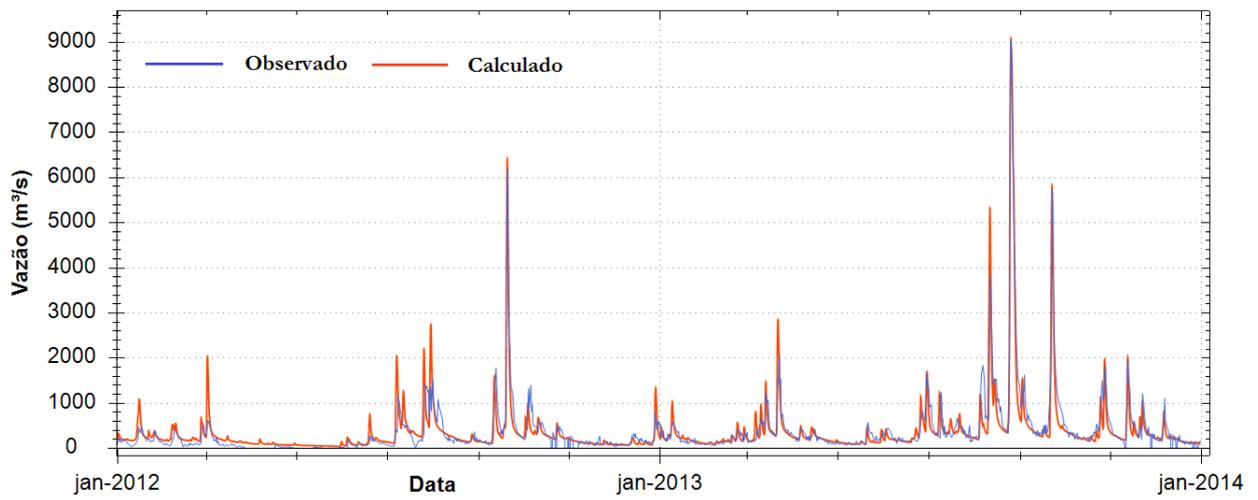


Figura 42. Resultado da verificação no posto de Encantado (86720000), no período de janeiro/2012 a dezembro/2013.

Capítulo 6. Previsão hidrológica: verificação dos HEPS e da previsão determinística

Na sequência, estão apresentados os resultados referentes à preparação e aplicação de um HEPS - *Hydrological Ensemble Prediction System* na bacia estudada. Ressalta-se que os resultados foram gerados e verificados para o posto fluviométrico na cidade de Encantado (Figura 43), situada no início do trecho classificado como crítico quanto a sua suscetibilidade a enchentes. Tal cidade foi selecionada devido a esta ser a localidade mais a jusante com existência de dados de vazão, uma vez que após a confluência entre os rios Taquari e Forqueta há uma influência da barragem-eclusa de Bom Retiro do Sul, cujo nível do rio principal é mantido operacionalmente na cota 13 m. Além disso, esta localidade é considerada estratégica para a Defesa Civil que atua em municípios a jusante como Lajeado e Estrela, a qual faz uso das informações de cota em Encantado para previsão de níveis - com antecedência aproximada de 6 horas - nos locais supracitados.

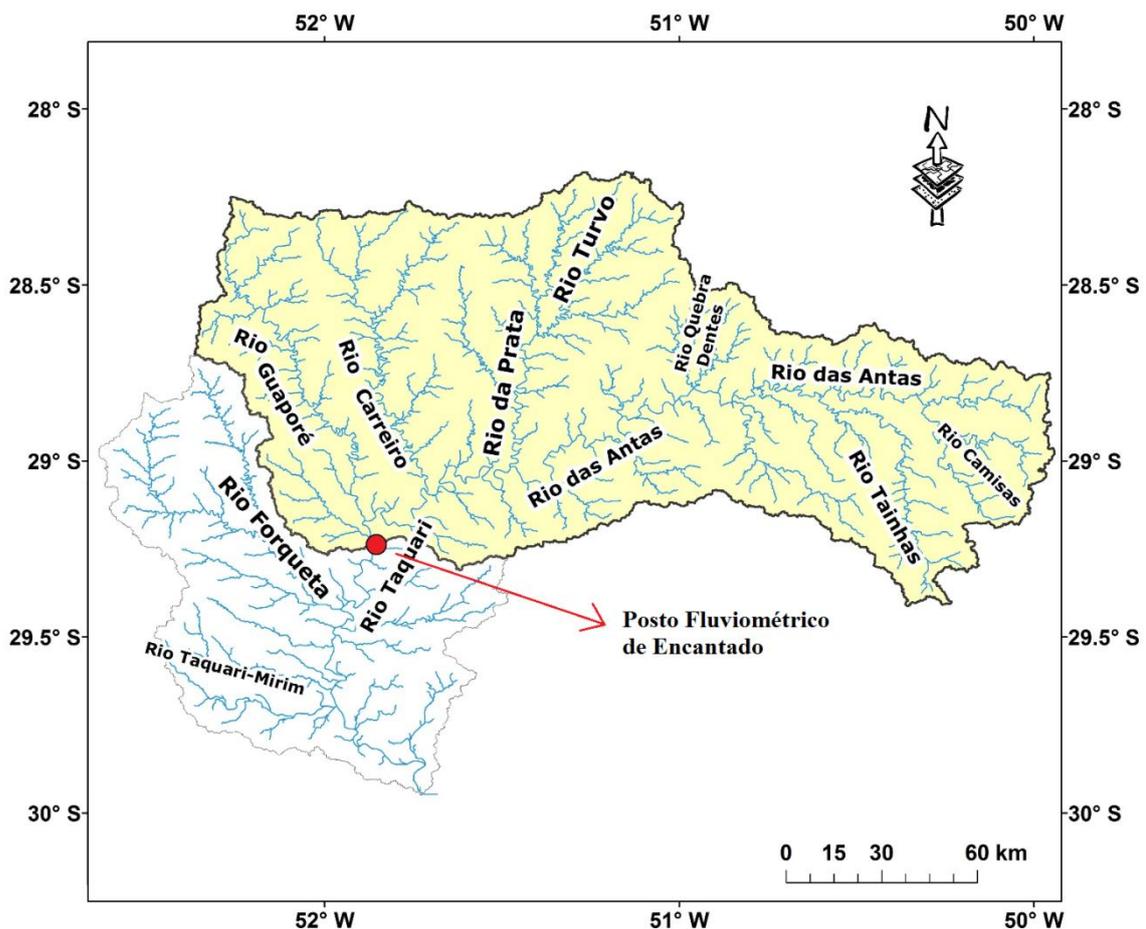


Figura 43. Delimitação da bacia do Taquari-Antas até o posto fluviométrico de Encantado (86720000).

6.1. Hindcasting I - Análise de eventos de cheia singulares

Nesta seção são apresentados os resultados da previsão hidrológica por conjunto para dois eventos de cheia verificados na bacia do Taquari-Antas, um no dia 21/07/2011 - de grande magnitude - e outro no dia 06/06/2014 - de pequena magnitude, sendo este último ocorrido ao longo da realização deste estudo.

6.1.1. Descrição dos eventos analisados

A Figura 44 mostra a evolução do campo de precipitação na área da bacia do Taquari-Antas que drena até o posto fluviométrico de Encantado, cuja representação é acumulada para cada 24 horas entre os dias 30/05/2014 até 06/06/2014. O início da precipitação foi observado entre os dias 30/05 e 01/06, ocorrendo uma média em torno de 50 mm na bacia. Durante os três dias seguintes houve um período sem chuva até a noite do dia 04/06, para o qual houve o retorno da precipitação durante um intervalo de 24 horas e gerando um volume acumulado médio de 116 mm desde seu início no dia 30/05. Algumas áreas localizadas na bacia tiveram precipitações bastante elevadas no período, alcançando acumulados máximos de 175 mm em 7 dias.

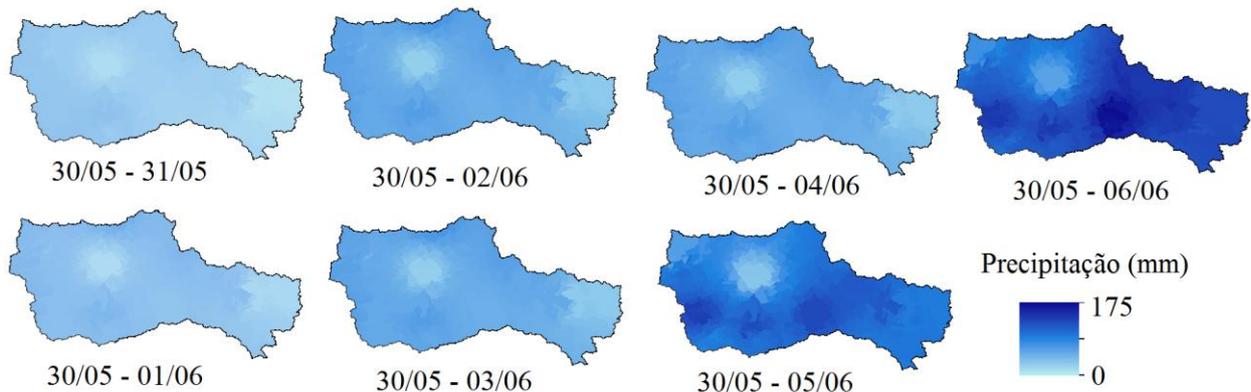


Figura 44. Campos de precipitação acumulada na bacia entre 24 e 168 horas (7 dias) antes da ocorrência do evento, iniciados a partir do dia 30/05/2014.

A Figura 45 apresenta os hidrogramas observado e simulado pelo MGB-IPH para o evento do mês de junho de 2014. No dia 02/06 foi evidenciado uma pequena elevação no rio Taquari até uma vazão de 2.000 m³/s, cuja recessão permaneceu até o dia 05/06. Na sequência, o evento de cheia principal ocorreu no dia 06/06 às 12:00, com o nível do rio a 9 metros acima do normal e uma vazão de pico acerca de 6.400 m³/s. O hidrograma simulado correspondeu bem à cheia principal, embora deslocado no tempo durante a sua ascensão devido à deficiência na propagação da onda verificada durante a modelagem hidrológica. Apesar disso, a elevação de menor magnitude no rio

Taquari ocorrida no dia 01/06 não foi muito bem representada em termos de *timing* e atenuação do pico, ocorrendo um adiantamento na onda de cheia na ordem de 15 horas.

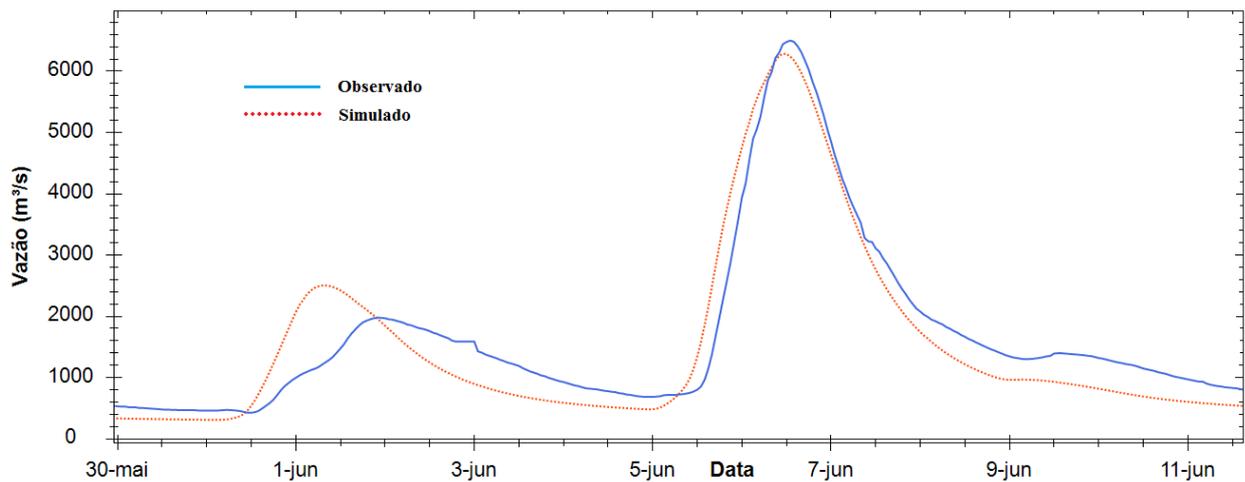


Figura 45. Hidrogramas observado (linha azul) e simulado (linha vermelha) para o evento de cheia de 06/06/2014.

A Figura 46 mostra a evolução do campo de precipitação na área da bacia do Taquari-Antas que drena até o posto fluviométrico de Encantado, cuja representação é acumulada para cada 24 horas entre os dias 14/07/2011 até 21/07/2011. O início da precipitação foi observado entre os dias 14/07 e 18/07, ocorrendo uma média de aproximadamente 57 mm na bacia. Aproximadamente um dia após cessada a chuva, houve o retorno da precipitação durante um intervalo de 30 horas, o que gerou um volume acumulado médio de 165 mm desde seu início no dia 14/07. Algumas áreas localizadas na bacia tiveram precipitações críticas no período, alcançando acumulados máximos de 230 mm em 7 dias.

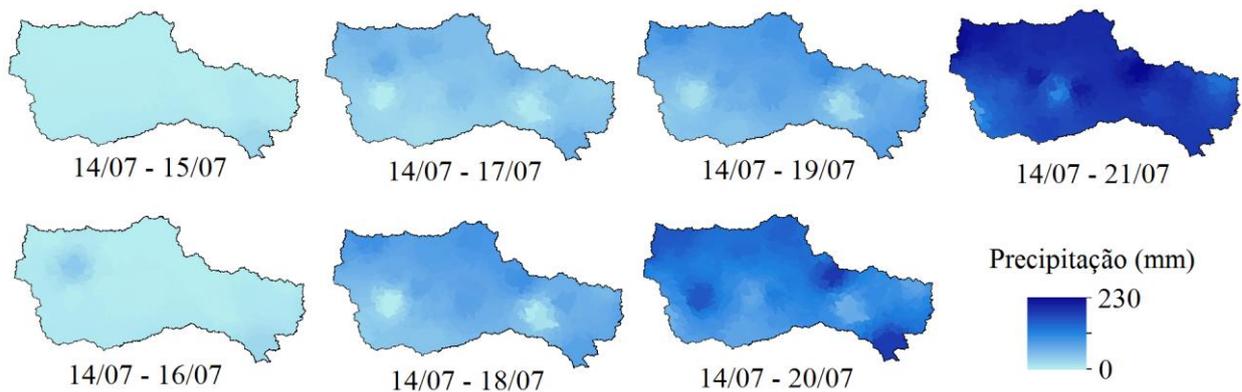


Figura 46. Campos de precipitação acumulada na bacia entre 24 e 168 horas (7 dias) antes da ocorrência do evento, iniciados a partir do dia 14/07/2011.

A Figura 47 apresenta os hidrogramas observado e simulado pelo MGB-IPH para o evento do mês de julho de 2011, uma das maiores cheias já registradas desde o início das medições fluviométricas no posto de Encantado. Da mesma forma como identificado no evento de

06/06/2014, esta cheia foi caracterizada por uma elevação de menor magnitude alguns dias antes do evento principal, atingindo vazões em torno de $5.000 \text{ m}^3/\text{s}$ entre os dias 18/07 e 19/07. Após cerca de dois dias de recessão desta menor cheia, com vazão situando-se na faixa a $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$, deu-se início à segunda elevação do rio Taquari, alcançando um nível de 17 metros acima do normal e uma vazão de pico acerca de $14.000 \text{ m}^3/\text{s}$ em aproximadamente 30 horas de ascensão. O hidrograma simulado correspondeu relativamente bem à cheia principal, apesar da primeira cheia ocorrida no dia 19/07 ter resultado em uma magnitude abaixo das observações. Isto pode ter sido causado por uma subestimativa de chuva por parte de alguns postos pluviométricos, conforme verificado pelos pontos claros na bacia durante a evolução dos campos de precipitação.

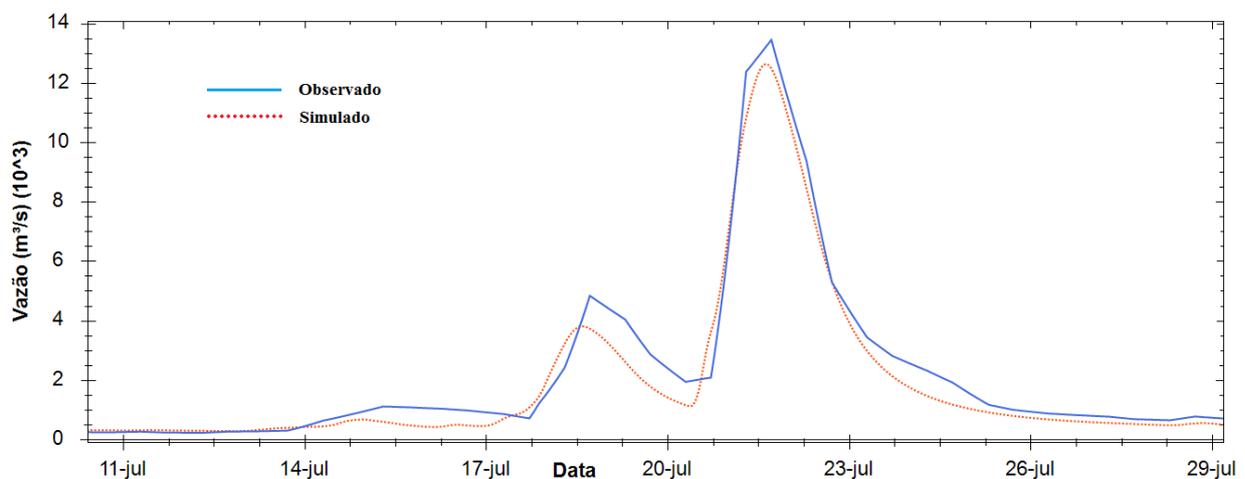


Figura 47. Hidrogramas observado (linha azul) e simulado (linha vermelha) para o evento de cheia de 21/07/2011.

6.1.2. Avaliação da antecedência com base na chuva zero no horizonte de previsão

Neste item estão apresentados os resultados da verificação do efeito da chuva zero no horizonte da previsão hidrológica. Em outras palavras, esta verificação consiste na estimativa do tempo de concentração da bacia em um evento típico de cheia, a partir da simulação hidrológica com chuva observada até o instante t_0 em que se deseja realizar a previsão e a chuva nula para os intervalos de tempo posteriores. A previsão com chuva zero permite determinar a máxima antecedência que pode ser adquirida sem o uso de previsões quantitativas de precipitação, permitindo conhecer o momento a partir do qual esta última ocasiona maior efeito no comportamento do hidrograma.

As Figuras 48 e 49 apresentam, respectivamente, os hidrogramas previstos com base na chuva zero para os eventos de cheia de 06/06/2014 e 21/07/2011, dados de forma sucessiva - a cada hora - desde a antecedência de 24 horas até a antecedência mais próxima em que houve redução no pico de vazão simulado. Enquanto isso, na Figura 50 é mostrado o Erro Relativo no pico

de vazão entre a simulação e a previsão com chuva zero, para cada antecedência nos eventos de cheia anteriormente apresentados.

Em relação ao evento de 06/06/2014, para antecedências da ordem de 24 horas o erro é bastante significativo, com magnitude cerca de 45% inferior à simulada com chuva perfeita. Na Figura 49, observa-se que a inclinação da reta que representa o ER é elevada entre as antecedências de 20 e 24 h, o que pode ser explicado pelo fato de que a maior parte da precipitação contribuinte para a formação da cheia ocorreu justamente até 20 horas antes do evento. Neste instante, o ER foi reduzido a -11% e permaneceu constante até a antecedência de 17 horas, sendo minimizado a zero durante as 3 horas seguintes cujo período houve o término da precipitação observada. Por fim, destaca-se que para antecedências menores do que 14 horas não foi possível perceber qualquer variação no pico da cheia simulada.

No que se refere ao evento de 21/07/2011, na antecedência de 24 horas o erro também foi bastante significativo, com magnitude de 40% inferior à simulada com chuva perfeita. Em termos absolutos, este valor representa aproximadamente uma vazão de 5.000 m³/s, o que por si só representa a magnitude da cheia observada entre os dias 18/07 e 19/07. Nas 10 horas seguintes, entre as antecedências de 14 e 24 h, observa-se que a inclinação da reta que representa o ER sofreu poucas alterações e manteve-se em torno de 4 a 5% de variação para cada hora de previsão, alcançando valores próximos a -10% na antecedência de 16 horas. Neste caso, a precipitação foi bem distribuída ao longo destes intervalos de tempo, sendo que valores de ER foram praticamente nulos em antecedências menores do que 13 horas.

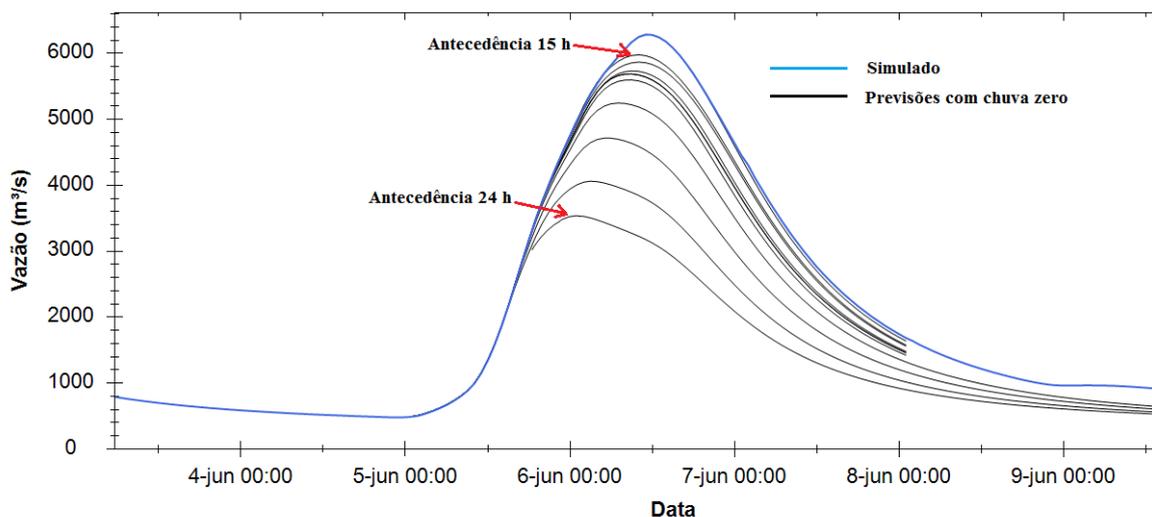


Figura 48. Previsões com chuva zero para o evento de 06/06/2014, para antecedências entre 15 e 24 horas.

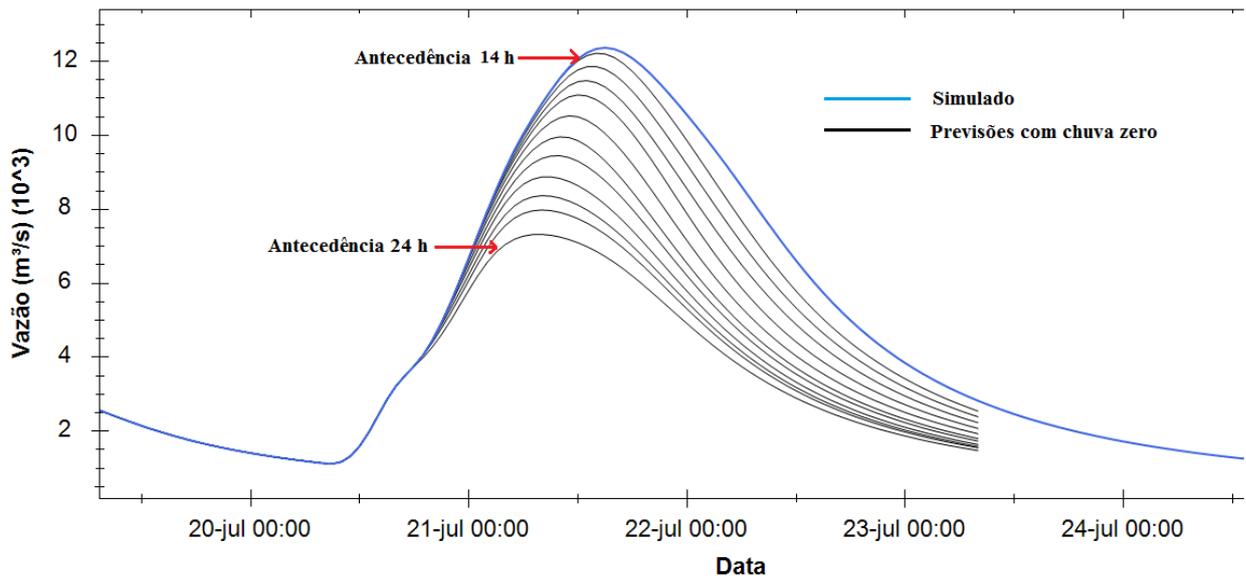


Figura 49. Previsões com chuva zero para o evento de 21/07/2014, para antecedências entre 14 e 24 horas.

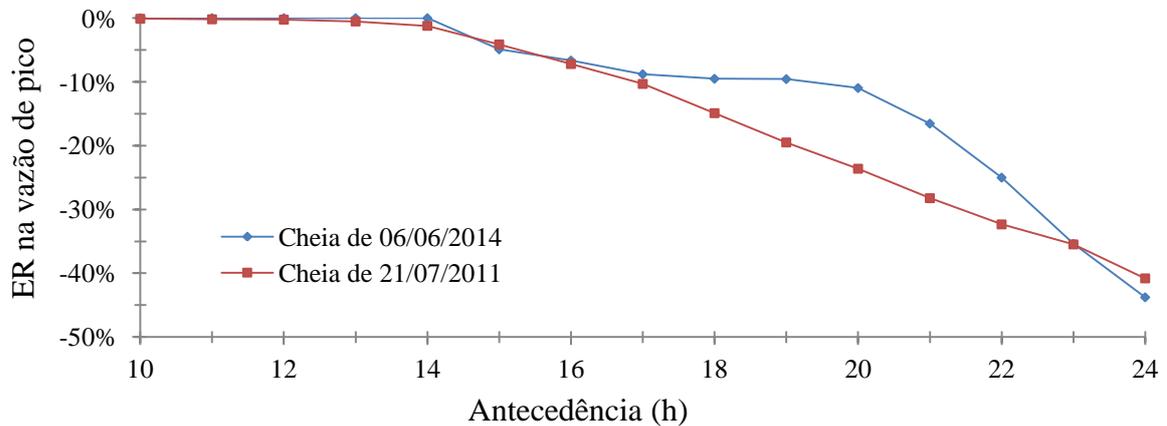


Figura 50. Erro relativo no pico de vazão entre a simulação com "chuva perfeita" e a simulação com chuva zero, para cada antecedência nos eventos de cheia de 06/06/2014 (linha azul) e 21/07/2011 (linha vermelha).

De acordo com estes resultados, a máxima antecedência que poderia ser adquirida sem o uso de previsões quantitativas de precipitação, para os eventos selecionados no presente estudo, é da ordem de 13 a 14 horas. Entretanto, é importante ressaltar que, especialmente no evento crítico de 2011, a máxima antecedência pode estar sendo um pouco superestimada, já que a propagação da onda de cheia no MGB-IPH acaba não considerando um aumento de celeridade para vazões muito elevadas.

6.1.3. Verificação da necessidade de atualização em tempo real nas previsões hidrológicas

A assimilação de dados em tempo real, ou simplesmente atualização, é usualmente necessária para minimização dos erros associados às variáveis de entrada, representação dos processos físicos ou mesmo nos parâmetros da modelagem hidrológica. No presente estudo, foi realizada a

verificação da necessidade da atualização no MGB-IPH na bacia do Taquari-Antas em termos de seu potencial benefício, considerando os eventos de cheia selecionados para a previsão hidrológica. Para este procedimento foram utilizados os dados de vazão nos postos fluviométricos de Santa Lúcia, no rio Guaporé, e Encantado, situado no local para onde as previsões foram realizadas.

Os parâmetros do método de assimilação de dados foram adotados levando-se em consideração os valores testados e com bom desempenho verificado nos estudos de Paz *et al.* (2007) e Meller (2012), os quais são apresentados na Tabela 17 a seguir. Além disso, foi testada ainda uma configuração adicional, com o parâmetro mais sensível - bx - situado acima da faixa recomendada pelos autores. Esta configuração foi inserida na análise visando uma correção mais rápida no volume dos reservatórios conceituais, uma vez que a bacia do Taquari-Antas possui como característica a grande variação de vazão em curtos intervalos de tempo, durante a ocorrência de cheias.

Tabela 17. Configurações testadas para os parâmetros de assimilação de dados em tempo real, na previsão com o MGB-IPH.

Configuração	Ebac	PBlim	bx
1 - (Paz <i>et al.</i> , 2007)	1,0	0,3	0,2
2 - (Paz <i>et al.</i> , 2007)	0,2	0,1	0,2
3 - (Meller, 2012)	1,5	0,2	0,4
4 - (Meller, 2012)	0,6	0,3	0,5
5 - Config. Adicional	0,5	0,3	0,8

O procedimento de atualização no MGB-IPH foi realizado em um intervalo de tempo suficientemente grande para estabilização das condições iniciais até o instante de previsão, sendo a precipitação observada utilizada em ambos os casos de aquecimento do modelo e horizonte da chuva prevista. Para tanto, foram realizadas sucessivas simulações para cada configuração de parâmetros, cujos períodos específicos de assimilação e de previsão foram, respectivamente, 6 meses no passado e 10 dias no futuro. Na sequência, a avaliação do desempenho para cada uma das configurações adotadas envolveu o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) e o Erro Relativo na vazão de pico (ER), sendo este último medido como a diferença relativa entre as magnitudes das cheias simulada e observada. É importante salientar que a escolha do ER na vazão de pico ao invés do erro de volume, como métrica de avaliação da atualização, é dado pelo fato que a segunda é mais importante no que tange à operação de reservatórios, enquanto que a informação da magnitude do pico passa a ser relevante na atuação de entidades como a Defesa Civil (Zappa *et al.*, 2013).

