

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES

PRODUTO 4.1.1. SISTEMA DE PREVISÃO DE CHEIAS EXPERIMENTAL:  
MÉDIO PRAZO  
**RF**  
RELATÓRIO FINAL

Porto Alegre  
Fevereiro/2017

## SUMÁRIO

PRODUTO 4.1.1. SISTEMA DE PREVISÃO DE CHEIAS EXPERIMENTAL: MÉDIO PRAZO .....	1
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. DESCRIÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO .....	3
2.1. ETAPA 1: Coleta de dados e Simulação Hidrológica .....	5
2.2. Dados hidrológicos .....	5
2.3. Unidades de Resposta Hidrológica .....	9
2.4. Mapa do tipo de solo .....	10
2.5. Mapa do uso de solo.....	13
2.6. Definição final das URHs .....	14
2.7. Discretização do MGB-IPH .....	15
2.7.1. Definição das minibacias .....	15
2.7.2. Definição das sub-bacias.....	16
2.7.3. Extração das características físicas da bacia .....	16
2.8. Calibração e verificação do MGB-IPH na bacia do Taquari-Antas.....	17
2.9. ETAPA 2: Elaboração do sistema de previsão .....	23
2.9.1. Acoplamento de previsões meteorológicas .....	25
2.9.2. Identificação e compatibilização de limiares de referência .....	27
2.9.3. Geração dos resultados.....	30
REFERÊNCIAS.....	38

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama esquemático para a antecedência na previsão de cheias.....	3
Figura 2 - Representação do processo de geração de escoamento na minibacia, considerando a existência de dois blocos distintos. ....	5
Figura 3 - Distribuição espacial dos postos horários e diários utilizados no modelo MGB-IPH. ....	8
Figura 4 - Representação esquemática do procedimento de combinação de mapas de uso e tipos de solo para elaboração de Unidades de Resposta Hidrológica - URH. ....	10
Figura 5 - Mapa de solos para a bacia do Taquari-Antas.....	11
Figura 6 - Mapa de solos reclassificado para a bacia do Taquari-Antas.....	12
Figura 8 - Mapa de uso do solo e cobertura vegetal para a bacia do Taquari-Antas. Fonte: DRH/SEMA .....	13
Figura 8 - Mapa final com a definição de Unidades de Resposta Hidrológica (URH) para a bacia do Taquari-Antas.....	14
Figura 9 - Mapa final com a discretização do modelo para a bacia do Taquari-Antas.....	16
Figura 10 - Resultado final da calibração horária para o posto de Passo Tainhas (86410000), no Rio Tainhas, período de junho/2009 a dezembro/2011. ....	20
Figura 11 - Resultado final da calibração horária para o posto de Passo Barra do Guaiaveira (86410000), no Rio Turvo, período de junho/2009 a dezembro/2011. ....	20
Figura 12 - Resultado final da calibração horária para o posto de Santa Lúcia (86580000), no rio Guaporé, período de junho/2009 a dezembro/2011.....	21
Figura 13 - Resultado final da calibração horária para o posto de Muçum (86510000), no período de junho/2009 a dezembro/2011.....	22
Figura 14 - Resultado final da calibração horária para o posto de Encantado (86720000), no período de junho/2009 a dezembro/2011.....	22
Figura 15 - Previsão com base em diferentes fontes de informação.....	23
Figura 16 - Espacialização das informações de precipitação da rede telemétrica para a bacia do Taquari-Antas. ....	24
Figura 17 - Representação do domínio do modelo atmosférico ETA, cobrindo a região da América do Sul. ....	26

Figura 18 - Espacialização das informações de precipitação da grade do ETA para a bacia Taquari-Antas. ....	26
Figura 19 - Interface web do sistema SACE - Sistema de Alerta Contra Enchentes da CPRM, com destaque para a bacia do Taquari-Antas. ....	28
Figura 20 - Gráfico com limiares de referência do sistema SACE da CPRM, para a cidade de Encantado/RS. ....	28
Figura 21 - Resultados da previsão iniciada em 01/06/2014 às 00 h, para o evento do dia 06/06/2014.	30
Figura 22 - Resultados da previsão iniciada em 01/06/2014 às 12 h, para o evento do dia 06/06/2014.	31
Figura 23 - Resultados da previsão iniciada em 02/06/2014 às 00 h, para o evento do dia 06/06/2014.	31
Figura 24 - Resultados da previsão iniciada em 02/06/2014 às 12 h, para o evento do dia 06/06/2014.	32
Figura 25 - Resultados da previsão iniciada em 03/06/2014 às 00 h, para o evento do dia 06/06/2014.	32
Figura 26 - Resultados da previsão iniciada em 04/06/2014 às 00 h, para o evento do dia 06/06/2014.	32
Figura 27 - Resultados da previsão iniciada em 05/06/2014 às 00 h, para o evento do dia 06/06/2014.	33
Figura 28 - Resultados da previsão iniciada em 13/10/2014 às 00 h, para o evento do dia 20/10/2014.	34
Figura 29 - Resultados da previsão iniciada em 13/10/2014 às 00 h, para o evento do dia 20/10/2014.	34
Figura 30 - Resultados da previsão iniciada em 14/10/2014 às 00 h, para o evento do dia 20/10/2014.	34
Figura 31 - Resultados da previsão iniciada em 14/10/2014 às 00 h, para o evento do dia 20/10/2014.	35
Figura 32 - Resultados da previsão iniciada em 15/10/2014 às 00 h, para o evento do dia 20/10/2014.	35
Figura 33 - Resultados da previsão iniciada em 15/10/2014 às 12 h, para o evento do dia 20/10/2014.	35
Figura 34 - Resultados da previsão iniciada em 16/10/2014 às 00 h, para o evento do dia 20/10/2014.	36
Figura 35 - Resultados da previsão iniciada em 16/10/2014 às 12 h, para o evento do dia 20/10/2014.	36
Figura 36 - Resultados da previsão iniciada em 17/10/2014 às 00 h, para o evento do dia 20/10/2014.	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Estações telemétricas com envio de dados de precipitação em tempo real, na bacia do rio Taquari-Antas.....	6
Tabela 2 - Postos pluviométricos com dados diários selecionados, no período 2009-2013.....	7
Tabela 3 - Estações telemétricas com transmissão automática de informação de níveis. ....	8
Tabela 4 - Informações referentes à vazão defluente nas usinas hidrelétricas da CERAN. ....	9
Tabela 5 - Postos fluviométricos com dados de dupla medição de níveis (7:00 e 17:00). ....	9
Tabela 6 - Reclassificação do tipo de solo de acordo com as profundidades associadas .....	12
Tabela 7 - Classes de uso e ocupação do solo/cobertura vegetal identificadas na bacia do Taquari-Antas. ....	13
Tabela 8 - Parâmetros fixos do modelo MGB-IPH.....	18
Tabela 9 - Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH. ....	18
Tabela 10 - Índices de eficiência do MGB-IPH para a bacia do Taquari-Antas - período de calibração. ....	20
Tabela 11 - Índices de eficiência do MGB-IPH para a bacia do Taquari-Antas - período de verificação. ....	22
Tabela 12 - Níveis de referência do sistema SACE-CPRM, na bacia do Taquari-Antas. Adaptado de Chagas et al (2014). ....	29
Tabela 13 - Limiares de referência em Encantado utilizados para o sistema de previsão experimental. ....	30

## PRODUTO 4.1.1. SISTEMA DE PREVISÃO DE CHEIAS EXPERIMENTAL: MÉDIO PRAZO

### 1. INTRODUÇÃO

A previsão hidrológica consiste na estimativa do estado futuro de variáveis hidrológicas como vazão, nível, volume, área de inundação para algum local de interesse. Esta previsão se traduz em um elemento fundamental para a gestão de inundações, uma vez que medidas estruturais, como diques e reservatórios de amortecimento, ou mesmo de caráter preventivo, a exemplo de políticas de planejamento territorial, não são completamente efetivas.

Em um contexto operacional, a previsão hidrológica é um componente de um Sistema de Alerta contra cheias. O estabelecimento deste sistema em locais suscetíveis a inundações, de forma viável, requer informações, ferramentas de previsão e pessoal capacitado para utilização destas ferramentas, de maneira a garantir um período suficiente antes da ocorrência do evento para a resposta das comunidades atingidas. Sendo assim, o princípio básico do sistema de alerta é fornecer a mínima antecedência no tempo requerida para que as ações preparatórias possam ser tomadas efetivamente pelos responsáveis, a exemplo de entidades como a Defesa Civil. O tempo necessário pode variar de acordo com a magnitude e abrangência do evento, sendo que informações sobre a possibilidade de cheia nos dias seguintes, bem como a intensidade e instante de sua ocorrência, podem ser importantes para auxiliar no planejamento e mitigação dos impactos futuros. Além disso, o nível de estresse que ocorre durante a iminência de um evento de cheia, particularmente em relação aos agentes diretamente envolvidos, não deve ser subestimado nos procedimentos de tomada de decisão, principalmente quando o tempo disponível para esta finalidade é reduzido.

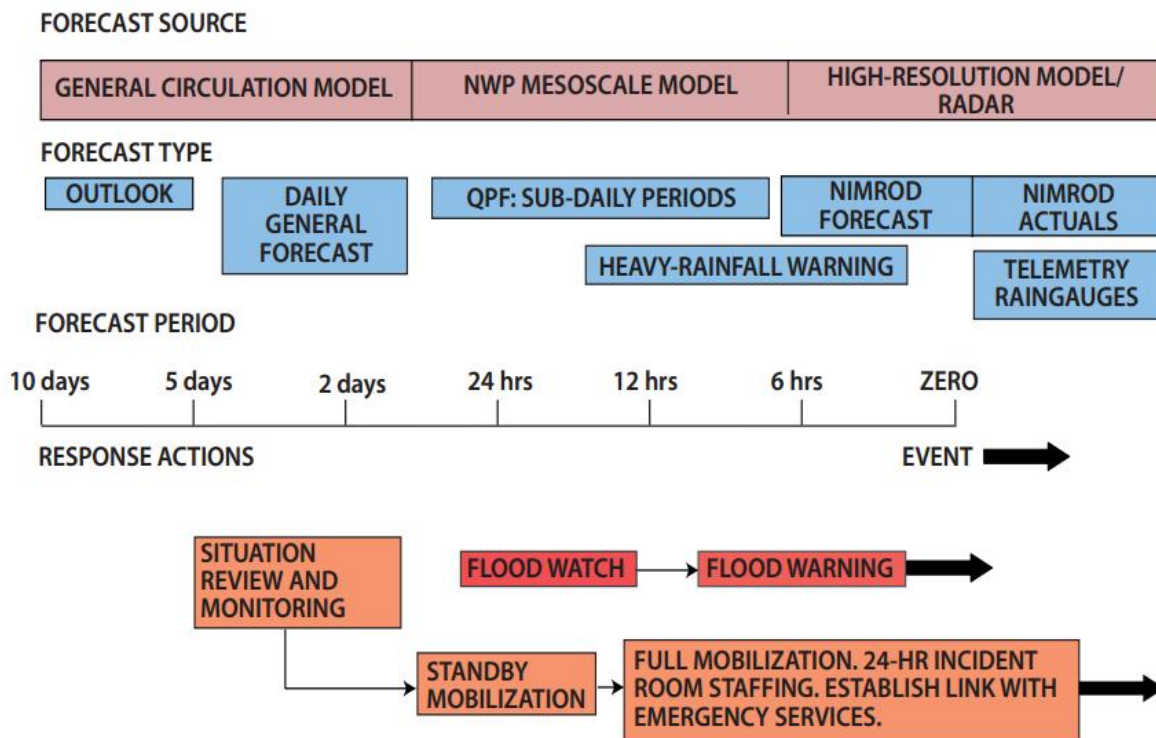
O termo designado por antecedência se refere ao período entre o início da previsão e o instante futuro no tempo para o qual essa previsão é aplicável, a qual costuma depender das características da bacia hidrográfica de interesse. Em situações onde boa parte da onda de cheia se forma na porção superior da bacia e seu tempo de propagação é relativamente longo até o ponto desejado para a previsão, esta pode ser simplesmente realizada através de uma relação cota-cota, onde o nível de jusante do rio é estimado com base no nível verificado a montante do local onde se deseja realizar a previsão.

Apesar deste método possibilitar a obtenção de antecedências na ordem de dias, ou até mesmo meses, para bacias muito grandes com declividades relativamente baixas, em regiões montanhosas e rios menores esta antecedência pode ser significativamente reduzida. Nestes casos, é necessário incorporar

dados de chuva medidos em postos pluviométricos com transmissão automática de dados, ou estimados por radar, em modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão para a realização das previsões. Estes sistemas normalmente permitem aumentar a antecedência das previsões hidrológicas, apesar da diminuição de acurácia devido à grande variabilidade da chuva - associada a uma cobertura insuficiente pelos postos pluviométricos - bem como às deficiências no processo de modelagem e nas medições de precipitação. Sistemas de previsão baseados em previsões de precipitação são necessários quando o tempo de antecedência desejado é maior do que o tempo de concentração da bacia. Além da precipitação já ocorrida, previsões quantitativas de precipitação provenientes de modelos atmosféricos são incorporadas no modelo chuva-vazão para estimativa das variáveis hidrológicas no tempo futuro. Embora resultem nas maiores antecedências, estes sistemas normalmente resultam nas maiores imprecisões dentre as demais abordagens, já que a chuva é uma das variáveis mais difíceis de serem previstas pelos modelos de previsão do tempo.

Conforme o *Manual of Flood Forecasting and Warning* (WMO, 2011), previsões na faixa de 5 a 10 dias podem ser úteis como um indicativo de um possível evento de larga escala, cujo benefício pode ser dado primeiramente como um auxílio preliminar para a preparação. Já previsões com antecedências menores do que 5 dias podem fornecer informações quanto à localidade e severidade do evento, porém normalmente ainda são insuficientes para fornecer alertas específicos locais. De maneira geral, é para antecedências menores do que 2 dias que as previsões de precipitação podem introduzir benefícios no processo de alerta contra cheias. Em bacias relativamente grandes, previsões de grandes volumes de chuva se tornam importantes em períodos de tempo em que o nível do rio já se encontra elevado, sendo que ascensões adicionais do nível podem resultar em bloqueios de partes do sistema viário e afetar áreas de risco de inundações.

No presente estudo, como exemplo de uma estratégia de combate aos impactos das cheias integrada em toda a bacia hidrográfica, foi implementado e testado um sistema experimental de previsão de vazões a partir da introdução de previsões de precipitação em caráter operacional. A descrição das informações e métodos utilizados, bem como da plataforma de visualização das previsões, estão descritas nas seções a seguir.

**Figura 1 - Diagrama esquemático para a antecedência na previsão de cheias.**


Fonte: Adaptado de WMO (2011).

