

Desenvolvimento em áreas-piloto de um sistema de alerta para os Canais Naturais e quantificação de cargas sólidas nos rios e açudes receptores.

Atividade 1.2 – Seleção de duas áreas piloto e concepção inicial do sistema de alerta contra enchentes

Fortaleza

2014

Este relatório apresenta as ações desenvolvidas pelo Termo de Cooperação para Descentralização de Crédito – TCDC N° 01/2014, de forma a atender as metas firmadas no Acordo de Cooperação Técnica celebrado entre o Ministério da Integração Nacional, através da sua Secretaria de infraestrutura Hídrica, e a Universidade Federal do Ceará.

Assim aborda, portanto, de forma detalhada, a meta de Organização da base de dados dos estudos de caso, realizando a seguinte atividade:

- Seleção de duas áreas piloto e concepção inicial do sistema de alerta contra enchentes.

SUMÁRIO

| | | |
|---|---|----|
| 1 | CONTEXTUALIZAÇÃO..... | 6 |
| 2 | JUSTIFICATIVA..... | 9 |
| 3 | INTRODUÇÃO..... | 10 |
| 4 | SELEÇÃO DAS ÁREAS PILOTO..... | 12 |
| 5 | OS RESERVATÓRIOS DE CONTROLE DE CHEIAS..... | 14 |
| 6 | METODOLOGIA APLICADA..... | 16 |
| 7 | REFERÊNCIAS..... | 20 |
| | ANEXOS..... | 21 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Sazonalidade da precipitação e da vazão da bacia hidrográfica do reservatório Orós..... | 13 |
| Figura 2 - Sazonalidade da precipitação e da vazão da bacia hidrográfica do reservatório Castanhão..... | 13 |
| Figura 3 - Tramitação de dados entre as plataformas..... | 28 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Dados Operacionais dos Açudes Castanhão e Banabuiú..... | 15 |
|--|----|

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O Estado do Ceará, a partir da implementação da sua legislação de Recursos Hídricos, adotou princípios e diretrizes de Gerenciamento dos Recursos Hídricos da sua dominialidade ou por delegação (em se tratando de águas de domínio da União), que orientam a sua ação gestora, no sentido da busca da sustentabilidade no uso desses recursos.

Um dos eixos estratégicos fundamentais para o alcance desse objetivo é o exercício de planejamento. Através do planejamento busca-se estabelecer caminhos de maior eficiência em relação ao uso, controle e proteção, de modo a permitir, se não o integral atendimento às demandas requeridas, em qualidade e quantidade, no tempo e no espaço, a maior efetividade do sistema nesse atendimento.

Como é do conhecimento corrente, as águas doces de maior potencial de aproveitamento, no âmbito das condições físico-climáticas do semiárido brasileiro, se dão através do armazenamento das águas das chuvas em reservatórios artificiais. Em todo o Estado do Ceará existem, aproximadamente, 5000 açudes, com capacidade de acumulação superior à 5.000.000 de m³, o mínimo armazenamento admissível para reservatórios de usos múltiplos. Aqueles de maior armazenamento terminam cumprindo duas funções: a função regularizadora e a função de controle de cheias.

a) A função regularizadora

O atendimento caracterizado pelos múltiplos usos é um princípio adotado na gestão de águas e está na base da função de regularização dos reservatórios do semiárido. Sabe-se que nesses reservatórios, sujeitos às variabilidades de recarga (clima irregular), a sua eficiência oscila entre o uso intenso e o uso conservativo. O uso mais intenso reduz perdas, mas pode levar o reservatório à exaustão. O uso conservativo diminui os riscos de esvaziamento, mas intensifica perdas (evaporação, sangrias). Portanto a operação eficiente será aquela que produzirá menos perdas e possibilitar maior usufruto das águas

armazenadas. O cumprimento da função regularizadora com a máxima eficiência possível é um desafio da gestão.

b) A função controle de cheia

Os reservatórios construídos no semiárido são reguladores de vazão. Entretanto, a sua operação, num cenário de chuvas intensas e recepção de grandes vazões, permitem que os mesmos retardem a passagem dessas vazões, fazendo com que as vazões efluentes sejam reduzidas, caracterizando assim o seu efeito controlador de enchentes. Alguns reservatórios produzem esses efeitos em maior magnitude que outros, dependendo da sua capacidade de retardamento da passagem das águas. O volume é retido nos reservatórios também em função dos espaços que os mesmos dispuserem para acomodação temporária do mesmo. O retardamento acontece em razão do estreitamento causado pela passagem no dispositivo de vertimento (sangradouro), fazendo com que as águas “aguardem” o seu momento de saída. Esses reservatórios, portanto, produzem amortecimentos sem controle, exatamente por não se tratarem de reservatórios construídos para essa função.