As Figuras 51 e 52 apresentam o índice de eficiência NS para as cheias observadas no dia 06/06/2014 e 21/07/2011, para cada configuração e também para o não uso de assimilação de dados. Os valores de NS foram obtidos a cada 12 horas a partir do instante inicial de previsão até a antecedência de 84 horas, sendo que após este instante os mesmos foram determinados em intervalos de 24 horas até a antecedência de 10 dias. Observa-se que para antecedências a partir de 156 horas não houve qualquer benefício no uso do procedimento de atualização, o que pode ser explicado pelo fato de que as vazões obtidas através da simulação situaram-se muito próximas das vazões observadas. Desta forma, o efeito da correção nas condições iniciais do modelo acaba tendo pouca influência nos resultados, já que o volume dos reservatórios conceituais tende a se estabilizar rapidamente com o tempo.

Para antecedências menores do que 132 horas, no evento do dia 06/06/2014, os efeitos da atualização no MGB-IPH começaram a se tornar visíveis, variando inicialmente entre 0,87 e 0,93 para as configurações sem e com uso da assimilação de dados. Esta variação no índice NS foi devido à diferença nos hidrogramas observado e simulado na primeira elevação do rio Taquari ocorrido no dia 02/06/2014, para o qual a simulação hidrológica resultou em ambas aceleração da onda e adiantamento no *timing* da pequena cheia. Entre 36 e 132 horas de antecedência, a diferença nos índices de NS permaneceu pouco significativa - 0,9 a 0,93 entre a opção sem e com atualização do modelo, respectivamente, sendo que praticamente não houve sensibilidade de acordo com a configuração de parâmetros adotada no método de atualização.

Já para antecedências menores do que 24 horas, foi possível identificar uma diminuição do NS à medida em que o instante analisado se aproxima do pico da cheia no dia 06/06. Especialmente para 12 horas antes da ocorrência do evento, a opção sem atualização do MGB-IPH resultou em um índice NS de 0,92, superior a qualquer configuração de parâmetros adotada. Para as melhores configurações - 1 e 2 - a diferença de NS foi insignificante (0,92 para 0,9), enquanto que no pior caso - configuração 5 - o NS foi reduzido a 0,85. Esta diminuição no desempenho pode ser atribuída a uma possível subcorreção do método de assimilação de dados, já que o hidrograma simulado possui um pequeno erro de fase (adiantamento) em relação ao observado, durante a sua ascensão.

No caso da cheia do dia 21/07/2011, foram verificadas discrepâncias ainda menores no índice do NS, com variações entre 0,95 e 0,97 para todas as antecedências analisadas. O efeito pouco significativo da atualização do MGB-IPH ocorreu devido às diferenças de vazão observada e simulada no dia 15/07 (132 h de antecedência), bem como durante a recessão do hidrograma na pequena cheia do dia 18/07, já que a vazão foi subestimada pelo modelo a partir deste intervalo de tempo. Além disso, em antecedências menores que 24 horas, o índice NS da obtidos através da

atualização não foram superiores à opção sem assimilação de dados, o que revela uma deficiência do método em instantes muito próximos ao evento de cheia.

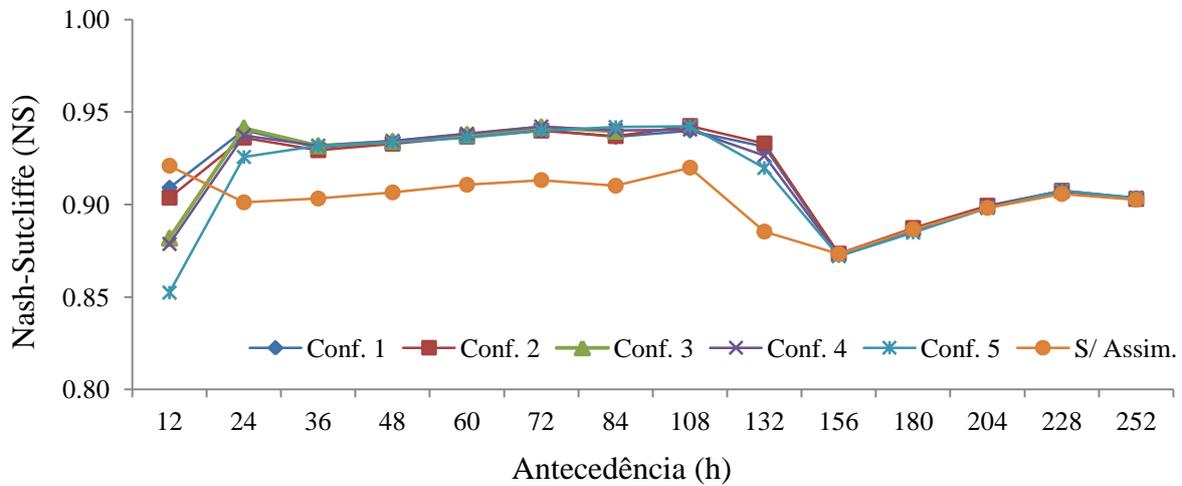


Figura 51. Índice de eficiência de Nash-Sutcliffe para o evento de 06/06/2014, para cada configuração de assimilação de dados e sem a atualização no modelo.

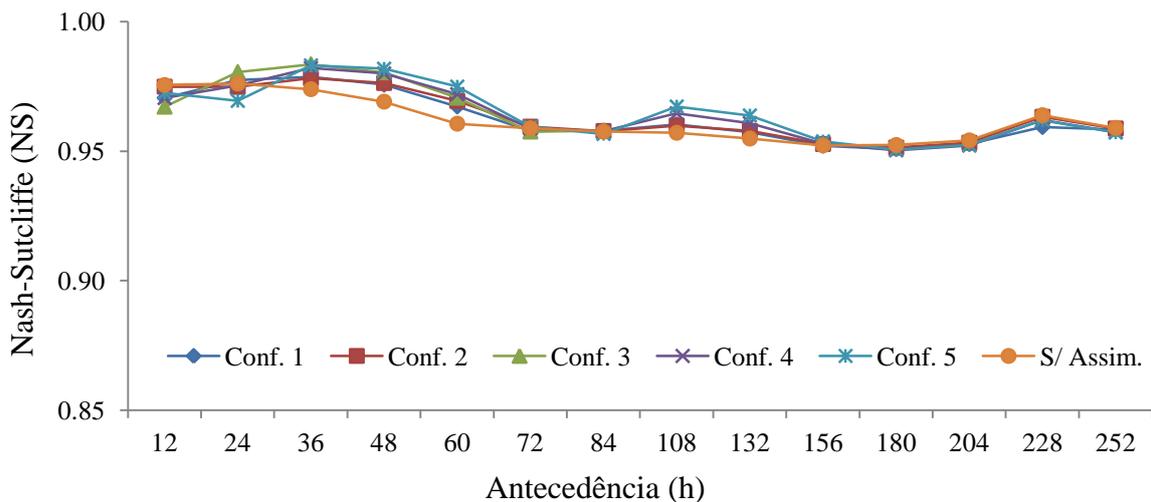


Figura 52. Índice de eficiência de Nash-Sutcliffe para o evento de 21/07/2011, para cada configuração de assimilação de dados e sem a atualização no modelo.

As Figuras 53 e 54 apresentam o erro relativo de vazão nos picos de cheia observados no dia 06/06/2014 e 21/07/2011, para cada configuração e também para o não uso de assimilação de dados. Os valores de ER foram obtidos a cada 12 horas a partir do instante inicial de previsão até a antecedência de 84 horas, sendo que após este instante os mesmos foram determinados em intervalos de 24 horas. Como já era esperado, para a opção sem assimilação de dados no MGB-IPH o ER na vazão de pico se manteve constante em todos os intervalos de tempo, uma vez que neste caso não são realizadas correções nas variáveis de estado do modelo a cada início de previsão. Entretanto, as demais configurações surtiram em efeitos distintos, cuja característica é bem diferenciável em função da faixa de antecedência analisada.

Nos instantes representados pela ascensão do hidrograma de cheia no dia 06/06/2014, com antecedências de 12 e 24 horas, é possível verificar a maior discrepância de ER entre as configurações de atualização do MGB-IPH. Na antecedência de 24 horas, a maior parte do ER situou-se na faixa entre -5 a -10%, alcançando um valor de -12% na situação mais desfavorável. Enquanto isso, no instante referente a 12 horas antes da ocorrência do pico, o menor ER resultante para a atualização ficou próximo a -15%, sendo que no caso mais extremo - na configuração 5 - chegou a exceder -20%. Para as antecedências entre 36 e 84 horas, ao longo da recessão da pequena cheia, o ER resultante da assimilação de dados foi inferior a -5% em todos os casos analisados. Para as configurações 3, 4 e 5, com valores do parâmetro b_x mais elevados, o ER no pico da cheia foi muito próximo de zero, cujo efeito pode estar associado a correções mais rápidas no volume dos reservatórios conceituais do modelo hidrológico durante a recessão do hidrograma, em período sem a ocorrência de chuva. Em contrapartida, as demais configurações - 1 e 2 - mantiveram um desempenho próximo à opção sem atualização no MGB-IPH.

Para o evento do dia 21/07/2011, houve uma situação semelhante ao após a antecedência de 36 horas, até o final do curto prazo. Neste período ocorreu a recessão da primeira cheia no dia 19/07, sendo que o uso de assimilação de dados reduziu ligeiramente o ER no pico de vazão de -8% para -6% no melhor conjunto de parâmetros - a configuração 5. Para antecedências menores ou iguais a 24 horas, foi possível notar também um pequeno aumento do ER em relação à não atualização do MGB-IPH, sendo que nos casos mais desfavoráveis o erro foi em torno de -12%.

Por fim, nas antecedências após 96 horas em ambos eventos simulados, não houve distinção significativa no ER entre as configurações adotadas para a atualização do modelo hidrológico, cujo resultado foi muito semelhante à opção sem assimilação de dados.

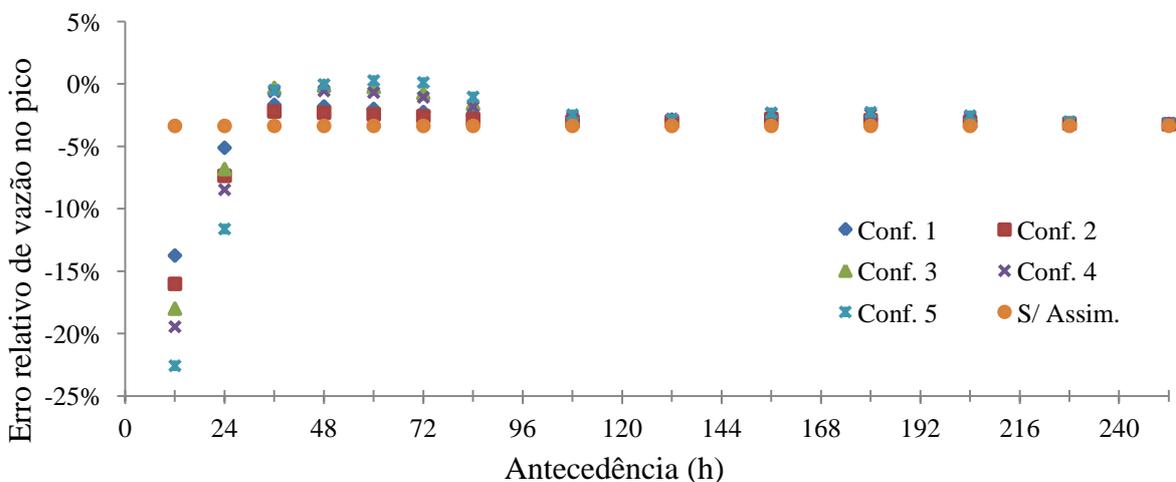


Figura 53. Erro relativo no pico de vazão entre o hidrograma simulado e observado no evento de 06/06/2014, para cada configuração de assimilação de dados e sem a atualização no modelo.

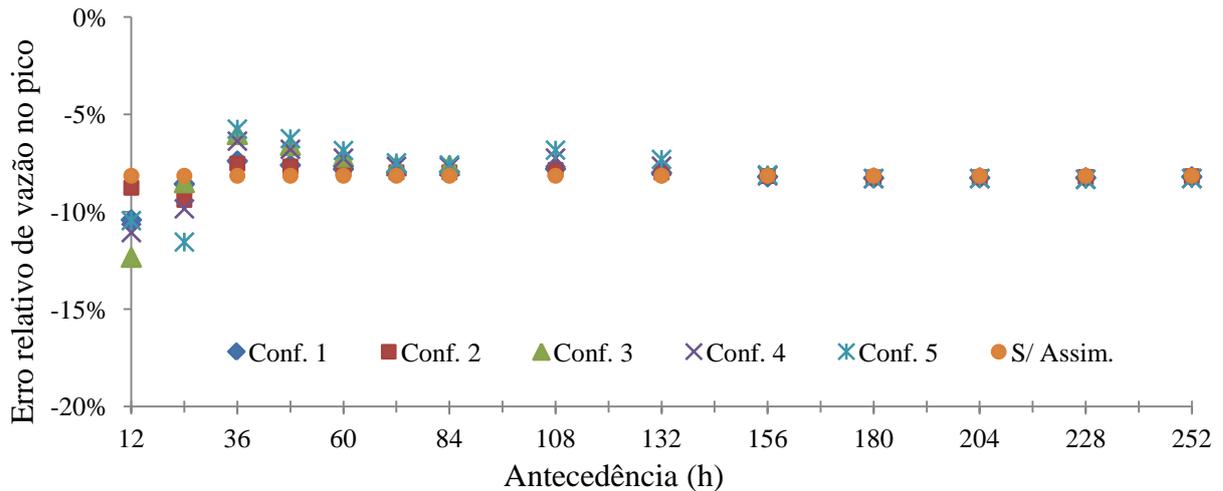


Figura 54. Erro relativo no pico de vazão entre o hidrograma simulado e observado no evento de 21/07/2014, para cada configuração de assimilação de dados e sem a atualização no modelo.

O índice de desempenho de NS, no melhor caso, variou entre 0,93 e 0,89 respectivamente para o uso da configuração 2 e a não utilização de assimilação de dados, referente à antecedência de 132 horas no evento de 06/06/2014. Para as demais antecedências, os valores de NS tiveram diferenças ainda menores, sendo que após 12 horas de previsão a opção sem uso de assimilação de dados resultou em um desempenho melhor em relação ao procedimento de atualização. Além disso, para o evento de 2011, a opção de não assimilação de dados já resultou em valores altos de NS, os quais foram iguais ou superiores a 0,95. Embora com alguns resultados ligeiramente superiores para antecedências maiores, a atualização do MGB-IPH acabou intensificando a subestimativa no pico de vazão simulado em relação ao pico observado, para antecedências de até 24 horas. Estes resultados podem estar associados à incerteza na propagação da onda de cheia na modelagem hidrológica, já que o adiantamento no hidrograma simulado durante sua ascensão tende a causar subcorreções no método de assimilação de dados.

A Figura 55 mostra um exemplo gráfico da atualização para o evento de 06/06/2014 nas antecedências de 24 e 72 horas, considerando o melhor e o pior desempenho dentre as configurações testadas. Mesmo com o deslocamento do hidrograma simulado para próximo do observado durante as primeiras antecedências, foi constatado um benefício muito pequeno - ou mesmo uma deficiência - na estimativa da vazão de pico através da melhor configuração encontrada para a assimilação de dados, cuja variável, relacionada diretamente com o nível do rio durante a ocorrência do pico, possui uma maior importância em termos de conhecimento para entidades como a Defesa Civil. Sendo assim, de acordo com os resultados obtidos optou-se pela não realização do procedimento de correção das variáveis de estado do modelo hidrológico até o instante de previsão.

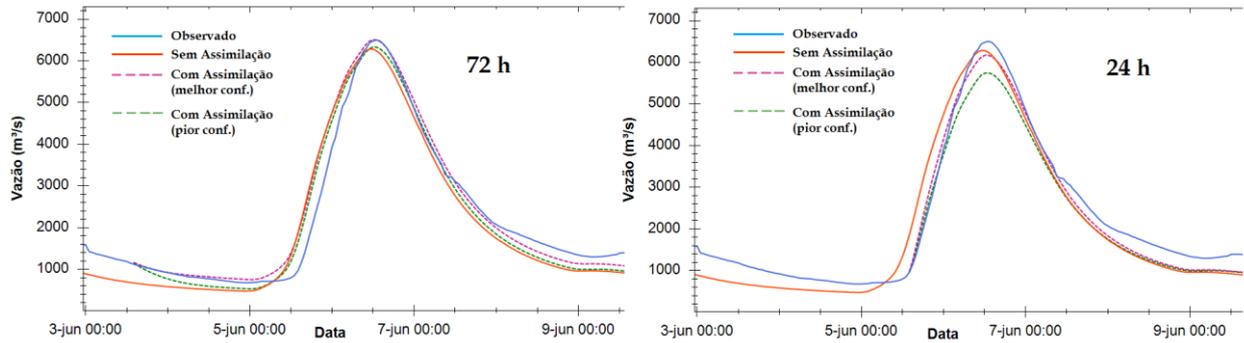


Figura 55. Resultado gráfico do desempenho da atualização do modelo para antecedências maiores (à esquerda e 24 horas de antecedência (à direita), para o evento de 06/06/2014.

6.1.4. Resultados da análise de previsão hidrológica nos eventos singulares

Nesta seção, estão apresentados os resultados da análise visual da previsão hidrológica por conjunto, para os eventos de cheia de 06/06/2014 e 21/07/2011. Estes resultados envolveram os hidrogramas gerados pelo MGB-IPH a partir da introdução dos EPS de curto (ETA - 5 km) e médio prazo (ECMWF - 50 km), sendo que o comportamento destes foi também verificado através de diagramas de excedência e da técnica "Peak-Box". O MGB-IPH foi executado com a mesma configuração obtida durante a etapa de simulação hidrológica, isto é, adotando-se o mesmo de conjunto de parâmetros definido na calibração do modelo.

As previsões em formato de grade do EPS Global do ECMWF 50 km foram inicialmente obtidas a partir da base de dados do TIGGE, enquanto que as previsões do EPS ETA 5 km foram obtidos diretamente do *ftp* operacional do CPTEC. Os dados destas previsões foram desagregados uniformemente para 1 hora, ou seja, considerando a mesma proporção da chuva para cada intervalo de tempo futuro. A interpolação dos dados em grade, oriundos da previsão quantitativa de precipitação, ocorreu de forma semelhante à chuva dos postos pluviométricos, ou seja, a partir da interpolação baseada no inverso do quadrado da distância do centróide da minibacia - nesse caso em relação aos pontos da grade mais próximos. Outro ponto a ser destacado é que o MGB-IPH foi submetido a um período de aquecimento de 6 meses anteriormente a cada rodada, de modo a fornecer as condições iniciais no instante de início das previsões hidrológicas.

Para o caso dos limiares de referência, no presente estudo foram adotadas as cotas de atenção, alerta e inundação do Sistema de Alerta Contra Cheias (SACE-CPRM) para a cidade de Encantado, devidamente convertidas para valores de vazão através da curva-chave associada ao posto fluviométrico no local (telemetria). Além disso, adotou-se um limiar adicional referente à vazão com TR = 5 anos, cujo nível do rio Taquari acarreta em inundações na área urbana da cidade. Ressalta-se que esta vazão foi determinada com base nos estudos de regionalização efetuados no

projeto em que se insere a presente pesquisa, cujos detalhes adicionais não foram aqui apresentados. Os limiares de vazão utilizados, sejam aqueles estabelecidos com base no sistema SACE-CPRM, bem como o referente à cheia com tempo de retorno 5 anos, são mostrados na Tabela 18.

Tabela 18. Limiares de vazão estabelecidos para a cidade de Encantado, com base nas informações do SACE-CPRM.

Descrição do Limiar - Posto de Encantado	Vazão (m³/s)
Limiar de observação (cota 560 cm)	2.010
Limiar de alerta (cota 870 cm)	3.910
Limiar de inundação (cota 950 cm)	4.650
Cheia com TR = 5 anos (cota ≈1.340 cm)	7.950

6.1.4.1. Previsões hidrológicas por conjunto para o evento de 06/06/2014

HEPS ECMWF 50 Km (50 membros) - Médio Prazo

A Figura 56 mostra a sucessão das previsões realizadas com cerca de 10 dias de antecedência em relação ao evento ocorrido no dia 06/06/2014, referente ao HEPS ECMWF 50 km. Os elementos apresentados correspondem aos hidrogramas observado, de cada um dos 50 membros da previsão hidrológica e, inclusive, da média do conjunto, destacando-se a intersecção dos mesmos com os limiares de observação, alerta e inundação para o posto de Encantado. Adicionalmente, para dar suporte à interpretação visual foram elaborados diagramas de excedência para cada limiar de referência utilizado, os quais são mostrados posteriormente nas Tabelas 19 a 21.

Para 228 horas de antecedência (28/05), menos de 5% dos membros sugeriam uma pequena subida do hidrograma com excedência do limiar de observação, por volta do dia 06/06 e 07/06, apesar da previsão estar caracterizada por uma completa subestimativa dos membros. Contudo, no dia seguinte (29/05) praticamente um terço das previsões indicavam vazões superiores ao limiar de observação, aumentando a possibilidade de cheias para a semana do dia 06. Já nesta antecedência, cerca de 15% dos membros ultrapassavam tanto o limiar de alerta quanto o limiar de inundação, sendo que em uma ocasião foi superado também o limiar de TR = 5 anos. Alguns membros inclusive já previam com acurácia a magnitude da cheia, embora a primeira elevação do hidrograma no dia 01/01 estivesse completamente subestimada.

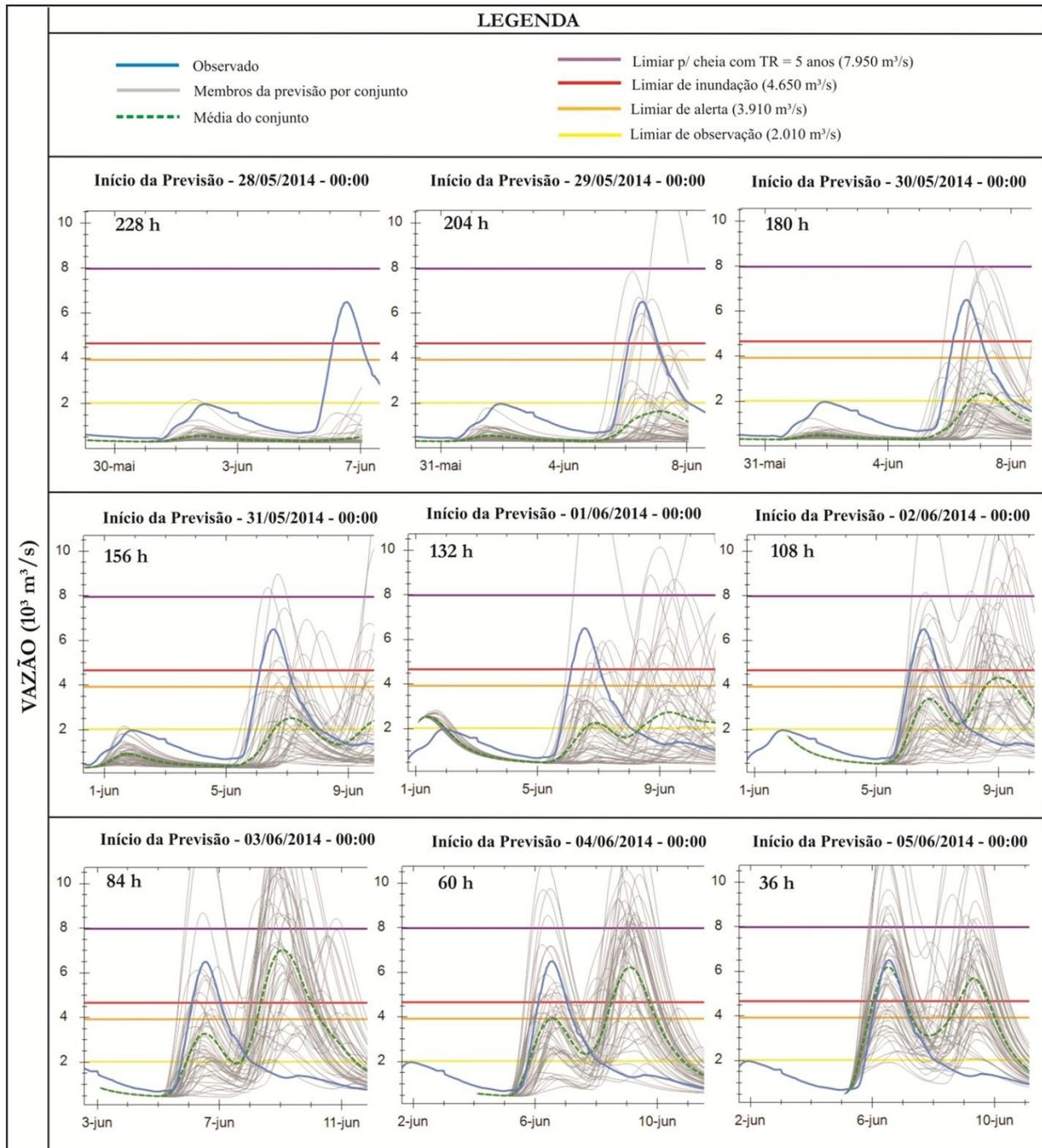


Figura 56. Resultados dos hidrogramas gerados através do HEPS ECMWF 50 km (médio prazo), para o evento ocorrido no dia 06/06/2014.

Tabela 19. Diagrama de excedência para o limiar de observação (2.010 m³/s), referente ao evento do dia 06/06/2014.

		Previsão para a data														
		28/5	29/5	30/5	31/5	1/6	2/6	3/6	4/6	5/6	6/6	7/6	8/6	9/6	10/6	11/6
Data de início da Previsão	28/05/2014	-	-	-	-	2%	-	-	-	-	2%	4%	-	-	-	-
	29/05/2014		-	-	-	-	-	-	-	12%	30%	30%	12%	-	-	-
	30/05/2014			-	-	-	-	-	-	10%	40%	40%	28%	8%	-	-
	31/05/2014				-	4%	-	-	-	10%	54%	64%	44%	42%	38%	-
	01/06/2014					100%	28%	-	-	12%	52%	48%	50%	54%	52%	38%
	02/06/2014						-	-	-	30%	70%	76%	82%	86%	74%	42%
	03/06/2014							-	-	46%	72%	70%	100%	98%	92%	60%
	04/06/2014								-	54%	86%	86%	96%	92%	86%	34%
	05/06/2014									94%	98%	96%	100%	98%	90%	30%
Observado		-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	-	-	-

Tabela 20. Diagrama de excedência para o limiar de alerta (3.910 m³/s), referente ao evento do dia 06/06/2014.

		Previsão para a data														
		28/5	29/5	30/5	31/5	1/6	2/6	3/6	4/6	5/6	6/6	7/6	8/6	9/6	10/6	11/6
Data de início da Previsão	28/05/2014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	29/05/2014		-	-	-	-	-	-	-	4%	12%	18%	4%	-	-	-
	30/05/2014			-	-	-	-	-	-	2%	16%	18%	8%	4%	-	-
	31/05/2014				-	-	-	-	-	2%	16%	22%	10%	22%	22%	-
	01/06/2014					-	-	-	-	2%	16%	14%	30%	32%	28%	14%
	02/06/2014						-	-	-	4%	36%	36%	52%	54%	40%	16%
	03/06/2014							-	-	14%	30%	36%	76%	78%	60%	16%
	04/06/2014								-	26%	50%	42%	72%	76%	46%	-
	05/06/2014									50%	76%	64%	64%	72%	42%	-
Observado		-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	-	-	-	-

Tabela 21. Diagrama de excedência para o limiar de inundação (4.650 m³/s), referente ao evento do dia 06/06/2014.

		Previsão para a data														
		28/5	29/5	30/5	31/5	1/6	2/6	3/6	4/6	5/6	6/6	7/6	8/6	9/6	10/6	11/6
Data de início da Previsão	28/05/2014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	29/05/2014		-	-	-	-	-	-	-	2%	12%	8%	2%	-	-	-
	30/05/2014			-	-	-	-	-	-	2%	14%	16%	8%	2%	-	-
	31/05/2014				-	-	-	-	-	2%	10%	14%	4%	14%	14%	-
	01/06/2014					-	-	-	-	2%	10%	10%	24%	22%	18%	12%
	02/06/2014						-	-	-	-	28%	24%	50%	46%	32%	12%
	03/06/2014							-	-	8%	22%	18%	68%	76%	50%	12%
	04/06/2014								-	14%	32%	26%	70%	70%	30%	
	05/06/2014									36%	66%	54%	50%	60%	28%	
Observado		-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	-	-	-	-

Após 180 horas de previsão (30/05), a possibilidade de uma cheia se manteve em relação à previsão anterior, porém de forma geral é aumentada a magnitude dos picos mais baixos, os quais elevaram-se próximo ao limiar de alerta. Além disso, a média do conjunto superou pela primeira vez o limiar de observação, para o qual houve excedência de cerca de 40% dos membros entre os dias 06/06 e 07/06. Para 156 horas de antecedência (31/05), a incerteza para o dia de ocorrência da cheia começa a tomar grandes dimensões, situando-se entre os dias 06/06 e 10/06. Mais da metade dos membros passou a superar o limiar de observação, enquanto que aproximadamente 20% dos membros ficaram acima do limiar de alerta. A partir de 132 horas de antecedência (01/06), a variabilidade das previsões em relação ao tempo de ocorrência e magnitude da cheia passou a ficar bem evidenciada. Nesta previsão, houve excedência do limiar de inundação no período entre os dias 05/06 e 11/06, sendo que alguns membros indicavam vazões muito críticas na faixa de 14.000 m³/s.