## 2. DESCRIÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO

Para o desenvolvimento do sistema experimental de previsão de cheias, com foco no horizonte de curto a médio prazo, foi selecionado o Modelo de Grandes Bacias - MGB-IPH (Collischonn e Tucci, 2001). O MGB-IPH é um modelo hidrológico distribuído e composto de módulos específicos que representam matematicamente os processos físicos que ocorrem na bacia hidrográfica. Este modelo, amplamente aplicado nos estudos envolvendo bacias na América do Sul, incluindo a própria bacia do Taquari-Antas (Collischonn, 2001; Larentis, 2004, 2009), tem sido utilizado por diversas vezes em trabalhos relacionados à previsão de vazões afluentes a reservatórios no contexto hidrelétrico brasileiro, o que motivou sua adaptação para o presente projeto especificamente no que se refere à temática das cheias. A maior vantagem na utilização de um modelo de caráter conceitual, ou seja, capaz de representar os processos da bacia através de uma representação matemática, reside na possibilidade de fornecer resultados para diferentes locais mesmo onde a carência de dados acaba sendo um fator limitante. A seguir, é feita uma breve descrição do modelo supracitado, sendo que a descrição completa pode ser encontrada em trabalhos como de Collischonn (2001) e Paiva (2009).



A versão mais recente do modelo hidrológico MGB-IPH permite a utilização de até três níveis de divisão dos dados espaciais: 1) a bacia; 2) as sub-bacias; e 3) as minibacias. A bacia é a área total que será representada no modelo hidrológico, enquanto que as minibacias são os menores elementos usualmente definidos para cada segmento da rede hidrográfica. As sub-bacias são unidades intermediárias em relação às outras duas, as quais podem ser utilizadas para a definição de valores de parâmetros do modelo hidrológico necessários para procedimentos de calibração.

A principal divisão da bacia para o modelo hidrológico corresponde à discretização em minibacias, as quais permitem espacializar as informações a serem fornecidas como entrada, por exemplo, a precipitação.

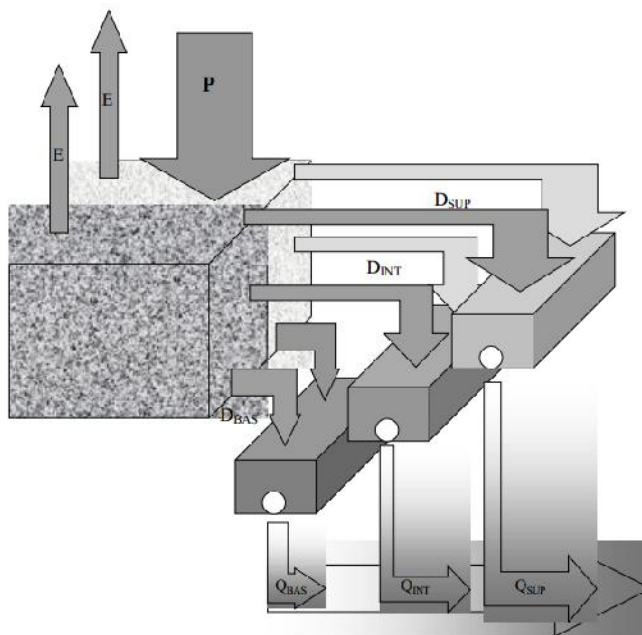
Além da variabilidade espacial da chuva, que pode ser representada por meio de séries distintas em cada uma das minibacias, há também a variabilidade espacial das características físicas da bacia que deve ser considerada. O tratamento desta variabilidade dentro do modelo é feito através da discriminação de áreas com comportamento hidrológico similar, denominadas Unidades de Resposta Hidrológica (URHs), ou, simplesmente, "blocos". Desta forma, cada minibacia é ainda subdividida em classes com respostas hidrológicas distintas, dentro das quais o modelo calcula o balanço vertical de água e determina as parcelas de escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo.

O balanço de água no solo é realizado utilizando uma metodologia baseada na geração de escoamento superficial por excesso de capacidade de armazenamento, porém com uma relação probabilística entre a umidade do solo e a fração de área de solo saturada. No caso da interceptação da chuva ocasionada pela cobertura vegetal, esta é representada por um reservatório cujo volume depende do índice de área foliar. A evapotranspiração é estimada para cada URH através do método de Penman – Monteith (Shuttleworth, 1993), considerando aspectos climáticos como insolação, velocidade do vento, umidade relativa e pressão, além de outros parâmetros como albedo, altura das árvores e resistência superficial. Estes últimos são exemplos de parâmetros fixos que não são alterados espacialmente, porém existem ainda alguns parâmetros calibráveis que podem ser modificados de acordo com o comportamento hidrológico associado a uma determinada URH.

Após o balanço de água no solo, os escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo resultantes, antes de alcançarem a rede de drenagem, sofrem efeito de atenuação e retardo através da metodologia do reservatório linear simples, considerando uma relação direta entre a vazão escoada e o volume de água armazenado em cada um dos reservatórios conceituais correspondentes. Na sequência, a propagação da vazão ao longo dos rios é realizada utilizando o método de Muskingum-Cunge linear (Tucci, 1998), cujos

parâmetros são calculados com base em informações hidráulicas como comprimento, declividade, rugosidade e largura média da seção.

**Figura 2 - Representação do processo de geração de escoamento na minibacia, considerando a existência de dois blocos distintos.**



Fonte: Collischonn e Tucci (2001).

### 2.1. ETAPA 1: Coleta de dados e Simulação Hidrológica

A primeira etapa para uso do modelo hidrológico MGB-IPH na bacia Taquari-Antas envolveu a coleta de informações hidrológicas (precipitação, níveis de água e vazões) nos pontos de monitoramento existentes, dados físicos da bacia hidrográfica, e simulação hidrológica. Esta etapa inicial é caracterizada como preparação do modelo, de maneira que sejam representados, com a maior proximidade possível da realidade, os processos que envolvem a transformação da chuva em escoamento na bacia.

### 2.2. Dados hidrológicos

O modelo MGB-IPH, no escopo de sua aplicação, normalmente é utilizado para intervalos de cálculo de 1 dia, o que pode ser considerado suficientemente adequado para a representação dos processos que ocorrem em grandes bacias. Todavia, em rios de característica montanhosa com elevadas declividades, da mesma forma como pode ser verificado na bacia do Taquari-Antas principalmente nos trechos a montante da cidade de Encantado, este intervalo de cálculo pode não se ajustar muito bem à realidade, visto as grandes elevações de nível - e vazão - que ocorrem no período de poucas horas durante as cheias.

Sendo assim, foram reunidos para o presente projeto dados horários para calibração e composição da base dados do sistema. As informações pluviométricas em intervalo de tempo horário identificadas (Tabela 1) 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):

**Tabela 1- 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
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	Abr/2014 - Atual
16	Anta Gorda	UNIVATES	-28,9832	-52,0004	Abr/2014 - Atual
17	Fontoura Xavier	UNIVATES	-28,9814	-52,3465	Abr/2014 - Atual
18	Marau	UNIVATES	-28,4503	-52,1991	Abr/2014 - Atual
19	Marques de Souza	UNIVATES	-29,3256	-52,0954	Abr/2014 - Atual
20	Monte Alegre dos Campos	UNIVATES	-28,6858	-50,7814	Abr/2014 - Atual
21	Rio das Antas	UNIVATES	-29,0455	-51,5698	Abr/2014 - Atual
22	São Marcos	UNIVATES	-28,9677	-51,0653	Abr/2014 - Atual

Embora a quantidade de estações telemétricas existentes na bacia seja relativamente suficiente para uma boa cobertura da precipitação, a mesma consideração não pode ser feita quanto à disponibilidade de registros históricos com transmissão em tempo real. Observando a Tabela 1, 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 variabilidade espacial em função da inserção de medições intermediárias 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 identificado um total de 27 postos pluviométricos - considerando o mesmo período de dados verificado nos postos do INMET (Tabela 2).

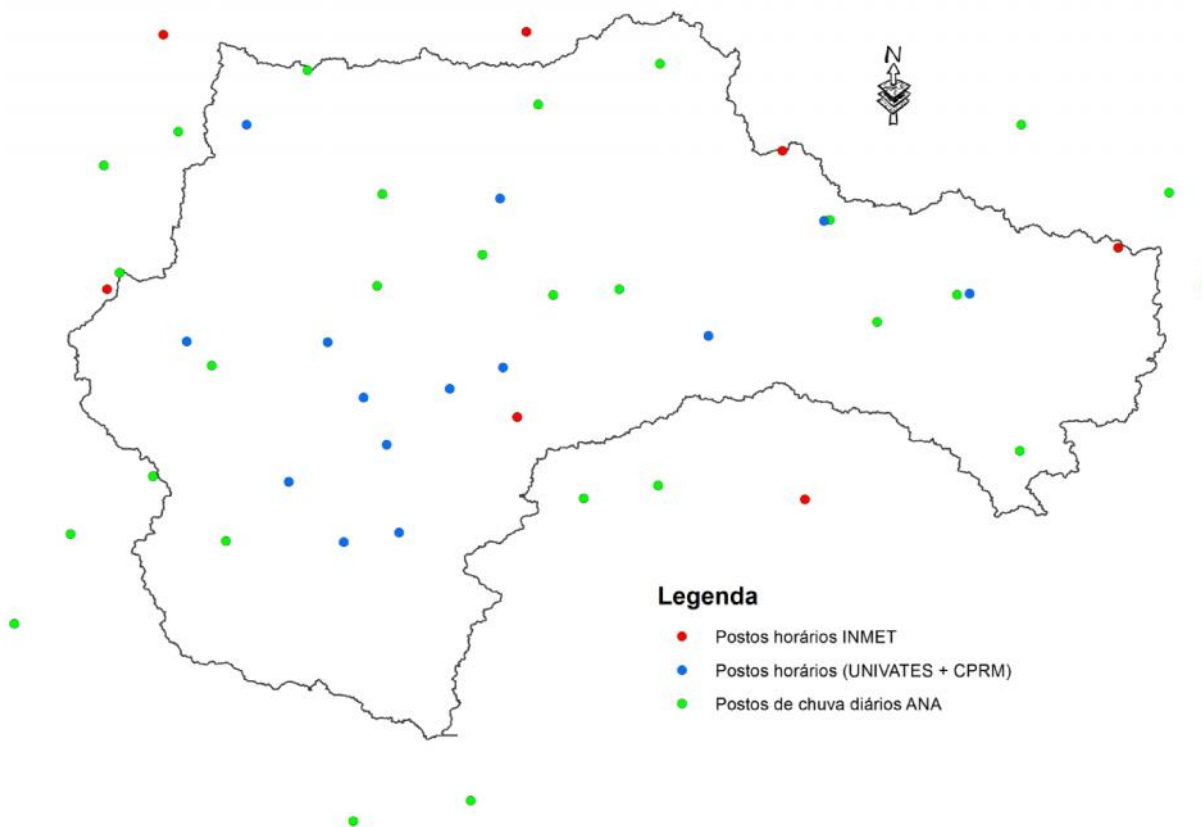
**Tabela 2 - Postos pluviométricos com dados diários selecionados, no período 2009-2013.**

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
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, 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. Embora esta consideração possa levar a resultados bem distintos se comparado à realidade - principalmente para eventos de chuva localizados - ela pode ser melhor aceita durante eventos de precipitação de maior escala e que causam a maior parte das cheias na bacia, já que nesses casos a chuva tende a ser mais bem

distribuída no tempo e no espaço. A Figura 3 apresenta a distribuição geográfica dos postos de chuva utilizados.

**Figura 3 - Distribuição espacial dos postos horários e diários utilizados no modelo MGB-IPH.**



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 3), 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 (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) - 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 3 - 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 4 - 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 (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) 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 5 - 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

Quanto às variáveis climáticas na bacia do Taquari-Antas, também necessárias para a aplicação do modelo, as mesmas foram obtidas a partir das Normais Climatológicas associadas a cada uma das estações representativa da bacia, conforme já identificado no relatório de caracterização hidrológica.

### 2.3. Unidades de Resposta Hidrológica

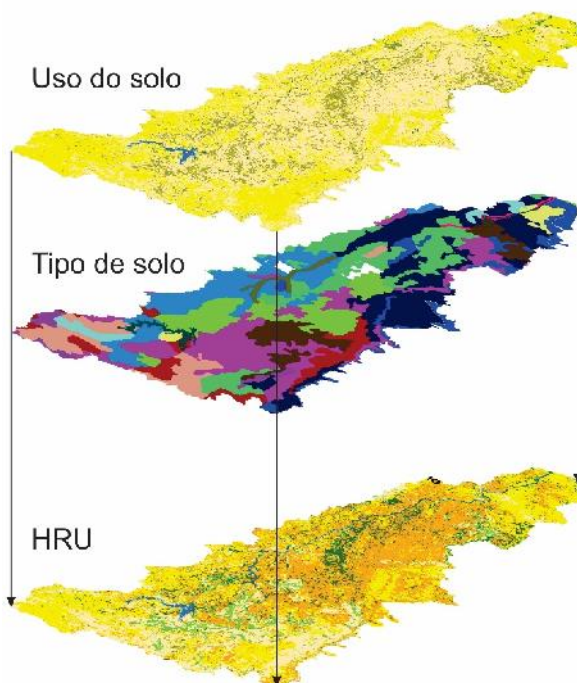
Dada a escala de aplicação do modelo MGB-IPH para a qual foi concebido (grandes bacias, entendidas como aquelas com área superior a 10.000 km<sup>2</sup>) e a sua característica de modelo distribuído, a variabilidade espacial das características físicas da bacia precisa ser considerada. Nesse sentido, considera-se que o comportamento hidrológico dos URHs possa ser explicado por características físicas relacionadas aos solos (ex. capacidade de armazenamento d'água, profundidade, porosidade, condutividade hidráulica) e à cobertura vegetal (ex. índice de área foliar, interceptação, profundidade das raízes, albedo). Desta forma, as URHs são geralmente definidas através da superposição de dois mapas

distintos de uma mesma região: 1) mapa de tipos de solo; 2) mapa de uso do solo e cobertura vegetal, conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

O número de URHs depende da quantidade de classes de tipos e de usos de solo. No caso de existirem, por exemplo, quatro tipos de solos e cinco classes de vegetação e uso da terra, a sobreposição destes dois mapas levaria a um número potencial de  $4 \times 5 = 20$  URHs. Entretanto, algumas destas combinações simplesmente não ocorrem, seja por acaso ou porque certos tipos de vegetação ou uso da terra são incompatíveis com certos tipos de solos.

De qualquer forma, a definição das URHs é subjetiva e deve ser criteriosa, pois quanto maior for o número de classes definidas maior será a dificuldade na calibração do modelo e conseqüentemente o número de graus de liberdade associado aos parâmetros. Além disso, não necessariamente haverá grande benefício no uso de um maior número de URH em termos de melhoria da representação dos hidrogramas.