Por outro lado, existem os reservatórios construídos não só para exercer funções de regularização, mas também para amortecerem cheias de maneira controlada. São os reservatórios dotados de comportas sobre seus vertedores. É o exemplo do açude Castanhão. Este reservatório foi construído, tendo como uma das suas funções estratégicas, proteger o Baixo Vale do Jaguaribe das grandes cheias.

Ocorre que a atenuação de cheia controlada é sempre realizada em tempo real e pressupõe o uso de uma regra operacional cujo equacionamento envolve um conjunto de variáveis que limitam as ações de controle. No caso específico do Açude Castanhão, as variáveis são as seguintes:

- as incertezas associadas às previsões climáticas;
- a limitação de nível do espelho d'água em razão da existência de núcleos urbanos na bacia hidráulica, ainda expostos à elevação do espelho d'água;

- a necessidade de garantir um volume de espera permanente durante a quadra chuvosa e na perspectiva da quadra seguinte;
- as restrições em relação as vazões liberadas, para prevenir transbordamentos da calha de jusante e assim evitar inundações nas áreas ocupadas;
- a oportunidade de viabilizar um sobrevolume eventual para regularização, ao final da quadra chuvosa;

Todos estes condicionantes resultam das relações interativas do Castanhão e Banabuiú (em menor escala), com a dinâmica das suas respectivas Bacias Hidrográficas de Contribuição, onde operam outros reservatórios, conectados através dos cursos d'água e onde se dá o desenvolvimento das forças produtivas, associado ao uso e ocupação dos solos, que geram relações de cooperação, mas também desencadeiam grandes conflitos em torno da água. Neste ambiente de transformações permanentes, os agentes públicos, inseridos no âmbito da gestão das águas, buscam definir regras operacionais visando equilibrar o binômio oferta x demanda e o gerenciamento eficiente dos de enchentes.

2 JUSTIFICATIVA

A observação das series hidrológicas existentes para as várias seções monitoradas nos grandes vales do território cearense, algumas de maior representatividade que outras, por apresentar maior tempo de observação e maior consistência nos dados observados, revelam a grande variabilidade dos deflúvios, espacial e temporal, explicitando uma característica marcante: a expressiva quantidade de anos de baixa pluviosidade, intercalados pela ocorrência de eventos críticos de enchentes. Essas características do clima semiárido tem historicamente induzido um comportamento de maior atenção aos problemas da escassez, desencadeando grandes esforços no sentido de atender as demandas crescentes, priorizando ações de reservação d'água e métodos racionais de alocação, embora, ultimamente, não subestimando os problemas causados pelas severas enchentes.

Em relação às enchentes, grandes reservatórios, dotados de comportas de controle de cheias, vêm sendo implantados e operados no Estado. Em que pese alguns avanços, outras necessidades de desenvolvimento institucional e técnico-operacional são recorrentes. Uma vez alcançadas, deverão permitir a adoção de procedimentos avançados de controle dessas enchentes, através desses equipamentos, numa permanente evolução das regras de controle.

Noutro plano, a gestão de eventos de cheias em bacias não dotadas desses equipamentos atenuadores de cheias, exigirão respostas operacionais em tempo real, para alertar em relação à dinâmica das águas correntes e seus reflexos sobre áreas ocupadas. A previsão de cenários com auxílio da informação meteorológica permitirá, com antecedência, vislumbrar ações de prevenção, constituindo-se na grande arma de gerenciamento dessas crises.

O prévio conhecimento destes cenários como consequência das projeções da modelagem hidráulico-hidrológica em estudo, vai requerer o domínio cartográfico-cadastral das áreas de ocupação do rio, o qual será adquirido com base nas imagens atualizadas de satélite, com a aplicação dos recursos de

geoprocessamento e através dos levantamentos topográficos para determinação da geometria dos rios principais envolvidos.

3 INTRODUÇÃO

De acordo com informações do Banco de Dados Internacional de Desastres Naturais, mais de 115 milhões de pessoas no mundo foram afetadas por grandes cheias nos anos de 2004 e 2009. Em termos de número de pessoas afetadas, grandes cheias estão no topo da lista das causas naturais catalogadas (<http://www.em-dat.net/disasters/country.php>). Numa escala global, as principais causas de prejuízos econômicos estão ligadas a eventos geofísicos, como terremotos, tsunamis e furacões. Entretanto, na maioria dos países em desenvolvimento, principalmente no Brasil, pode-se dizer que as grandes cheias são os maiores responsáveis por perdas econômicas e de vida.

O artigo 21 da Constituição Federal, no seu inciso XIX, estabelece que compete à União instituir sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos e definir critérios de outorga de direitos de seu uso. Este inciso é regulamentado pela Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

O mesmo artigo da Constituição, no inciso XVIII, atribui à União a competência de planejar e promover a defesa permanente contra as calamidades públicas, especialmente as secas e as inundações. A prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais é um dos objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos (art. 2º, inciso III, da Lei n. 9.433, de 1997).