Na antecedência de 108 horas (02/06), a média do conjunto ultrapassou pela primeira vez o limiar de alerta, embora com um erro considerável no dia de ocorrência da cheia. Os membros da previsão reforçaram a subida do hidrograma por volta do dia 06/06, porém começaram a sugerir com maior possibilidade o retorno do pico em momento posterior. Após 84 horas de previsão (03/06), uma grande quantidade de membros excedeu o limiar de TR = 5 anos, porém a cheia começou a ser prevista com maior probabilidade para o dia 08/06. Aproximadamente 75% dos membros indicavam a superação do limiar de inundação, além da própria excedência deste limite pela média do conjunto, a qual situou-se na faixa de 7.000 m³/s.

Para 60 horas de antecedência (04/06), a previsão de uma primeira cheia, sucedida por outra, se manteve, porém com grande variabilidade dos membros quanto à magnitude do evento. Na previsão do dia seguinte (05/06), a média do conjunto superou em duas ocasiões o limiar de inundação, sendo que na primeira foi acertada a magnitude da cheia com bastante acurácia (~ 6.200 m³/s). A previsão do segundo pico foi mantida nesta antecedência (36 horas) e o percentual de membros superando o limiar de inundação passou a ser mais bem distribuído entre os dias da previsão, sendo que a maior fração de excedência (66%) foram, neste caso, para o dia de ocorrência do evento (06/06).

Ressalta-se que após a 1ª identificação da cheia (no dia 29/05) houve uma forte persistência na previsão em relação a um possível evento na semana analisada, apesar da incerteza quanto ao dia de sua ocorrência. A persistência pode ser bem interpretada através dos diagramas de excedência apresentados, onde verifica-se um crescimento gradual do percentual dos membros excedendo os limiares à medida em que novas previsões vão sendo realizadas. Além disso, devido a sua baixa resolução espacial (50 km), um único ponto da grade - cobrindo cerca de 2.500 km² - com grandes

volumes acumulados de precipitação pode acabar afetando uma área significativa da bacia, conseqüentemente gerando hidrogramas previstos com elevados picos de vazão. Este efeito pode ser ainda mais significativo em bacias com resposta rápida ao evento de chuva, como é o caso da bacia do Taquari-Antas.

HEPS ETA 5 Km (5 membros) - Curto Prazo

A Figura 57 mostra a sucessão das previsões realizadas com cerca de 84 horas de antecedência em relação ao evento ocorrido no dia 06/06/2014, referente ao HEPS ETA 5 km. Os elementos apresentados correspondem aos hidrogramas observado, de cada um dos 5 membros da previsão hidrológica e, inclusive, da média do conjunto, destacando-se a intersecção dos mesmos com os limiares de observação, alerta e inundação para o posto de Encantado.

Para 84 horas de antecedência, na interface entre os horizontes de curto e médio prazo, os membros KFG e KfmFG superaram os limiar de inundação, apresentando vazões de pico muito próximas ao evento observado (acima de 5.500 m³/s). Na previsão com 72 horas de antecedência, todos os membros acabaram elevando as vazões previstas para o evento de cheia com exceção do KfmFG, o qual diminuiu a magnitude prevista até o tangenciamento do limiar de inundação. Os membros com parametrização de Betts-Miller-Janjic ainda demonstravam vazões baixas em relação à observada, sendo que no melhor caso (BFG) o membro coincidiu com a média do conjunto, superando ligeiramente o limiar de alerta.

Na antecedência de 60 horas a incerteza na magnitude da cheia foi maximizada pelo conjunto, resultando em um grande espalhamento dos membros na previsão. Os membros configurados com esquema de Betts-Miller-Janjic tiveram vazões reduzidas, enquanto que os de Kain-Fritsch foram aumentados. Esta foi a única ocasião onde o limiar com TR = 5 anos foi excedido, embora que ligeiramente, pelo membro KfmFG. Na sequência, a previsão com antecedência de 48 horas foi a única em que apenas um membro (KFG) excedeu o limiar de inundação, sendo que todos os demais resultaram em hidrogramas abaixo da linha de observação. Ainda, a previsão da elevação do pico no membro BFG, apesar da pequena magnitude, foi deslocada para quase dois dias após os demais membros, o que ampliou a incerteza temporal para este evento.

Após 36 horas de previsão, os membros com parametrização de Betts-Miller-Janjic indicaram a possibilidade da ocorrência de um segundo pico próximo ao limiar de alerta, cujo comportamento também havia sido observado anteriormente nas previsões com o HEPS ECMWF 50 km. Entretanto, os membros com esquema de Kain-Fritsch pouco alteraram a posição do pico da cheia em relação às previsões anteriores, sendo que a previsão do KFG praticamente coincidiu com a

cheia ocorrida. Por fim, na antecedência de 24 horas a previsão foi considerada bem sucedida especialmente para a média do conjunto, no momento em que parte da precipitação já havia ocorrido na bacia.

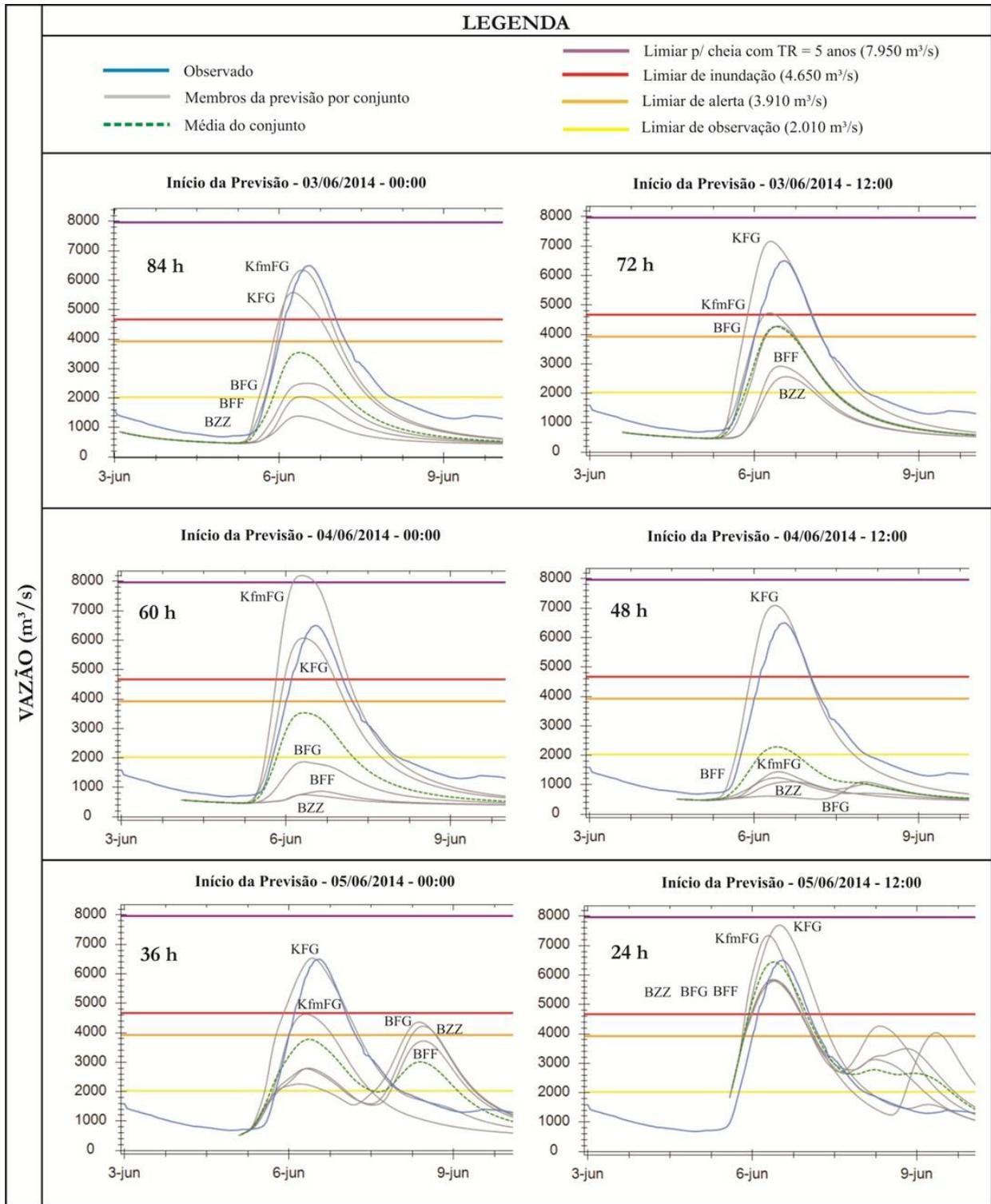


Figura 57. Resultados dos hidrogramas gerados através do HEPS ETA 5 km (curto prazo), para o evento ocorrido no dia 06/06/2014.

Nesse caso, o HEPS de curto prazo mostrou resultados similares às previsões do HEPS de médio prazo em relação à possibilidade de inundação no período, porém sugerindo uma faixa mais adequada da vazão máxima prevista. Ainda, percebe-se que o efeito das diferentes parametrizações, principalmente para precipitação convectiva, acabou sendo preponderante em relação às diferentes condições de contorno utilizadas (NCEP/GFS ou ETA-40 km), para qual os membros com esquema de Kain-Fritsch resultaram em maiores vazões previstas neste evento de cheia se comparado aos membros configurados com o esquema de Betts-Miller-Janjic. Contudo, nota-se também que os membros gerados com a condição de contorno NCEP/GFS (BFG, KfmFG e KFG) apresentaram na grande maioria dos casos vazões maiores em relação aos membros com condições laterais provenientes do ETA - 40 km (BFF e BZZ).

A Figura 58 apresenta o diagrama "*Peak-Box*" para o evento do dia 06/06/2014, o qual é formado pelas posições extremas dos picos previstos - em instante (t_0 e t_{100}) e magnitude (p_0 e p_{100})- considerando todos os membros do conjunto. Já o IQR-Box, representado pela parte mais escura no diagrama, refere-se à região interquartil destas posições (percentis 0,25 e 0,75), indicando o que seria a "faixa mais provável" da previsão. De modo a possibilitar uma avaliação conjunta da incerteza associada às previsões hidrológicas, ou seja, com a utilização de toda a informação gerada no horizonte de curto prazo, o *Peak-Box* foi elaborado a partir da agregação das previsões anteriores às previsões atuais, o que permite inclusive uma melhoria em termos de visualização devido à maior variabilidade de pontos disponíveis no diagrama.

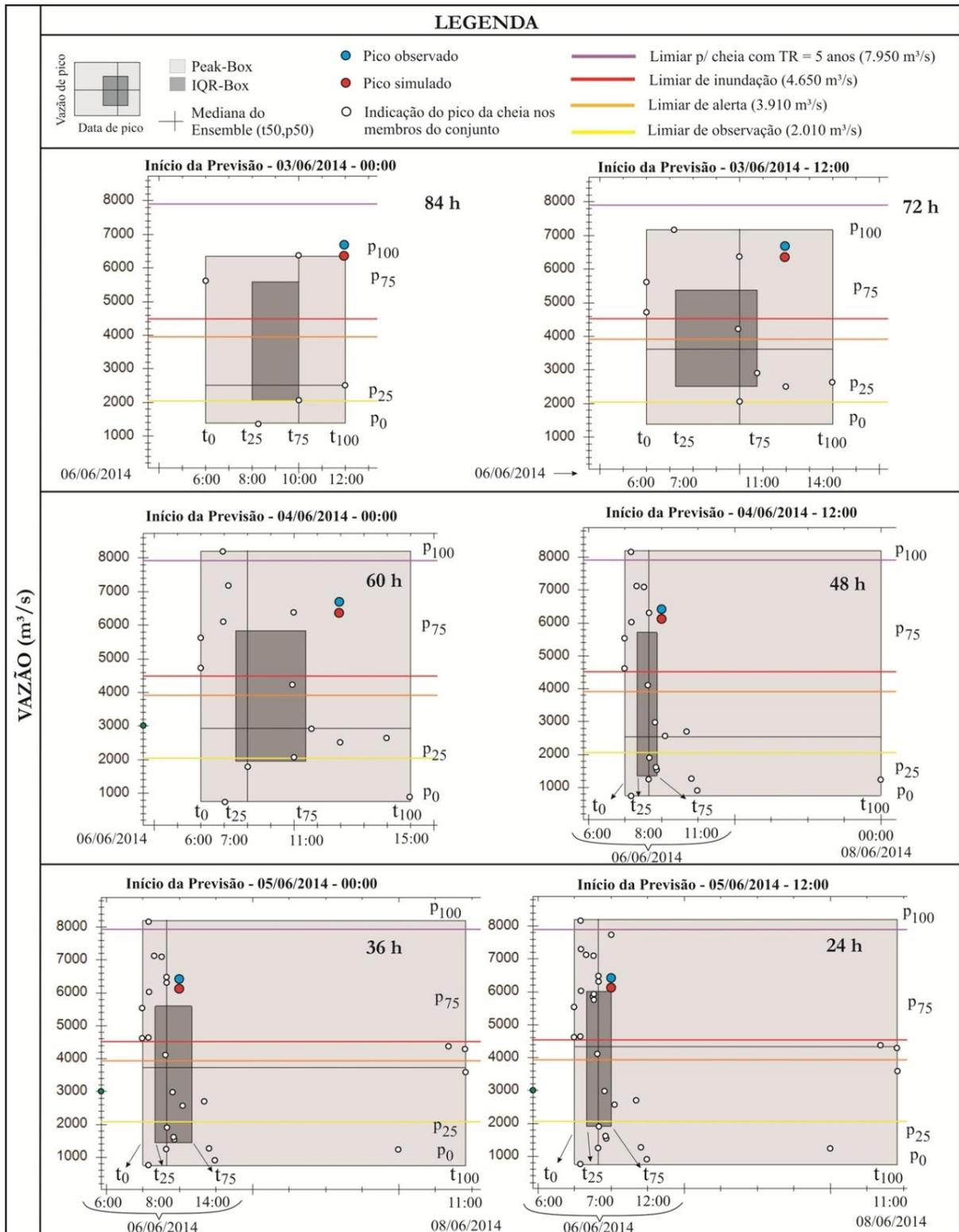


Figura 58. Diagramas "Peak-Box" com previsões agregadas a cada nova antecedência, para o HEPS ETA 5 km no evento do dia 06/06/2014.

No quadrante superior esquerdo (previsão do dia 03/06 às 00:00) são apresentados apenas os 5 membros do conjunto, em função desta ser a primeira análise realizada. Nesse caso, 75% das previsões indicaram o pico ocorrendo após às 8:00 da manhã (t_{25}) e com vazão inferior a 5.500 m³/s

(p_{75}). Ao mesmo tempo, nenhum dos membros indicou a ocorrência dos picos para valores além da faixa entre 06:00 e 12:00, para o dia 06/06.

Nas previsões seguintes (dia 03/06 - 12:00 e 04/06 às 00:00), houve maior distinção entre o IQR-Box e o *Peak-Box*, sendo que este último envolveu o ponto correspondente à vazão de pico observada. A faixa de possíveis valores ficou ligeiramente alterada para a região interquartil, sobretudo em relação ao tempo de pico - cerca de 1 hora, enquanto que o *Peak-Box* apresentou a possibilidade da cheia entre às 6:00 e às 15:00 do dia 06/06 considerando uma antecedência de cerca de 60 horas. Além disso, a faixa máxima de possíveis magnitudes para esta mesma antecedência também foi ampliada, ocasionando em um aumento da amplitude para cerca de 7.000 m³/s considerando os limites p_0 e p_{100} .

Já nas previsões agregadas a partir da antecedência de 48 h é possível perceber um aumento significativo na amplitude temporal do *Peak-Box*, em função de alguns membros indicarem possibilidade da cheia ocorrendo no dia 08/06. Apesar disso, o IQR-Box se manteve na região próximo ao limite esquerdo do *Peak-Box*, o que representou um maior nível de confiança para a ocorrência do pico entre às 06:00 e 11:00 do dia 06/06. Além disso, a introdução de previsões com vazões baixas acabou ampliando também a incerteza na magnitude do IQR-Box, com o limite p_{25} situando-se abaixo do limiar de observação. Para as antecedências de 36 e 24 horas, um aspecto interessante a ser observado é o aumento da linha que representa a mediana dos membros (t_{50} , p_{50}), em termos de magnitude, consecutivamente para as últimas duas previsões. Este aspecto indica que as previsões mais recentes resultaram em elevados valores de vazão, o que pode ser verificado a partir da distribuição de pontos dos picos (pontos brancos) nas porções superiores do diagrama.

Observando-se a diferença entre os limites temporais do IQR-Box em relação à mediana do conjunto, esta foi de no máximo 4 horas e pode ser considerada pequena em função da antecedência das previsões realizadas. Além disso, esta região "mais provável" foi relativamente adequada para representar o *timing* da cheia, já que nas antecedências abaixo de 72 horas houve um desvio máximo de 1 hora entre o limite t_{75} e o tempo de pico observado. Contudo, no que se refere à magnitude da cheia, é possível verificar um valor médio em torno de 2.500 m³/s para a faixa de vazão entre a mediana (p_{50}) e o limite superior do IQR-Box, o que pode ser considerado elevado. Esta faixa não foi suficientemente adequada para representar o desvio do pico observado em relação ao pico mais provável (p_{50}), representando inclusive uma baixa confiabilidade nas previsões agregadas em função da maior incerteza associada.

6.1.4.2. Previsões hidrológicas por conjunto para o evento de 21/07/2011

HEPS ECMWF 50 Km (50 membros) - Médio Prazo

A Figura 59 mostra a sucessão das previsões realizadas com cerca de 10 dias de antecedência em relação ao evento ocorrido no dia 21/07/2011, referente ao HEPS ECMWF 50 km. Os elementos apresentados correspondem aos hidrogramas observado, de cada um dos 50 membros da previsão hidrológica e, inclusive, da média do conjunto, destacando-se a intersecção dos mesmos com os limiares de observação, alerta e inundação para o posto de Encantado. Adicionalmente, para dar suporte à interpretação visual foram elaborados diagramas de excedência para cada limiar de referência utilizado, os quais são mostrados posteriormente nas Tabelas 22 a 24.

Para 228 horas de antecedência (12/07), cerca de 25% dos membros indicavam a ultrapassagem do limiar de observação para dois dias à frente, além da superação do mesmo nos dias 19/07 e 20/07. Em relação a estes últimos dias, um pequeno número de previsões, inferior a 8%, sugeria também a possibilidade de vazões na faixa de alerta e inundação. Entretanto, a previsão realizada com 206 horas de antecedência (13/07) já reduzia a possibilidade uma pequena elevação do hidrograma nos dias 14/07 e 15/07, diminuindo de 20% para 2% o percentual de membros com superação do limiar de observação. Enquanto isso, mais de 50% do conjunto excedia este mesmo limiar para cerca de 7 dias à frente (pequena cheia do dia 19/07).

Após 180 horas de previsão (14/07) a forma geral dos hidrogramas previstos foi semelhante à previsão feita em dia anterior, sendo evidenciada a maior incerteza temporal quanto à ocorrência do evento. Além disso, acima de 20% dos membros superou o limiar de alerta nos dias 18 e 19/07, enquanto que a média do conjunto situou-se pela primeira vez acima do limiar de observação. Na previsão do dia seguinte (15/07), visivelmente as previsões começaram a sugerir a possibilidade de dois eventos de cheia - ocorrendo nos dias 19/07 e 22/07, sendo que no primeiro caso havia um membro praticamente tangenciando o limiar de TR = 5 anos. Para 132 horas de antecedência (16/07) torna-se mais nítida a separação destes dois eventos, o que pode ser identificado nos diagramas de excedência através de um percentual bem menor de membros superando os limiares para o dia 20/07, em relação a ambos dias anterior e posterior. Apesar disso, a magnitude da vazão para o segundo pico foi bastante subestimada pelo conjunto (membros mais elevados próximos a 6.000 m³/s), cujo aspecto permaneceu ao longo das previsões posteriores.

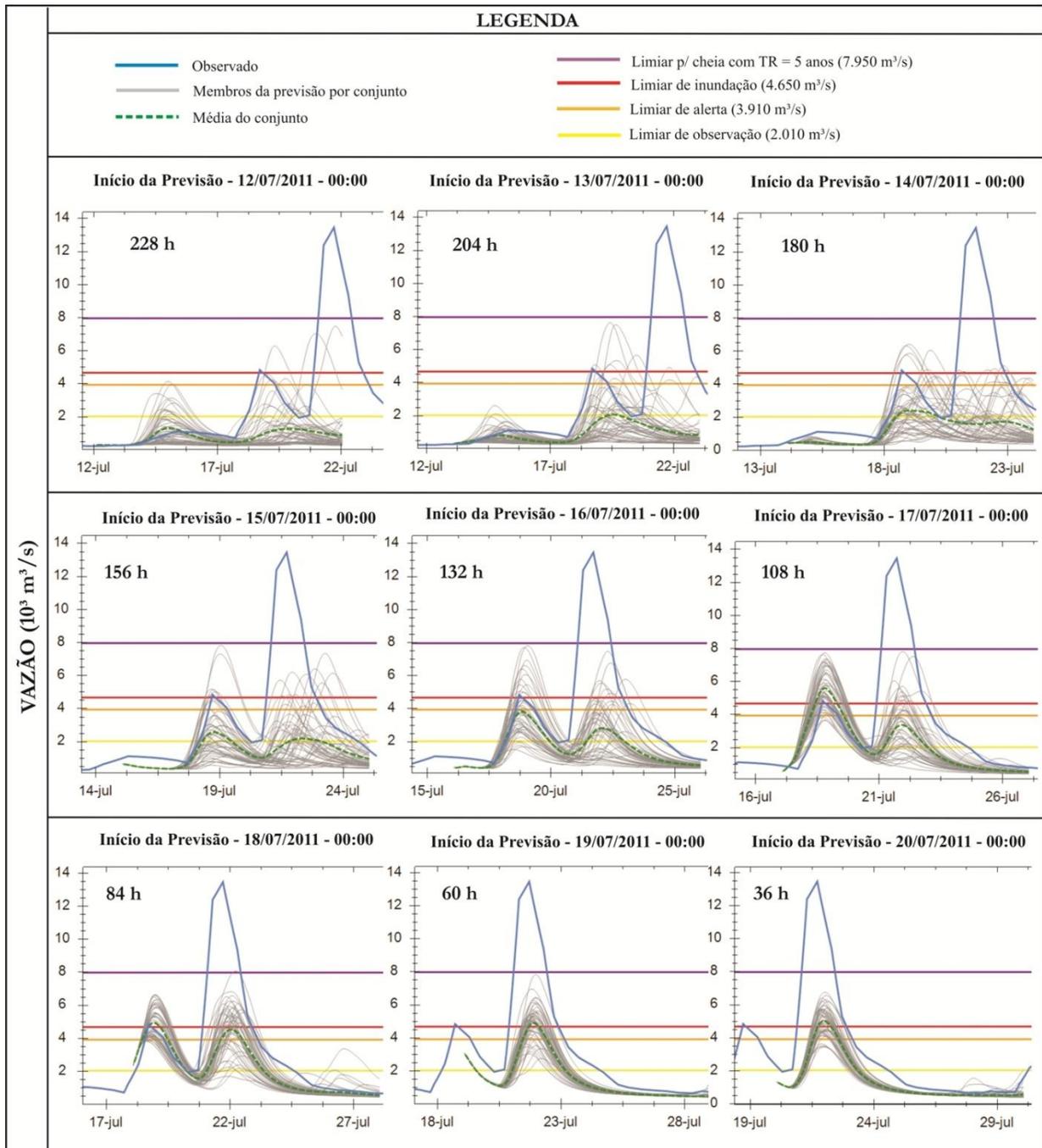


Figura 59. Resultados dos hidrogramas gerados através do HEPS ECMWF 50 km (médio prazo), para o evento ocorrido no dia 21/07/2011.

Tabela 22. Diagrama de excedência para o limiar de observação (2.010 m³/s), referente ao evento do dia 21/07/2011.

		Previsão para a data														
		12/7	13/7	14/7	15/7	16/7	17/7	18/7	19/7	20/7	21/7	22/7	23/7	24/7	25/7	26/7
Data de início da Previsão	12/07/2011	-	2%	24%	22%	4%	-	16%	24%	22%	8%	4%	-	-	-	-
	13/07/2011		-	4%	2%	-	-	34%	50%	40%	16%	10%	8%	-	-	-
	14/07/2011			-	-	-	6%	60%	66%	48%	46%	46%	32%	18%	-	-
	15/07/2011				-	-	8%	58%	54%	22%	54%	66%	34%	22%	6%	-
	16/07/2011					-	10%	92%	90%	44%	66%	72%	28%	10%	-	-
	17/07/2011						94%	100%	100%	94%	82%	84%	38%	4%	-	-
	18/07/2011							100%	100%	82%	96%	98%	78%	2%	2%	4%
	19/07/2011								100%	28%	100%	100%	78%	-	-	-
	20/07/2011									-	100%	100%	98%	-	-	-
	Observado		-	-	-	-	-	-	X	X	X	X	X	X	X	-

Tabela 23. Diagrama de excedência para o limiar de alerta (3.910 m³/s), referente ao evento do dia 21/07/2011.

		Previsão para a data														
		12/7	13/7	14/7	15/7	16/7	17/7	18/7	19/7	20/7	21/7	22/7	23/7	24/7	25/7	26/7
Data de início da Previsão	12/07/2011	-	-	2%	4%	-	-	6%	8%	8%	4%	2%	-	-	-	-
	13/07/2011		-	-	-	-	-	8%	16%	10%	6%	6%	2%	-	-	-
	14/07/2011			-	-	-	-	10%	22%	20%	8%	12%	14%	6%	-	-
	15/07/2011				-	-	-	20%	16%	6%	14%	24%	14%	4%	-	-
	16/07/2011					-	-	46%	38%	2%	24%	32%	10%	-	-	-
	17/07/2011						6%	94%	90%	-	38%	36%	6%	-	-	-
	18/07/2011							94%	80%	-	70%	72%	12%	-	-	-
	19/07/2011								-	-	84%	80%	2%	-	-	-
	20/07/2011									-	92%	92%	4%	-	-	-
	Observado		-	-	-	-	-	-	-	X	-	X	X	X	-	-

Tabela 24. Diagrama de excedência para o limiar de inundação (4.650 m³/s), referente ao evento do dia 21/07/2011.

		Previsão para a data														
		12/7	13/7	14/7	15/7	16/7	17/7	18/7	19/7	20/7	21/7	22/7	23/7	24/7	25/7	26/7
Data de início da Previsão	12/07/2011	-	-	-	-	-	-	2%	2%	2%	4%	2%	-	-	-	-
	13/07/2011		-	-	-	-	-	4%	10%	8%	2%	2%	-	-	-	-
	14/07/2011			-	-	-	-	8%	12%	4%	4%	8%	4%	-	-	-
	15/07/2011				-	-	-	12%	8%	-	10%	14%	10%	4%	-	-
	16/07/2011					-	-	24%	22%	-	10%	14%	6%	-	-	-
	17/07/2011						-	78%	72%	-	22%	24%	4%	-	-	-
	18/07/2011							50%	50%	-	50%	58%	6%	-	-	-
	19/07/2011								-	-	66%	64%	-	-	-	-
	20/07/2011									-	64%	64%	-	-	-	-
	Observado		-	-	-	-	-	-	X	X	-	X	X	-	-	-

Para 108 horas de antecedência (17/07), a média do conjunto representou de forma adequada o primeiro evento de cheia ($\sim 5.000 \text{ m}^3/\text{s}$), com mais de 70% dos membros superando o limiar de inundação. Ao mesmo tempo, o limiar de alerta foi excedido por cerca de 90% das previsões geradas nesta antecedência. Por fim, para as previsões iguais ou inferiores a 84 horas de antecedência (18/07 a 20/07), houve uma grande persistência para a segunda cheia, com limiares de alerta e de inundação superados, respectivamente, por mais de 70% e 50% dos membros nas previsões realizadas em sequência. No entanto, embora este evento tenha sido bem identificado pelo conjunto, a magnitude do mesmo foi bastante subestimada, sendo que em apenas uma ocasião o limiar com $TR = 5$ anos foi superado e somente por um único membro.

De forma geral, o HEPS ECMWF 50 km teve um desempenho relativamente bom na identificação antecipada das cheias no período analisado, sendo bem evidenciada também a distinção dos dois eventos - com 108 a 132 horas de antecedência - conforme previsto por parte dos membros do conjunto. Neste sentido, é importante destacar, através dos resultados na forma de diagramas de excedência, o aumento gradual do percentual de membros ao longo das previsões realizadas com superação dos limiares de referência, o que representa uma técnica simples e prática para avaliar a possibilidade de ocorrência de eventos dada a grande quantidade de informações gerada nas previsões hidrológicas. Entretanto, ressalta-se que a cheia foi subestimada em mais da metade da vazão de pico referente ao evento crítico no dia 21/07 ($\sim 14.000 \text{ m}^3/\text{s}$), sendo que apenas um único membro indicou vazões ligeiramente superando o limiar de $TR = 5$ anos.