**Figura 4 - Representação esquemática do procedimento de combinação de mapas de uso e tipos de solo para elaboração de Unidades de Resposta Hidrológica - URH.**



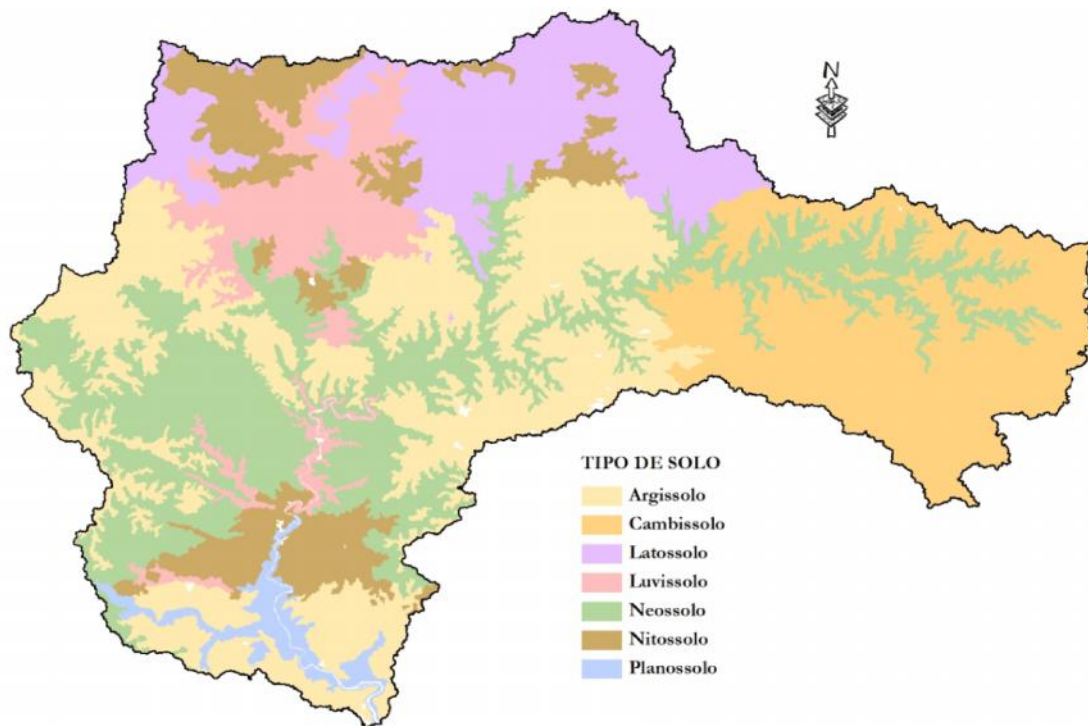
#### 2.4. Mapa do tipo de solo

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 (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 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, 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.

**Figura 5 - Mapa de solos para a bacia do Taquari-Antas.**



Fonte: IBGE/Embrapa Solos - DRH/SEMA (2011).

No entanto, as classificações tradicionais dos mapas de tipos de solos tem, geralmente, objetivos que vão muito além da questão hidrológica, sendo necessário reclassificá-los em um número menor de classes para aplicação no modelo MGB-IPH. A simplificação deve considerar o potencial de geração de escoamento superficial e de base, bem como seu potencial de armazenamento de água.

Nesse caso, 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 RADAM Brasil 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



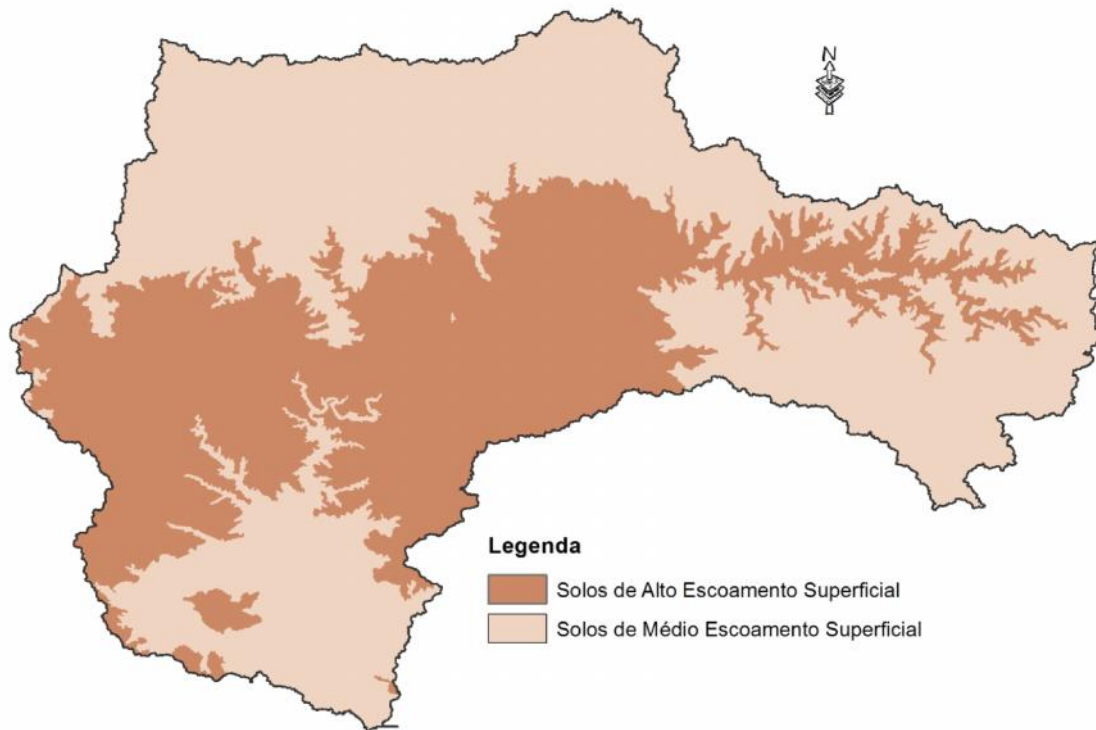
geração de escoamento superficial; já para solos com profundidades acima de 150 cm, ou inferiores desde que com boa drenagem, a atribuição foi de médio potencial de geração de escoamento superficial, cujo resultado pode ser verificado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

**Tabela 6 - Reclassificação do tipo de solo de acordo com as profundidades associadas**

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 alumínico
	< 150 cm - boa drenagem	- Luvissolo
Média produção de escoamento superficial (solos profundos)	> 150 cm	- Nitossolo Bruno alumínico - Nitossolo Vermelho eutroférico - Cambissolo - Argissolo Bruno-acinzentado
	> 200 cm	- Planossolo - Argissolo Vermelho-amarelo distrófico
	> 250 cm	- Latossolo - Nitossolo Vermelho Alumínico

Fonte: RADAMBrasil.

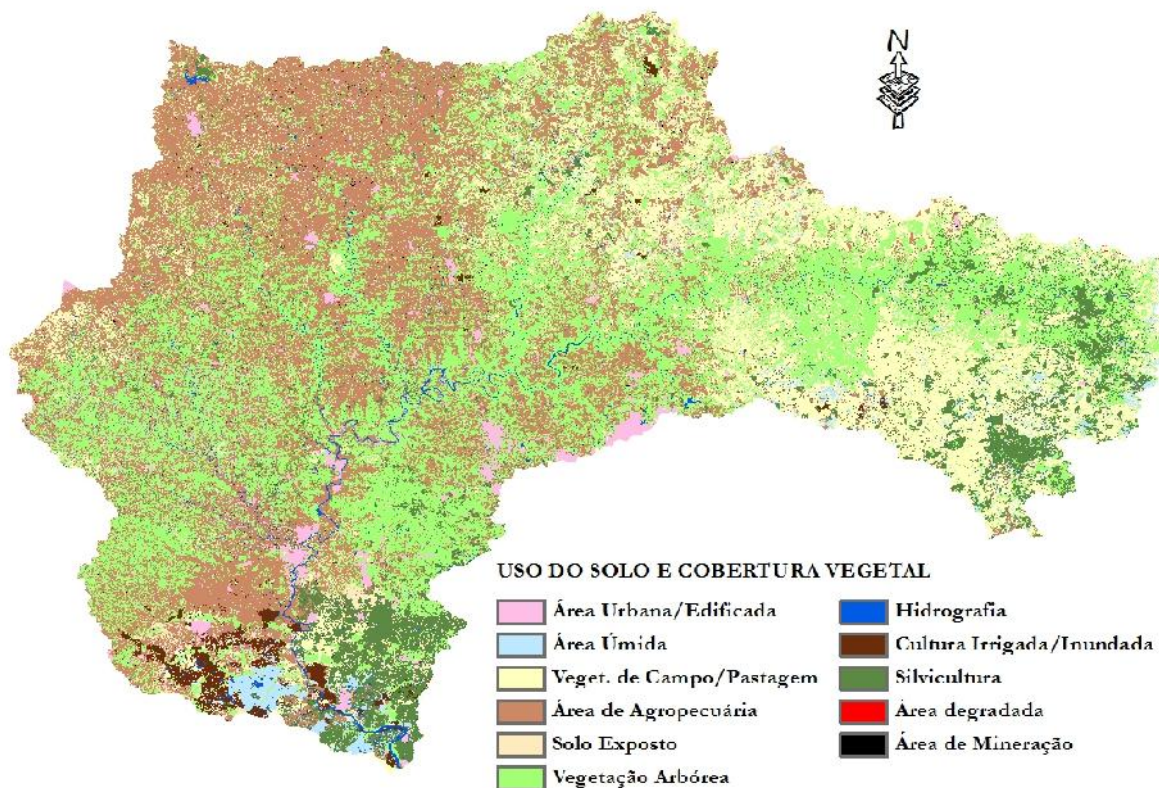
**Figura 6 - Mapa de solos reclassificado para a bacia do Taquari-Antas.**



## 2.5. Mapa do uso de solo

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 (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), conforme apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**A16 8 seguir.

**Figura 7 - Mapa de uso do solo e cobertura vegetal para a bacia do Taquari-Antas. Fonte: DRH/SEMA**



**Tabela 7 - 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
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
<b>TOTAL</b>		<b>100,00</b>

Para a reclassificação, considerou-se que as classes "Vegetação de campo / pastagens" e "Solo exposto" possam ser representadas simplesmente por "campos". Áreas artificiais (e.g. áreas urbanas) são locais com capacidade elevada para geração de escoamento superficial, portanto foram classificadas como "Áreas Semi-Impermeáveis". Áreas de mineração e áreas degradadas foram incluídas nesta classificação, o que acaba causando pouco efeito em função do baixo percentual de área correspondente. Vegetação

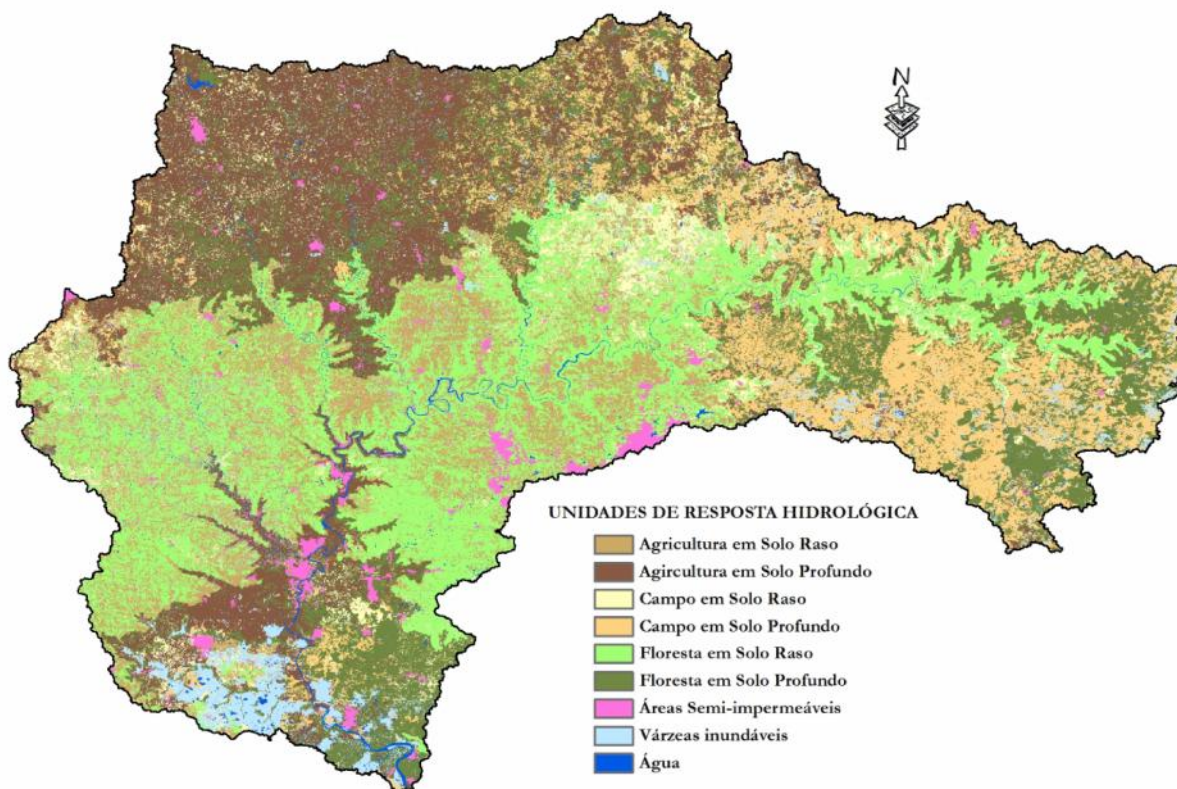
arbórea e silvicultura foram agrupadas na classe "Floresta", enquanto que áreas de Cultura Irrigada / Inundada e áreas úmidas foram classificadas como "Várzeas Inundáveis".

## 2.6. Definição final das URHs

Os dois mapas reclassificados de uso e tipo do solo apresentados foram sobrepostos para a criação de classes de Unidades de Resposta Hidrológica, compondo o conjunto final de parâmetros a serem calibrados no MGB-IPH. Entretanto, algumas das combinações geradas simplesmente não são diferenciáveis (ex: classe "água" em solo profundo ou raso, ou "água" com qualquer tipo de classe de cobertura vegetal, deve compor uma única classe "água", pois não há importância hidrológica na distinção entre os solos, nem entre os tipos de cobertura vegetal, das regiões cobertas por água), ou não ocorrem, seja por acaso ou porque certos tipos de vegetação ou uso da terra são incompatíveis com certos 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 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

**Figura 8 - Mapa final com a definição de Unidades de Resposta Hidrológica (URH) para a bacia do Taquari-Antas.**



## 2.7. Discretização do MGB-IPH

### 2.7.1. Definição das minibacias

A discretização da bacia em minibacias é efetuada a partir de uma divisão nos pontos de confluência entre dois trechos de rio ou em pontos de controle como reservatórios, tomadas d'água e estações de medições de vazão. A inserção de uma minibacia com exutório sobre o ponto de controle é particularmente importante, pois permite que os hidrogramas gerados pelo modelo sejam compatíveis em relação às informações do local para onde o mesmo esteja sendo simulado (ou controlado, no caso). Para o procedimento de discretização utilizou-se o ArcHydro, um conjunto de ferramentas desenvolvido pela Universidade do Texas em parceria com a empresa ESRI, que opera internamente ao *software* ArcGIS (Maidment, 2002). Uma sequência típica de utilização das ferramentas ArcHydro inicia com o MDE, a partir do qual são obtidas informações como direções de escoamento, área de drenagem, rede de drenagem, definição de trechos de rios bem como de bacias hidrográficas. No caso específico da discretização da bacia, a delimitação de bacias é importante. O resultado final desta discretização foi a geração de 980 minibacias.

### 2.7.2. Definição das sub-bacias

Para a delimitação das sub-bacias foram consideradas as localizações dos postos fluviométricos com dados horários disponibilizados pela CPRM bem como a configuração dos principais afluentes, os quais podem ser considerados como pontos de interesse para monitoramento das previsões. Seguindo esta lógica, as minibacias foram agrupadas em um total de 14 sub-bacias. Esta divisão permite que a calibração do modelo seja realizada através de diversos conjuntos de parâmetros, específicos para cada sub-bacia, o que resulta em uma melhor representação do comportamento hidrológico em regiões intermediárias.