As enchentes são fenômenos naturais dos regimes dos rios e todo rio tem sua área natural de inundação. As inundações passam a ser um problema para o homem quando este deixa de respeitar esses limites. Há outros fatores que favorecem ou agravam a ocorrência de enchentes, principalmente nas cidades. Nestes casos, o principal agravante das enchentes são as ações do homem

que alteram o escoamento natural das águas, como quando desmata, remove a vegetação, canaliza as águas pluviais e impermeabiliza o solo.

A Bacia do Jaguaribe devido a sua extensão é subdividida para fins de planejamento e gestão em cinco sub-bacias: Alto Jaguaribe, Médio Jaguaribe, Baixo Jaguaribe, Salgado e Banabuiú.

Apesar das cheias acarretarem grandes prejuízos materiais e econômicos ao longo dos vales, tais como a destruição de lavouras por enxurradas e pelo excesso de umidade no solo, a preocupação maior se reflete nos impactos sobre as populações humanas e bens públicos e privados das cidades e comunidades ribeirinhas, sendo que a maioria destas é ocupante irregular das planícies de inundação dos rios.

As cidades localizadas junto aos rios no médio e baixo vale do Jaguaribe foram historicamente assoladas por grandes cheias, mesmo após a construção do açude Orós, iniciado em 1958 e concluído em 1961, e do açude Banabuiú, iniciado em 1952 e concluído em 1966. O açude Orós dista cerca de 450 km de Fortaleza, controlando uma bacia de drenagem de 24.208 km², enquanto que o açude Banabuiú, dista 230 km de Fortaleza e controla uma área de 14.243 km². Juntos estes açudes controlam uma área de 38.451 km², correspondendo a 53% da área total da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe. Em outras palavras, mesmo que estes dois açudes pudessem exercer um efetivo controle de cheias de suas respectivas bacias, o que de fato, não ocorre, ainda assim haveria mais de 34.000 km² de área não controlada da bacia hidrográfica que produziriam um significativo nível de cheia no baixo vale do Jaguaribe.

Com o advento da construção do açude Castanhão que começou com a expedição da Ordem de Serviço nº 04/DG/DGO do DNOCS em 16/11/1995 autorizando a Construtora Andrade Gutierrez a iniciar as obras e a sua conclusão em 2004, ano em que foi inaugurado e efetivamente atuou pela primeira vez como uma obra de efetivo controle de cheias no rio Jaguaribe, teve início o processo de operação controlada de cheias no vale do Jaguaribe.

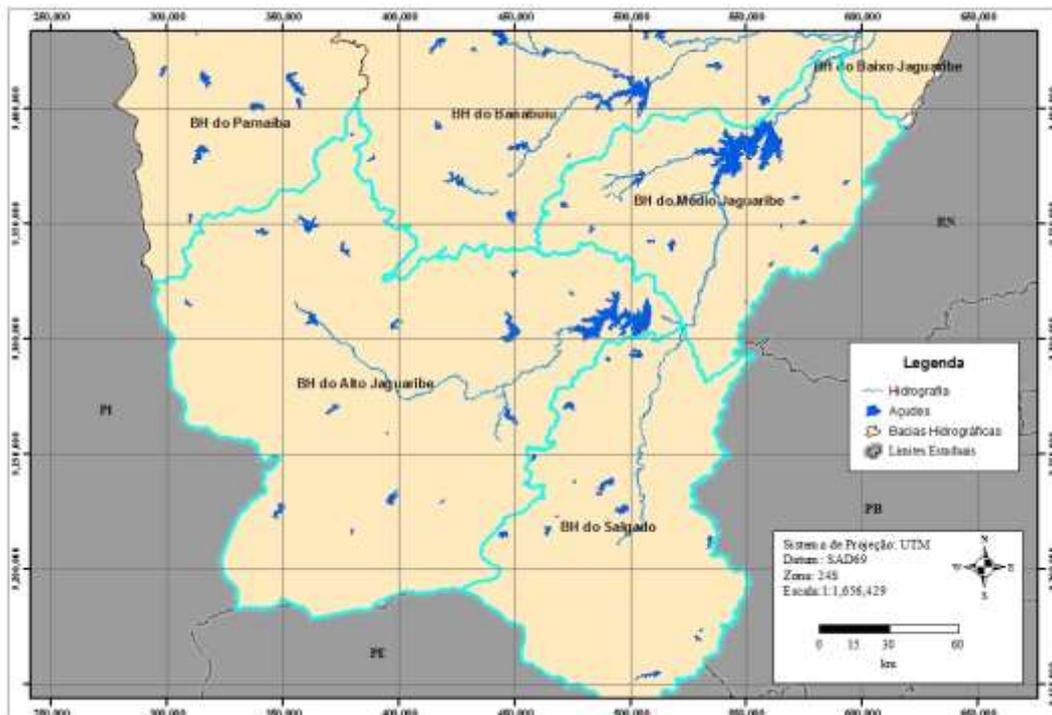
O açude Castanhão controla uma bacia de drenagem de 44.850 km² do vale do Jaguaribe, superando a soma das bacias de drenagem controladas pelos açudes Orós e Banabuiú. Representa assim um extraordinário incremento de capacidade de regularização de vazão e propicia a possibilidade de se fazer um efetivo controle de cheias com alta probabilidade de sucesso,

correspondente à minimização dos efeitos adversos das cheias para as populações ribeirinhas e urbanas do médio e baixo vale do Jaguaribe.