HEPS ETA 5 km (5 membros) - Curto Prazo

A Figura 60 mostra a sucessão das previsões realizadas com cerca de 84 horas de antecedência em relação ao evento ocorrido no dia 21/07/2011, referente ao HEPS ETA 5 km. Os elementos apresentados correspondem aos hidrogramas observado, de cada um dos 5 membros da previsão hidrológica e, inclusive, da média do conjunto, destacando-se a intersecção dos mesmos com os limiares de observação, alerta e inundação para o posto de Encantado. Entretanto, especialmente para este evento de cheia, as previsões de precipitação do EPS ETA 5 km ainda não estavam disponíveis nos registros do CPTEC, já que este conjunto começou a ser arquivado apenas após o mês de novembro de 2012. Sendo assim, foram inicialmente solicitadas as rodadas do EPS para o período antecedente ao evento, considerando as mesmas parametrizações (convectiva e microfísica), condições de contorno e resolução espacial em relação ao conjunto disponibilizado de forma operacional.

Para 84 horas de antecedência, na interface entre os horizontes de curto e médio prazo, apenas o membro KfmFG superou todos os limiares de referência, atingindo uma vazão de pico de aproximadamente 10.000 m³/s. Os demais membros apresentaram vazões muito baixas para o evento em questão, sem representar qualquer situação de alerta para o presente caso. Apesar disso, na antecedência de 72 horas já foi possível notar um aumento na variabilidade dos membros do conjunto, sendo que o KFG situou-se próximo ao limiar de TR = 5 anos e o KfmFG indicou vazões acerca de 11.500 m³/s. Juntamente com a previsão do membro BFG, a média do conjunto superou pela primeira vez o limiar de inundação, enquanto que os demais membros com esquema de Betts-Miller-Janjic ligeiramente excediam o limiar de observação.

Na antecedência de 60 horas, ambas previsões geradas com esquema de Kain-Fritsch se situaram-se acima do limiar de TR = 5 anos, indicando pico de cheia na faixa de 9.000 a 10.500 m³/s. Já os demais membros com esquema de Betts-Miller-Janjic apenas indicavam situações próximas ao limiar de alerta, com vazões inferiores a 4.600 m³/s. Após 48 horas de previsão, apesar do membro de maior magnitude ter reduzido o pico de vazão em relação às previsões anteriores, verificou-se que todos os membros ultrapassaram o limiar de inundação, reduzindo o espalhamento do conjunto. Consequentemente, a confiança em um possível evento de cheia passou a ser maior neste momento, já que a concordância dos membros foi intensificada na previsão efetuada.

No que se refere a 36 horas de antecedência, os membros com parametrização de Betts-Miller-Janjic mantiveram a magnitude da previsão anterior, enquanto que os membros KFG e KfmFG novamente ultrapassaram o limiar com TR = 5 anos. Embora os membros BFG, BFF e BZZ praticamente não tenham sofrido alterações em relação à previsão anterior, ressalta-se que a média do conjunto ficou muito próxima ao limiar de referência mais elevado. Por fim, a previsão com antecedência de 1 dia foi considerada bem sucedida, sendo que um grande volume de chuva ainda não havia ocorrido nas últimas 24 horas. Neste caso, os hidrogramas gerados pelo conjunto, com exceção do membro BZZ, ficaram muito próximos ao hidrograma simulado pelo MGB-IPH considerando a chuva perfeita, sendo que as diferenças identificadas nesta previsão em relação à cheia observada podem ser atribuídas às incertezas existentes nos dados, na modelagem hidrológica ou na própria extrapolação da curva chave associada ao posto fluviométrico de Encantado.

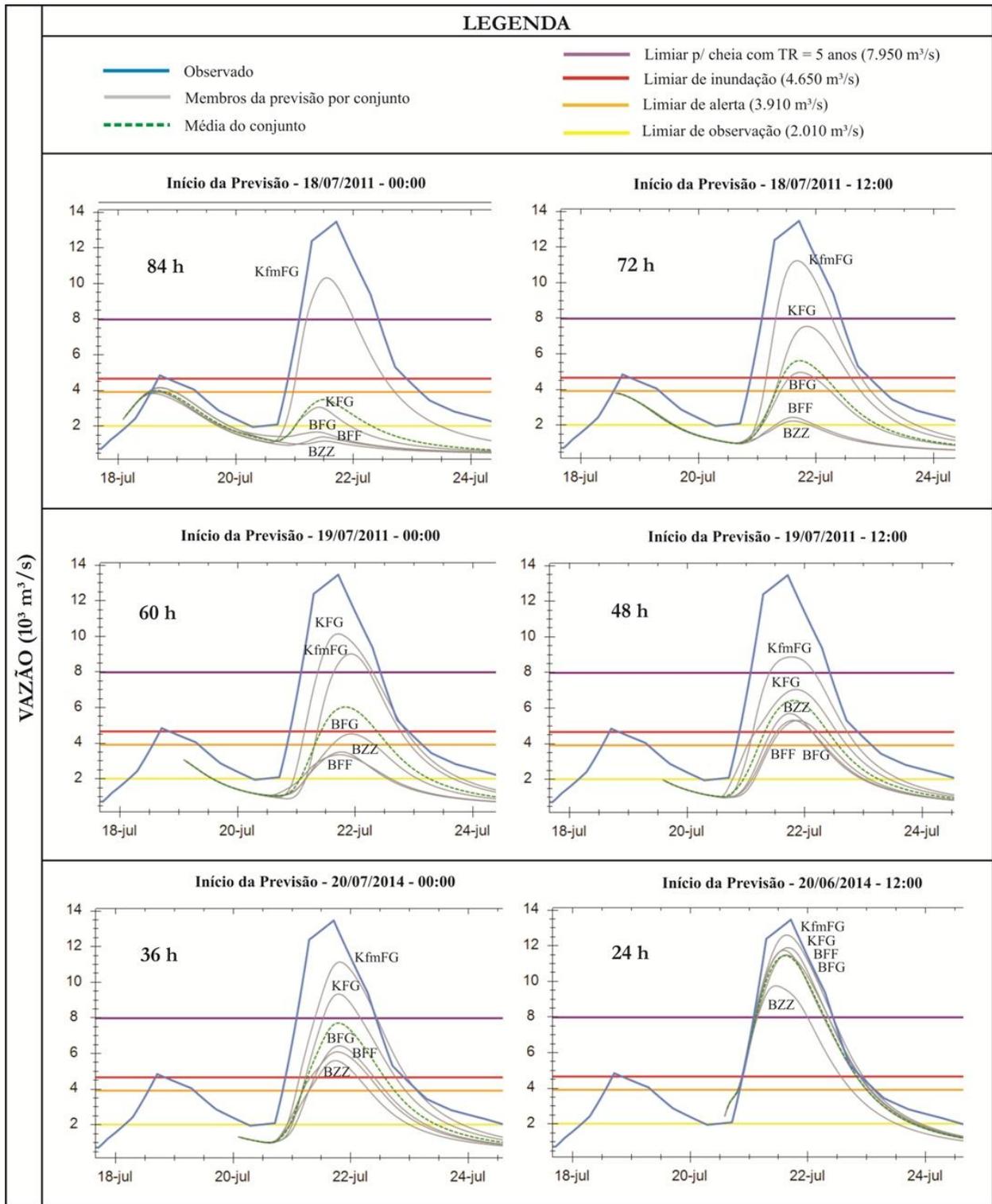


Figura 60. Resultados do HEPS de curto prazo (EPS Regional ETA), para o evento ocorrido no dia 21/07/2011.

É interessante notar que, em todas as previsões efetuadas em curto prazo, pelo menos um membro com parametrização de Kain Fritsch (KfmFG) superou o limiar com TR = 5 anos, cuja persistência ao longo destas previsões apontou para a probabilidade de ocorrência de um evento crítico. Além disso, observou-se que em apenas uma previsão - na antecedência de 48 h - o pico da maior cheia prevista dentre os membros disponíveis ficou abaixo de 10.000 m³/s. Nesse caso, o

HEPS ETA 5 km mostrou resultados similares às previsões do HEPS ECMWF 50 km em relação à possibilidade de inundação no período, porém a máxima magnitude do pico foi melhor indicada no HEPS de curto prazo entre às antecedências de 36 e 84 horas.

A Figura 61 apresenta o diagrama "*Peak-Box*" para o evento do dia 21/07/2011. Da mesma forma como no evento do dia 06/06/2014, o *Peak-Box* foi elaborado a partir da agregação das previsões anteriores às previsões atuais, de modo a possibilitar uma avaliação conjunta da incerteza associada às previsões hidrológicas, ou seja, com a utilização de toda a informação gerada no horizonte de curto prazo. Particularmente para este evento, é possível verificar de maneira clara a discrepância entre os picos de cheia observado e simulado pelo MGB-IPH, conforme demonstrado pelos pontos relacionados no diagrama. O pico no hidrograma simulado possui um atraso de 3 horas em relação ao observado, o que pode ser explicado pelas incertezas na propagação da onda de cheia na modelagem hidrológica.

Na imagem do canto superior esquerdo (previsão do dia 18/07 às 00 h) são apresentados apenas os 5 membros em função da primeira previsão realizada. Nesse caso, o ponto extremo do *Peak-Box* (p_{100}) mostrava uma vazão muito superior ($10.000 \text{ m}^3/\text{s}$) em relação às demais, já que 75% das previsões indicaram um pico com vazão inferior a $3.000 \text{ m}^3/\text{s}$ (p_{75}). No entanto, a faixa mais provável em relação ao *timing* foi relativamente pequena, variando entre as horas 09:00 e 13:00 para o dia 21/07.

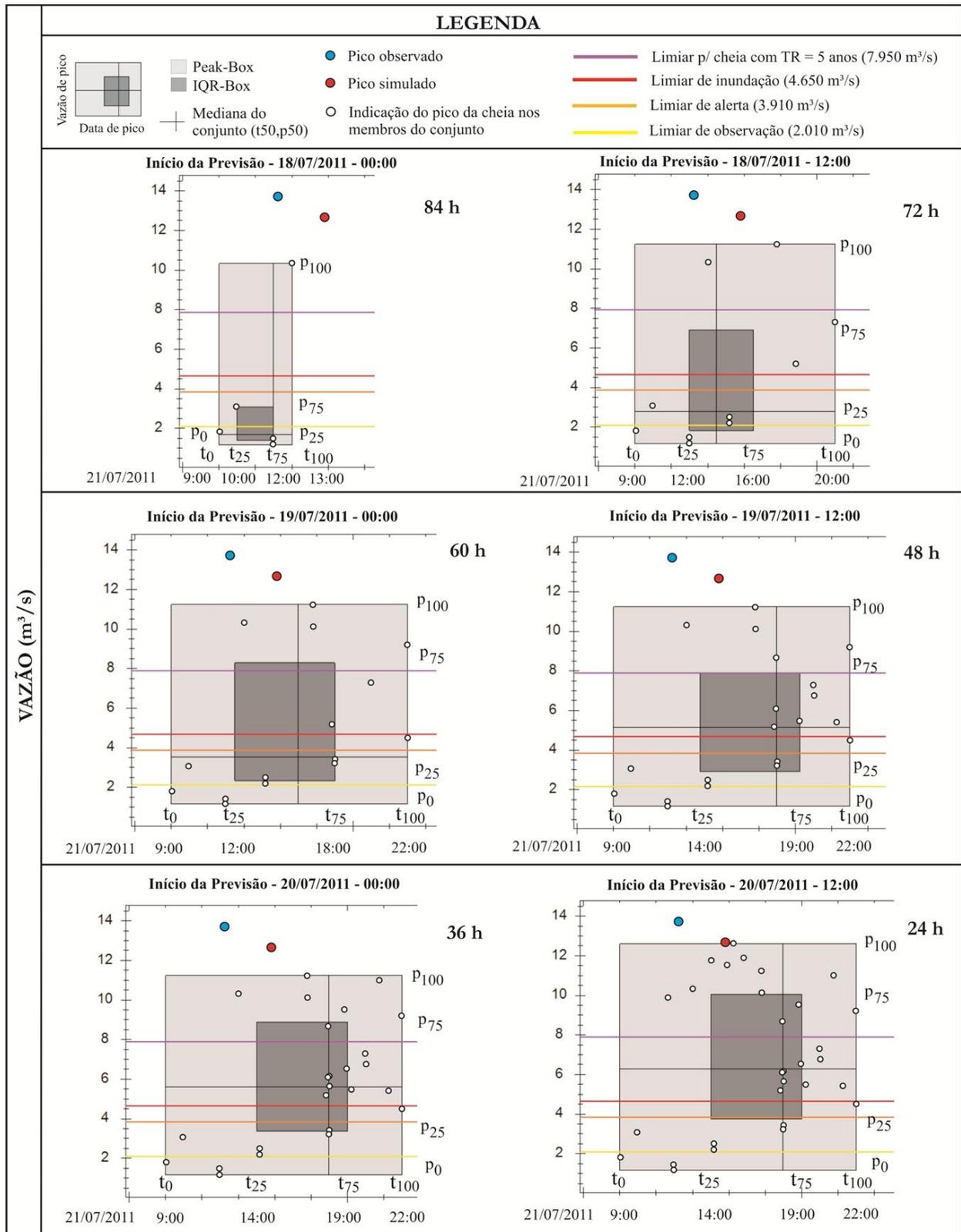
A partir da previsão efetuada no dia 18/07, às 12 h, tanto o *Peak-Box* como o *IQR-Box* passaram a ter seus limites de tempo deslocados para a direita, o que indica que as previsões geradas neste intervalo de tempo resultaram em um pequeno atraso no instante de ocorrência cheia. Nesta antecedência, ambos retângulos envolveram o instante de pico simulado com a chuva observada. Além disso, o *IQR-Box* teve a amplitude aumentada, variando na faixa entre $1.950 \text{ m}^3/\text{s}$ (p_{25}) e $7.000 \text{ m}^3/\text{s}$ (p_{75}). Na previsão do dia 19/07, às 00 h, a incerteza na magnitude aumenta para o máximo na faixa mais provável, com 50% dos membros ($p_{25} - p_{75}$) indicando vazões entre 2.000 e $8.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Para esta mesma antecedência (60 h), o limite na faixa do *timing* também alcança a maior amplitude - (9:00 às 22:00), mantendo-se constante até a última previsão.

De maneira geral, a geometria do *Peak-Box* foi pouco alterada a partir das previsões agregadas até o dia 19/07, às 00:00. Além disso, a incerteza no instante de pico permaneceu inalterada dentre os limites do *IQR-Box* a partir da antecedência de 48 h, com 25% das previsões indicando vazões superiores ao limiar $TR = 5$ anos. Já na antecedência de 24 horas, 25% das previsões agregadas no tempo indicaram vazões acima de $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$, com os picos muito

próximos ao pico simulado com a chuva observada. Outro aspecto a ser observado é o comportamento da linha que representa a mediana dos membros (t_{50} , p_{50}) no conjunto. É possível notar que houve um crescimento gradual na magnitude (p_{50}) desta linha a cada nova previsão lançada, desde a antecedência de 84 h até 24 h, o que indicou uma certa concordância entre os membros no que se refere à possibilidade de vazões mais elevadas da cheia. Em relação ao *timing* (t_{50}), a linha aumentou gradativamente até a antecedência de 48 h (19/07), sendo fixada nas 18:00 para o instante de pico até o final das previsões.

Através dos resultados obtidos é possível verificar que o retângulo do *Peak-Box* não foi suficiente para capturar a magnitude do evento extremo analisado. Apenas na antecedência de 24 horas o limite superior deste retângulo tangenciou o pico simulado, o que significa que isto aconteceu apenas para uma única previsão do conjunto, ao longo de todo o horizonte de curto prazo. Além disso, é possível verificar grandes diferenças de vazão na faixa entre a mediana (p_{50}) e o limite superior do IQR-Box, alcançando valores médios próximos de 3.500 m³/s.. Mesmo com a grande incerteza - espalhamento - verificada nos membros agregados, o pico da cheia ficou bastante distante da região "mais provável" do conjunto, se mostrando bastante inadequada para estimativa da magnitude da cheia neste evento.

Todavia, observando-se a diferença entre os limites temporais do IQR-Box em relação à mediana do conjunto, esta foi de no máximo 4 horas (similar ao evento anterior) e pode ser considerada pequena em função da antecedência das previsões realizadas. Adicionalmente, a região "mais provável" foi relativamente adequada para representar o *timing* da cheia, já que o instante de pico simulado, isto é, desconsiderando incertezas associadas ao modelo hidrológico utilizado, foi completamente englobado durante a agregação das previsões já desde a antecedência de 72 horas.



6.2.Hindcasting II - Análise estatística das previsões hidrológicas por conjunto e determinística

Neste item estão apresentados os resultados da análise estatística de previsões hidrológicas determinísticas e por conjunto (HEPS), na bacia do Taquari-Antas. O período selecionado para esta análise - 19/03/2014 a 19/11/2014 (8 meses) - foi concebido em função de alguns critérios específicos como: (i) aquisição de dados de previsões operacionais ao longo do período do projeto; (ii) existência de um maior número de estações horárias de chuva observada disponíveis (INMET + CPRM + UNIVATES); (iii) existência de alguns eventos com superação dos limiares de observação, alerta e inundação; (iv) abrangência do período de maior ocorrência de cheias na bacia, referente aos meses entre julho e outubro.

As métricas utilizadas para avaliação das previsões de vazão foram determinadas em relação a uma simulação de referência obtida a partir do MGB-IPH acoplado à "chuva perfeita" (Figura 62), de maneira a desconsiderar a propagação de incertezas relacionadas à modelagem hidrológica, como erros de *timing*, para o resultado das análises. Estas métricas foram concebidas de maneira a descrever o comportamento esperado para os sistemas de previsão, sendo aqui utilizadas para verificação das seguintes características:

- Viés: Erro Médio Relativo (previsão determinística e média dos conjuntos);
- Acurácia: Erro Médio Absoluto (previsão determinística e média dos conjuntos) e Mean Continuous Ranked Probability Score (HEPS);
- Destreza: Brier Skill Score (HEPS em relação à previsão determinística);
- Espalhamento: Rank Histogram (HEPS);
- Discriminação: Relative Operating Characteristics - Curva ROC (Previsão determinística e HEPS).

Ainda, para facilitar a descrição dos resultados, a configuração dos sistemas de previsão utilizados na análise estatística foi organizada através das seguintes terminologias:

- D-ETA15: Previsão hidrológica de médio prazo, a partir da incorporação da previsão determinística do ETA de média resolução (15 km), com até 7 dias de antecedência.
- ETA5: previsão hidrológica de curto prazo, a partir da incorporação dos 5 membros de alta resolução (5 km) do conjunto ETA, com até 72 horas de antecedência;

- ETA5-LAF: previsão hidrológica de curto prazo, a partir da incorporação dos 5 membros de alta resolução (5 km) do conjunto ETA + 5 membros da rodada de 12 horas anteriores (*Lagged Averaged Forecasts*), com até 72 horas de antecedência;
- ECMWF50: previsão hidrológica de médio prazo, a partir da incorporação dos 50 membros de baixa resolução (50 km) do conjunto ECMWF, com até 10 dias de antecedência;

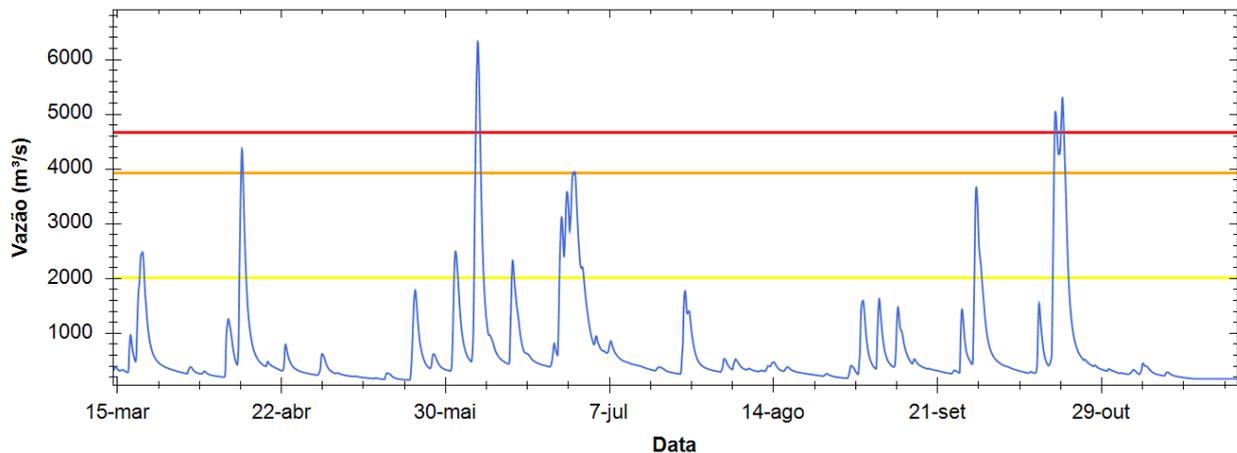


Figura 62. Simulação de referência utilizada para análise das previsões hidrológicas, no período de 19/03/2014 a 19/11/2014. Na figura, apresentam-se também os limiares de observação (amarelo), alerta (laranja) e inundação (vermelho)

As previsões de chuva oriundas do EPS ETA - 5 km (5 membros) e do ETA 15 km determinístico foram adquiridas para as 00 e 12 UTC, obtidas diariamente do *ftp* do CPTEC ao longo do período selecionado. Quanto às previsões de chuva do EPS ECMWF - 50 km (50 membros), estas foram adquiridas para os meses de interesse a partir da base de dados do TIGGE, com rodadas das 00 e 12 UTC e recorte específico para a bacia do Taquari-Antas. Ao total, foram realizadas 27.440 simulações com o MGB-IPH para a produção das previsões hidrológicas, para o qual foi atribuído um período de aquecimento do modelo de 6 meses anteriormente ao instante de cada previsão. Ressalta-se que o modelo hidrológico foi inicializado em 490 intervalos de tempo - para cada membro - no período selecionado de 8 meses (245 dias, para as 00 e 12 h), sendo que os limiares de observação, alerta e inundação foram superados respectivamente em 33, 8 e 5 ocasiões ao longo das antecedências analisadas. Para a obtenção dos resultados estatísticos utilizou-se o *software* EVS (*Ensemble Verification System*), conforme apresentado por Brown *et al.* (2010).

6.2.1. Erro Médio Relativo

A seguir, nas Figuras 63 a 66, estão apresentados o erro médio relativo (EMR) de vazão para a previsão hidrológica alimentada pelo ETA Determinístico - 15 km bem como para a média do conjunto de cada um dos HEPS testados: ECMWF50, ETA5 e ETA5-LAF. Os gráficos foram organizados de maneira a permitir a avaliação geral do viés das previsões e a intercomparação entre

as faixas de vazão de interesse (em curto - C.P e médio prazo - M.P), contemplando toda a série analisada e os limiares de observação, alerta e inundação do posto de Encantado.

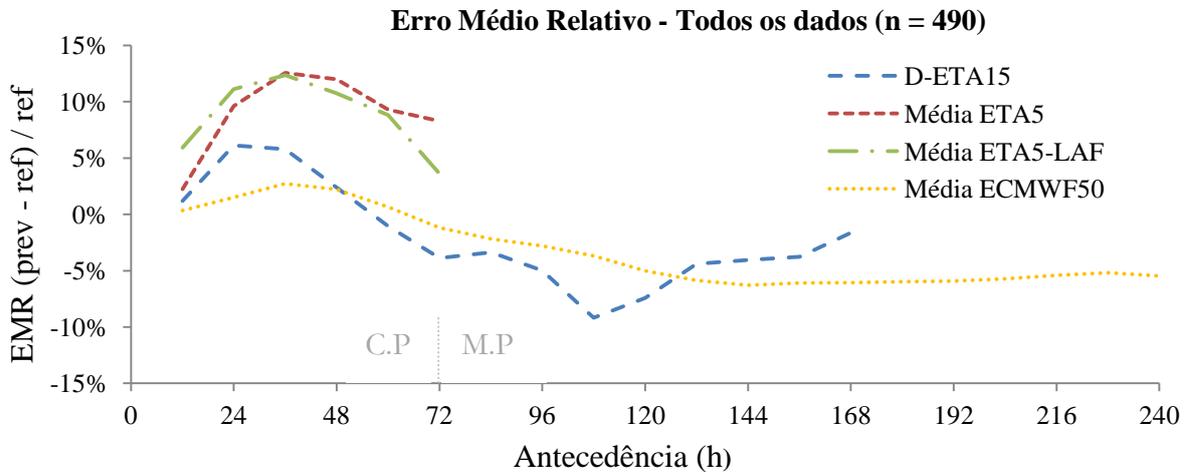


Figura 63. Erro médio relativo para cada antecedência de previsão, considerando todos os valores da série analisada.

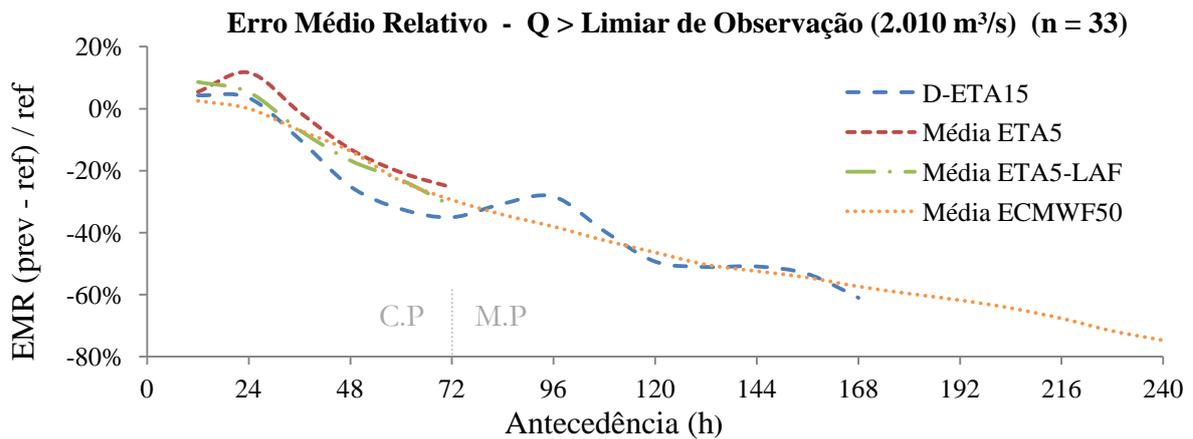


Figura 64. Erro médio relativo para cada antecedência de previsão, considerando vazões maiores do que 2.010 m³/s (Limiar de observação).

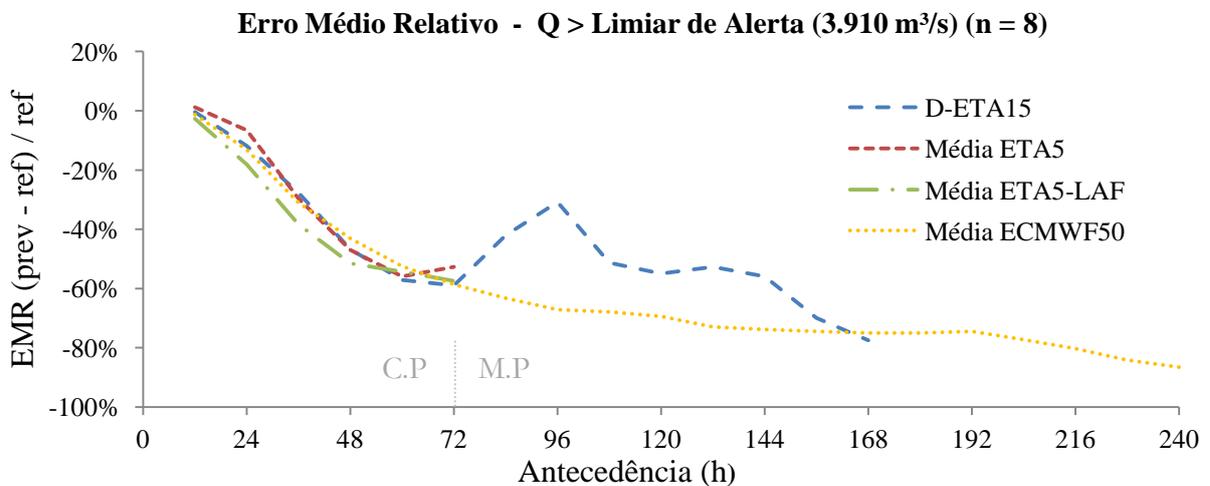


Figura 65. Erro médio relativo para cada antecedência de previsão, considerando vazões maiores do que 3.910 m³/s (Limiar de alerta).

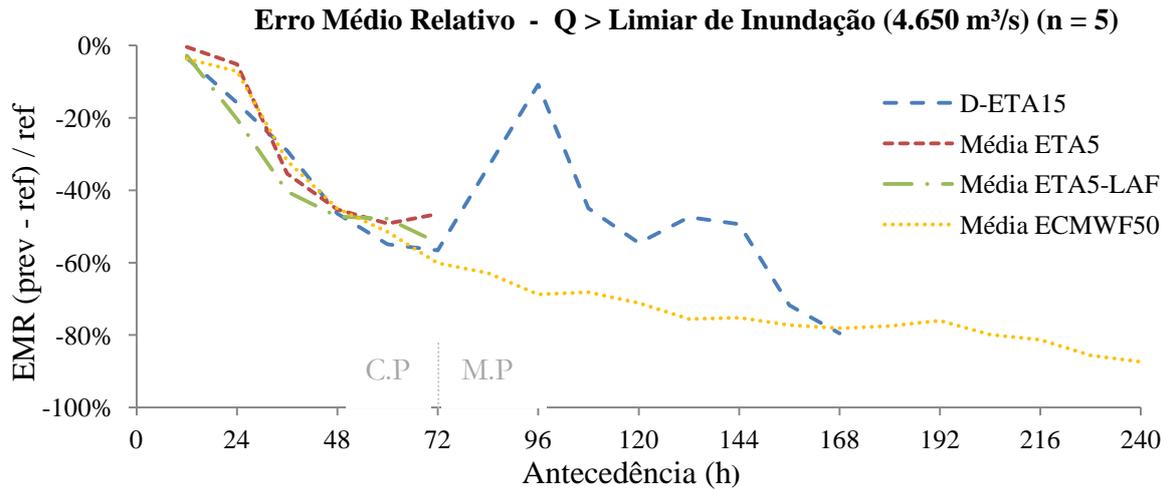


Figura 66. Erro médio relativo para cada antecedência de previsão, considerando vazões maiores do que $4.650 \text{ m}^3/\text{s}$ (Limiar de inundação).