**Figura 9 - Mapa final com a discretização do modelo para a bacia do Taquari-Antas.**



### 2.7.3. Extração das características físicas da bacia

A extração das características físicas e hidráulicas de cada minibacia necessárias para aplicação do modelo é realizada a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), utilizando uma rotina computacional desenvolvida especialmente para o MGB-IPH (Buarque *et al.*, 2011). A rotina de extração automática analisa os dados de relevo da bacia fornecidos pelo MDE bem como outras informações provenientes de pre-processamento em SIG (ex: da bacia, das minibacias, da rede de drenagem, das sub-bacias e das

URH geradas), sintetizando as informações das características fisiográficas de cada minibacia em uma tabela contendo:

- 1) Número das minibacias em ordem topológica, iniciando pelas minibacias de cabeceira até a minibacia exutório. Este número serve para organizar a ordem em que são realizados os cálculos no modelo MGB-IPH (de montante para jusante);
- 2) Coordenadas do centróide das minibacias, utilizado no processo de interpolação de dados de chuva e de variáveis climáticas. Cada minibacia terá os valores de chuva e das variáveis climáticas determinados para o seu centróide, assumindo como representativo da sua área. Desta forma, quanto maior for o número de postos disponíveis maior deve ser a discretização do modelo (nº de minibacias);
- 3) Sub-bacia para a qual pertence a minibacia. As sub-bacias têm a função de permitir a formação de conjuntos distintos de parâmetros, os quais podem ser necessários à calibração do modelo hidrológico em diferentes regiões internas à bacia;
- 4) Área de drenagem, utilizada principalmente nos cálculos de vazão gerada em cada minibacia;
- 5) Área de drenagem total a montante de cada minibacia. Esta área é utilizada para calcular características de seção transversal necessárias à propagação de vazão nos rios, com base numa relação geomorfológica entre a área de drenagem e a largura do rio;
- 6) Comprimento e declividade do trecho de rio, pertencente à rede de drenagem, que atravessa a minibacia. Estas são informações utilizadas para calcular a propagação de vazão nos rios;
- 7) Comprimento e declividade do afluente mais longo dentro de uma minibacia. Estes parâmetros são utilizados no cálculo do tempo de concentração de cada minibacia;
- 8) Número da minibacia localizada imediatamente a jusante. Esta informação permite a propagação da vazão de uma minibacia para a próxima;
- 9) Ordem do curso d'água da minibacia. Esta informação é útil para organizar a ordem em que são realizados os cálculos no modelo (de montante para jusante);
- 10) Percentual da área da minibacia correspondente à parcela de cada uma das Unidades de Resposta Hidrológica (URH). Estes percentuais indicam a fração da área da minibacia que terá um determinado comportamento hidrológico, dado com base nas características físicas identificadas na região considerada.

## **2.8. Calibração e verificação do MGB-IPH na bacia do Taquari-Antas**

A calibração do modelo hidrológico consiste em encontrar o valor dos parâmetros que resultem em uma boa concordância entre dados observados e calculados. Esse ajuste pode ser feito manualmente ou através

de um algoritmo de otimização automática, porém nesse caso o ajuste manual foi adotado exclusivamente devido às simplificações utilizadas para adequar os dados para intervalo de tempo horário.

Alguns dos parâmetros de pouca sensibilidade são fixos e estão definidos implicitamente no modelo, como é o caso do coeficiente de rugosidade de Manning e parte dos parâmetros relacionados ao movimento de água no solo. Outros parâmetros - os chamados fixos - são definidos à priori, enquanto que os parâmetros calibráveis estão associados às propriedades físicas das URHs e devem ser ajustados, uma vez que o modelo é mais sensível aos mesmos. As **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **A16 Erro! Fonte de referência não encontrada.** resumem os parâmetros utilizados pelo MGB-IPH.

**Tabela 8 - Parâmetros fixos do modelo MGB-IPH.**

Parâmetro Fixo	Descrição
Índice de Área Foliar (IAF)	O IAF expressa a relação entre a área das folhas de todas as plantas e da área de uma parcela de solo. É um parâmetro adimensional ( $m^2 \cdot m^{-2}$ ) e que, em geral, pode ser medido ou estimado a partir de informações na bibliografia.
Albedo	O albedo é a parcela da radiação solar que é refletida ao atingir a superfície do solo, considerando sua cobertura vegetal.
Resistência Superficial	A resistência superficial representa a resistência ao fluxo de umidade do solo, através das plantas, até a atmosfera. Esta resistência é diferente para os diversos tipos de plantas e depende de variáveis ambientais como a umidade do solo, a temperatura do ar e a radiação recebida pela planta.
Altura do Dossel	A altura média da vegetação é utilizada no modelo hidrológico para estimar a resistência aerodinâmica, que atua no controle da evapotranspiração. Quanto maior a resistência aerodinâmica, menor é o fluxo de evapotranspiração. A resistência aerodinâmica é considerada menor em florestas, onde a altura média da vegetação é maior e intensifica a turbulência do vento.

Fonte: Adaptado de Fan (2011).

**Tabela 9 - Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH.**

Parâmetro Calibrável	Descrição
Capacidade de Armazenamento do Solo ( $W_m$ )	Capacidade de armazenamento de água no solo. Valores baixos implicam em maiores vazões escoadas devido à saturação mais rápida do solo.
Forma da relação entre armazenamento e saturação (b)	Parâmetro empírico que define a variabilidade da capacidade de armazenamento do solo em torno de $W_m$ .



Parâmetro Calibrável	Descrição
Vazão durante a estiagem (Kbas)	Parâmetro que controla a vazão durante a estiagem. Valores mais altos implicam em maior escoamento subterrâneo.
Quantidade de água que escoo subsuperficialmente (Kint)	Parâmetro controla a quantidade de água da camada de solo que escoo subsuperficialmente.
Forma da curva de redução da drenagem intermediária (XL)	Controla a forma da curva de redução da drenagem intermediária ou sub-superficial do solo.
Fluxo do reservatório subterrâneo para a camada superficial (CAP)	Controla a possibilidade de retorno de água subterrânea para a camada de solo.
Armazenamento Residual (Wc)	Limita o armazenamento residual e subterrâneo.
Calibração da propagação superficial (CS)	Parâmetro para calibração da propagação superficial nas mini bacias.
Calibração da propagação sub-superficial (CI)	Parâmetro para calibração da propagação subterrânea nas mini bacias.
Retardo do reservatório subterrâneo (CB)	Parâmetro que representa o retardo do reservatório subterrâneo.

Fonte: Adaptado de Fan (2011).

A calibração foi realizada considerando o ajuste visual dos hidrogramas observado e simulado em diferentes locais, bem como valores quantitativos de diferentes estatísticas normalmente utilizadas na calibração de modelos hidrológicos, como o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS); o coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões ( $NS_{Log}$ ) e o erro médio de volume.

Em relação aos coeficientes de Nash-Sutcliffe, valores que correspondem à unidade indicam a perfeita concordância entre dados simulados e observados, enquanto que valores negativos indicam que a média dos dados observados é um melhor preditor do que os resultados do modelo. Enquanto que o índice NS dá um maior peso para as maiores cheias, o  $NS_{Log}$  possibilita a avaliação das vazões baixas e pequenos picos. Já o erro de volume permite a avaliação de outros fatores, como perdas por evapotranspiração, por exemplo.

O período de calibração do MGB-IPH ocorreu entre junho/2009 a dezembro/2011, sendo o período seguinte (2012-2013) adotado para a verificação do modelo. De uma maneira geral, as medidas

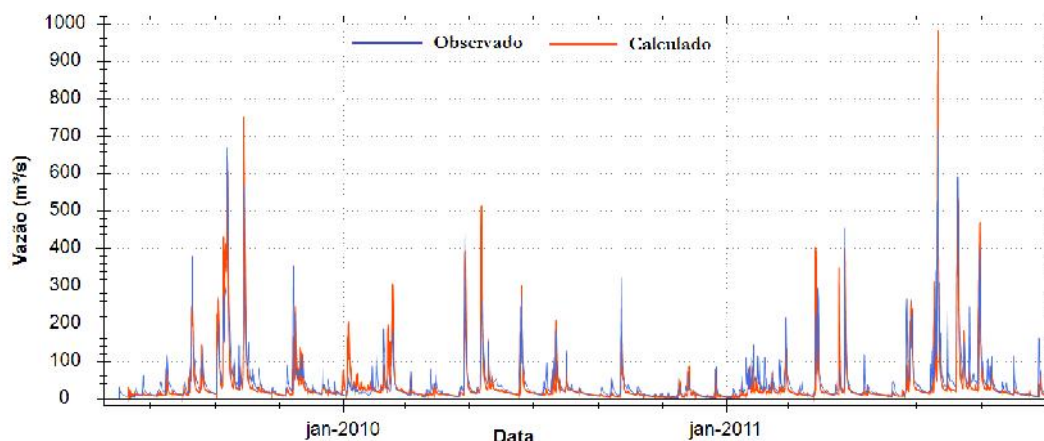
estatísticas tiveram um bom resultado na bacia do Taquari-Antas durante a calibração, conforme pode ser verificado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Apesar do erro de volume ser relativamente alto, os coeficientes de Nash-Sutcliffe podem ser considerados aceitáveis para o período, sendo em sua maioria superiores a 0,8.

**Tabela 10 - Índices de eficiência do MGB-IPH para a bacia do Taquari-Antas - período de calibração.**

Código	Nome da Estação	Nash-Sutcliffe	Log Nash-Sutcliffe	V
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%

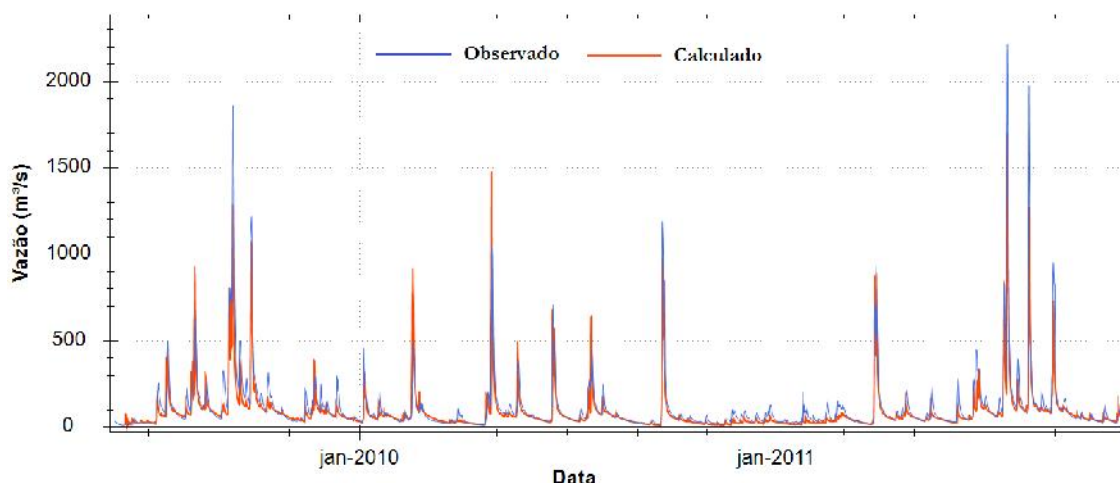
A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra os hidrogramas observado e calculado do rio Tainhas no posto fluviométrico de Passo Tainhas, próximo às cabeceiras do Rio das Antas, cuja área de drenagem deste posto fluviométrico é de 1.120 km<sup>2</sup>. A concordância dos hidrogramas para este posto foi razoável no período de calibração, o que pode estar associada a fatores como pequena área de drenagem em relação à concepção do modelo hidrológico e baixa cobertura de postos pluviométricos a montante do local.

**Figura 10 - Resultado final da calibração horária para o posto de Passo Tainhas (86410000), no Rio Tainhas, período de junho/2009 a dezembro/2011.**



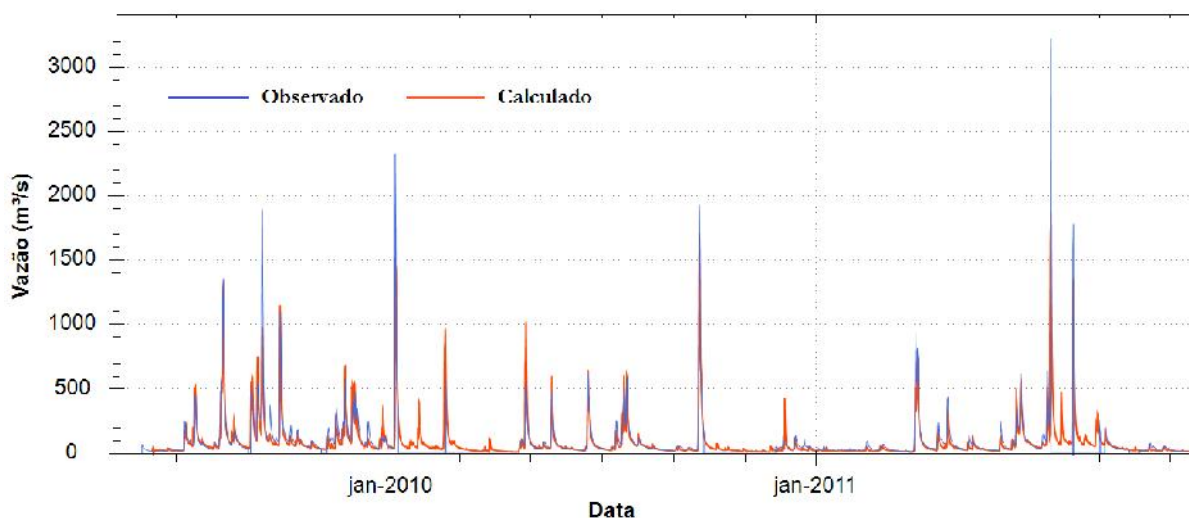
A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra os hidrogramas no posto fluviométrico de Barra do Guaiaveira, situado no rio Turvo - afluente do rio da Prata, cuja área de drenagem é de 2.820 km<sup>2</sup>. Neste caso, os resultados podem ser considerados bons apesar do erro de volume ter sido o de maior magnitude entre os demais postos analisados.

**Figura 11 - Resultado final da calibração horária para o posto de Passo Barra do Guaiaveira (86410000), no Rio Turvo, período de junho/2009 a dezembro/2011.**



**A Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra os hidrogramas observado e calculado do rio Guaporé no posto fluviométrico de Santa Lúcia, cuja área de drenagem deste posto fluviométrico é de 2.470 km<sup>2</sup>. Observa-se que as vazões mais baixas são geralmente intensificadas pelo modelo, enquanto que as vazões mais altas são em sua maioria subestimadas. Isso pode estar relacionado a uma dificuldade no método de propagação do modelo durante as maiores cheias bem como uma possível incoerência da curva-chave para estas situações, uma vez que a mesma é obtida por extrapolação nesta faixa de vazão.