4 SELEÇÃO DAS ÁREAS PILOTO

A bacia hidrográfica do rio Jaguaribe compreende boa parte do território cearense e é subdividida em outras cinco bacias hidrográficas, para efeito de planejamento e operação: alto rio Jaguaribe, médio rio Jaguaribe, baixo rio Jaguaribe, rio Salgado e rio Banabuiú. Ocupa, no total, uma área de 73.043 km², o que corresponde a cerca de 49% do território do Estado.

Nesse estudo será contemplada a bacia do Alto Jaguaribe, a bacia do Médio Jaguaribe e a bacia do Salgado conforme Figura 1, devido a maior vulnerabilidade de ocorrências de cheias e inundações.



Com uma precipitação média anual de 852 mm/ano, com as características típicas do semiárido, mal distribuídas tanto no tempo quanto no espaço. O sistema hídrico dessa bacia conta com 13 (treze) reservatórios, com capacidade de armazenamento na ordem de 7 (sete) bilhões de m³, distribuído tanto na parte controlada como na parte na controlada da bacia. As Figuras 2,3 e 4 apresentam a sazonalidade das precipitações e vazões nas principais bacias hidrográficas dos reservatórios do Jaguaribe.

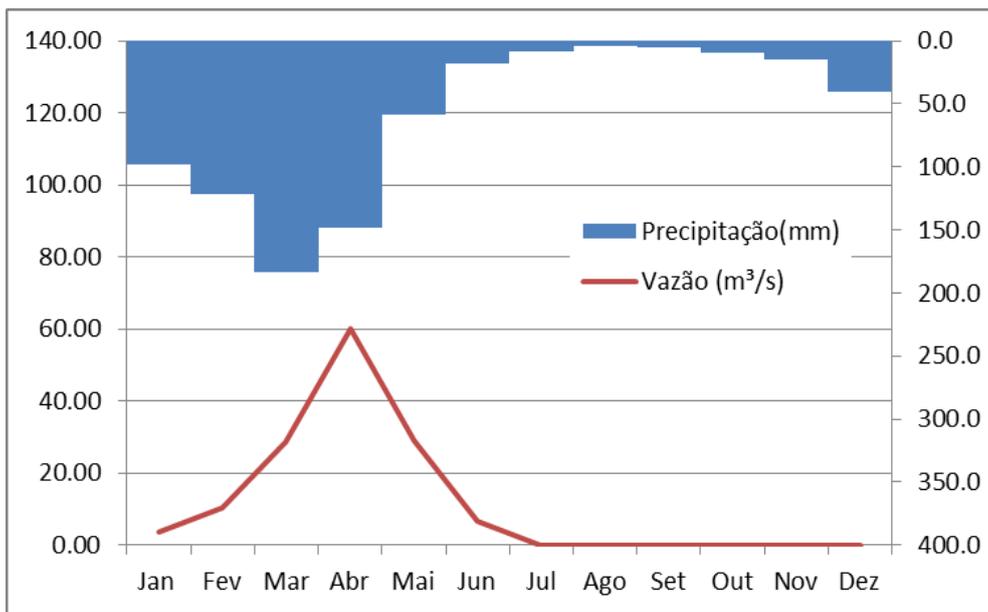


Figura 1 - Sazonalidade da precipitação e da vazão da bacia hidrográfica do reservatório Orós.