A partir da análise do EMR para todos os dados da série verificou-se que a média de ambos ETA5 e ETA5-LAF possui um viés positivo, com o EMR máximo em torno de 12% para o horizonte de 36 horas. A previsão hidrológica determinística resultou em um viés positivo de até cerca de 5% para 36 horas, decrescendo até um viés negativo em -10% para a antecedência de 108 horas. Dentre todas as previsões, a média do ECMWF50 manteve os menores EMRs até a antecedência de 120 horas, tornando-se estável em um mínimo de aproximadamente -5%. A partir deste instante, a previsão com o ETA determinístico passa a ter um EMR ligeiramente menor, variando na faixa de -2 a -5%.

Para vazões superiores ao limiar de observação ($2.010 \text{ m}^3/\text{s}$), de maneira geral os resultados foram similares, com viés positivo nas primeiras 24 horas e tendência negativa após 36 horas do início da previsão. Entretanto, a média do conjunto do ECMWF50 demonstrou um EMR em torno de zero nos primeiros intervalos de tempo, decrescendo com um comportamento próximo ao linear até -80% na antecedência de 10 dias. No intervalo entre 36 e 72 horas à frente, a média de cada um dos HEPS teve um EMR inferior ao da previsão determinística, sendo que no médio prazo o desempenho desta última foi semelhante à média do ECMWF50, sobretudo após 108 horas. Ao mesmo tempo, a média do ETA5 teve o menor EMR o horizonte de curto prazo, atingindo um valor mínimo de -20% para a antecedência de 72 horas.

Já na faixa de vazões acima do limiar de alerta ($3.910 \text{ m}^3/\text{s}$), de maneira geral foi verificado um viés negativo nas previsões de todos os sistemas analisados. A média do ETA5 resultou no menor EMR (-5%) até à antecedência de 24 horas, sendo que após este instante de tempo o desempenho foi semelhante à previsão determinística. No horizonte de curto prazo, o maior EMR foi aquele relacionado ao ETA5-LAF, enquanto que na interface entre o horizonte de médio prazo

(72 horas) os valores foram semelhantes a todos os demais sistemas, em torno de -60%. Especialmente após a antecedência de 72 horas, o EMR da previsão determinística foi de aproximadamente 20% menor em relação ao ECMWF50, cujos valores coincidiram apenas na antecedência de 168 horas.

Assim como para o limiar de alerta, no que se refere às vazões superiores ao limiar de inundação (4.650 m³/s), novamente a média do ETA5 se destaca dentre os demais pelo menor EMR obtido até 24 horas de antecedência. Nesse caso, a média do ECMWF50 também teve um desempenho semelhante para este intervalo de tempo, com um EMR próximo a -5%. Em contrapartida, a introdução das previsões defasadas no ETA5-LAF acabou ampliando o EMR para este sistema de previsão, atingindo os maiores valores negativos até a antecedência de 48 horas. Ainda, um aspecto curioso foi verificado para a previsão determinística na antecedência de 96 horas, a qual apresentou valores de EMR bem menores - na ordem de -10%.

De maneira geral, as vazões tendem a ser subestimadas à medida que cresce o horizonte de previsão. Além disso, é interessante notar que, para 24 horas de antecedência e todas as faixas de vazão, as médias dos ETA5 e ECMWF50 resultaram em um EMR variando na faixa entre -10% a 12%, enquanto que os demais sistemas de previsão analisados apresentaram em alguns casos EMR de até -20%. Para intervalos de tempo maiores, o EMR nestes sistemas de previsão começa a se tornar mais expressivo, atingindo valores de até -60% para a antecedência de 60 horas se considerados os limiares superiores (alerta e inundação). Já no horizonte de médio prazo, o EMR tende a ser mais negativo para a média do ECMWF50 em relação à previsão determinística, atingindo valores entre -60 a -80% se consideradas vazões acima dos limiares de referência na antecedência de 168 horas (7 dias).

6.2.2. Erro Médio Absoluto

A seguir, nas Figuras 67 a 70, estão apresentados os resultados para o erro médio absoluto (EMA) de vazão nos quatro sistemas de previsão verificados: D-ETA15, Média dos conjuntos ETA5, ETA5-LAF e ECMWF50. Os gráficos foram organizados de maneira a permitir a avaliação geral da magnitude de erro para cada antecedência de previsão e sua intercomparação entre as faixas de vazão de interesse, contemplando toda a série analisada e os limiares de observação, alerta e inundação do posto de Encantado.

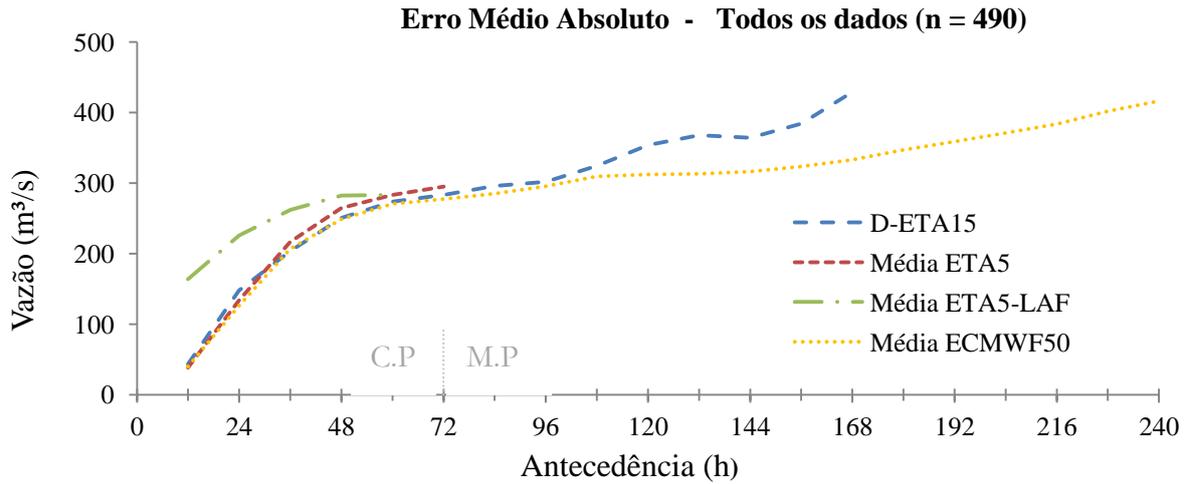


Figura 67. Erro médio absoluto para cada antecedência de previsão, considerando todos os valores da série analisada.

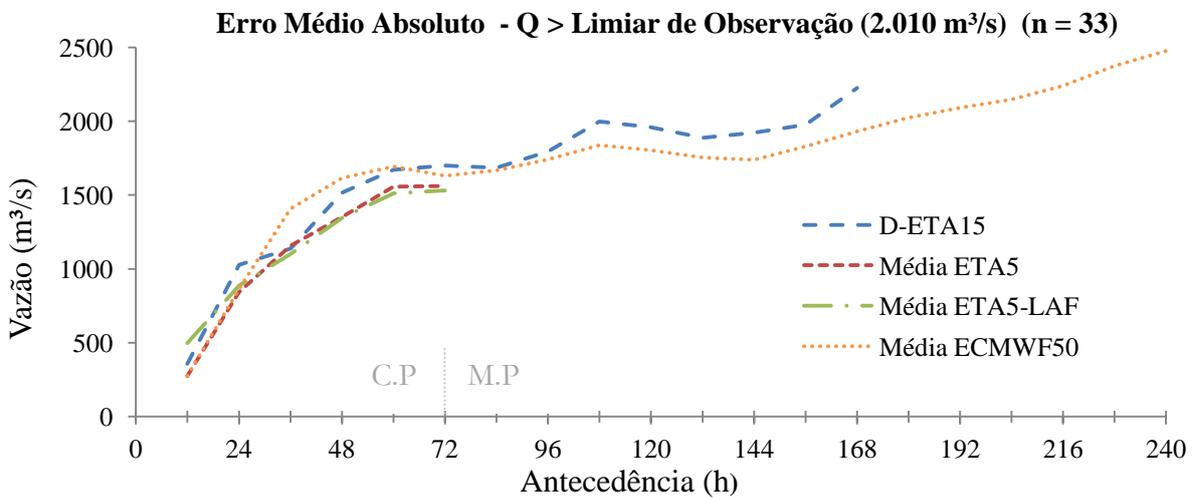


Figura 68. Erro médio absoluto para cada antecedência de previsão, considerando vazões maiores do que 2.010 m³/s (Limiar de observação).

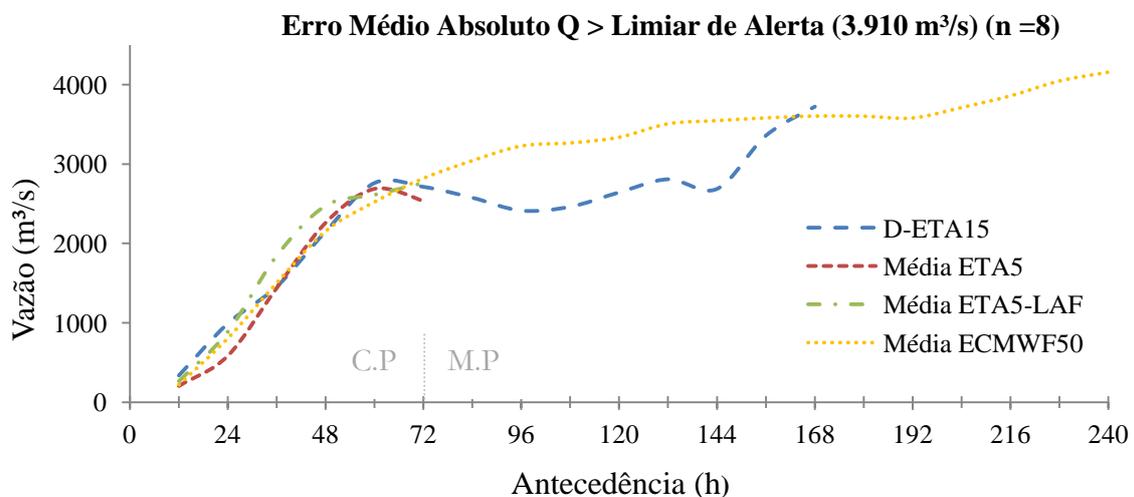


Figura 69. Erro médio absoluto para cada antecedência de previsão, considerando vazões maiores do que 3.910 m³/s (Limiar de alerta).

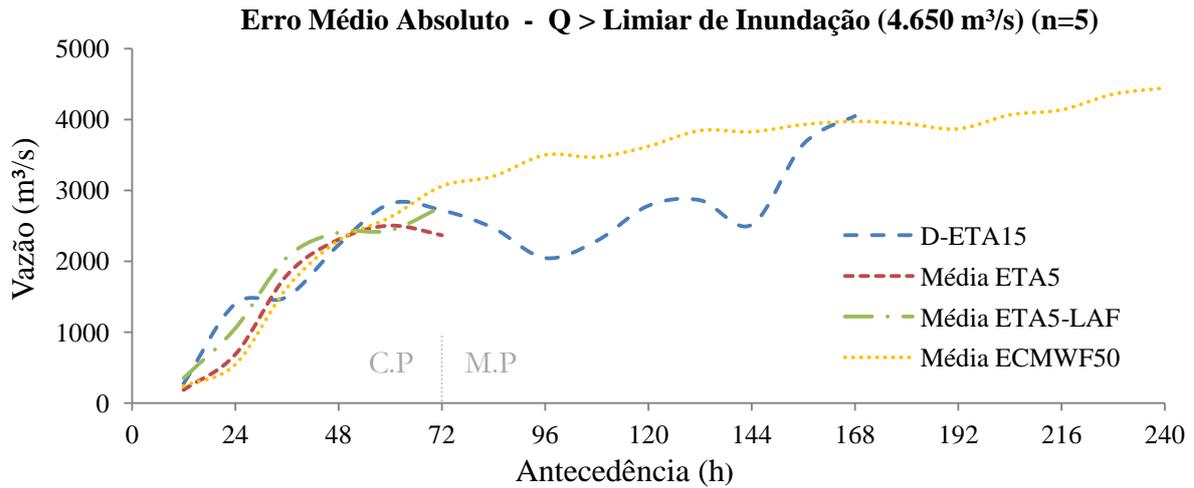


Figura 70. Erro médio absoluto para cada antecedência de previsão, considerando vazões maiores do que 4.650 m³/s (Limiar de inundação).

Nos primeiros intervalos de previsão, considerando todos os dados da série, verificou-se que a média do ETA5-LAF apresentou valores de EMA mais elevados em relação aos demais sistemas, o que destaca a diminuição da acurácia devido à condição inicial defasada (-12h) atribuída para metade dos membros deste conjunto. Enquanto isso, as previsões oriundas do D-ETA15, e das médias do ETA5 e ECMWF50 resultaram em valores muito próximos no horizonte de curto prazo, variando entre 125 e 300 m³/s para respectivamente, 24 e 72 horas de antecedência. Após este último intervalo, as previsões do D-ETA15 e da média do ECMWF50 mantiveram-se praticamente constantes com o mesmo EMA (300 m³/s) até 108 horas, sendo que para antecedências maiores o ECMWF50 resultou em menores valores de EMA com relação à previsão determinística.

No que se refere à faixa de vazões acima do limiar de observação (2.010 m³/s), no horizonte de curto prazo os menores EMAs foram resultantes da média do ETA5 e ETA5-LAF, ambos variando entre 750 e 1.500 m³/s para as antecedências de 24 e 72 horas, respectivamente. Neste mesmo intervalo, as previsões obtidas com a média do ECMWF50 tiveram o menor desempenho, com EMA situando-se próximo aos 1.500 m³/s já na antecedência de 36 horas. Já no horizonte de médio prazo, as previsões hidrológicas deste último HEPS resultaram em um desempenho ligeiramente superior ao do D-ETA15, com EMA um pouco abaixo de 2.000 m³/s até a antecedência de 168 horas e com um máximo de 2.500 m³/s ao final de 10 dias de previsão.

Nos casos em que houve a excedência do limiar de alerta (3.910 m³/s), o maior EMA observado nas primeiras 24 horas foi o da previsão D-ETA15 com cerca de 1.000 m³/s, o que representou praticamente o dobro do índice verificado para a média do ETA5. Já o EMA das previsões do ECMWF50 parte de uma posição intermediária nos instantes iniciais da previsão, assumindo o menor dos valores entre as antecedências de 36 e 48 horas com magnitudes um pouco

superiores a 2.500 m³/s, ao final do horizonte de curto prazo. Entretanto, a média do ETA5-LAF, com desempenho inicial ligeiramente superior ao D-ETA15, acabou gerando os maiores EMAs até a antecedência de 48 horas. A partir do horizonte de médio prazo, a previsão com o D-ETA15 levou uma pequena vantagem em relação à média do ECMWF50, com um EMA fluando na faixa de 2.500 m³/s.

Para a faixa de vazão que supera o limiar de inundação (4.650 m³/s), as previsões dos sistemas ETA5-LAF e D-ETA15 resultaram em EMAs de duas a três vezes superiores aos erros identificados pelas médias do ETA5 e ECMWF50 (com EMA de 500 m³/s), nas primeiras 24 horas de previsão. Na sequência, entre 36 e 48 horas de antecedência, o D-ETA15 assume juntamente com a média do ECMWF50 os menores valores de EMA na faixa de 1.500 a 2.500 m³/s, sendo este último valor de EMA mantido pelos conjuntos hidrológicos do modelo ETA nas antecedências de 60 e 72 horas. No que se refere ao horizonte de médio prazo, a previsão determinística teve um EMA significativamente menor do que a média do ECMWF50, acarretando em diferenças de acurácia na faixa de 1.000 a 1.500 m³/s até 144 horas de antecedência. Ressalta-se que os valores de EMA após 7 dias de previsão foram iguais ou superiores a 4.000 m³/s, cuja vazão representa praticamente uma situação de inundação na bacia de estudo.

De maneira geral, apesar da média dos conjuntos ETA5 e ECMWF50 terem resultado nos menores EMAs para as primeiras 24 horas de previsão, o mesmo não necessariamente ocorre até o final do horizonte de curto prazo, onde se observam alternâncias entre os desempenhos dos sistemas de previsão analisados. É possível notar também que, para tal horizonte, o EMA destes sistemas tende a ter uma taxa de crescimento maior em relação ao médio prazo, resultando em aproximadamente 60% do EMA verificado ao final da antecedência de 10 dias pelo ECMWF50. Por fim, um outro aspecto a ser observado é que as previsões defasadas tendem a aumentar a magnitude do erro para a média do conjunto nos instantes iniciais da previsão, uma vez que a chuva observada passa a ter um efeito menor nas primeiras antecedências.

6.2.3. Continuous Ranking Probability Score (CRPS)

A seguir, nas Figuras 71 a 74, estão apresentados os resultados para o Continuous Ranking Probability Score (CRPS) nos quatro sistemas de previsão verificados: D-ETA15 e conjuntos ETA5, ETA5-LAF e ECMWF50. Os gráficos foram organizados de maneira a possibilitar a comparação direta da acurácia entre as previsões determinísticas e as previsões por conjunto (com a completa distribuição de probabilidades), contemplando toda a série analisada e os limiares de observação, alerta e inundação para o posto de Encantado. É importante salientar que o CRPS médio para as

previsões com o ETA Determinístico se reduz ao EMA para o mesmo, uma vez que a função acumulada de probabilidades para previsões com esta característica é sempre binária (0 ou 1).

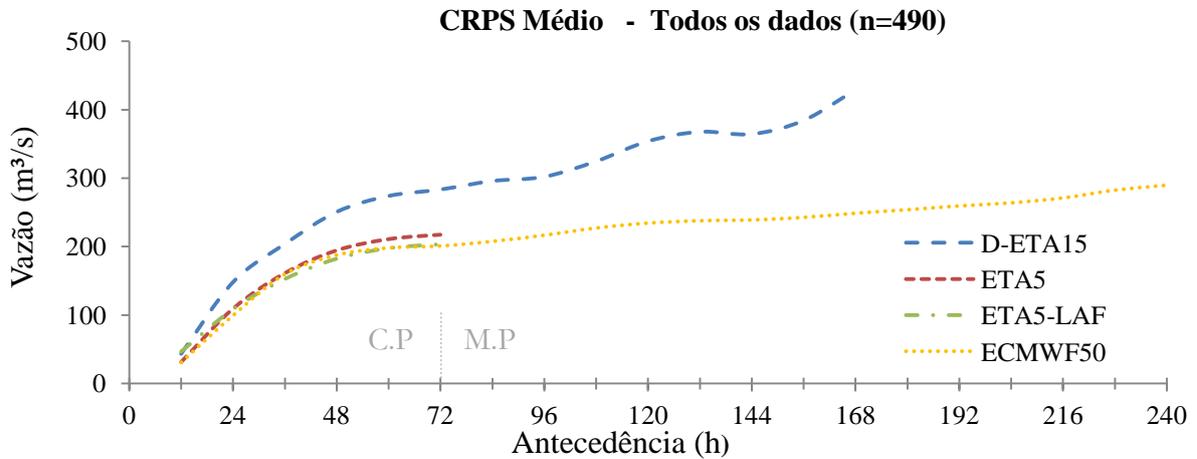


Figura 71. CRPS Médio para cada antecedência de previsão, considerando todos os dados da série analisada.

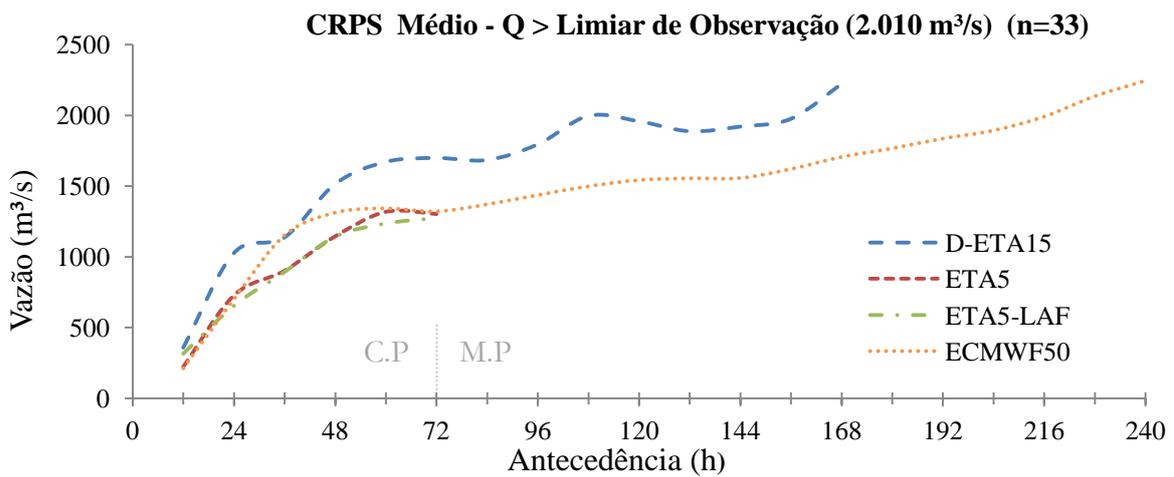


Figura 72. Erro Médio Absoluto e CRPS Médio para cada antecedência de previsão, considerando apenas valores acima do limiar de observação (2.010 m³/s).

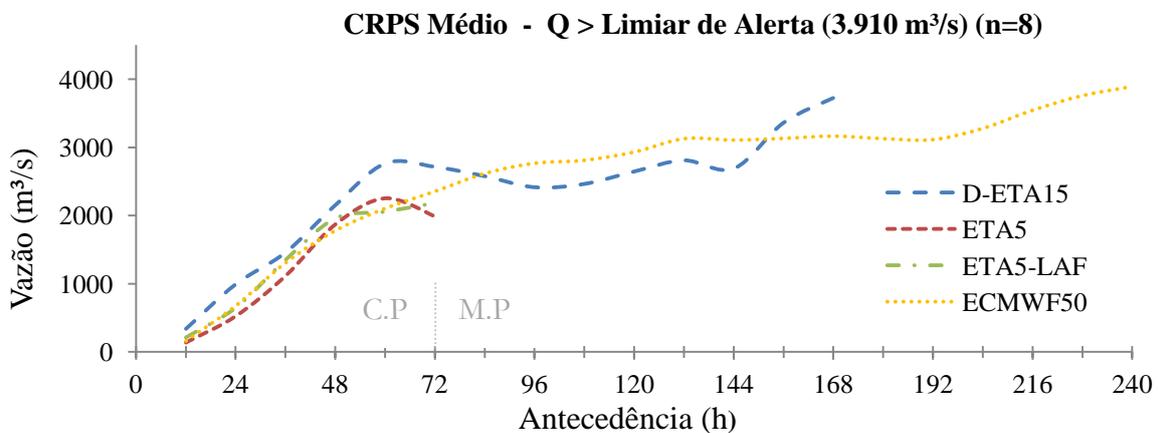


Figura 73. Erro Médio Absoluto e CRPS Médio para cada antecedência de previsão, considerando apenas valores acima do limiar de alerta (3.910 m³/s).

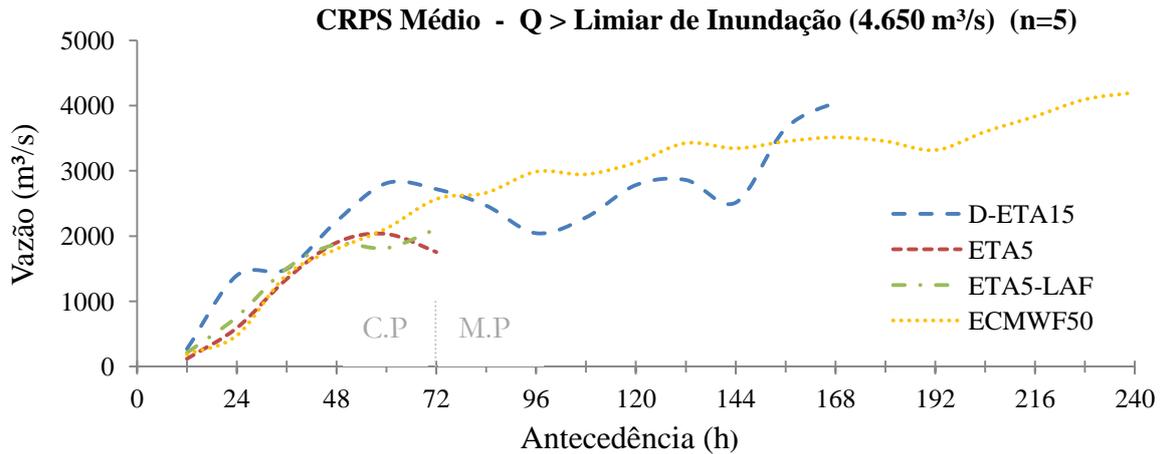


Figura 74. CRPS Médio para cada antecedência de previsão, considerando apenas valores acima do limiar de inundação (4.650 m³/s).

Na análise do CRPS médio para todos os dados da série é possível verificar que o desempenho dos HEPS foi semelhante para o horizonte de curto prazo, cujas diferenças não foram muito significativas. O valor do CRPS médio das previsões hidrológicas por conjunto situou-se na faixa dos 100 m³/s na antecedência de 24 horas, atingindo valores em torno de 200 m³/s no período entre 48 e 72 horas após o início de previsão. Quanto à previsão do D-ETA15, esta teve um desempenho inferior para todas as antecedências verificadas, sendo que o valor do CRPS médio para 72 horas - 250 m³/s - foi equivalente ao desempenho do ECMWF50 para o final do período de 10 dias.

Para vazões acima do limiar de observação (2.010 m³/s), nota-se poucas diferenças no CRPS médio entre as previsões do ETA5 e ETA5-LAF, com ligeira vantagem para este último. Nas antecedências de 36 e 48 horas houve uma diminuição do desempenho do ECMWF50, alcançando um CRPS médio de 1.250 m³/s neste último intervalo de previsão - equivalente ao desempenho dos conjuntos ETA5 e ETA5-LAF ao final do curto prazo. Apesar da magnitude do erro ser maior para este limiar, a previsão determinística manteve a característica verificada na análise de todos os dados da série, resultando em valores maiores ao longo de todas as antecedências em relação às previsões por conjunto, com exceção da antecedência de 36 horas.

No que se refere a vazões superiores ao limiar de alerta (3.910 m³/s), até as primeiras 36 horas de previsão o menor CRPS médio foi obtido através do ETA5, com valores situando-se na faixa de 1.000 m³/s. Neste mesmo intervalo de tempo, o desempenho dos conjuntos ECMWF50 e ETA5-LAF foi muito semelhante, os quais tiveram vantagem em relação à previsão do D-ETA15. Entretanto, para além de 84 horas de antecedência, a acurácia do ECMWF50 foi menor em relação ao D-ETA15, cujas diferenças ficaram na faixa dos 350 m³/s.

Nos casos onde as vazões excederam o limiar de inundação ($4.650 \text{ m}^3/\text{s}$), o comportamento das previsões foi semelhante ao obtido para o limiar anterior. Apesar disso, nota-se que o ECMWF50 teve um desempenho um pouco melhor para a antecedência de 24 horas, ao mesmo tempo em que a diferença de CRPS médio de cada um dos HEPS em relação ao D-ETA15 foi aumentada - cerca de $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ para 60 h após o início de previsão. Em contrapartida, mesmo levando em consideração toda a distribuição de probabilidades das previsões por conjunto, na maior parte do horizonte de médio prazo o desempenho do ECMWF50 foi ainda menor do que a previsão determinística, o que acaba revelando uma falta de acurácia do primeiro sistema em relação a limiares de referência superiores.

De maneira geral, é possível observar que a utilização da distribuição completa dos HEPS resulta em melhores acurácias se comparado à média do conjunto nestes sistemas, a qual foi anteriormente avaliada ao longo dos resultados do Erro Médio Absoluto. Para todas as antecedências no horizonte de curto prazo, o CRPS médio dos HEPS foi menor ou igual à previsão determinística do ETA, porém o mesmo não foi comprovado para antecedências após 84 horas, na qual o desempenho do D-ETA15 foi melhor se levadas em consideração vazões acima dos limiares de alerta e inundação. Outro aspecto importante é que as previsões hidrológicas do ETA5-LAF tiveram um desempenho semelhante àsquelas do ETA5, porém não puderam ser notadas melhorias na acurácia a partir da introdução de previsões defasadas em 12 horas.

6.2.4. Brier Skill Score

As Figuras 75 a 77 apresentam os resultados para o índice Brier Skill Score (BSS) da previsão hidrológica por conjunto, resultante de cada um dos HEPS analisados: ETA5, ETA5-LAF e ECMWF50. O Brier Skill Score foi introduzido de maneira a possibilitar a comparação entre estes sistemas e a previsão determinística D-ETA15, em relação à destreza na detecção dos limiares de observação, alerta e inundação. Valores positivos do índice BSS indicam uma melhor destreza do sistema analisado na detecção destes limiares, em relação ao sistema de referência (previsão determinística).