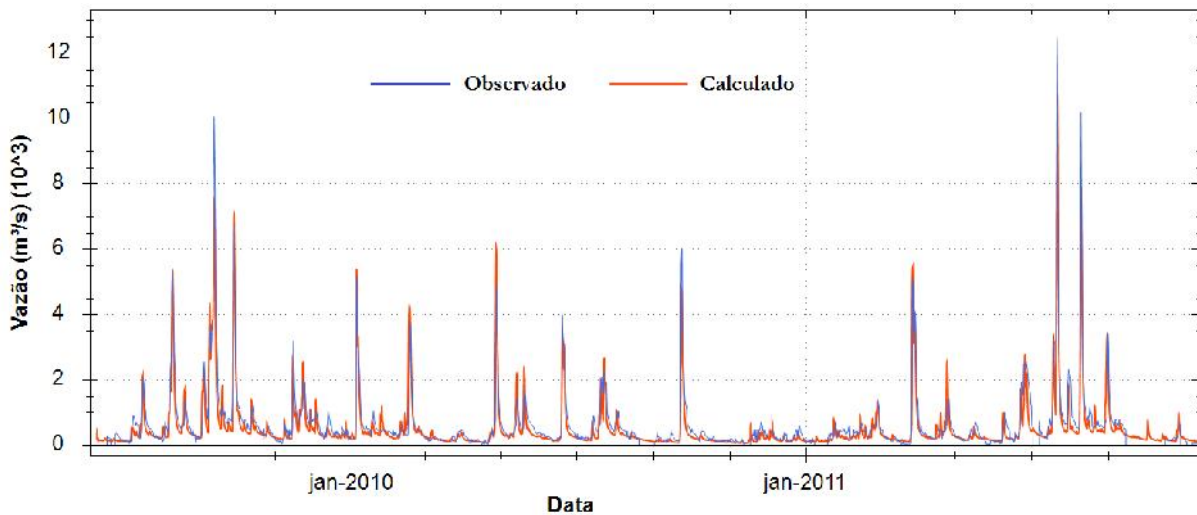
**Figura 12 - Resultado final da calibração horária para o posto de Santa Lúcia (86580000), no rio Guaporé, período de junho/2009 a dezembro/2011.**



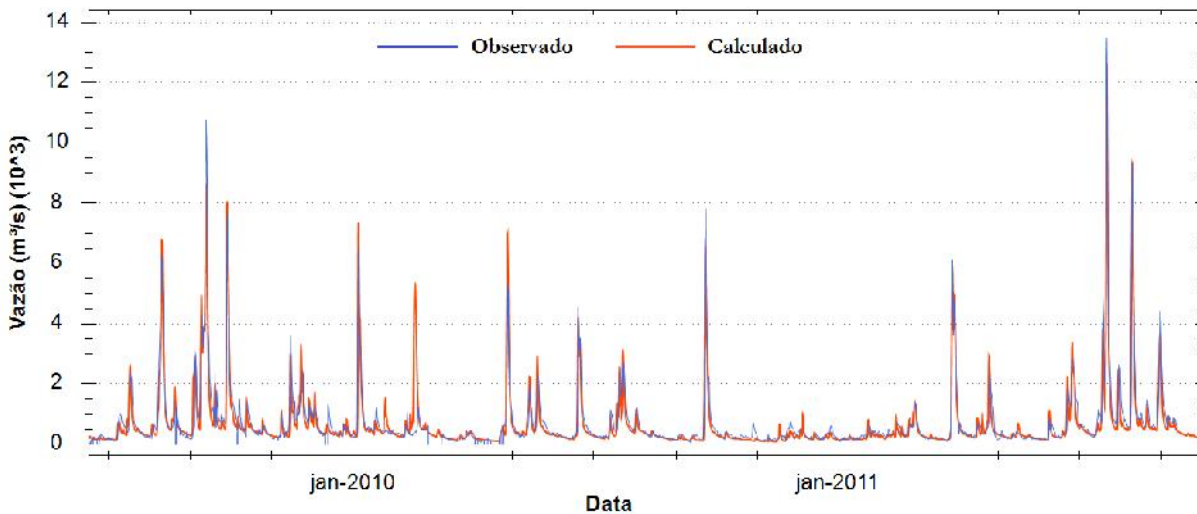
**As Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **A16 Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresentam os hidrogramas observado e calculado do rio Taquari nos postos fluviométricos de Muçum e Encantado. A área de drenagem destes postos fluviométricos são de, respectivamente, 16.000 e 19.100

km<sup>2</sup>, cujos valores correspondem por cerca de 60 e 70% da área de drenagem total da bacia. Observa-se que as observações e o resultado da simulação possuem uma boa concordância, tanto nos períodos de vazões mais altas como nos períodos de pouca chuva.

**Figura 13 - Resultado final da calibração horária para o posto de Muçum (86510000), no período de junho/2009 a dezembro/2011.**



**Figura 14 - Resultado final da calibração horária para o posto de Encantado (86720000), no período de junho/2009 a dezembro/2011.**



Quanto ao período adotado para a verificação do modelo, entre Janeiro / 2012 e Dezembro / 2013, as medidas estatísticas foram de uma maneira geral melhores em relação ao erro de volume, porém um pouco piores em relação aos índices NS e NS<sub>Log</sub>, conforme pode ser verificado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

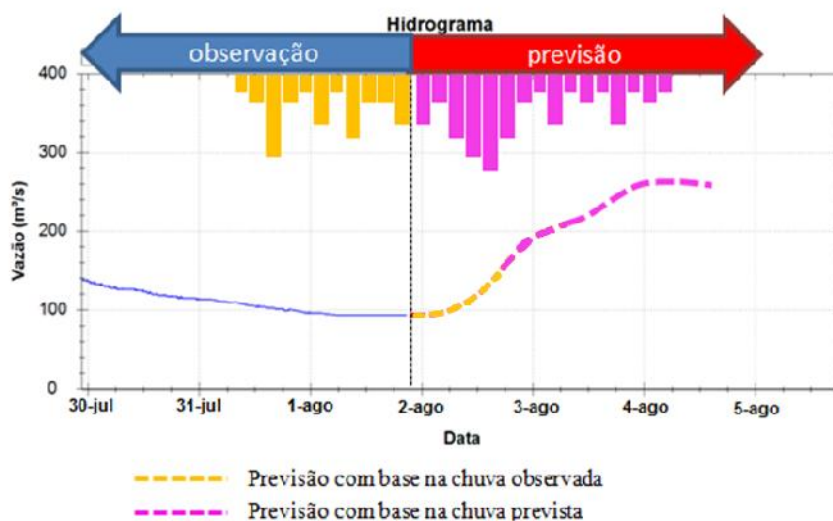
**Tabela 11 - Índices de eficiência do MGB-IPH para a bacia do Taquari-Antas - período de verificação.**

Código	Nome da Estação	Nash-Sutcliffe	Log Nash-Sutcliffe	V
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%

## 2.9. ETAPA 2: Elaboração do sistema de previsão

Após a conclusão do procedimento de calibração, deu-se início ao desenvolvimento do sistema de previsão propriamente dito. O princípio de funcionamento deste sistema, de caráter experimental, é a aquisição e padronização dos dados observados em tempo real - chuva, nível e vazão - por parte das estações telemétricas, introdução das previsões meteorológicas e realização da previsão de cheia em horizonte em até médio prazo.

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 instante, previsões de precipitação são utilizadas a partir do primeiro intervalo de tempo após o término da chuva observada, conforme apresentado no exemplo esquemático da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

**Figura 15 - Previsão com base em diferentes fontes de informação.**


A seguir são apresentados os detalhes relacionados a cada um dos procedimentos necessários, desde o processamento das informações em tempo real até a disponibilização das previsões hidrológicas geradas.

#### Processamento das informações telemétricas em tempo real

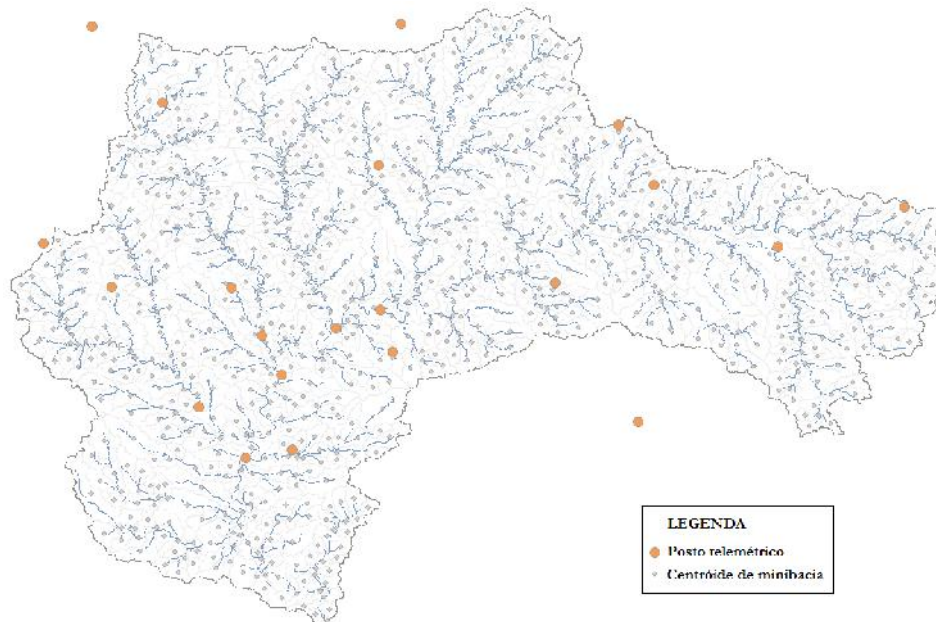
As informações que são obtidas da rede telemétrica - CPRM, UNIVATES, INMET e CERAN - são rearranjadas em um formato padrão e acopladas a uma base de dados existente, composta pelo período de dados mostrado anteriormente na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Esta base de dados, além de atuar como uma forma de armazenamento dos registros provenientes de diversas instituições, é particularmente importante para fornecer ao modelo MGB-IPH uma condição inicial no momento imediatamente anterior à previsão, já que a qualidade da mesma depende fortemente desta condição.

Em outras palavras, é necessário que se faça uma simulação entre um período de alguns meses no passado e o momento atual, de maneira que seja possível conhecer quais as condições de umidade no solo e a vazão dos rios na bacia do Taquari-Antas no instante em que se deseja estimar as condições hidrológicas futuras. Por exemplo, em uma situação de período seco, um determinado volume de chuva nas próximas 24 horas pode não ser suficiente para causar uma enchente; em contrapartida, em condições de grande umidade no solo devido à precipitação ocorrida em dias anteriores, esta mesma quantidade de chuva pode acabar ocasionando uma cheia já que nestes casos a infiltração no solo é reduzida, o que promove um grande aumento no escoamento superficial.

No sistema de previsão experimental, esta simulação é entendida como um "aquecimento" inicial do modelo, e é realizada para um período de 6 meses anterior à previsão. Para tanto, os dados de chuva já atualizados na base dados existente são espacializados para os centróides das minibacias (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) através de um procedimento de interpolação, seguindo o método do inverso pela distância ao quadrado. Durante a simulação, os dados de vazão observados na defluência das usinas hidrelétricas 14 de Julho, Monte Claro e Castro Alves são utilizados para substituição da vazão calculada nestes locais, cuja finalidade é melhorar a representatividade da simulação pelo modelo.

A partir desta preparação inicial, informações de precipitação prevista são obtidas e fornecidas em um formato específico para acoplamento no MGB-IPH, o que possibilita a sua conversão para valores de vazão nos intervalos de tempo futuros.

**Figura 16 - Espacialização das informações de precipitação da rede telemétrica para a bacia do Taquari-Antas.**



### 2.9.1. Acoplamento de previsões meteorológicas

As previsões de precipitação utilizadas para geração das previsões hidrológicas são provenientes do modelo atmosférico ETA, cuja nomenclatura se refere a letra grega  $\eta$ . 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.

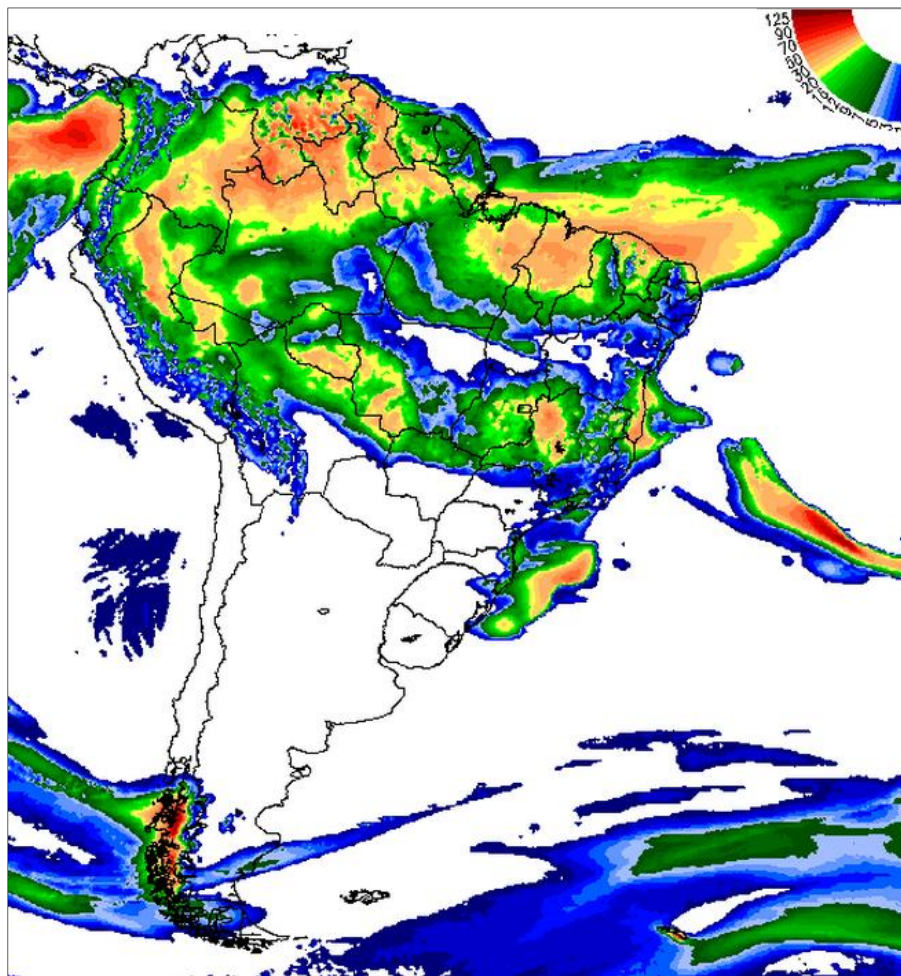
As variáveis previstas pelo ETA são dadas na forma de uma grade tridimensional com camadas verticais e resolução horizontal definida, cujos pontos (da grade) representam os locais onde as equações do modelo de previsão do tempo são resolvidas. O domínio do modelo cobre toda a América do Sul incluindo 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. Para o sistema experimental foi selecionada a versão com resolução horizontal de 15 km (espaçamento da grade do modelo), a qual é amplamente utilizada pelos usuários do software SISMA DEN (Sistema de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais), desenvolvido pelo INPE.

Ainda, 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/>](ftp://ftp1.cptec.inpe.br/modelos/io/tempo/regional/Eta15km/sismaden/)

Por fim, as informações de chuva prevista provenientes no formato de grade são espacializadas para os centróides das minibacias (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) através de um procedimento de interpolação. Adicionalmente, para compatibilização com a configuração do MGB-IPH as previsões de precipitação acumuladas a cada 3 horas são desagregadas para o intervalo de tempo horário, seguindo uma distribuição temporal constante equivalente a 1/3 da chuva total para cada hora.