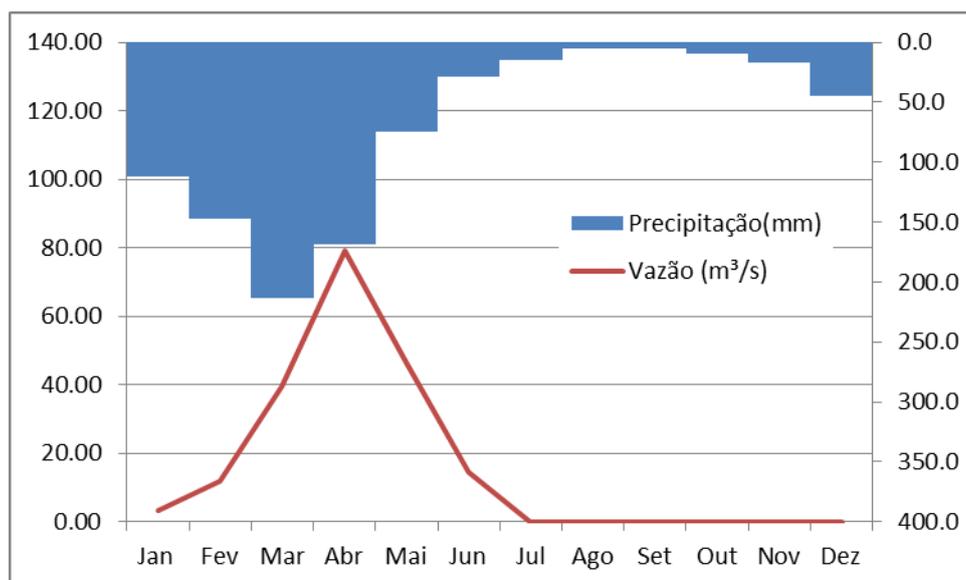


Figura 2 - Sazonalidade da precipitação e da vazão da bacia hidrográfica do reservatório Castanhão.

O principal reservatório da bacia, o Castanhão, conta com a capacidade de armazenamento de 6,7 bilhões de m³, além da função regularizadora esse reservatório opera com comportas específicas para controle de cheias, mitigando as consequências oriundas de eventos extremos de caráter hidrológicos.

5 OS RESERVATÓRIOS DE CONTROLE DE CHEIAS

O açude Orós, apesar de amortecer a onda de cheia proveniente da bacia do alto Jaguaribe em direção ao médio Jaguaribe, afluindo para o açude Castanhão, não tem características de ser um reservatório para controle de cheias uma vez que não dispõe de nenhuma estrutura para essa finalidade, ou seja, não é dotado de comportas que permitam realizar manobras de retenção e liberação controlada das águas efluentes do mesmo.

Assim, apenas os açudes Castanhão, no médio Jaguaribe e Banabuiú, na bacia de mesmo nome dispõem de comportas para operação de controle de cheias nos seus respectivos vales.

A Tabela 1 apresenta as principais características técnicas relacionadas com esta função relativas aos dois principais reservatórios de controle de cheias na bacia do Jaguaribe/Banabuiú.

Conforme se pode observar na Tabela 1, o açude Castanhão foi projetado para conter um volume de espera para controle de cheias de 2.252.030.464 m³ enquanto que o açude Banabuiú somente controla até 316.135.998 m³, ou seja, apenas 14% do volume controlável pelo primeiro.

Tabela 1 - Dados Operacionais dos Açudes Castanhão e Banabuiú.

| Situação Operacional das Comportas | Característica da Obra | Açude | |
|------------------------------------|--|---|---|
| | | Castanhão | Banabuiú |
| Comportas Abertas | Tipo de Vertedor | Superfície (Creager) com salto de esqui | Superfície (Creager) com salto de esqui |
| | Largura total do vertedor | 153,00 m | 102,00 m |
| | Largura útil do vertedor | 120,00 m | 90,00 m |
| | Descarga máxima pelo vertedor | 12.345 m ³ /s | 5.200 m ³ /s |
| | Cota do vertedor | 95,00 m | 134,50 m |
| | Volume acumulado operacional normal | 4.447.969.792 m ³ | 1.284.864.002 m ³ |
| Comportas Fechadas | Volume acumulável máximo maximorum | 6.700.000.256 m ³ | 1.601.000.000 m ³ |
| | Volume máximo de espera para controle de cheia | 2.252.030.464 m ³ | 316.135.998 m ³ |
| | Número de comportas | 12,0 | 6,0 |
| | Dimensões: largura x altura | 10 m x 11,55 m | 15 m x 9 m |
| | Cota operacional normal | 100,00 | 139,00 ⁽¹⁾ |
| | Cota máxima operacional | 106,00 | 142,50 |
| | Cota do coroamento | 111,00 | 146,00 |
| | Bacia hidráulica máxima | 44.100 ha | 14.487 ha |
| | Bacia hidrográfica | 44.850 km ² | 14.243 km ² |

⁽¹⁾ Definida em reunião da Comissão de Acompanhamento de Cheias DNOCS/COGERH em 18/03/2004.

6 METODOLOGIA APLICADA

Previsão de Tempo

A previsão de tempo com uso de modelos numéricos já é realizada pela Funceme em caráter operacional. De fato, o processo de previsão de tempo faz uso de dois modelos distintos, o Modelo de Circulação Geral Atmosférico (MCGA) do Centro de Previsão de Tempo e Clima do INPE (CPTEC), e o Regional Atmospheric Modeling System (RAMS), desenvolvido pela Colorado State University. O primeiro é um modelo de circulação global que prevê o comportamento da atmosfera em resposta a um forçante de grande escala. Como este modelo faz a previsão para todo o globo, sua discretização espacial é muito grosseira, de modo que seus resultados não são indicados para uso direto em problemas de recursos hídricos. Utiliza-se então a técnica de redução de escala (downscaling). Neste caso, os dados obtidos pelo MCGA alimentam o modelo de meso-escala RAMS, que é capaz de simular a ocorrência de circulações locais, fornecendo portanto uma previsão mais precisa.