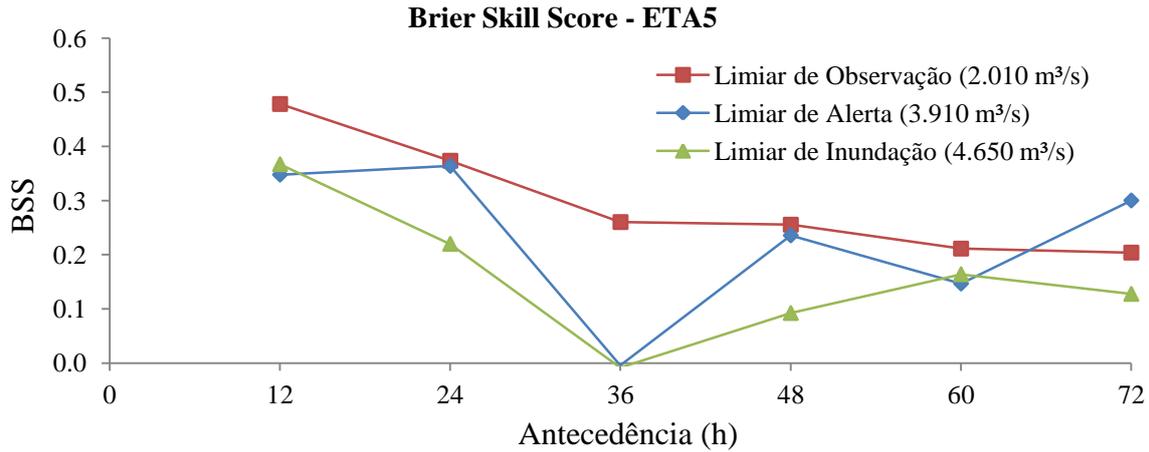


Figura 75. Brier Skill Score para o HEPS ETA 5km em relação à previsão hidrológica com o ETA Determinístico 15 km.

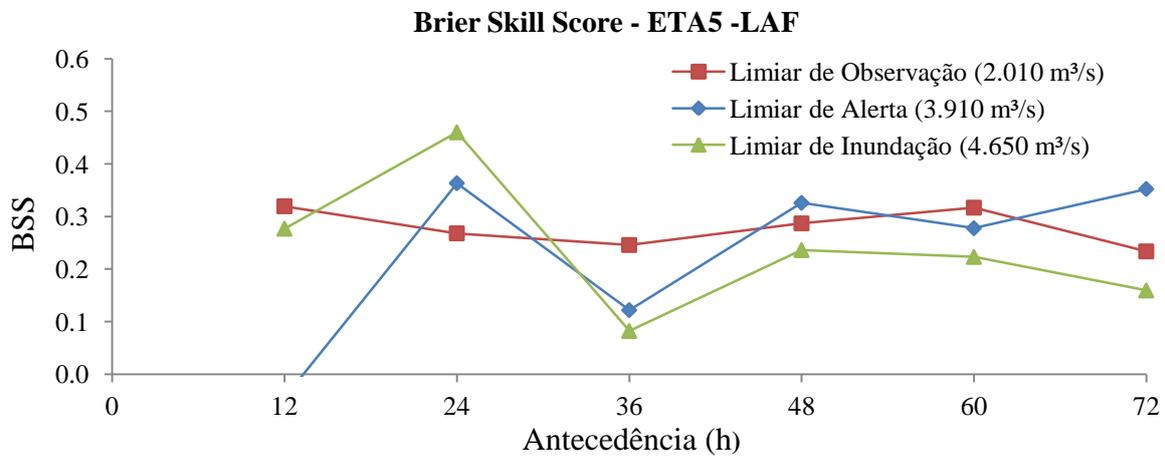


Figura 76. Brier Skill Score para o HEPS ETA 5km LAF em relação à previsão hidrológica com o ETA Determinístico 15 km.

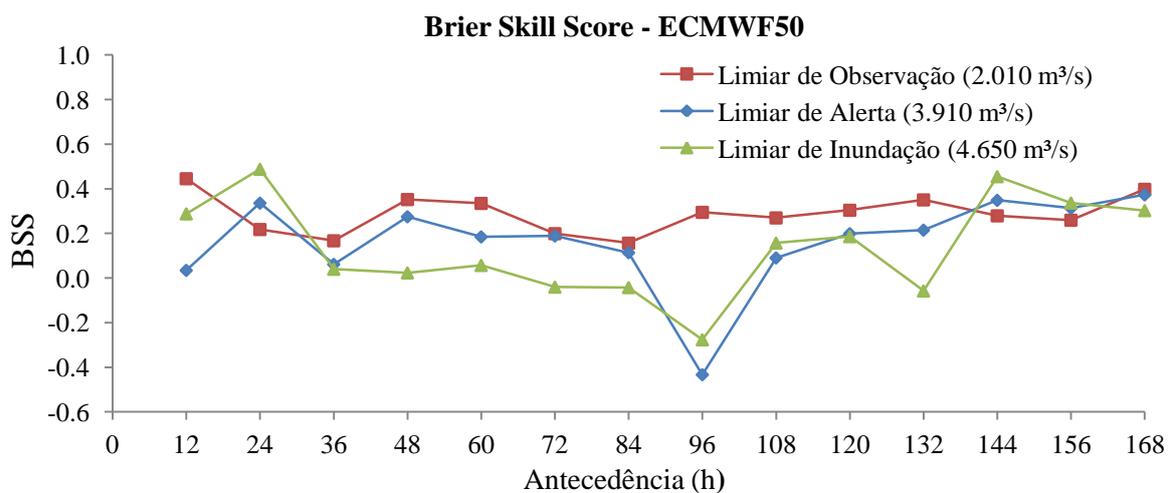


Figura 77. Brier Skill Score para o HEPS ECMWF 50 km em relação à previsão hidrológica com o ETA Determinístico 15 km.

De uma maneira geral, os resultados referentes ao ETA5 demonstram uma melhor destreza deste HEPS em relação ao D-ETA15. Para antecedências menores ou iguais a 24 horas, os valores de BSS ficaram superiores a 0,35 para os limiares de observação e alerta, sendo que para o limiar de inundação o BSS resultante foi acima de 0,2. Para 36 horas de antecedência, foi possível apenas detectar uma melhoria na destreza de detecção para o limiar de observação, com um índice de BSS equivalente a 0,25, enquanto que os demais limiares permaneceram com o mesmo desempenho em relação ao D-ETA15. Para os instantes posteriores de previsão de curto prazo, os valores de BSS ficaram acima de 0,2 para o limiar de observação, enquanto que para o limiar de alerta estes variaram entre 0,15 (60 horas) e 0,3 (72 horas); No caso do limiar de inundação, o BSS ficou em torno de 0,1 nestas antecedências.

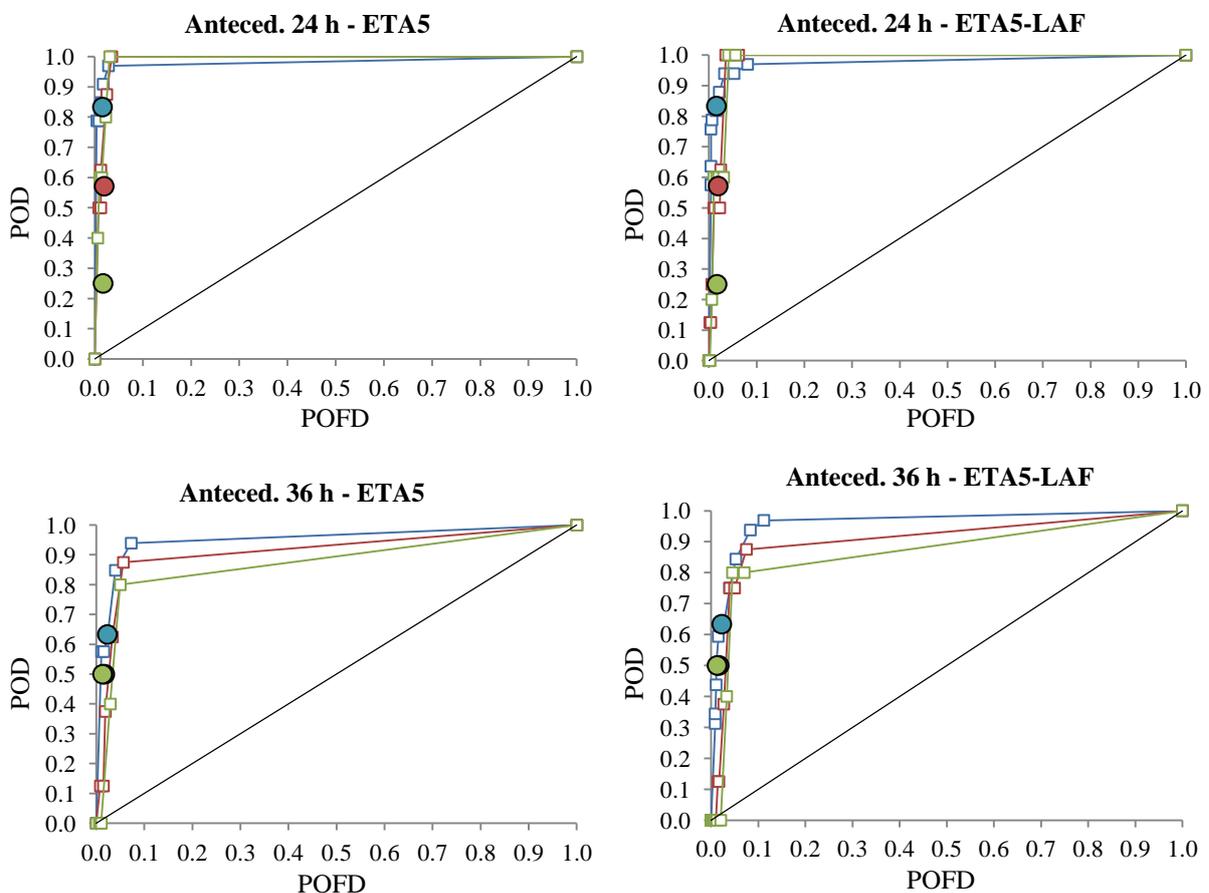
Para o sistema ETA5-LAF, os valores de BSS não variaram muito ao longo do horizonte de previsão no caso do limiar de observação, situando-se entre 0,25 e 0,3. Destaca-se que para a antecedência de 12 horas houve uma redução de destreza para a detecção do limiar de alerta em relação ao ETA5, sendo identificados BSS nulos - não representando melhorias em comparação à previsão determinística. Já na antecedência de 24 horas, os valores de BSS ficaram em torno de 0,4 para os limiares de referência superiores, indicando uma melhoria considerável da previsão por conjunto na destreza de detecção dos mesmos. Foi possível notar também um ganho de BSS na antecedência de 36 horas, o que não havia sido verificado no conjunto sem a introdução das previsões hidrológicas defasadas. Por fim, para 48 e 60 horas de antecedência, os valores de BSS situaram-se acima de 0,2 para todos os limiares analisados, enquanto que para 72 horas de previsão os resultados foram semelhantes ao do HEPS ETA5.

A avaliação do Brier Skill Score para o ECMWF50 foi realizada até a antecedência de 168 horas, uma vez que este índice de desempenho pode ser obtido de forma comparativa somente até o horizonte de previsão do D-ETA15 (7 dias). Durante as primeiras 36 horas de antecedência, o comportamento do índice BSS foi semelhante ao verificado no ETA5-LAF, no qual melhores destrezas na detecção dos limiares de alerta e inundação foram identificadas no instante de 24 horas após a previsão. Em relação ao limiar de observação, os valores de BSS foram positivos em todos os intervalos de tempo analisados, variando na faixa entre 0,2 e 0,4. Com exceção das antecedências de 12 e 96 horas, os valores de BSS para o limiar de alerta também foram positivos, sendo na maioria dos casos próximos a 0,2. Além disso, entre 36 e 132 horas de antecedência não foi possível observar uma melhor destreza na detecção do limiar de inundação, sendo que para o mesmo houve somente uma notável melhoria - acima de 0,3 - após 144 horas de previsão.

Para a maioria das antecedências de previsão, verifica-se que os HEPS de curto e médio prazo em geral possuem uma melhor destreza na detecção dos limiares de referência em relação à previsão determinística, com apenas algumas exceções. Entretanto, embora na grande maioria dos casos tenham sido identificados valores de BSS positivos, não foi possível observar, de forma clara, tendências de aumento ou redução desta destreza relativa na medida em que cresce o horizonte de previsão.

6.2.5. Curvas ROC - Relative Operating Characteristics

De maneira a avaliar a capacidade dos sistemas de previsão em detectar a ocorrência de cheias, bem como a sua relação com a emissão de falsos alarmes, foram elaboradas curvas ROC (*Relative Operating Characteristic*). A Figura 78 apresenta os resultados das curvas ROC para os sistemas ETA5 e ETA5-LAF, geradas para a previsão por conjunto em relação aos limiares de observação (linha azul), alerta (linha vermelha) e inundação (linha verde), sendo a previsão determinística representada pelos círculos isolados seguindo o mesmo esquema de cores para cada limiar de referência. Os pontos - quadrados - pertencentes à curva ROC representam cada um dos membros da previsão, ordenados a partir do membro mais baixo (ponto mais próximo à origem) para o mais alto (mais distante da origem).



(Figura continua na próxima página)

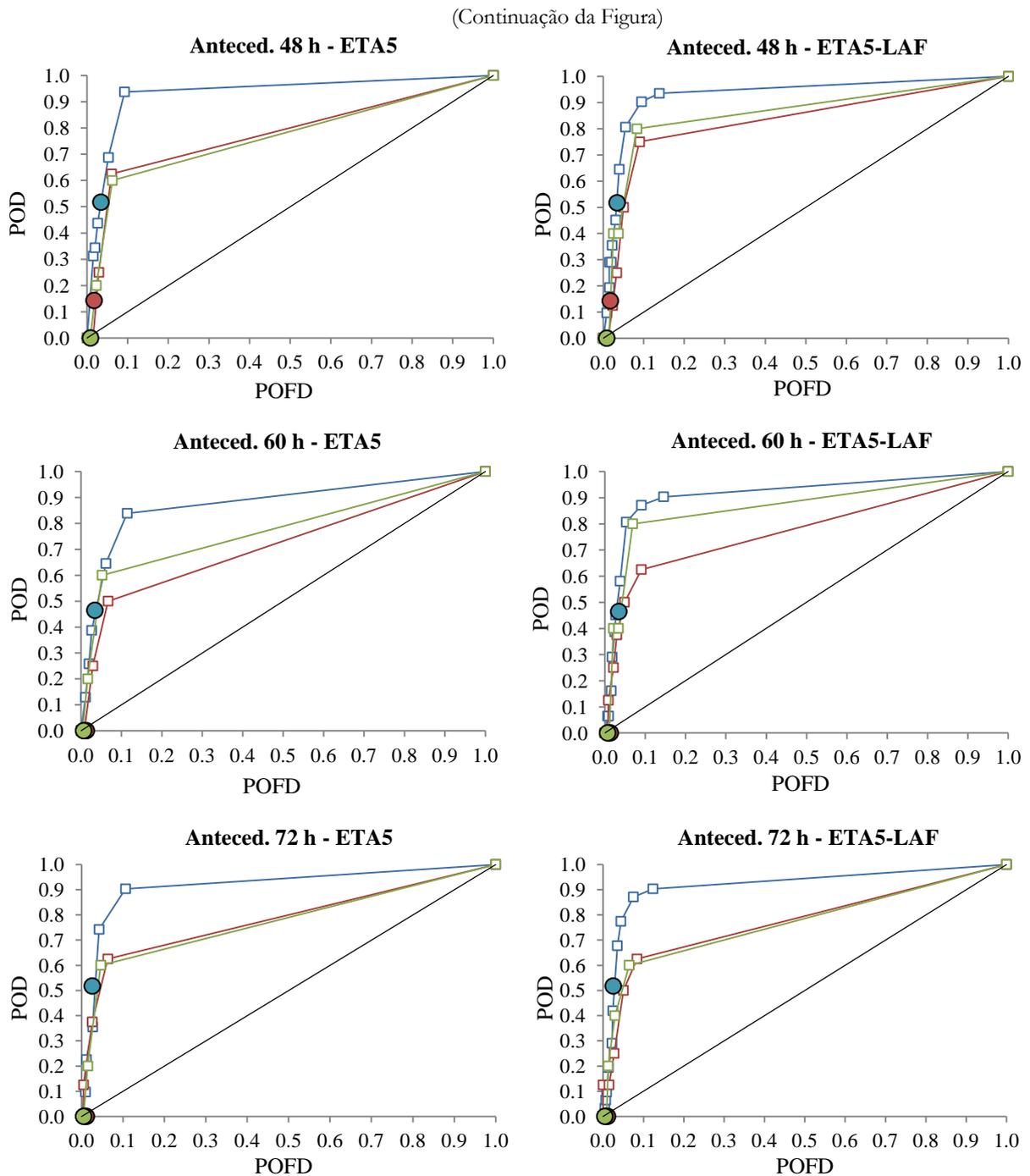


Figura 78. Resultados das Curvas ROC para o HEPS ETA 5 km e HEPS ETA 5 km - LAF, no horizonte de curto prazo. As linhas azul, vermelho e verde correspondem respectivamente aos limiares de observação, alerta e inundação na previsão por conjunto, enquanto que os círculos representam os pares (POD, POFD) da previsão determinística para os mesmos limiares de referência.

No caso do limiar de observação ($2.010 \text{ m}^3/\text{s}$), para os dois conjuntos do ETA em todas as antecedências analisadas, os valores de POD superaram 0,85 para o membro superior, com POFD máxima de 0,1 (60 e 72 horas). Para o ETA5 LAF os valores foram um pouco superiores se considerado o maior membro, atingindo índices de POD de 0,9 e POFD de 0,15. Quanto à previsão determinística, esta resultou em valores de POD inferiores aos dois conjuntos do ETA nas antecedências analisadas, com um máximo de 0,85 nas primeiras 24 horas. Na sequência, em 36

horas de previsão, os valores de POD foram equivalentes a 0,63, atingindo um mínimo e 0,48 na antecedência de 60 horas. Os valores de POFD foram em geral muito pequenos para o D-ETA15, situando-se na faixa de 0,02.

Para os limiares de alerta ($3.910 \text{ m}^3/\text{s}$) e de inundação ($4.650 \text{ m}^3/\text{s}$) na antecedência de 24 horas a POD do membro mais elevado foi equivalente a 1, ou seja, sempre houve a detecção do evento observado em ambos ETA5 e ETA5-LAF. Na antecedência de 36 horas verificou-se uma maior capacidade de discriminação neste último sistema de previsão, para o qual os valores de POD foram de 0,75 e 0,8 (ETA5-LAF) em relação a 0,62 e 0,6 (ETA5), respectivamente para os limiares de alerta e inundação. Além disso, esta vantagem para o sistema ETA5-LAF foi notada também nas antecedências de 48 e 60 horas. Os valores de POD do membro mais elevado ficaram na faixa de 0,5 a 0,63 para o ETA5, enquanto que para o ETA5-LAF resultaram entre 0,6 e 0,8 para os limiares supracitados. Ao final do curto prazo (72 horas) não foram identificadas diferenças entre os resultados do ETA5 e o ETA5-LAF, o que pode ser atribuído ao fato de que não há chuva prevista para os 5 membros defasados nas últimas 12 horas (entre 60 e 72 h). Os valores de POFD nestes limiares foram considerados baixos, sendo inferiores a 0,1 em todas as antecedências. Entretanto, embora pouco significativo, é importante observar que a POFD foi ligeiramente maior para o ETA5-LAF.

Quanto à previsão determinística, novamente esta resultou em valores de POD inferiores aos dois conjuntos do ETA nas antecedências analisadas. Para as primeiras 24 horas de previsão, os valores de POD foram de 0,58 e 0,25, respectivamente, para os limiares de alerta e inundação, sendo que após 36 horas a POD foi de 0,5 em ambos os limiares de referência. A partir de 48 horas de antecedência, nota-se que a capacidade de discriminação é praticamente nula para a previsão determinística, considerando o horizonte de curto prazo. Os valores de POFD foram em geral muito baixos, situando-se na faixa de 0,02.

A Figura 79 mostra os resultados das curvas ROC para o ECMWF50, especialmente para as antecedências de 72, 120, 168 e 240 horas. De maneira a aprimorar os aspectos visuais para o horizonte de médio prazo, em relação à avaliação da capacidade de discriminação do ECMWF50, o posicionamento dos membros foi agrupado em 10 classes distintas - com 5 elementos em cada uma destas. Sendo assim, os pontos pertencentes à curva ROC representam os decis desta previsão por conjunto, ordenados a partir do decil mais baixo (ponto mais próximo à origem) para o mais elevado (ponto mais distante da origem).

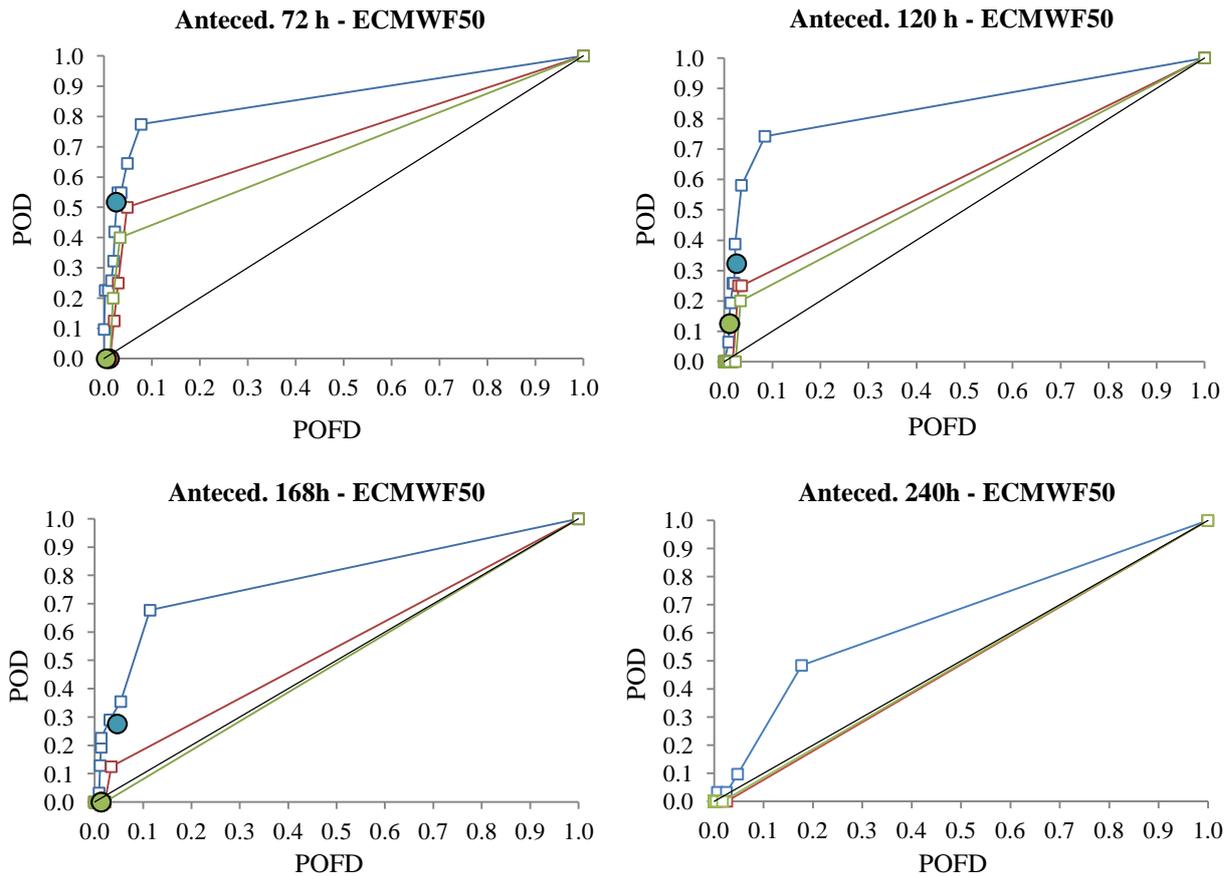


Figura 79. Resultados das Curvas ROC para o HEP5 ECMWF 50 km, para as antecedências de 72, 120, 168 e 240 horas. As linhas azul, vermelho e verde correspondem respectivamente aos limiares de observação, alerta e inundação na previsão por conjunto, enquanto que os círculos representam os pares (POD, POFD) da previsão determinística para os mesmos limiares de referência.

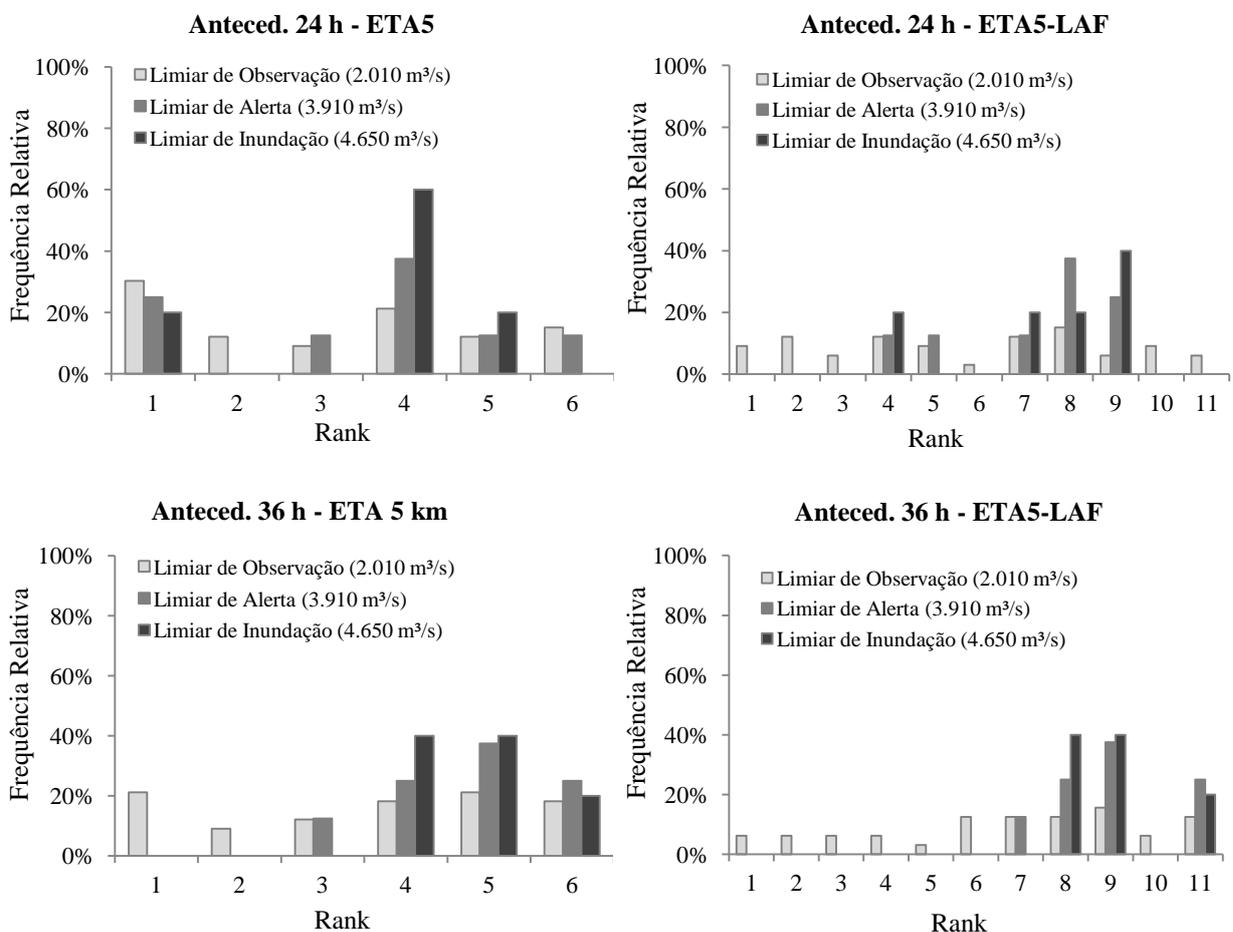
Para o limiar de observação ($2.010 \text{ m}^3/\text{s}$), é possível verificar o decil mais elevado (9°) com POD de 0,8 em 72 horas de previsão, sendo que abaixo do 8° decil os valores foram inferiores a 0,65. Em relação às antecedências de 120 e 168 horas não houve grande variação na probabilidade de detecção no decil mais elevado do conjunto, situando-se na faixa de 0,7 a 0,75. Além disso, os valores de POFD até esta antecedência foram relativamente baixos, sendo equivalentes a 0,1. Entretanto, após 10 dias de previsão (240 horas) a POD para este limiar de referência foi de 0,5, com uma POFD de 0,2 no caso do decil mais elevado do conjunto.

No que se refere ao limiar de alerta ($3.910 \text{ m}^3/\text{s}$), os valores de POD para o decil superior foram considerados muito baixos nas antecedências de 72, 120 e 168 horas, sendo respectivamente iguais a 0,5, 0,25 e 0,1. Nestas mesmas antecedências, os valores de POD para o limiar de inundação ($3.910 \text{ m}^3/\text{s}$) foram ainda menores, correspondendo a 0,4, 0,2 e ao valor nulo, seguindo a mesma ordem que a anterior. Especialmente após 10 dias de previsão, não foi possível identificar qualquer probabilidade na detecção destes limiares, ao mesmo tempo em que valores de POFD no horizonte de médio prazo não foram significativos, situando-se próximo a 0,02.