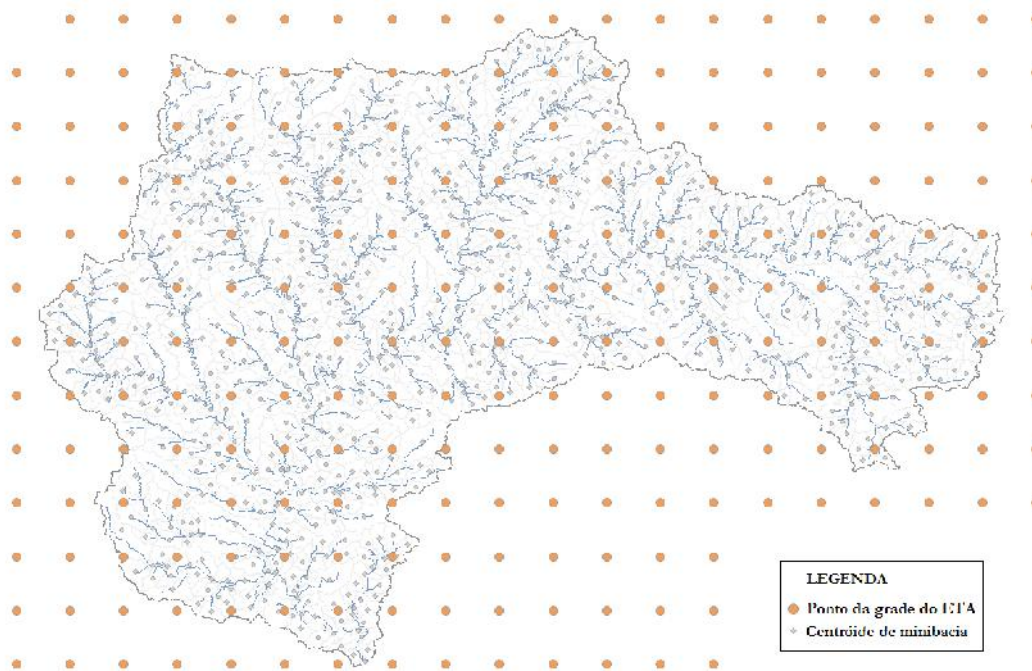
**Figura 17 - Representação do domínio do modelo atmosférico ETA, cobrindo a região da América do Sul.**



Fonte: CPTEC/INPE

**Figura 18 - Espacialização das informações de precipitação da grade do ETA para a bacia Taquari-Antas.**





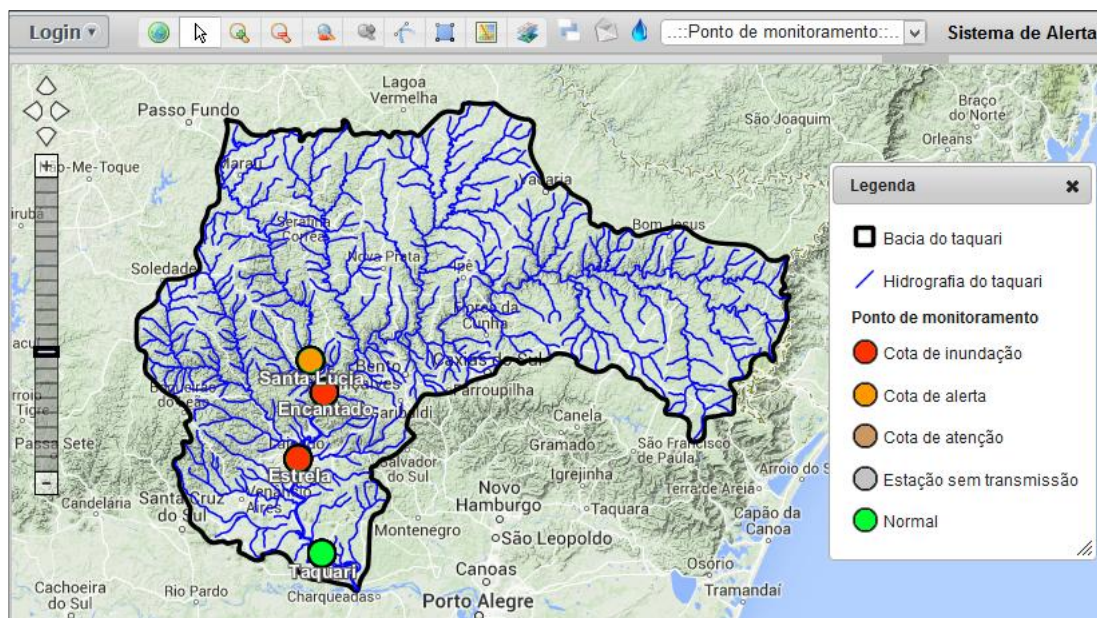
### 2.9.2. Identificação e compatibilização de limiares de referência

Após o acoplamento de todas as informações necessárias, o modelo MGB-IPH é então rodado em modo "previsão em tempo real" para geração das vazões nos intervalos de tempo futuros. Entretanto, devido ao fato do modelo hidrológico fornecer resultados apenas em termos de vazões, surge uma necessidade de compatibilização destes resultados de maneira a produzir informações que possam ser úteis sob o ponto de vista dos usuários finais, como a própria Defesa Civil. Em um Sistema de Alerta contra Cheias, o monitoramento é normalmente realizado com base em determinados níveis (limiares) de referência que definem o estado de criticidade do rio, conforme exemplificado a seguir (Tucci, 2005):

- **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;
- **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;
- **Nível de emergência (ou inundação):** nível no qual potencialmente ocorrem prejuízos materiais e humanos.

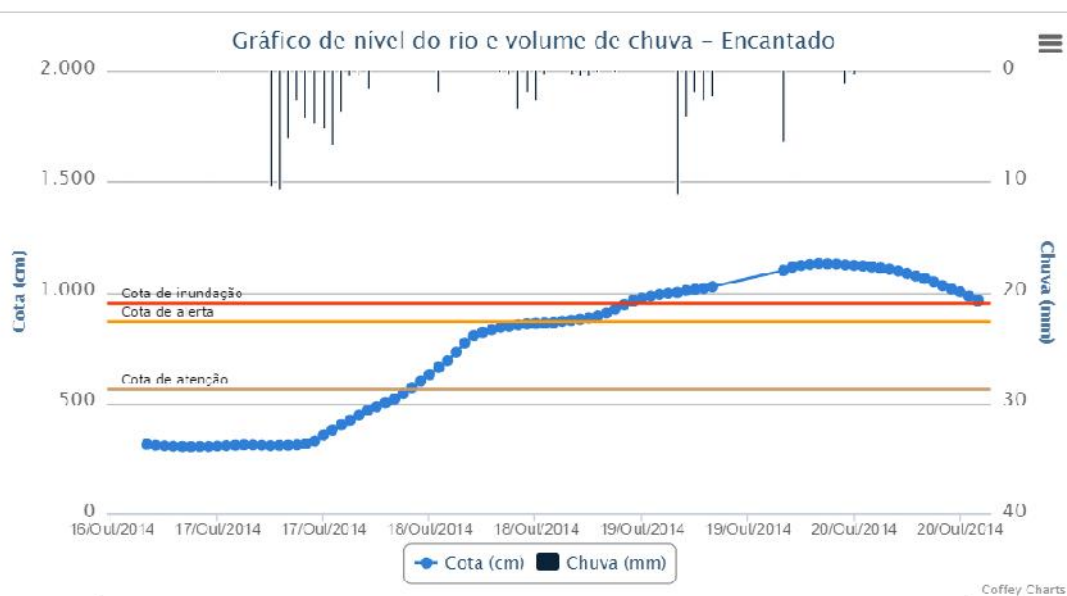
Neste contexto, atividades de monitoramento e previsão hidrológica vêm sendo realizadas a mais de 30 anos através do Sistema de Alerta de Cheias no Brasil (SACE) operado pela CPRM, sendo que em caso de risco de inundação, boletins são emitidos para a Defesa Civil (nacional, estadual e municipal), incluindo o CEMADEN, prefeituras, além de outras entidades. Atualmente, o SACE é implementado em algumas bacias com alta suscetibilidade a inundações, como é o caso do Rio Doce, do Rio Caí e do próprio objeto do presente projeto - a bacia do Taquari-Antas, cujo sistema encontra-se em atual fase de implementação. Outras bacias, como a do Rio Muriaé, Parnaíba, e algumas bacias da região Norte do Brasil estão recebendo equipamentos para monitoramento e alerta contra cheias, cuja operação é prevista em breve.

**Figura 19 - Interface web do sistema SACE - Sistema de Alerta Contra Enchentes da CPRM, com destaque para a bacia do Taquari-Antas.**



Os círculos no mapa acima representam pontos de monitoramento distribuídos ao longo do rio principal bem como em afluentes de interesse, geralmente situados em locais com a presença de réguas limimétricas para facilitar o nivelamento e aferição dos equipamentos. Enquanto isso, as cores indicam o grau de criticidade em que se encontra o rio no ponto de monitoramento, de maneira que o usuário tenha uma visão geral da situação atual encontrada na bacia hidrográfica. Para cada um dos locais indicados no mapa é possível, também, obter informações mais detalhadas acerca dos níveis dos rios, conforme apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

**Figura 20 - Gráfico com limiares de referência do sistema SACE da CPRM, para a cidade de Encantado/RS.**



Fonte: <http://www.cprm.gov.br/sace/#>

No gráfico acima, é possível verificar o cotograma dos últimos 5 dias para a cidade de Encantado, além do volume de precipitação e dos níveis de referência - atenção, alerta e inundação - referentes a este posto fluviométrico. Da mesma forma, os limiares de referência foram definidos pela CPRM para cada um dos locais cujo monitoramento é realizado, sendo que os níveis associados estão apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 12 - Níveis de referência do sistema SACE-CPRM, na bacia do Taquari-Antas. Adaptado de Chagas *et al* (2014).

Ponto de monitoramento	Nível de referência (cm)		
	Atenção	Alerta	Inundação
Santa Lúcia	180	280	500
Muçum	680	1.000	1.100
Encantado	560	870	950
Porto de Estrela	1.360	1.700	1.800
Bom Retiro do Sul	-	1.350	1.420
Porto Mariante	730	1.000	1.060
Taquari	680	800	820

No caso do sistema experimental desenvolvido neste projeto, a estação de Encantado foi selecionada inicialmente como local de previsões de curto a médio prazo, uma vez que a estação possui curva-chave para associação entre nível e vazão - além de não possuir influência da barragem de Bom Retiro do Sul, ou de outra condição de jusante, como o remanso ocasionado pelo rio Jacuí. Particularmente, estas características não são bem representadas através do método de propagação implementado no modelo

MGB-IPH, porém poderiam ser simuladas por meio técnicas mais complexas, a exemplo da modelagem hidrodinâmica.

Sendo assim, os limiares de referência de vazão, determinados após a aplicação da curva-chave, resultaram na configuração apresentada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Além disso, foi inserido um limiar de vazão adicional, de maneira a introduzir uma referência para eventos mais críticos. Nesse caso, utilizou-se a cota 1.340 cm para a qual já ocorrem problemas de inundação na área urbana do município, correspondendo a uma cheia de 5 anos de tempo de retorno.

**Tabela 13 - Limiares de referência em Encantado utilizados para o sistema de previsão experimental.**

Descrição do Limiar	Vazão (m <sup>3</sup> /s)
Limiar de observação (cota 560 cm) – CPRM	2.010
Limiar de alerta (cota 870 cm) – CPRM	3.910
Limiar de inundação (cota 950 cm) - CPRM	4.650
Cheia com TR = 5 anos (cota 1.340 cm)	7.950

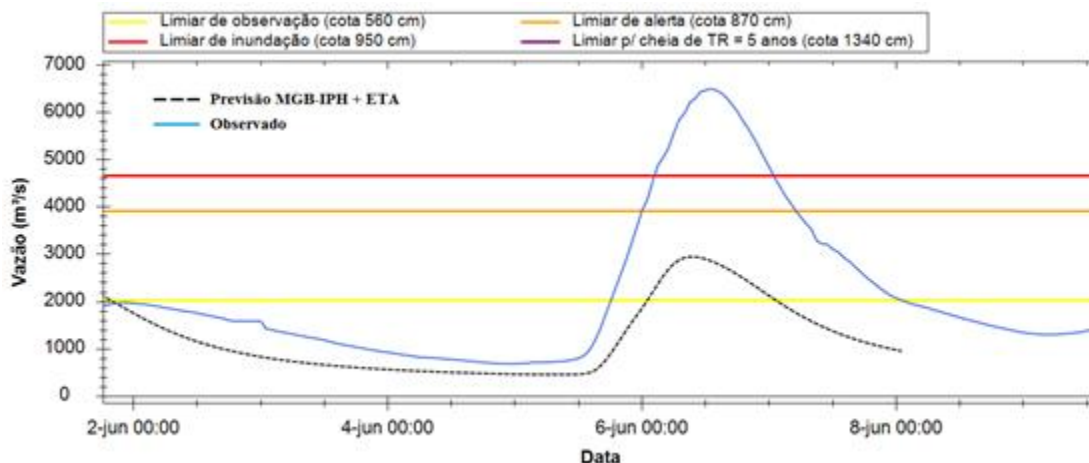
### 2.9.3. Geração dos resultados

Neste item são apresentados alguns resultados do sistema de previsão experimental, considerando um horizonte de médio prazo com até 7 dias de antecedência. Os resultados foram obtidos ao longo do decorrer do projeto, simulando uma situação de caráter operacional através da previsão hidrológica em tempo real.

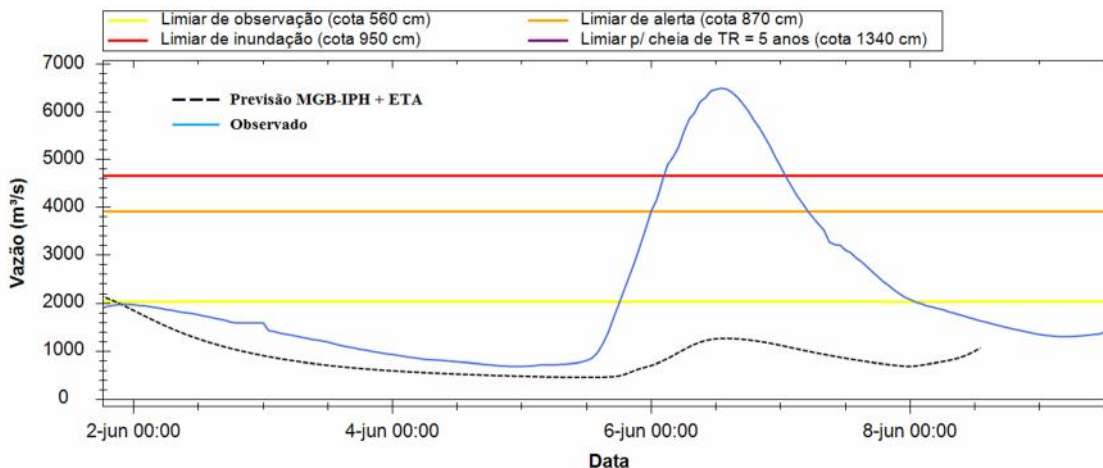
#### **Resultados para um evento de cheia de 06/06/2014**

As **Erro! Fonte de referência não encontrada. Erro! Fonte de referência não encontrada.** a A16 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresentam os hidrogramas observados e previstos para a cheia de 06/06/2014 no posto fluviométrico de Encantado, localizado no rio Taquari cerca de 10 km a jusante da confluência com o rio Guaporé. Os resultados compreendem as previsões automaticamente realizadas entre o dia 01/06 e 05/06, sendo que nesta ocasião, o pico observado atingiu aproximadamente 6.500 m<sup>3</sup>/s às 12:00 no dia 06 de junho, com uma variação de 5.500 m<sup>3</sup>/s em apenas 24 horas. Em termos de elevação de nível do rio Taquari, este se encontrava na medição 11,6 m na régua do posto fluviométrico de Encantado (em torno de 9 metros acima do nível considerado normal), no instante de ocorrência do pico.