A previsão de tempo com o uso dos modelos MCGA e RAMS já está implantada e operacionalizada na FUNCEME, e tem gerado previsões de tempo e clima regionalizadas para o Estado do Ceará e para toda a região Nordeste do Brasil. Neste momento, a Funceme está avaliando a incorporação de um outro modelo de larga escala na previsão de tempo.

Previsão de Afluências

A previsão de afluências será obtida através do uso em conjunto de modelos numéricos atmosféricos, com modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão, que transformarão a chuva prevista pelos modelos atmosféricos em vazão afluente. Esta abordagem é relativamente nova e vem sendo desenvolvida e avaliada em outras partes do mundo [NRC, 2006; Collischonn

et al., 2005; Hartmann et al., 2003; Westrick et al., 2002; Westrick & Mass, 2001].

Como a maioria das bacias a serem estudadas possui tempo de concentração acima de um dia, serão utilizados também os valores de chuva medidos nos dias anteriores à previsão.

De fato, a previsão de afluências poderia ser feita utilizando apenas a chuva observada na bacia, medida pelos postos pluviométricos convencionais e pelas PCDs operadas pela Funceme.

A incorporação da previsão de tempo na realização da previsão de afluências possui o intuito de aumentar o horizonte de previsão, o que, dependendo da qualidade da previsão de tempo, pode trazer vantagens importantes para a operação dos reservatórios.

O benefício advindo do uso da previsão de tempo deve variar de bacia para bacia. De uma maneira geral, as previsões de tempo costumam ser de boa qualidade nas primeiras 48 ou 72 horas. A partir desta janela inicial de três dias, a qualidade da informação deteriora-se rapidamente. Desta forma, a incorporação da previsão de tempo proporcionaria um aumento no horizonte de previsão de pelo menos dois dias, o que certamente traria um enorme benefício aos operadores dos reservatórios. Em termos proporcionais, bacias com tempo de concentração menor se beneficiariam mais com o uso da previsão de tempo, embora, a princípio, todas possam ser beneficiadas.

Um dos estudos previstos no escopo deste projeto consiste em avaliar se há realmente algum benefício em incorporar a previsão de tempo na previsão de afluências. Acredita-se que o benefício exista, porém o ganho vai depender da qualidade da previsão para diversos horizontes de previsão e do tamanho da bacia. Uma breve descrição desta avaliação será apresentada mais adiante.

A seção segue com uma descrição de como será feita a previsão de afluências. Inicia-se com a metodologia para a previsão de chuva na escala de tempo, e segue-se com a estratégia de como utilizar esta previsão para gerar previsão de afluências aos reservatórios de interesse.

Previsão de Vazão com Modelos Hidrológicos

Serão avaliados modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão, um concentrado do tipo conceitual. O modelo concentrado a ser utilizado é o HEC-HMS a nível diário, já utilizado e aceito pela comunidade científica.

Estes modelos serão calibrados utilizando uma abordagem multiobjetivo através dos algoritmos, presentes dentro do próprio HEC-HMS. Em princípio, os objetivos a serem empregados na calibração serão o volume do hidrograma afluente e o tempo de pico. Este tipo de abordagem deve aumentar a robustez do modelo para a previsão de cheias.

Os modelos hidrológicos devidamente calibrados serão alimentados com os valores de previsão de chuva obtidos pelos modelos atmosféricos para gerarem os hidrogramas afluentes aos reservatórios de interesse, quais sejam, Orós e Castanhão. Dados de chuva medidos na bacia, tanto nos postos pluviométricos convencionais quanto nas PCDs operadas pela Funceme também serão utilizadas na previsão de afluições.

Avaliação da Previsão de Afluições

O projeto prevê uma avaliação da previsão de afluições utilizando uma análise retrospectiva, onde serão utilizados dados históricos de chuva e vazão observados nas bacias afluentes aos reservatórios, bem como dados de previsão de tempo que teriam sido feitos no passado. O objetivo é avaliar a qualidade da previsão de tempo e de afluição para diversos horizontes de previsão. Esta avaliação incluirá também uma análise dos benefícios de se utilizar a previsão de tempo como forma de aumentar o horizonte de previsão de afluições. Procurar-se-á determinar uma relação entre horizonte e qualidade da previsão. É de se esperar que esta avaliação obtenha resultados distintos para cada reservatório.

Para realizar esta análise será necessário obter junto ao CPTEC todas as informações atmosféricas necessárias para refazer a previsão de tempo

para os locais de interesse, durante o primeiro semestre do ano, no período de 1998 a 2005, que é o período onde há disponibilidade de dados acerca da operação dos reservatórios de interesse.