A previsão determinística resultou em valores de POD mais baixos do que o conjunto do ECMWF50 para o limiar de observação (2.010 m³/s), sendo equivalentes a 0,5, para 72 horas de antecedência, e próximos a 0,3, nas antecedências de 120 e 168 horas. Entretanto, para os limiares de alerta e inundação apenas na antecedência de 120 horas foi possível notar uma POD diferente de zero, embora com valores muito baixos - iguais a 0,12 em ambos os casos. No horizonte de médio prazo, os valores de POFD do D-ETA15 também foram baixos, situando-se abaixo de 0,05.

6.2.6. Rank Histograms

Para avaliar o espalhamento dos conjuntos hidrológicos em relação à variabilidade das observações, diagramas do tipo "Rank Histograms" foram elaborados. Na Figura 80, estão apresentados os resultados destes histogramas para o ETA5 e ETA5-LAF a partir do ordenamento crescente dos membros do conjunto, sendo atribuídos os menores e maiores *rank*s para a fração das observações que se situou, respectivamente, abaixo do membro inferior e acima do membro superior na previsão. Entretanto, ressalta-se que os termos "observações" ou "valores observados" que são citados ao longo desta análise se referem, de fato, aos valores de vazão resultantes da simulação de referência.



(Figura continua na próxima página)

(Continuação da Figura)

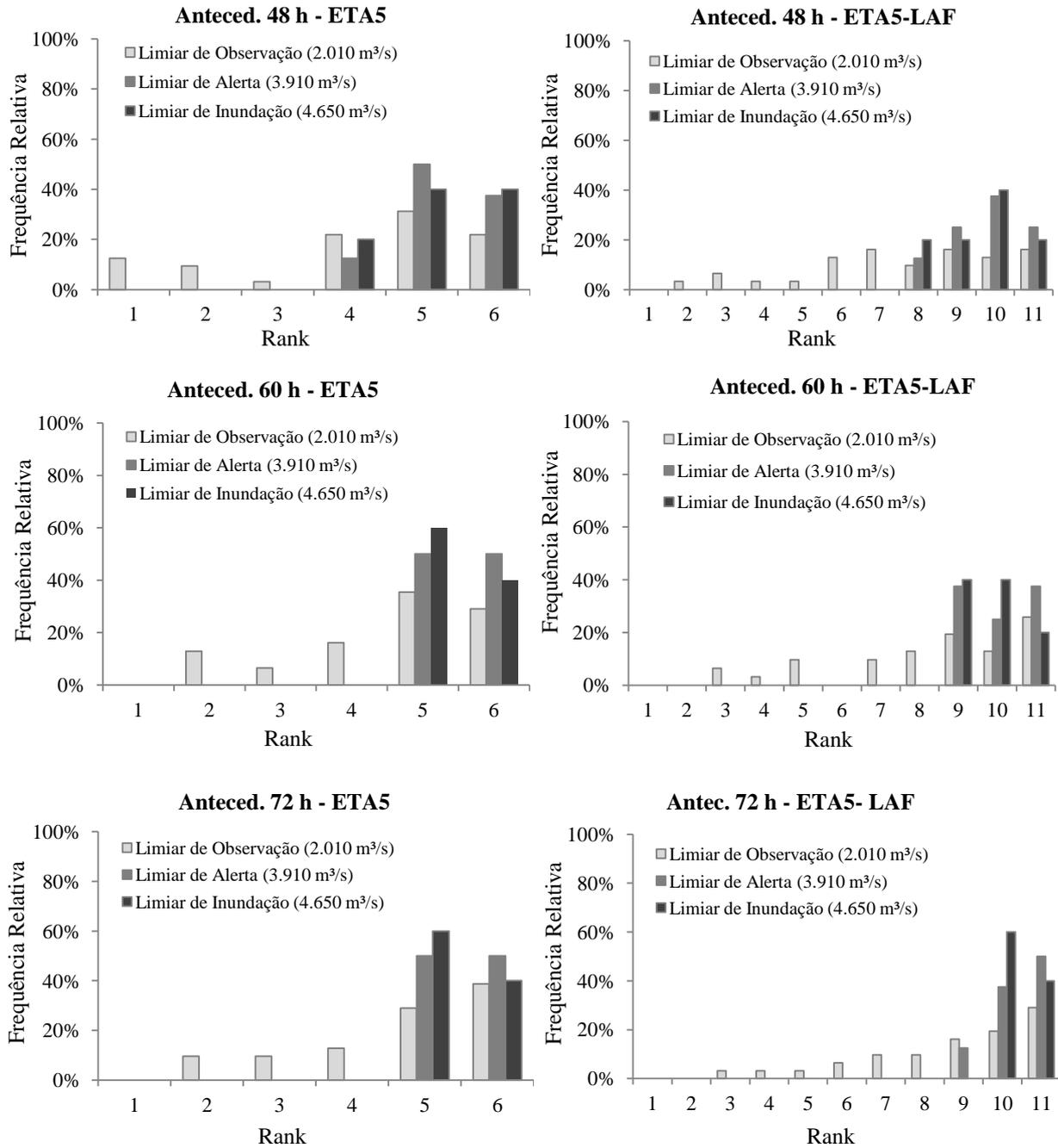


Figura 80. Resultados do Rank Histogram para os HEPS ETA 5 km e HEPS ETA 5 km - LAF, no horizonte de curto prazo.

Para o limiar de observação (2.010 m³/s), o espalhamento do ETA5 é relativamente adequado para a antecedência de 24 horas, embora a maior parte das observações - cerca de 30% - tenha ficado abaixo do membro inferior do conjunto. Na antecedência de 36 horas é possível verificar um bom espalhamento, com as observações situando-se com 10 a 20 % da frequência em cada rank. Para a antecedência de 48 horas, o espalhamento foi razoável porém representou uma ligeira tendência de viés negativo, com 50% das frequências observadas entre o 3º e o 5º membro do rank. Em 60 e 72 horas, a indicação de viés negativo começa a ficar mais visível (em forma de

"rampa" à direita), já que um grande percentual das observações supera o membro mais elevado do conjunto. Enquanto isso, observa-se que o ETA5-LAF contribuiu para dar uma maior consistência ao conjunto em todo o curto prazo, reduzindo o percentual das observações que situaram-se abaixo do membro inferior (p. ex., 30% para 10%, na antecedência de 24 horas) e acima do membro superior em relação ao ETA5. Entretanto, a forma geral do histograma não variou muito entre estes dois sistemas de previsão.

Para o limiar de alerta ($3.910 \text{ m}^3/\text{s}$), embora houve uma pequena tendência do histograma em formato de pirâmide nas primeiras 24 horas do ETA5, não é possível detectar de forma clara uma condição de superespalhamento. Entretanto, esta condição ficou um pouco mais visível para o limiar de inundação ($4.650 \text{ m}^3/\text{s}$), no qual aproximadamente 60% das observações situaram-se entre o 3º e o 4º membro do ordenamento (rank 4). A partir das 36 horas de previsão, se observa uma ligeira tendência de viés negativo, com 60% e 80% das observações se concentrando entre o 3º e 5º membro do rank, respectivamente para os limiares de alerta e inundação. Já nesta antecedência praticamente nenhuma das observações caiu entre os menores membros do ordenamento (ranks 2 e 3), sendo que para ambos limiares 20% das observações ficaram acima do membro mais elevado. Na previsão efetuada para 48 horas, a tendência de viés negativo é aumentada, com 50% das observações se concentrando entre o 4º e 5º membro do rank. Outro aspecto a ser destacado é o grande número de observações (40%) acima do membro superior do conjunto, cujo resultado foi muito próximo para ambos limiares de alerta e inundação. Para as previsões das 60 e 72 horas, os resultados foram semelhantes, notando-se um viés negativo no conjunto, com todas as observações ficando acima do 4º membro do rank.

Em relação ETA5-LAF, para a faixa de vazões acima dos limiares mais elevados (alerta e inundação), foi notado que para 24 horas nenhum dos valores observados ficou abaixo do membro inferior ou acima do membro superior, cuja situação havia ocorrido nas previsões com o ETA5. Além disso, nas antecedências de 48 e 60 horas também foi possível verificar uma redução na frequência das observações acima do membro mais elevado, o que indica que a introdução das previsões defasadas causa uma pequena melhoria na representação da variabilidade das vazões observadas, apesar da notável falta de dispersividade no conjunto. Entretanto, isto não foi visível em todas as ocasiões, já que nas antecedências de 36 e 72 horas praticamente não houve entre os histogramas do ETA5 e ETA5-LAF.

A Figura 81 apresenta os Rank Histogram referentes ao ECMWF50. Os resultados individuais do histograma foram agrupados em classes distintas, as quais representam a frequência relativa das observações que situaram-se entre os decis da previsão por conjunto. Desta forma, a

classe "0" representa a fração das observações que ficaram abaixo do 1º decil (Classe 1), enquanto que a classe "10" representa a frequência observada acima do 9º decil (Classe 9) do conjunto.

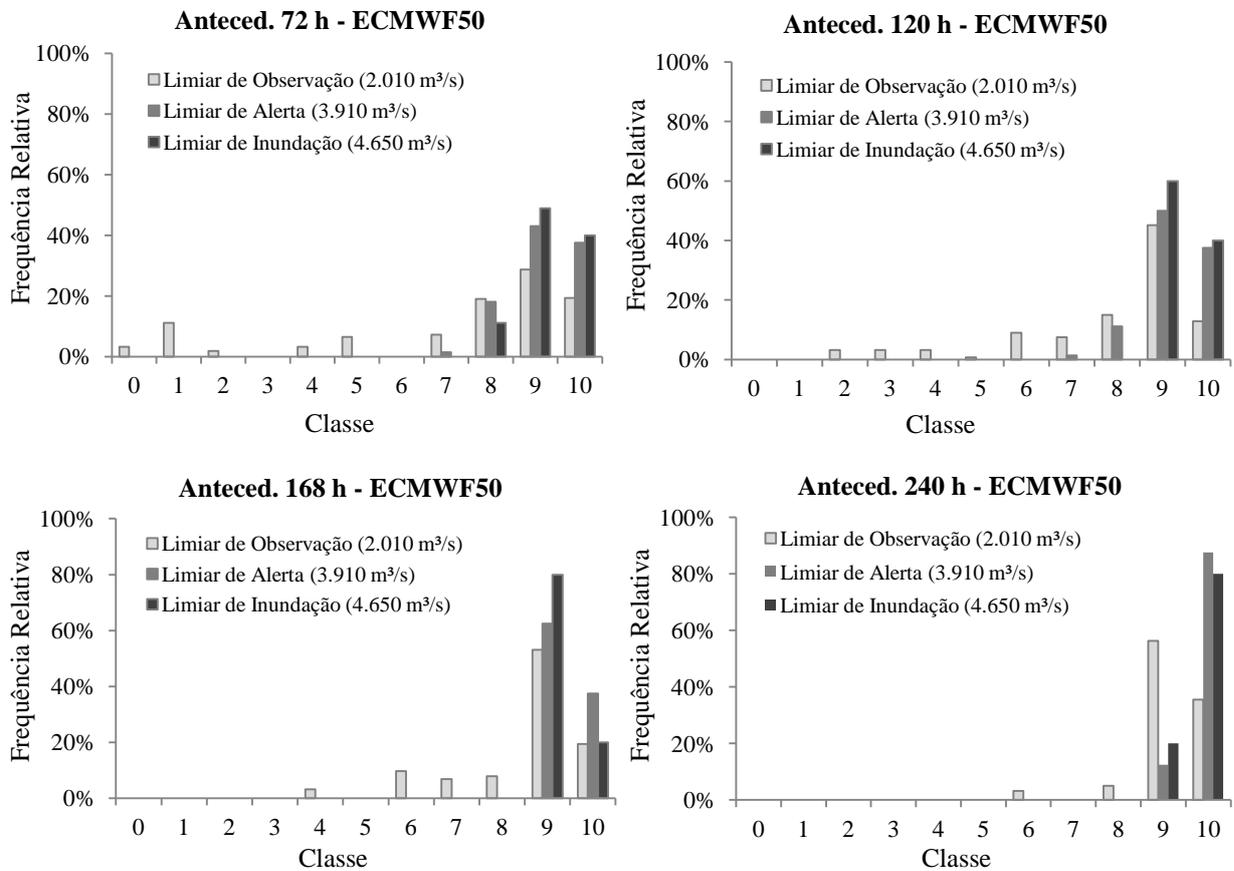


Figura 81. Resultados do Rank Histogram para o HEPS ECMWF 50 km, no horizonte de médio prazo.

De forma geral, identificou-se espalhamento não adequado (falta de dispersividade) e um viés negativo na forma do histograma (i.e., em "rampa" à direita, ou em "L" invertido) independentemente do limiar de referência analisado, para todas as antecedências entre 3 e 10 dias. No que se refere ao limiar de observação (2.010 m³/s), para 72 horas a maior parte das observações ficou concentrada acima do 8º decil, tendo sido identificado um pequeno número destas - cerca de 15% - nas classes inferiores do histograma. Na antecedência de 120 horas, quase 50% dos valores observados caíram na faixa representada pelo último decil do conjunto (Classe 9), ao mesmo tempo em que 40% destes ficou localizado entre o 2º e o 8º decil da previsão. Enquanto isso, nas antecedências de 168 e 240 horas, o 9º decil do conjunto teve a maior frequência dos valores observados (60%), sendo que para esta última antecedência 40% dos valores ficaram acima do respectivo decil.

Já para os limiares de alerta (3.910m³/s) e inundação (4.650 m³/s), praticamente todos os valores observados situaram-se acima do 7º decil do conjunto na antecedência de 72 horas, cujo resultado foi bastante semelhante na antecedência de 120 horas. Na previsão com 168 horas de

antecedência, a grande maioria (60 a 80%) das observações caiu no intervalo definido pelo 9º decil do conjunto, com nenhum dos valores observados situaram-se nas classes anteriores a esta. Após 10 dias de previsão, cerca de 80% das observações ficou situada acima do 9º decil da previsão nos limiares de alerta e inundação, demonstrando uma incapacidade deste sistema em prever vazões elevadas nesta antecedência.

Capítulo 7. Conclusões e Recomendações

No presente trabalho foi avaliado o desempenho de uma metodologia de previsão de cheias de curto a médio prazo na bacia do Taquari-Antas, na qual diferentes sistemas foram preparados com a incorporação de previsões quantitativas de precipitação - determinísticas e por conjunto (EPS - *Ensemble Prediction Systems*) no modelo hidrológico MGB-IPH para a geração de previsões hidrológicas. A metodologia abordada permitiu a verificação de forma qualitativa para dois eventos de cheia recentemente ocorridos na bacia, bem como uma análise de caráter estatístico para um período com e sem a ocorrência de eventos. Os resultados obtidos permitiram as seguintes considerações a respeito das questões envolvidas nesta pesquisa:

- **Sobre a capacidade dos HEPS na identificação antecipada de eventos recentemente ocorridos na bacia:**

Uma das características marcantes no comportamento hidrológico na bacia do Taquari-Antas é a ocorrência de eventos de cheia relativamente rápidos com vazões muito elevadas, podendo ocorrer variações maiores do que 10.000 m³/s em cerca de 24 horas, durante situações críticas. Especialmente nos eventos analisados (06/06/2014 e 21/07/2011), a ausência de previsões quantitativas de precipitação na modelagem hidrológica possibilitaria uma boa estimativa da magnitude do pico com antecedência máxima de 14 horas para o posto de Encantado, considerando uma situação com amplo monitoramento de precipitação em tempo real.

A previsão em médio prazo, com o HEPS ECMWF (50 membros), apontou para a possibilidade de cheia nos eventos analisados com aproximadamente 156 horas de antecedência, se considerado pelo menos 10% dos membros com superação do limiar de inundação. Embora este percentual seja inicialmente muito pequeno, um aspecto a ser destacado através do diagrama de excedência foi o comportamento do conjunto no que se refere à persistência na previsão hidrológica, dada pela aumento gradual do percentual de membros que situaram-se acima dos limiares de referência, à medida em que os eventos se aproximavam. A constante superação destes limiares, ao longo de sucessivas previsões realizadas, poderia dar uma certa confiabilidade na previsão por conjunto em relação à ocorrência destas cheias. Apesar disso, cabe ressaltar que a previsão com o HEPS ECMWF foi marcada por uma grande variabilidade quanto ao tempo e a magnitude dos eventos, não sendo possível uma quantificação destas variáveis para este sistema de previsão.

Enquanto isso, a previsão com o HEPS ETA (5 membros) no horizonte de curto prazo permitiu uma melhor previsibilidade da magnitude de cheia nos eventos analisados, desde as antecedências mais distantes. Foi notado que na grande maioria dos casos houve pelo menos 1 dos membros (com parametrização de Kain-Fritsch) apontando a possibilidade de cheia à medida em que o evento se aproximava, com vazões relativamente próximas às observações. Uma possível explicação para isso é o fato do conjunto meteorológico utilizado como entrada no modelo hidrológico ter sido desenvolvido para melhorar a previsibilidade de eventos extremos, sendo que parametrizações como a de Kain-Fritsch tendem a melhorar a quantidade de chuva em relação ao esquema de Betts-Miller-Janjic para maiores limiares de precipitação (Mesinger *et al.*, 2012). Outros fatores, como maior resolução espacial, também podem ter influenciado na previsão de vazões mais elevadas para o evento de cheia em questão. Para uma previsão de 24 horas de antecedência, houve um bom desempenho deste HEPS considerando a média do conjunto, sendo que neste intervalo de tempo previsões que consideram somente a chuva observada acarretariam erros relativos na vazão de pico acima de 40%.

Além disso a utilização do "Peak-Box" foi interessante para uma visualização da incerteza nas previsões em relação ao tempo e a magnitude das cheias, considerando a avaliação conjunta dos membros em todo o curto prazo. Verificou-se que as previsões representaram relativamente bem o tempo de pico observado nos eventos analisados, sendo que este ocorreu muito próximo ou no interior da região mais provável do conjunto. Neste caso, as incertezas nas previsões hidrológicas foram adequadas quanto ao *timing* destes eventos, além de possuírem uma maior confiabilidade em função da faixa de incerteza ser relativamente pequena.

Entretanto, foi verificada uma baixa confiabilidade das previsões hidrológicas em relação à magnitude das cheias analisadas, especialmente para maiores antecedências no curto prazo. As diferenças de vazão entre o valor mais provável (p_{50}) dos membros e o limite superior do IQR-Box foi elevada durante a agregação das previsões, alcançando valores entre 2.500 a 3.500 m³/s para os dois eventos. Adicionalmente, a incerteza das previsões verificada no evento crítico (cheia de 2011), mesmo se mostrando elevada, não foi suficiente para capturar a vazão de pico da cheia no limite superior representado pelo conjunto. Através dos resultados individuais das previsões, isto é, sem levar em consideração informações de previsões anteriores verificou-se que apenas na antecedência de 24 horas a incerteza na magnitude do pico passou a ser pequena, indicada pelo pequeno espalhamento dos membros do conjunto.

- **Sobre o desempenho esperado para as previsões hidrológicas por conjunto e comparação em relação à determinística:**

Para a avaliação do desempenho esperado para as previsões hidrológicas foi realizada uma análise de caráter estatístico, utilizando-se como base uma simulação de referência com o MGB-IPH a partir do acoplamento da "chuva perfeita". Na comparação entre a previsão determinística e a média dos conjuntos (HEPS ETA e ECMWF), foi verificado que estas oferecem um melhor desempenho em relação às primeiras para antecedências de até 24 horas e vazões acima dos limiares mais elevados, resultando em acurácias relativamente boas e pequeno viés negativo. Entretanto, os erros tendem a crescer bastante ao longo do curto prazo (72 horas), para o qual se notou algumas alternâncias de desempenho entre as previsões (determinística e conjunto), bem como baixa acurácia e grandes subestimativas, sendo que no horizonte de médio prazo o desempenho da média do conjunto HEPS ECMWF foi em grande parte das vezes inferior ao da previsão determinística. Já considerando toda a distribuição dos conjuntos - verificado através do índice CRPS - os HEPS tiveram um desempenho superior em todo o curto prazo, porém os erros relacionados à previsão determinística permaneceram menores se comparado ao HEPS ECMWF no médio prazo (nos liminares de alerta e inundação).

Adicionalmente, foi testado o desempenho dos sistemas de previsão no que se refere à detecção de eventos do tipo dicótomos, com superação dos limiares de referência estabelecidos. De maneira geral, os HEPS apresentaram destreza igual ou superior na previsão em relação à abordagem determinística, com apenas algumas situações de menor destreza para o HEPS ECMWF no horizonte de médio prazo. Apesar da previsão determinística ter demonstrado uma pequena taxa de emissões de falso alarme (POFD) em todas as antecedências, além de uma boa detecção do limiar mais baixo (observação) na antecedência de 24 horas, para os demais instantes e limiares elevados (alerta e inundação) os resultados de POD foram insatisfatórios. Em contrapartida, a previsão por conjunto promoveu grandes melhorias na capacidade de detecção destes limiares, especialmente para os membros (ou decis, no caso do HEPS ECMWF) superiores além da manutenção da POFD em níveis reduzidos. Entretanto, para antecedências acima de 120 horas somente foi possível verificar algum benefício da previsão por conjunto em relação à detecção do limiar de observação.

No que se refere à representatividade do espalhamento dos conjuntos hidrológicos, notou-se uma falta de dispersividade dos membros sobretudo para vazões acima dos limiares de alerta e inundação, uma vez que as observações - dada pela simulação de referência - tendem a se concentrar entre os membros (ou decis) superiores da previsão a partir de 36 horas de antecedência. Além disso, boa parte das vazões observadas acabaram se situando acima do membro mais elevado, ou seja, com espalhamento insuficiente, atingindo valores em torno de 40% após a antecedência de 60 horas.

- **Sobre o impacto das previsões hidrológicas defasadas na previsão mais atual:**

A introdução das previsões hidrológicas em tempo anterior (t-12h) na atual acarretou em alguns efeitos distintos. Dentre os positivos, foi identificado um maior ganho de destreza neste sistema previsão (HEPS ETA-LAF) em relação à previsão determinística no intervalo entre 24 e 60 horas de antecedência, uma vez que os valores de BSS foram iguais ou superiores aos valores de BSS relacionados ao HEPS ETA para os limiares de alerta e inundação. Além disso, considerando os membros mais elevados da previsão, foram verificados valores superiores de POD especialmente para 48 e 60 horas de antecedência, apesar de uma ligeira ampliação da taxa de emissão de falsos alarmes. Identificou-se também uma ampliação no espalhamento no conjunto hidrológico em algumas situações, o que contribuiu para redução da fração de observações que se situaram-se abaixo e acima, respectivamente, dos membros inferior e superior da previsão. Apesar disso, de forma geral não foi notada uma melhoria em relação à falta de dispersividade no conjunto, cujos resultados foram similares aos encontrados por Machado *et al.* (2010).

Quanto à média do conjunto, no que se refere a características como acurácia e viés, o HEPS ETA-LAF resultou em um menor desempenho que os demais sistemas para os limiares de alerta e inundação, sendo em muitos casos inferior à previsão determinística. Para limiares mais baixos, a tendência é que estas características ocasionem um desempenho inferior nas menores antecedências (i.e. 12h), para a qual a chuva observada passa a ter um efeito menor para os membros defasados. Enquanto isso, a utilização de toda a distribuição do conjunto não representou melhorias na acurácia da previsão, cujos resultados foram relativamente similares ao conjunto do HEPS ETA.

De qualquer forma, a informação das previsões realizadas em tempos anteriores não deve ser excluída de processos como tomada de decisão, já que esta abordagem permite uma melhor detecção de eventos com superação de limiares mais elevados sem acréscimo de custo computacional. Entretanto, em relação à melhor estimativa para a magnitude da cheia, a média deste conjunto (HEPS ETA-LAF) não substitui a média do conjunto sem a introdução das previsões defasadas, uma vez que a primeira normalmente possui uma acurácia menor e tende a gerar maiores subestimativas nas vazões. Aspectos como a utilização de pesos distintos para as previsões atuais e defasadas, o que é comum na área de meteorologia, podem ser estudados também de maneira a melhorar o desempenho do conjunto hidrológico.

- **Limitações e recomendações para trabalhos futuros:**

De forma geral, as previsões por conjunto apresentam potencial para servir como uma informação complementar em um sistema de alerta contra cheias, o que possibilita uma melhor preparação dos agentes envolvidos durante a ocorrência destes eventos. Entretanto, atenta-se para

alguns aspectos e limitações importantes verificados ao longo do trabalho realizado, os quais devem ser levados em consideração:

(i) A calibração do MGB-IPH foi realizada a partir da horarização de dados diários (chuva e vazão), devido a carência deste tipo de informação para maiores períodos. Isso limitou a comparação entre as vazões observadas e simuladas nos eventos de cheia, já que a representação do hidrograma durante sua ascensão normalmente requer medições em intervalo de tempo inferiores a um dia;

(ii) Houve a necessidade de ajustes no modelo hidrológico em relação a características que afetam a propagação da vazão no método Muskingum-Cunge Linear, a exemplo da declividade de alguns trechos e vazão de referência. Aparentemente, este método não é muito apropriado para a representação de cheias nesta bacia, já que podem haver grandes variações da celeridade durante estes eventos. Nesse sentido, sugere-se que sejam avaliados outros métodos para a propagação de vazão inclusive em bacias com característica semelhante (grande variação de vazão em intervalos de tempo relativamente curtos), principalmente durante a aplicação de modelos com intervalo de tempo horário;

(iii) O procedimento de assimilação de dados, através do método empírico apresentado por Paz *et al.* (2007), foi descartado para a correção do MGB-IPH durante as previsões. O método produziu um pequeno benefício para antecedências após 24 horas principalmente durante a recessão do hidrograma antes da cheia principal, porém para instantes abaixo de 24 horas, próximo e durante a ascensão do evento de cheia, a atualização do modelo acabou reduzindo o desempenho da previsão, incluindo subestimativas na vazão de pico prevista. Este resultado foi atribuído ao erro de *timing* na modelagem hidrológica, para a qual destaca-se as considerações feitas por Liu *et al.* (2012) sobre a necessidade dos métodos de assimilação em lidar com processos não lineares, com separação de erros relacionados a amplitude e fase no modelo. Sugere-se que novos métodos de atualização sejam estudados seguindo esta abordagem, especialmente para aplicação em bacias de característica semelhante (baixa profundidade de solos e escoamento rápido);

(iv) Os resultados das análises foram obtidos em relação a uma rodada de referência com a "chuva perfeita", ao invés da comparação com as vazões observadas em campo. Este tipo de análise acaba se justificando pela presença de erros de *timing* no MGB-IPH, os quais poderiam se propagar para as previsões hidrológicas e possivelmente originar resultados menos confiáveis. Entretanto, sugere-se que, na existência de um período suficiente de dados observados, os resultados das previsões (inclusive em outras bacias) sejam analisados sobre as observações, desde que as considerações nos itens (ii) e (iii) sejam primeiramente atendidas;

(v) Foi constatado um pequeno número de observações (vazões de referência) acima dos limiares de alerta e inundação, o que acaba reduzindo a significância da análise estatística das previsões. Entretanto, conforme já indicado por Cloke e Pappenberger (2009) a verificação de previsões hidrológicas normalmente é um processo difícil devido à raridade dos eventos de cheia, sendo que os resultados obtidos devem ser combinados com outros estudos de caso para que seja possível confiar na informação existente. Embora os resultados desta pesquisa estejam alinhados com outras pesquisas que envolvem a previsão por conjunto, ressalta-se a importância de existir um maior número de estudos com esta abordagem no contexto brasileiro.

Referências

- ABAZA, M.; ANCTIL, F.; FORTIN, F.; TURCOTTE, R. (2013) A comparison of the canadian global and regional meteorological ensemble prediction systems for short-term hydrological forecasting. **Monthly Weather Review**, v. 141, p. 3462-3476.
- ABBOT, M. B. *et al.* (1986). An introduction to the european hydrological system - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: history and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. **Journal of Hydrology**, 87, p. 45-59.
- ANDREOLLI, I.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. (2004). Análise da rede de postos de chuva na previsão em tempo real na bacia do Rio Uruguai. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, p. 5-14.
- ANDREOLLI, I.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; HAAS, R.; REGINA, J. V. M. (2006) Previsão de vazão afluente a um reservatório utilizando previsão quantitativa de chuva. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Vol. 11, nº 3, p. 55-69.
- ALFIERI, L. *et al.* (2013) GloFAS – Global ensemble streamflow forecasting and flood early warning. **Hydrology and Earth System Sciences**, Vol. 17, p. 1161–1175.
- ALLASIA, D. G. (2007). **Avaliação da previsão hidroclimática no Alto Paraguai**. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 342 p.
- ARDUINO, G.; REGGIANI, P.; TODINI, E. (2005) Recent advances in flood forecasting and flood risk assessment. **Hydrology and Earth System Sciences**, Vol. 9, n. 4 p. 280-284.
- ARRIBAS, A.; ROBERTSON, K. B.; MYLNE, K. R. (2005). Test of a Poor Man's Ensemble Prediction System for Short-Range Probability Forecasting. **Monthly Weather Review**, Vol.133, p. 1825-1839.
- AUBERT, D.; LOUMAGNE, C.; OUDIN, L. (2003). Sequential assimilation of soil moisture and streamflow data in a conceptual rainfall-runoff model. **Journal of Hydrology**, Vol. 280, p. 145-161.
- BABOVIC, V.; CAÑIZARES, R.; JENSEN, H. R.; KLINTING, A. (2001). Neural networks as routine for error updating of numerical models. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, Vol. 127, n.3, p. 181-193.
- BARTHOLMES, J.; TODINI, E. (2005). Coupling meteorological and hydrological models for flood forecasting, **Hydrology and Earth System Sciences**, Vol. 9, p. 333-346.
- BARTHOLMES, J.; THIELEN, J.; RAMOS, M-H.; GENTILINI, S. (2009) The European flood alert system EFAS – Part 2: Statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational forecasts **Hydrology and Earth System Sciences**, Vol. 13, p. 141-153.
- BENOIT, R.; KOUWEN, N.; YU, W.; CHAMBERLAND, S.; PELLERIN, P. (2003) Hydrometeorological aspects of the Real-Time Ultrafinescale Forecast Support during the Special Observing Period of the MAP*. **Hydrology and Earth System Sciences**, vol. 7, n. 6, p. 877-889.

- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. (1992). Rainfall-based real time flood forecasting. **Journal of Hydrology**, Vol. 131, p. 313-339.
- BEVEN, K.; KIRBY, M. A. (1979). Physically based variable contributing area model of basing hydrology. **Hydrological Science Bulletin**, v. 24, p. 43-69.
- BLACK, T. (1994) The new NMC mesoscale Eta model: description and forecast examples. **Weather and Forecasting**, Vol. 9, p. 265-278.
- BOTH, G. C.; HAETINGER, C.; FERREIRA, E. R.; DIEDRICH, V. L.; AZAMBUJA, J. L. F. (2008) **Uso da modelagem matemática para a previsão de enchentes no Vale do Taquari – RS**. Anais do VI Simpósio de Engenharia Ambiental, Serra Negra/SP, 2008.
- BRASIL (2011). Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. **Anuário brasileiro de desastres naturais: 2011** / Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. - Brasília: CENAD, 2011.
- BRASIL (2012). Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. **Anuário brasileiro de desastres naturais: 2012** / Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. - Brasília: CENAD, 2012.
- BRAVO, J. M. *et al.* (2008) Previsões de curto prazo de vazão afluente ao reservatório de furnas utilizando redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Vol. 13, nº 2, p. 77-88.
- BROWN, J. D.; DEMARGNE, J.; SEO, D-J.; LIU, Y. (2010) The Ensemble Verification System (EVS): A software tool for verifying ensemble forecasts of hydrometeorological and hydrologic variables at discrete locations. **Environmental Modelling & Software**, Vol. 25, p. 854-872.
- BRUN, G. W.; TUCCI, C. E. M. (2001) Previsão em Tempo Real do Volume Afluente ao reservatório de Ernestina. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Vol. 6, n. 2, Abr/Jun., p. 73-80.
- BUIZZA, R.; PALMER, T. N. (1995) The Singular-Vector structure of the atmospheric global circulation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Vol. 52, n. 9, p. 1434-1456.
- BUIZZA, R. (1997) Potential forecast skill of ensemble prediction and spread and skill distributions of the ECMWF Ensemble Prediction System. **Monthly Weather Review**, Vol. 125, p. 99-119.
- BUIZZA, R.; HOLLINGSWORTH, A.; LALAURETTE, F.; GHELLY, A. (1999a). Probabilistic predictions of precipitation using the ECWFMF ensemble prediction system. **Weather and Forecasting**, Vol. 14, p. 168-188.
- BUIZZA, R.; MILLER, M.; PALMER, T. N. (1999b) Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Vol. 125 p. 2887-2908.
- BUIZZA, R. (2005) EPS skill improvements between 1994 and 2005. **ECMWF Newsletter n. 104**, ECMWF, Shinfield Park, Reading RG2-9AX, UK, p. 10-14.

- BUIZZA, R. (2008) The value of probabilistic prediction. **Atmospheric Science Letters**, Vol. 9 p. 36-42.
- BUSTAMANTE, J. F. (2009) **Estudo da previsibilidade de eventos severos sobre o sudeste da América do Sul com ênfase na região da Serra do Mar usando previsão de curto prazo por ensemble**. Tese de Doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 218 p.
- BUSTAMANTE, J. F. (2013). Previsão por conjunto. **IV Workshop Latino-Americano em Modelagem de Tempo e Clima Utilizando o Modelo Regional Eta**. Disponível em
- CALVETTI, L. (2011). **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.
- CAMPOLLO, M.; ANDREUSSI, P.; SOLDATI, A. (1999) River flood forecasting with a neural network model. **Water Resources Research**, Vol. 35, n. 4, p. 1191-1197.
- CASTANHARO, G. *et al.* (2007) Previsão de Vazões na Bacia do Rio Iguaçu Baseada no Modelo SMAP e com Incorporação de Informações de Precipitação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Vol. 12, n. 3 Jul/Set 2007, p.57-68.
- CASTILHO, A. S.; OLIVEIRA, L. M., MEDEIROS, M. J., (2001). **O Sistema de Alerta Contra Enchentes na Bacia do Rio Doce**. IV Diálogo Interamericano de Gerenciamento de Águas. Foz do Iguaçu, 2001.
- CASTILHO, A. S.; DAVIS, E. G. (2003). **Previsão Hidrológica de Vazões para as Cidades de Resplendor, Colatina e Linhares Utilizando o Método das Diferenças**. Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH: Curitiba, 2003.
- CHOU, S. C.; NUNES, A. M. B.; CAVALCANTI, I. F. A. (2000) Extended range forecasts over South America using the regional ETA model. **Journal of Geophysics Research**, Vol. 105, n.8, p. 10147-10160.
- CHOU, S. C.; BUSTAMANTE, J. F.; GOMES, J. L. (2005) Evaluation of Eta Model seasonal precipitation forecasts over South America. **Nonlinear Processes in Geophysics**, Vol. 12, p. 537–555
- CLOKE, H. L.; PAPPENBERGER, F., (2009). Ensemble flood forecasting: A review. **Journal of Hydrology**, 375 (3-4), pp. 613-626.
- CLOKE *et al.* (2013). Preface: Hydrological ensemble prediction systems. **Hydrological Processes**, Vol. 27, p. 1-4.
- COLLIER, C. G.; KRSTOFOWICZ, R. (2000). Quantitative Precipitation Forecasting. **Journal of Hydrology**, v. 239, p. 1-2.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. (2001). Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Vol. 6, n. 1, p. 95-118.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. (2005). Previsão sazonal de vazão na bacia do rio Uruguai 1: ajuste e verificação do modelo hidrológico distribuído. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Vol. 10, n. 4, p. 43-59.

COLLISCHONN, W.; HAAS, R.; ANDREOLLI, I.; TUCCI, C. E. M. (2005) Forecasting River Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model. **Journal of Hydrology**, Vol. 305, p. 87-98.

COLLISCHONN, W. *et al.* (2007) Medium-range reservoir inflow predictions based on quantitative precipitation forecasts. **Journal of Hydrology**, Vol. 344, p. 112-122.

CORDERO, A.; MOMO, M. R.; SEVERO, D. L. (2011) **Previsão de cheia em tempo atual, com um modelo ARMAX, para a cidade de Rio do Sul - SC**. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

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

DAMRATH, G. D.; FRUHWALD, E. H.; STEPPELER, J. (2000) Operational quantitative precipitation forecasting at the German Weather Service. **Journal of Hydrology**, Vol. 239, p. 260-285.

DAVOLIO, S. *et al.* (2008) A meteo-hydrological prediction system based on a multi-model approach for precipitation forecasting. **Natural Hazards Earth System Sciences**, Vol. 8, p.143-159.

DAVOLIO, S.; MIGLIETTA, M. M.; DIOMEDE, T.; MARSIGLI, C.; MONTANI, A. (2013) A flood episode in northern Italy: multi-model and single-model mesoscale meteorological ensembles for hydrological predictions. **Hydrology and Earth System Sciences**, Vol. 17, p. 2107-2120.

De ROO, A. P. J.; WESSELING, C. G., VAN DEURSEN, W. P. A. (2000). Physically based river basin modelling within a GIS: the LISFLOOD model. **Hydrological Processes**, vol. 14, p. 1981-1992

De ROO, A. P. J. *et al.* (2003) Development of a European Flood Forecast System. **Intl. J. River Basin Management**, Vol. 1, n. 1, p. 49-59

DEMERRIT, D. *et al.* (2007) Ensemble predictions and perceptions of risk, uncertainty, and error in flood forecasting. **Environmental Hazards**, Vol. 7, p. 115-127.

DEMARGNE, J. *et al.* (2014). The science of NOAA's operational hydrological ensemble forecast service. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Vol. 95, p. 79-98.

DIETRICH, J. *et al.* (2008) Combination of different types of ensembles for the adaptive simulation of probabilistic flood forecasts: hindcasts for the Mulde 2002 extreme event. **Nonlinear Processes Geophysics**, Vol. 15, p.275-286.

- DORNELLES, F. (2007) **Previsão contínua de níveis fluviais com redes neurais utilizando previsão de precipitação**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 99 p.
- DRH/SEMA (2011). **Plano de Bacia do Taquari-Antas**. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. Estado do Rio Grande do Sul.
- DU, J.; MULLEN, S. L.; SANDERS, F. (1997) Short-Range Ensemble Forecasting of Quantitative Precipitation. **Monthly Weather Review**, Vol. 125, p. 2427-2459.
- EM-DAT (2013) Université Catholique de Louvain. Disponível em <www.emdat.be/database>
- EBERT, E. (2001). Ability of a Poor Man's Ensemble to Predict the Probability and Distribution of Precipitation. **Monthly Weather Review**, Vol. 129, 2461–2480.
- EBERT, E.; MCBRIDE, J. L. (2000) Verification of precipitation in weather systems: determination of systematic errors. **Journal of Hydrology**, Vol. 239, p. 179-202.
- EBERT, E.; DAMRATH, U.; WERGEN, W.; BALDWIN, M. (2003) The WGNE assessment of short-term quantitative precipitation forecasts. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Vol. 84, p. 481–492.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; MELLER, A. BOTELHO, L. C. M. (2014) Ensemble streamflow forecasting experiments in a tropical basin: The São Francisco river case study. **Journal of Hydrology**, Vol. 519, Part D, p. 2906–2919.
- FERRI, G. A.; TOGNI, A. C. (2012) **A história da bacia hidrográfica Taquari-Antas**. UNIVATES, 2012
- FERRIER, B. S.; LIN, Y.; BLACK, T.; ROGERS, E.; DIMEGO, G. (2002). Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta Model. In: 15th Conference on Numerical Weather Prediction, San Antonio, TX, Amer. Meteor. Soc., 280-283.
- FRENCH, M. N.; KRAJEWSKY, W. F.; CUYKENDALL, R. R. (1992) Rainfall forecasting in space and time using a neural network. **Journal of Hydrology**, Vol. 137, p. 1-31.
- GOLDING, B. W. (2000). Quantitative precipitation forecasting in the UK. **Journal of Hydrology**, vol. 239, p. 286–305.
- GOLDING, B. W. (2009) Long lead time flood warnings: reality or fantasy? **Meteorological Applications**, n. 16, p. 3-12.
- GOLDING, B. W. (2014) Regional Prediction Models. In: NORTH, G. R.; PYLE, J. A.; ZHANG, F. (2014) **Encyclopedia of Atmospheric Sciences**. Academic Press: 2nd Edition, 2998 p.
- GOMES, J.; MINE, M. R. M. (1998) Estimativa de parâmetros de modelos hidrológicos utilizando o Filtro de Kalman. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Vol. 3, n. 2, p. 67-86.

GOUWELLEUW, B. T.; THIELEN, J.; FRANCHELLO, G; De ROO, A. P. J.; BUIZZA, R. (2005) Flood forecasting using medium-range probabilistic weather prediction. **Hydrology and Earth System Sciences**, Vol. 9, n. 4, p. 365-380.

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

IFRC (2011). **World Disasters Report 2010, Focus on urban risk**. International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, Editor: Denis McClean, Lyons, France, 214 p.

JANJIC, Z. I. (1994). The step-mountain ETA coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes. **Monthly Weather Review**, Vol. 122, p. 927-945.

JAUN, S.; AHRENS, B. (2009) Evaluation of a probabilistic hydrometeorological forecast system. **Hydrology and Earth System Sciences**, Vol. 13, p. 1031-1043.

JOLLIFFE, I. T.; STEPHENSON, D. B. (2003) **Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science**. Wiley and Sons, Chichester, 254 p.

KAIN, J. S. (2004) The Kain-Fritsch convective parametrization: an update. **Journal of Applied Meteorology**, Vol. 43, p. 165-170.

KALNAY, E. (2003). **Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability**. Cambridge University Press. UK. 276 p.

KOUSSIS, A. D. *et al.* (2003) Flood forecasts for urban basin with integrated hydro-meteorological model. **Journal of Hydrologic Engineering**, Vol. 8, n. 1, p. 1-11.

KRUK, N. S.; VENDRAME, I. F; CHOU, S. C. (2013) Coupling a mesoscale atmospheric model with a distributed hydrological model applied to a watershed in southeast Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, Vol. 18, p. 58-65.

KRZYSZTOFOWICZ, R. (1998) Probabilistic hydrometeorological forecasts: towards a new era in operational forecasting. **Bulletin of the American Meteorological Society**, p. 243-251.

KRZYSZTOFOWICZ, R. (2001). The case for probabilistic forecasting in hydrology. **Journal of Hydrology**, Vol. 249, p. 2-9.

LETTENMAIER, D. P.; WOOD, E. F. (1993). Hydrologic Forecasting. In: Maidment (Org.), **Handbook of Hydrology**. Ed McGraw-Hill

LEUTBECHER, M.; PALMER, T. N. (2008). Ensemble Forecasting. **Journal of Computational Physics**, Vol. 227, p. 3515–3539.

LIU, Y.; et al. (2012) Advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting: progresses, challenges, and emerging opportunities. **Hydrology Earth System Sciences**, Vol. 16, p. 3863–3887.

- LORENZ, E. (1963) Deterministic non-periodic flow. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Vol. 20, p. 130–141.
- LORENZ, E. (1969) Atmospheric Predictability as Reveled by Naturally Occurring Analogues. **Journal of the Atmospheric Sciences**, vol. 26, p. 636-646.
- MACHADO, L. H. R.; MENDONÇA, A. M.; MENDONÇA, R. W. B.; BONATTI, J. P. (2010) Impacto da utilização de previsões "defasadas" no sistema de previsão de tempo por conjunto do CPTEC/INPE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Vol. 25, n.1, p.54-69.
- MCENERY, J.; INGRAM, J.; DUAN, Q.; ADAMS, T.; ANDERSON, L. (2005) NOAA's Advanced Hydrologic Prediction Service: Building pathways for better science in water forecasting. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Vol. 86, p. 375-385.
- MELLER, A. (2012) **Previsão de cheias por conjunto em curto prazo**. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 204p.
- MENDONÇA, A. M.; BONATTI, J. P. (2002) **O sistema de previsão de tempo global por ensemble do CPTEC**. Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz do Iguaçu.
- MESINGER, F. *et al.* (2012) An upgraded version of ETA model. **Meteorology and Atmospheric Physics**, Vol. 116, p. 63-79.
- MINE, M. R. M.; TUCCI, C. E. M. (1999). Previsão em tempo real de vazões afluentes a reservatórios de usinas hidrelétricas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Vol. 4, n° 2, p.73-95.
- MOORE, R. J.; BELL, V. A.; JONES, D. A. (2005). Forecasting for flood warning. **Computers Rendus Geoscience**, Vol. 337, p. 203-217.
- MOLTENI, F.; BUIZZA, R.; PALMER, T. N.; PETROLIAGIS, T. (1996). The ECMWF Ensemble Prediction System: Methodology and validation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. Vol. 122 (529), p 73-119
- O'CONNELL, P. E.; CLARKE, R. T. (1981) Adaptive hydrological forecasting - a review. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 26, n. 2, p. 179-205.
- OLIVEIRA, D.; MEDEIROS, A.; PINTO, E. J. A (2009). Previsão e Alerta de cheias em Manaus. Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande, Nov/2009.
- PAIVA, L. F. G.; ACIOLI, G. C. L. (2007) **Previsão de vazões com o modelo CPINS – Cálculo e Previsão de Vazões Naturais e Incrementais a Sobradinho**. Anais do I Workshop de previsão de vazões. Rio de Janeiro. ONS.
- PAIVA, R. C. D. (2009) **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias estudo de caso: bacia do rio Solimões**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 168 p.
- PALMER, T. N. (1999). **Predicting uncertainty in forecasts of weather and climate**. ECWMF Publications: Research Department, 51 p.

PAPPENBERGER, F. *et al.* (2005) 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). **Hydrology and Earth System Sciences**, Vol. 9, n. 4, p. 381-393.

PAPPENBERGER, F. *et al.* (2008) New dimensions in early flood warning across the globe using grand-ensemble weather predictions. **Geophysical Research Letters**, Vol. 35, L10404, doi:10.1029/2008GL033837.

PAPPENBERGER, F.; THIELEN, J.; DEL MEDICO, M. (2011) The impact of weather forecast improvements on large scale hydrology: analysing a decade of forecasts of the European Flood Alert System. **Hydrological Processes**, Vol. 25, p. 1091-1113.

PAPPENBERGER, F. *et al.* (2013) Visualizing probabilistic flood forecast information: expert preferences and perceptions of best practice in uncertainty communication. **Hydrological Processes**, Vol. 27, p. 132-146.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; ALLASIA, D. (2007) Data assimilation in a large-scale distributed hydrological model for medium-range flow forecasts. Quantification and Reduction of Predictive Uncertainty for Sustainable Water Resources Management. In: **Proceedings of Symposium HS2004 at IUGG2007**, Perugia, July 2007. IAHS Publ., p. 471-478

PEDROLLO, O. (2000). **Previsão em tempo atual de cheias com uso de sistema especialista difuso**. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 134 p.

PEDROLLO, M.; GERMANO, A.; SOTÉRIO, P.; RODRIGUES, E.; MADUELL, J. C. (2011) **Alerta hidrológico na bacia do rio Caí: concepção e implantação do sistema**. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

RAMOS, M-H.; BARTHOLMES, J.; THIELEN, J. (2007) Development of decision support products based on ensemble forecasts in the European flood alert system. **Atmospheric Science Letters**, Vol. p. 113-119.

RAMOS, M-H.; MATHEVET, T.; THIELEN, J. PAPPENBERGER, F. (2010) Communicating uncertainty in hydro-meteorological forecasts: mission impossible? **Meteorological Applications**, Vol. 17, p. 223-235.

REFSGAARD, J. C. (1997). Validation and intercomparison of different updating procedures for real-time forecasting. **Nordic Hydrology**, v. 28, n. 2, p. 65-84.

RENNER, M.; WERNER, M. G. F; RADEMACHER, S.; SPROKKEREEF, E. (2009) Verification of ensemble flow forecasts for the river Rhine. **Journal of Hydrology**, Vol. 376, p. 463-475.

ROSA, A. F. M.; MIERES, L. S.; SALDANHA, C. B.; ALVES, R. C. M (2011) **Análise de chuva intensa na região de Agudo-RS em janeiro de 2010**. Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, abr/mai 2011, INPE p. 2135.

- ROULIN, E.; VANNITSEN, S. (2005). Skill of medium-range hydrological ensemble predictions. **Journal of Hydrometeorology**, Vol. 6, p. 729-744.
- SERBAN, P.; ASKEW, A. J. (1991). Hydrological Forecasting and Updating Procedures. In: van de VEN, H. M.; GUTKNECHT, G.; LOUCKS, D. P.; SALEWICZ, K. A. (Ed.). **Hydrology for the Water Management of Large River Basins**. Vienna: IAHS, 1991. 357-369. (IAHS publication, n. 201). (Proceedings of the Vienna Symposium, August 1991).
- SCHAAKE, J. C.; HAMILL, T. M.; BUIZZA, R.; CLARK, M. (2007). The Hydrological Ensemble Prediction Experiment. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Vol. 88, p. 1541–1547.
- SHAMSELDIN, A. Y.; O'CONNOR, K. M. (2001). A non-linear neural network technique for updating of forecasts. **Hydrology and Earth System Sciences**, Vol. 5, n. 4, p. 577-597.
- SHRETSHA, D. L.; ROBERTSON, D. E.; WANG, Q. J.; PAGANO, T. C.; HAPUARACHCHI, A. P. (2013) Evaluation of numerical weather prediction model precipitation forecasts for short term streamflow forecasting purpose. **Hydrology and Earth System Sciences**, Vol. 17, p. 1913-1931.
- SILVA, B. C. da; TUCCI, C. E. M.; COLLISCHONN, W. (2006). Previsão de vazão com modelos hidroclimáticos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Vol. 11, nº 3, p.15-29.
- SIMMONS, A. J.; HOLLINGSWORTH, A. (2002) Some aspects of the improvement in skill of numerical weather prediction. **Quarter Journal of the Royal Meteorological Society**, Vol. 128, p. 647-677.
- SOLER, L. S. *et al.*. (2013). Challenges and perspectives of innovative digital ecosystems designed to monitor and warn natural disasters in Brazil. **Proceedings of the Fifth International Conference on Management of Emergent Digital EcoSystems**, p. 254-261.
- SOLOMON, S. I., BASSO, E., OSORIO, C., de MORAES, H. M., SERRANO, A. (1986) Flood forecasting for Tucuruí hydroelectrical plant, Brazil. **Water Resources Bulletin**, Vol. 22, n. 2, p. 209-217.
- SORIANO, E. *et al.*. (2013); Avaliação de propostas de candidatos a prefeitos em relação aos riscos de desastres naturais. **Soc. & Nat.**, Uberlândia, vol. 25, n.3, p. 525-542.
- STENSRUD, D. J.; BAO, J.; WARNER, T. T. (2000) Using Initial Condition and Model Physics Perturbations in Short-Range Ensemble Simulations of Mesoscale Convective Systems. **Monthly Weather Review**, Vol. 128, p. 2077-2107.
- TACHINI, M. (2003). O alerta de cheias e a ação da defesa civil. In: FRANK, B.; PINHEIRO A. **Enchentes na bacia do Itajaí: 20 anos de experiências**. Blumenau: Edifurb, 2003, p. 129-141.
- THIELEN, J., BARTHOLMES, J., RAMOS, M.-H., de ROO, A. (2009a). The European Flood Alert System – Part 1: Concept and development. **Hydrology and Earth System Sciences**, 13, 125–140, doi:10.5194/hess-13-125.

THIELEN, J.; BOGNER, K.; PAPPENBERGER, F., KALAS, M.; del MEDICO, M.; de ROO, A. (2009b). Monthly-, medium-, and short-range flood warning: testing the limits of predictability. **Meteorological Applications**, Vol.16, p. 77–90.

THIREL, G.; REGIMBEAU, F. R.; MARTIN, E. HABETS, F. (2008) On the Impact of Short-Range Meteorological Forecasts for Ensemble Streamflow Predictions. **Journal of Hydrometeorology**, Vol. 9, p. 1301-1317.

TOMINAGA, L. K. (2009). Desastres Naturais. Por que Ocorrem? In: TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres Naturais: Conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 196p.

TOTH, Z.; KALNAY, E. (1995) **Ensemble forecasting at NMC and the breeding method**. Office Note 407, National Meteorological Center, 58 p.

TOTH, E.; BRATH, A.; MONTANARI, A. (2000) Comparison of short-term rainfall prediction models for real-time flood forecasting. **Journal of Hydrology**, Vol. 239, p. 132-147.

TUCCI, C. E. M. (1998). **Modelos Hidrológicos**. 1ª edição. ABRH: Porto Alegre, 669 p.

TUCCI, C. E. M. (1999). **Aspectos institucionais no controle de inundações**. Anais... I Seminário de Recursos Hídricos do Centro-Oeste. Brasília.

TUCCI, C. E. M. (2005) Gestão de inundações urbanas. Ministério das Cidades. Global Water Partnership. World Bank. Unesco, 269 p.

TUCCI, C. E. M.; COLLISCHONN, W.; CLARKE, R. T.; PAZ, A. R.; ALLASIA, D. (2008) Short- and long-term flow forecasting in the Rio Grande watershed (Brazil). **Atmospheric Science Letters**, Vol. 9, p. 53-56.

TRACTON, M. S.; KALNAY, E., (1993) Operational Ensemble prediction at the National Meteorological Center: Practical Aspects. **Weather and Forecasting**, p. 379-398.

UN/ISDR (2004) **Guidelines for Reducing Flood Losses**. Editor: Paul J. Pilon, 79 p.

UN/ISDR (2011) **Disaster through a Different Lens: behind every effect, there is a cause. A guide for journalists covering disaster risk reduction**. United Nations Inter-Agency Secretariat of the International Strategy for Disaster Reduction, Geneva, 188p.

VERBUNT, M.; ZAPPA, M.; GURTZ, J.; KAUFMANN, P. (2006) Verification of a coupled hydrometeorological modelling approach for alpine tributaries in the Rhine basin. **Journal of Hydrology**, Vol. 324, p. 224-238.

VERBUNT, M.; WALSER, A.; GURTZ, J.; MONTANI, A.; SCHAR, C. (2007) Probabilistic flood forecasting with a Limited-Area Ensemble Prediction System: selected case studies. **Journal of Hydrometeorology**, Vol. 8, p. 897-909.

VIANA, L. P. S.; FARIAS JÚNIOR, J. E. F.; de OLIVEIRA, C. L. (2009). **Sistema de alerta de cheias do estado do Rio de Janeiro**. Anais... XVIII Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos, 2009.

- VIANA, L. P. S.; IKEMOTO, S. M.; GIORI, J. Z.; JOHNSON , R. M. F.; FARIAS JÚNIOR, J. E. F. (2011). **Sistema de alerta de cheias do estado do Rio de Janeiro: situação atual e perspectivas**. Anais... XIX Simpósio Brasileiro De Recursos Hidricos, 2011.
- VIVONI, E. R. *et al.* (2006) Extending the predictability of hydrometeorological flood events using radar rainfall nowcasting. **Journal of Hydrometeorology**, Vol. 7, n. 4, p. 660–677.
- VOISIN, N.; PAPPENBERGER, F.; LETTENMAIER, D. P.; BUIZZA, R.; SCHAAKE, J. C. (2011) Application of a medium-range global hydrologic probabilistic forecast scheme to the Ohio River basin. **Weather and Forecasting**, Vol. 26, p. 425-446.
- VRUGT, J. A.; GUPTA, H. V.; O' NUALLÁIN, B.; BOUTEN, W. (2006). Real-time data assimilation for operational ensemble streamflow forecasting. **Journal of Hydrometeorology**, Vol. 7, p. 548-565.
- WANDISHIN, M. S.; MULLEN, S. L.; STENSRUD, D. J. BROOKS, H. E. (2001) Evaluation of a Short-Range Multimodel Ensemble System. **Monthly Weather Review**, Vol. 129, p. 729-747.
- WEI, M. *et al.* (2006) **Ensemble transform Kalman filter-based ensemble perturbations in an operational global prediction system at NCEP**. *Tellus* 58A, p. 28–44.
- WEISSE, A.; OUDIN, L.; LOUMAGNE, C. (2003). Assimilation of soil moisture into hydrological models for flood forecasting: Comparison of a conceptual rainfall-runoff model and a model with an explicit counterpart for soil moisture. **Revue Des Sciences De L'Eau**. Vol. 16, n. 2. p. 173-197.
- WETTERHALL, F.; HE, Y.; CLOKE, H.; PAPPENBERGER, F. (2011) Effects of temporal resolution of input precipitation on the performance of hydrological forecasting. **Advances in Geosciences**, Vol. 29, p. 21-25.
- WETTERHALL *et al.* (2013) HESS opinions: "Forecaster priorities for improving probabilistic flood forecasts". **Hydrology and Earth System Sciences**, Vol. 17, p. 4389-4399.
- WILKS, D. S. (2006) *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, 2^a ed., 627 p.
- WMO, (1992) **Simulated real-time intercomparison of hydrological models**. World Meteorological Organization, Operational Hydrology Report no. 38, WMO, Geneva, Switzerland.
- WMO, (2011) **Manual on flood forecasting and warning**. World Meteorological Organization. WMO Publications, 2011, 142 p.
- WMO, (2013) **The Global Climate 2001-2010: a decade of climate extremes - Summary Report**. World Meteorological Organization. WMO Publications, 2013, 15p.
- WOOD, A. W.; MAURER, E. P.; KUMAR, A.; LETTENMAIER, D. P. (2002). Long-range experimental hydrologic forecasting for eastern United States. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 107, n. 20, p.

- WÖHLING, T. H.; LENNARTZ, F.; ZAPPA, M. (2006). Technical Note: Real-time updating procedure for flood forecasting with conceptual HBV-type models. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 10, p. 783-788.
- XIONG, L.; O'CONNOR, K. M. (2002). Comparison of four updating models for real-time river flow forecasting. **Hydrological Sciences Journal**, v. 47, n. 4, p. 621-639.
- XU, C. (2002) **Textbook of Hydrologic Models**. Uppsala University Department of Earth Sciences Hydrology, Lärobok I Edition, Sweden.
- XUAN, Y.; CLUCKIE, I. D.; WANG, Y. (2009) Uncertainty analysis of hydrological ensemble forecasts in a distributed model utilising short-range rainfall prediction. **Hydrology and Earth System Sciences**, Vol. 13, p. 293-303.
- YOUNIS, J.; RAMOS, M-H.; THIELEN, J. (2008) EFAS forecasts for the March-April 2006 flood in the Czech part of the Elbe River Basin - a case study. **Atmospheric Science Letters**, Vol. 9, p. 88-94.
- YU, P.; CHEN, S. (2005) Updating real-time flood forecasting using a fuzzy rule-based model. **Hydrological Sciences Journal**, v. 50, n. 2, p. 265-278.
- ZAPPA, M.; FUNDEL, F.; JAUN, S. (2013) A 'Peak-Box' approach for supporting interpretation and verification of operational ensemble peak-flow forecasts. **Hydrological Processes**, Vol. 27, p. 117-131.
- ZHANG, Z.; KRISHNAMURTI, T. N. (1999) A perturbation method for hurricane ensemble predictions. **Monthly Weather Review**, Vol. 127, p. 447-469.
- ZHAO, Q.; CARR, F. H. (1997) A Prognostic Cloud Scheme for Operational NWP Models. **Monthly Weather Review**, Vol. 125, p. 1931-1953.