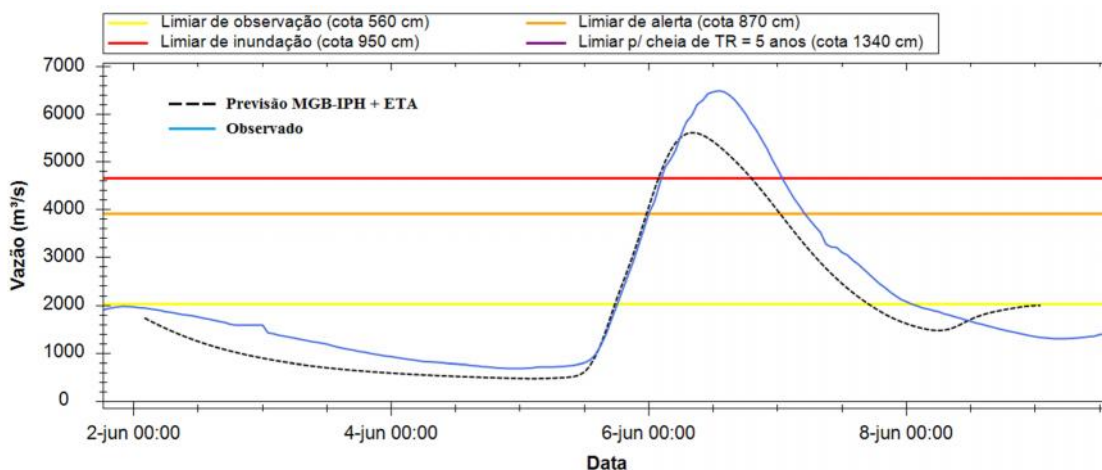
**Figura 21 - Resultados da previsão iniciada em 01/06/2014 às 00 h, para o evento do dia 06/06/2014.**



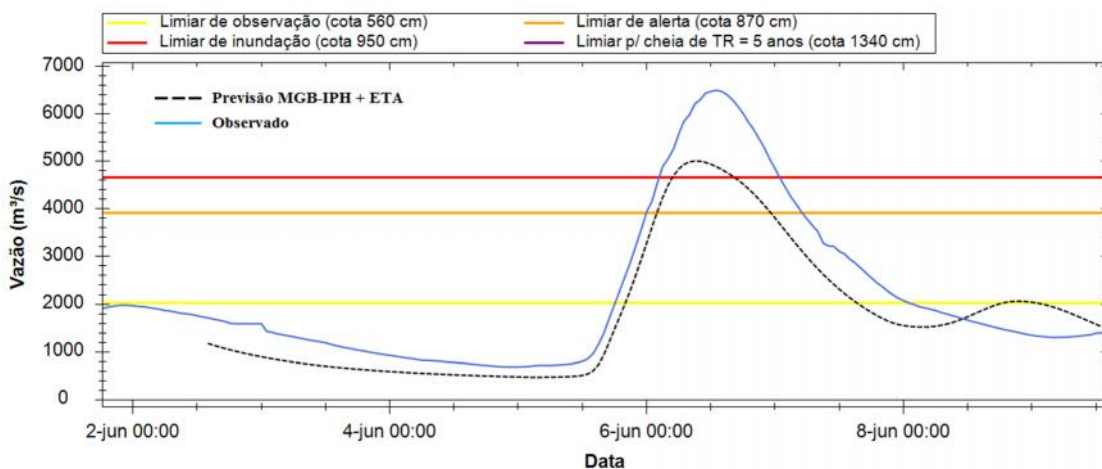
**Figura 22 - Resultados da previsão iniciada em 01/06/2014 às 12 h, para o evento do dia 06/06/2014.**



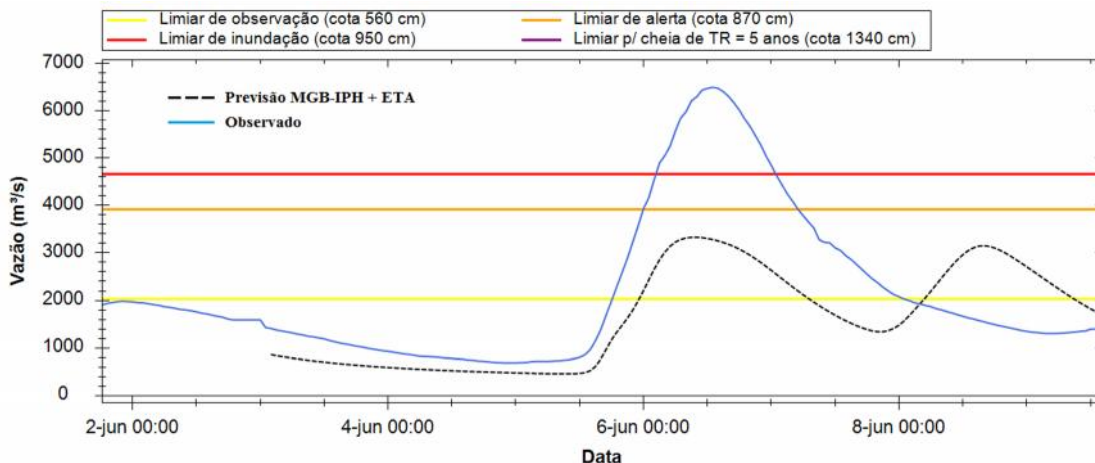
**Figura 23 - Resultados da previsão iniciada em 02/06/2014 às 00 h, para o evento do dia 06/06/2014.**

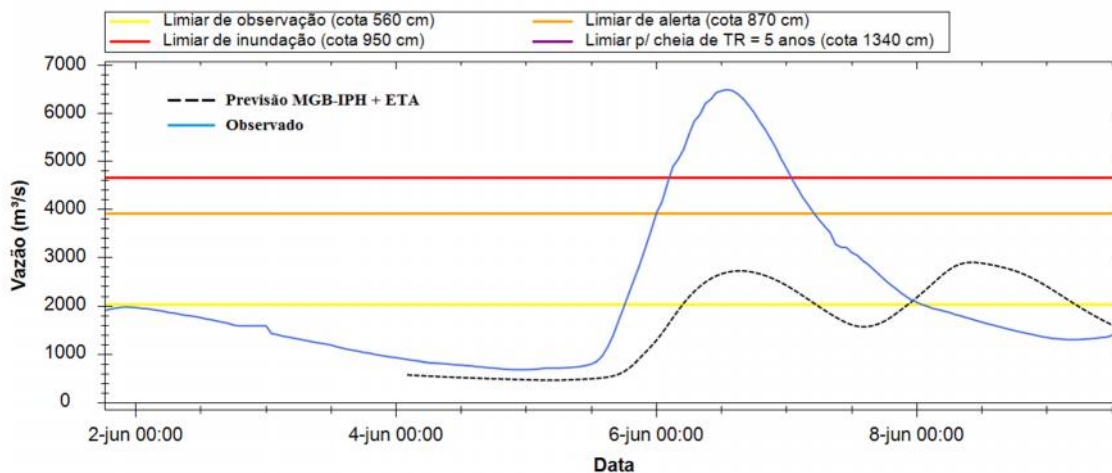
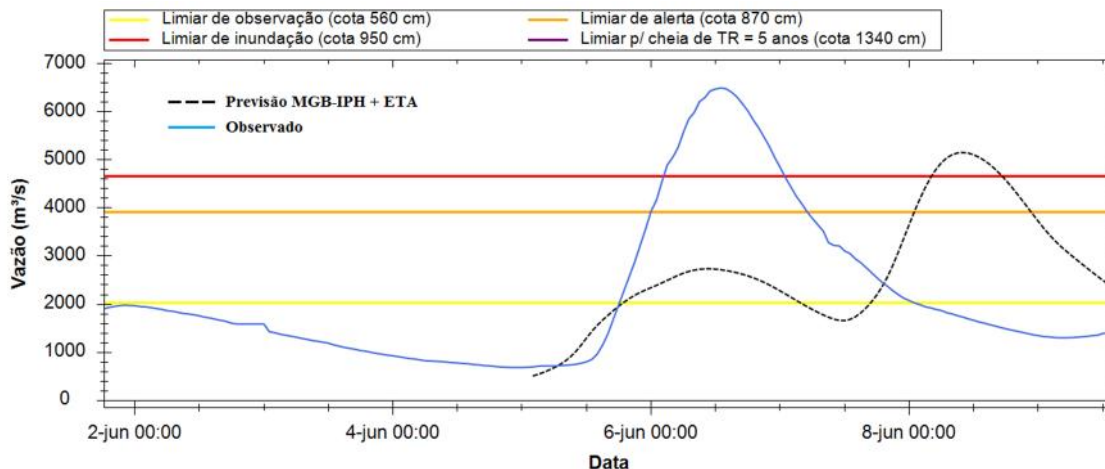


**Figura 24 - Resultados da previsão iniciada em 02/06/2014 às 12 h, para o evento do dia 06/06/2014.**



**Figura 25 - Resultados da previsão iniciada em 03/06/2014 às 00 h, para o evento do dia 06/06/2014.**



**Figura 26 - Resultados da previsão iniciada em 04/06/2014 às 00 h, para o evento do dia 06/06/2014.**

**Figura 27 - Resultados da previsão iniciada em 05/06/2014 às 00 h, para o evento do dia 06/06/2014.**


É possível observar que os hidrogramas previstos tiveram grandes variações ao longo do período analisado. Estes resultados podem ser atribuídos preponderantemente às previsões de chuva incorporadas no modelo hidrológico, já que estas podem variar substancialmente de um dia para o outro. Neste caso, apenas as previsões hidrológicas realizadas no dia 02/06 apresentaram um resultado adequado, com superação do limiar de inundação, vazão relativamente próxima da observada assim como seu próprio tempo de ocorrência. Na maioria das previsões realizadas, houve representação de uma elevação significativa após o dia 06/06, porém com um segundo pico ocorrendo aproximadamente 2 ou 3 dias após o primeiro.

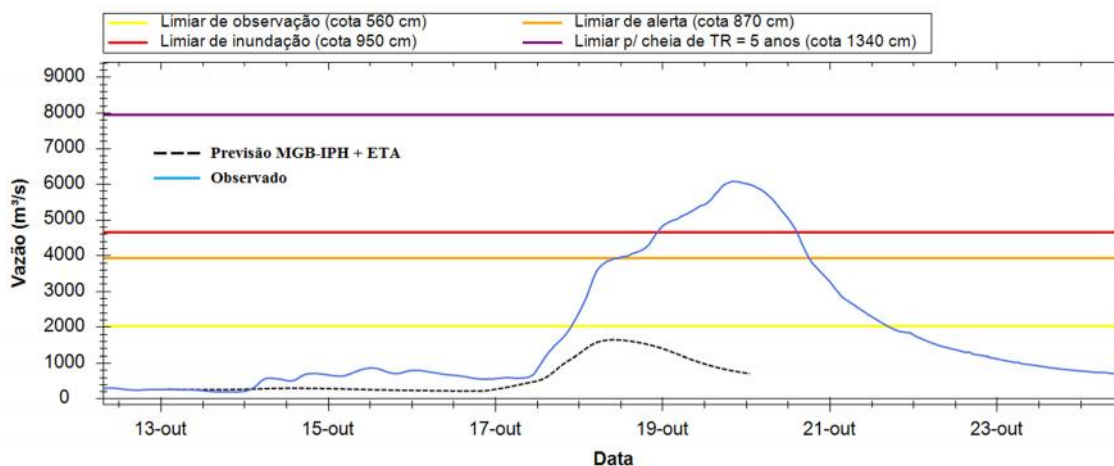
Em outras palavras, nas previsões realizadas após o dia 03/06 demonstraram que a cheia poderia ocorrer em duas etapas, porém com nível entre o limiar de observação e o de alerta. Além disso, na previsão do

dia 05/06 indicou uma intensificação do segundo pico de cheia previsto, superando o limiar de inundação e com vazão já mais próxima à observada. Neste mesmo dia (05/06) foi verificado o início do evento de precipitação que permaneceu até o dia seguinte, provocando a elevação do nível do rio Taquari até a situação de cheia.

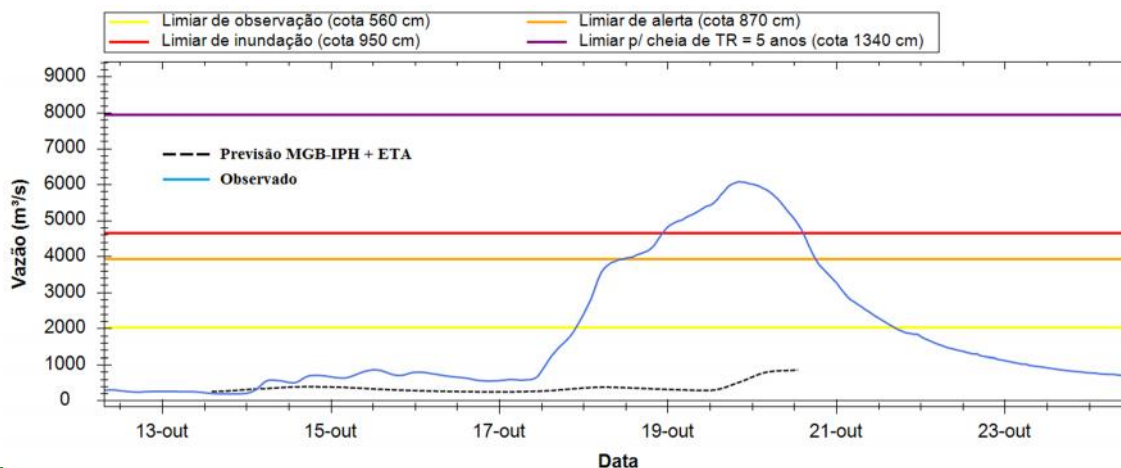
**Resultados para o evento dos dias 19-20 de outubro de 2014**

As **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a **A16 Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresentam os hidrogramas observados e previstos para a cheia de 20/10/2014, no posto fluviométrico de Encantado. Os resultados compreendem as previsões automaticamente realizadas entre o dia 13/10 e 17/10, sendo que o pico observado atingiu aproximadamente 6.000 m<sup>3</sup>/s às 18:00 no dia 19 de outubro, com uma variação de 5.500 m<sup>3</sup>/s em cerca de 2,5 dias. Em termos de elevação de nível do rio Taquari, este se encontrava na medição 11,3 m na régua do posto fluviométrico de Encantado (também em torno de 9 metros acima do nível considerado normal), no instante de ocorrência do pico.