Além desta avaliação, está prevista uma comparação entre os resultados obtidos pelos dois modelos hidrológicos citados acima. Este estudo é importante, pois trará indícios sobre as vantagens e desvantagens, pelo menos para este tipo de problema, de se utilizar modelos distribuídos de base física em detrimento de modelos mais simples do tipo concentrado e conceitual. Apesar dos potenciais benefícios do uso de um modelo distribuído na previsão de curto prazo, estudos anteriores em diversos locais no mundo indicam que não há um consenso sobre o tema. A adequação do tipo de modelo depende de uma série de fatores como a disponibilidade de dados de qualidade acerca das características físicas da bacia, variabilidade espacial da chuva, tipo de formação de chuva preponderante, densidade da rede pluviométrica e fluviométrica entre outras.

Otimização da Operação

Esta parte do projeto irá estudar diferentes de técnicas de otimização e simulação para incorporar a previsão de afluências de curto prazo na definição de regras de operação, ou procedimentos de operação em tempo real, dos reservatórios, Orós e Castanhão que minimizem os impactos causados pelas cheias nas comunidades localizadas a jusante destes reservatórios. Além disso, serão também levadas em consideração as demandas ligadas à agricultura, indústria e abastecimento humano.

O estudo de otimização será baseado no período que vai de 1998 a 2005. Este período foi escolhido devido à disponibilidade de dados de operação dos reservatórios de interesse, tais como, vazão afluente, volume inicial, liberações, demandas a serem atendidas.

Uma avaliação da importância da incorporação da previsão de tempo na otimização será também efetuada. Esta análise irá permitir uma melhor compreensão dos benefícios que a informação climática pode trazer para a área de recursos hídricos, bem como indicar a necessidade de avanços científicos em áreas específicas do processo de previsão.

7 REFERÊNCIAS

ANEXOS

O Modelo HEC HMS

O software HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) foi desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (USACE-HEC, 2000). Este programa é gratuito e está disponível em <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>.

O HEC-HMS é projetado para simular o processo de precipitação-vazão de sistemas de bacias hidrográficas dendríticas. Foi projetado para ser aplicável a uma ampla variedade de áreas geográficas para resolver uma grande variedade de possíveis problemas. Isto inclui grandes rios de bacias hidrográficas para fornecimento de água e estudos de inundação, até do escoamento de pequenas bacias hidrográficas urbanas ou naturais. Os hidrogramas produzidos pelo programa são utilizados diretamente ou em conjunto com outros softwares para estudos de disponibilidade de água, drenagem urbana, previsão de vazão, impacto do desenvolvimento da urbanização, dimensionamento de vertedouros de reservatórios, redução de danos de inundação, regime de planícies de inundação e sistemas de operação (USACE-HEC, 2010).

O HEC-HMS utiliza modelos separados para representar cada componente do processo de escoamento que são: Modelos que calculam o volume do escoamento; Modelos de escoamento direto (superficial e subsuperficial); Modelos de escoamento de base e modelos de fluxo no canal (USACE-HEC, 2000). Para Tavares & Castro (2005) o processamento de modelagem do HEC-HMS requer inicialmente a entrada de dados da bacia hidrográfica e dos dados meteorológicos. Para a bacia são escolhidos os métodos para o cálculo das perdas, de transformação do escoamento superficial, de composição do escoamento de base, de propagação em rios; considerando parâmetros relacionados a tais métodos, como a área das

subbacias, tempo de concentração, fatores de perda por infiltração, evapotranspiração, e perdas em sumidouros e interceptação. Já para no modelo hidrológico é escolhido qual o formato de entrada da precipitação a ser utilizada na simulação.

O Modelo HEC RAS

Segundo Oliveira (2005), *Hydrologic Engeneering Center (HEC) do U.S. Corps of Engineers* é um dos centros de excelência na elaboração de programas e modelos aplicados à Hidráulica e Hidrologia. No campo da Hidráulica Fluvial destaca-se pela sua aceitação, confiabilidade, facilidade de acesso e utilização.

O *Hydrologic Engineering Centers River Analysis System* - HEC-RAS é um modelo unidimensional, de fundo fixo, capaz de efetuar os cálculos dos perfis de superfície da água em escoamento permanente e não permanente, em canais com superfície livre. Esses perfis podem ser calculados em regimes subcríticos, supercrítico e misto, onde poderão ocorrer mudanças dos regimes supercrítico para subcrítico ou de subcrítico para supercrítico. O procedimento de cálculo baseia-se na solução da equação de energia unidimensional. O modelo também utiliza as equações de momento em situações onde o perfil da superfície de água varia rapidamente. Essas situações incluem, dentre outras, os ressaltos hidráulicos, as pontes e as confluências de rios. Permite, ainda, a avaliação do efeito de estruturas hidráulicas – pontes, bueiros, galerias, etc., na alteração das planícies de inundação, bem como mudanças nos perfis de superfície da água devido à construção de canais e diques (HEC, 2008a). Conforme Hatipoğlu *et al.* (2007), os principais dados de entrada são: a geometria do canal, condições de contorno, contribuição do fluxo lateral e valores para o coeficiente “*n*” de Manning.