**Figura 28 - Resultados da previsão iniciada em 13/10/2014 às 00 h, para o evento do dia 20/10/2014.**

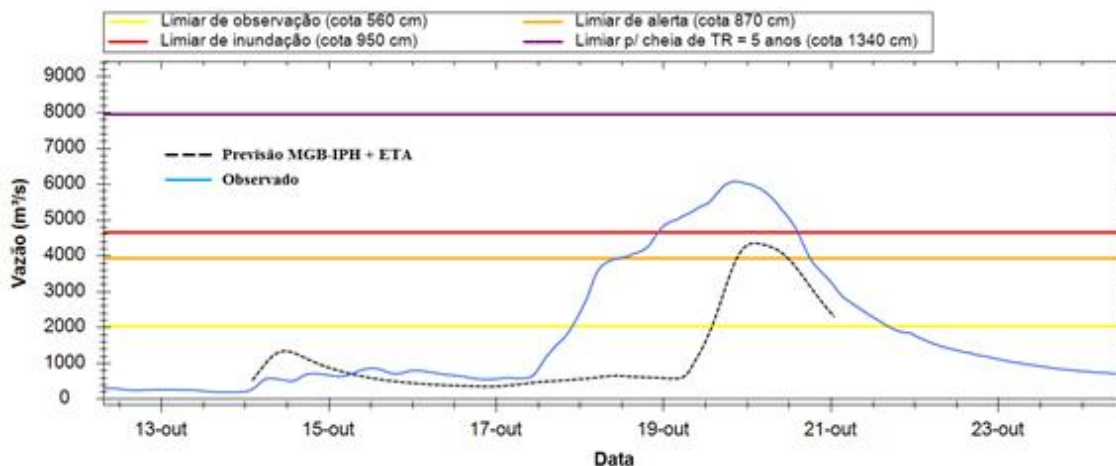


**Figura 29 - Resultados da previsão iniciada em 13/10/2014 às 00 h, para o evento do dia 20/10/2014.**

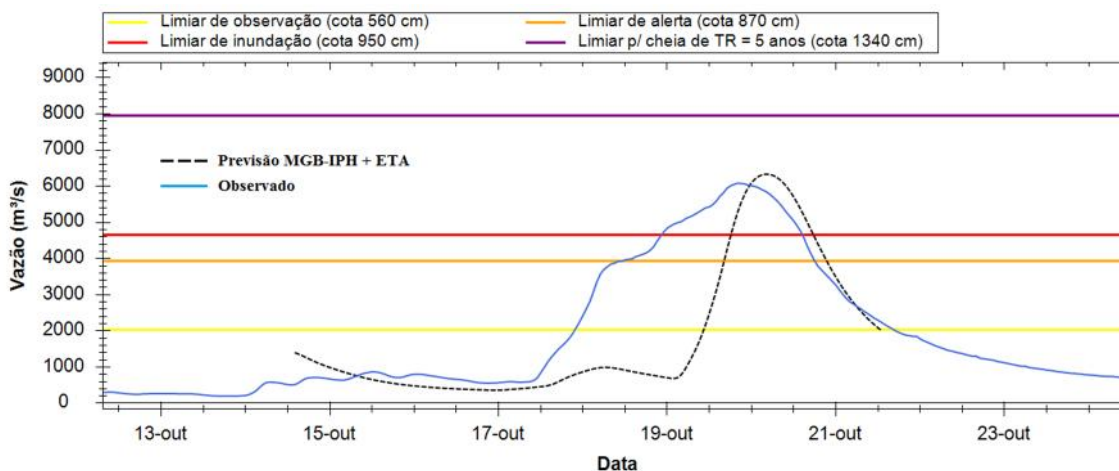




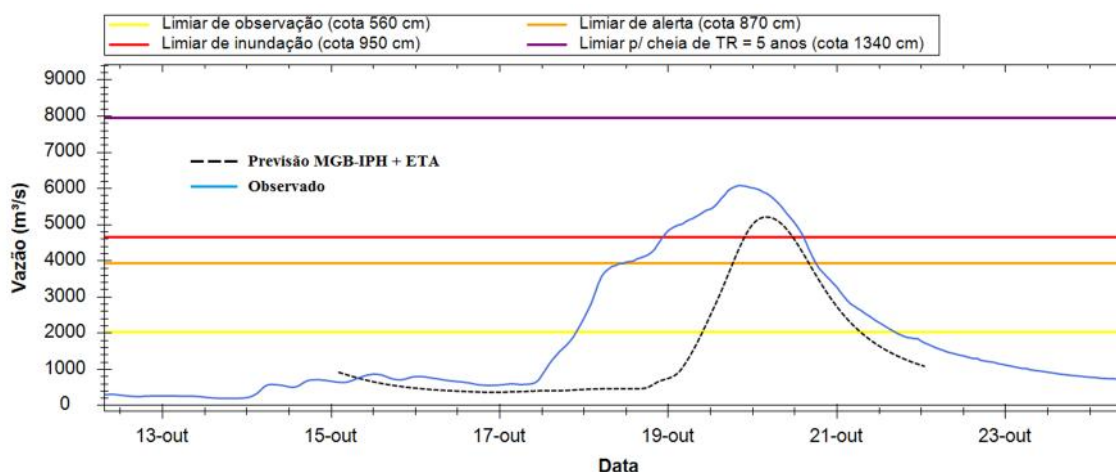
**Figura 30 - Resultados da previsão iniciada em 14/10/2014 às 00 h, para o evento do dia 20/10/2014.**



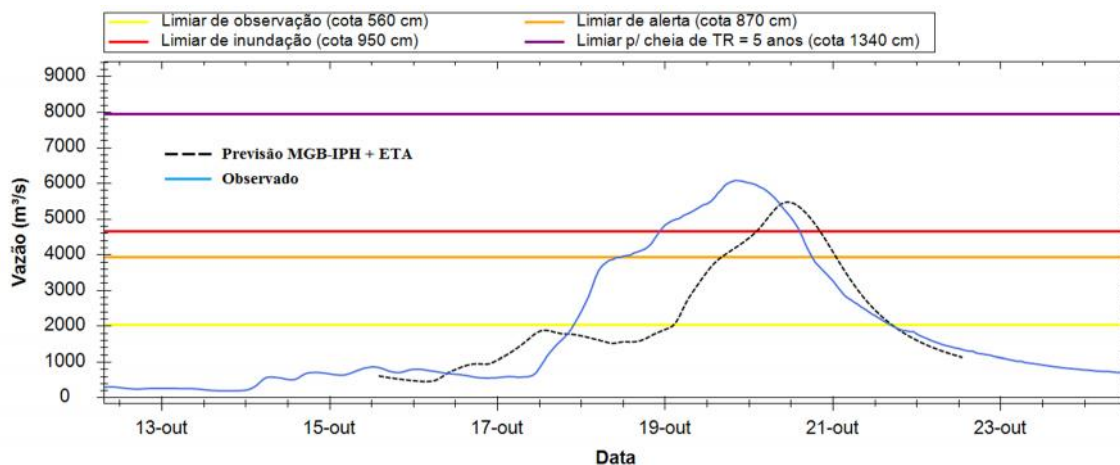
**Figura 31 - Resultados da previsão iniciada em 14/10/2014 às 00 h, para o evento do dia 20/10/2014.**



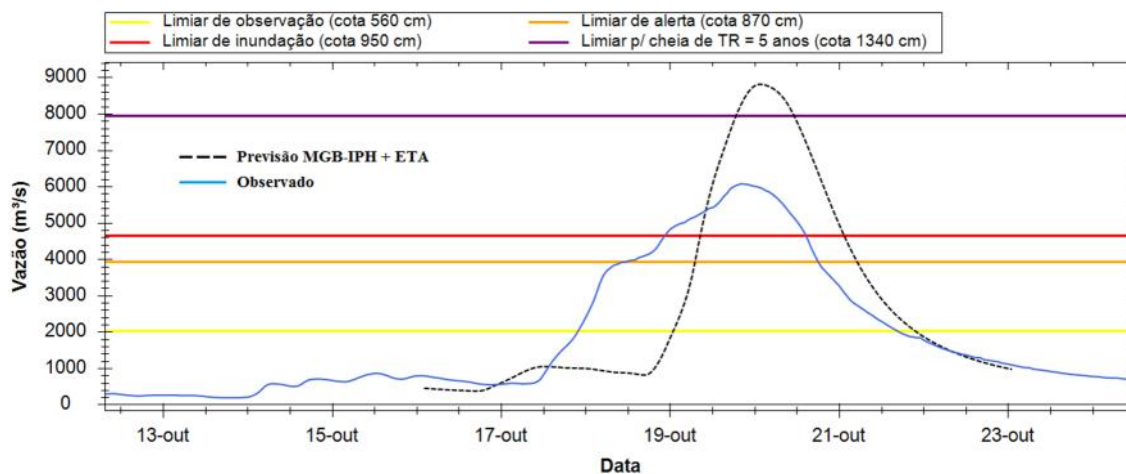
**Figura 32 - Resultados da previsão iniciada em 15/10/2014 às 00 h, para o evento do dia 20/10/2014.**



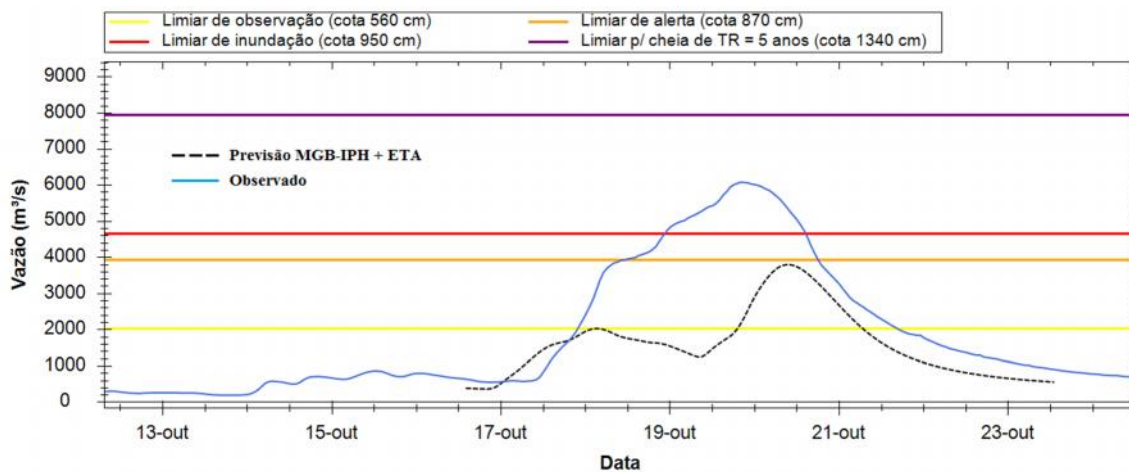
**Figura 33 - Resultados da previsão iniciada em 15/10/2014 às 12 h, para o evento do dia 20/10/2014.**



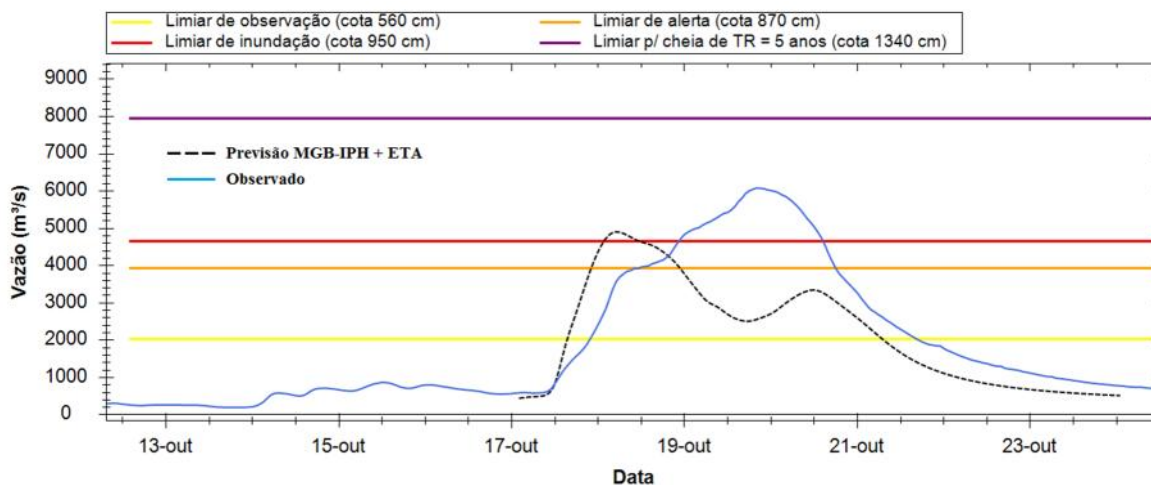
**Figura 34 - Resultados da previsão iniciada em 16/10/2014 às 00 h, para o evento do dia 20/10/2014.**



**Figura 35 - Resultados da previsão iniciada em 16/10/2014 às 12 h, para o evento do dia 20/10/2014.**



**Figura 36 - Resultados da previsão iniciada em 17/10/2014 às 00 h, para o evento do dia 20/10/2014.**



Para este evento, apenas as previsões inicializadas a partir do dia 14/06 às 0h indicaram uma elevação significativa do rio Taquari. É possível observar que neste caso houve uma certa concordância entre as consecutivas previsões quanto à superação dos limiares superiores (alerta e inundação) para os dias seguintes, o que normalmente indicaria uma maior confiabilidade nos resultados obtidos. Especialmente na previsão do dia 16/10 às 0h, havia previsão de uma cheia superando o limiar com TR = 5 anos, demonstrando inclusive a possibilidade de ocorrência de um evento de grande magnitude.

Entretanto, em boa parte dos casos o hidrograma previsto inicia a ascensão com atraso em relação ao hidrograma observado. Nas demais situações, conforme verificado nas previsões iniciadas no dia 15/10 às 12h e naquelas após o dia 16/10 às 12 horas, o hidrograma previsto assumiu um comportamento mais próximo do ocorrido, porém ainda com magnitudes inferiores. De qualquer forma, a previsão para este evento foi melhor sucedida em relação à previsão do evento do dia 06/06/2014, já que verificou-se um maior número de excedências do limiar de inundação no período antecedente à cheia.

Notadamente, o sistema de previsão experimental demonstrou alguns resultados interessantes durante a simulação em caráter operacional na bacia do Taquari-Antas. Foi demonstrado que, apesar da grande dificuldade em se trabalhar com maiores antecedências, principalmente quando a chuva prevista é incorporada em um modelo hidrológico, podem ser estimados possíveis cenários futuros através da análise de diversas previsões consecutivas. Esta situação indica também que a estimativa da incerteza em relação às previsões realizadas é particularmente importante para o planejamento interno de entidades como a Defesa Civil, a qual pode ser melhor estimada através do uso de um conjunto de previsões ao invés de apenas uma única previsão. Esta abordagem já vem sendo utilizada em Sistemas de Alerta contra Cheias em diversas partes do mundo, sobretudo na Europa, com resultados bastante promissores.

## REFERÊNCIAS

COLLISCHONN, W. (2001). Simulação hidrológica de grandes bacias. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 233 p.

CHAGAS, A.; CASTILHO, A. S.; PEDROLLO, M.; GERMANO, A.; SOTERIO, P. (2014) The Warning Flood System in Taquari River Basin. 6<sup>th</sup> International Conference on Flood Management. São Paulo, Sep, 2014.

LARENTIS, D. G. (2004) Modelagem matemática da qualidade da água em grandes bacias: sistema Taquari-Antas - RS. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 159 p.

LARENTIS, D. G. (2009) Prospecção hidrelétrica remanescente. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 233 p.

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.

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.

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

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

WMO, (2011) Manual on Flood forecasting and Warning. World Meteorological Organization. WMO Publications, 2011, 142 p.