Segundo HEC (2008a), a utilização do HEC-RAS está condicionada as seguintes premissas:

- Escoamento é permanente. Não há condições dependentes do tempo na equação de energia;

- Escoamento é gradualmente variado. A equação da energia (Bernoulli) está baseada na premissa da distribuição uniforme de pressões hidrostáticas em cada seção transversal. Nos locais onde o escoamento é rapidamente variado (estruturas hidráulicas como pontes, bueiros e barragens), o programa utiliza a equação de momento ou outras empíricas;
- Escoamento é unidimensional. A energia cinética é a mesma para todos os pontos numa seção transversal. Os componentes da velocidade estão na mesma direção do fluxo.

O HEC-RAS se caracteriza como um modelo hidráulico, pois simula a propagação da onda de cheia ao longo de um canal. Observando, contudo, os critérios de classificação dos modelos hidrológicos apresentados anteriormente e enquadrando o HEC-RAS dentro desta classificação, pode-se dizer que este modelo pode ser considerado discreto, distribuído, determinístico e empírico. Os dados necessários para utilizar o HEC-RAS são divididos nas seguintes categorias: dados geométricos, hidráulicos e de escoamento.

Dados geométricos

Consistem em estabelecer o sistema topológico do rio, das seções transversais, comprimento dos trechos, coeficientes de perda de energia (perdas por atrito, contração e expansão) e as informações sobre as junções dos canais. Estruturas hidráulicas também são consideradas nos dados geométricos.

- Esquema do sistema do rio

O sistema esquemático do rio é necessário para qualquer dado geométrico a ser inserido no sistema do HEC-RAS. Esse esquema define como os vários trechos do rio estão conectados e também estabelece uma convenção de nome para referência de todos os outros dados. Ele é desenvolvido desenhando os vários trechos do sistema dentro do editor de dados geométricos.

Para cada trecho do rio no esquema é dado um identificador único. Todos os outros dados inseridos serão referenciados a um tema específico do esquema.

A conectividade dos trechos é muito importante para o modelo entender como os cálculos devem ser precedidos de um trecho para outro. Junções somente podem ser estabelecidas nas localizações aonde dois ou mais canais chegam ou saem.

- Geometria da seção transversal

Este tipo de geometria é necessário para a análise de escoamento em canais naturais e são especificadas as coordenadas de cada seção transversal e as distâncias entre elas. Essas seções são localizadas ao longo do canal e caracterizam a capacidade de escoamento do canal e suas planícies de inundação.

- Comprimento dos trechos

A medida das distâncias entre cada seção transversal é chamada de comprimento dos trechos. O comprimento dos trechos para a margem esquerda, margem direita e canal devem ser especificados no editor da seção transversal. O comprimento no canal é geralmente medido ao longo do talvegue. Geralmente esses três comprimentos têm o mesmo valor. Há casos em que irão diferir significativamente, como em curvas de rio ou quando o canal tem meandros.

Quando as distâncias entre as seções transversais do canal e as margens são diferentes, é determinada uma média ponderada utilizando como peso as vazões no canal principal, nas margens direita e esquerda de cada segmento.

A melhor maneira de se obter o n de Manning é calibrando o modelo de acordo com dados reais observados. Quando não se dispões de dados reais podem ser utilizados valores de acordo com canais similares ou valores obtidos na literatura.

- Dados de junção de canais

As junções de canais são definidas como as localizações onde dois ou mais canais se juntam ou se separam. Os dados de junção consistem nos comprimentos dos trechos ao longo da junção e os ângulos dos tributários (somente se a equação da quantidade de movimento é utilizada). Os comprimentos dos trechos ao longo da junção são inseridos no editor de dados de junção. Isto permite que confluências bastante complicadas possam ser representadas.

Dados hidráulicos

- *Coefficientes de perda de energia.*

Vários tipos de coeficientes de perda são utilizados pelo programa para avaliar a perda de energia:

- Valores para o coeficiente de rugosidade de Manning para as perdas contínuas;
- Contração e expansão para avaliar as perdas em transições;
- Coeficientes para perdas em pontes e bueiros relacionadas com a sua configuração de pilares e, escoamento com ou sem superfície livre condições de entrada e saída.

- *Coefficiente de rugosidade de Manning (n)*

A seleção do valor apropriado para este coeficiente é bastante significativa na confiabilidade dos dados calculados. O valor do n de Manning é bastante variável e depende de um grande número de fatores, incluindo: rugosidade da superfície, vegetação, irregularidades do canal, alinhamento do canal, deposição, obstruções, tamanho e forma do canal, vazão, mudanças sazonais, temperatura, material suspenso e leito do canal.

Dados de escoamento

Os dados de escoamento são necessários para permitir o cálculo dos níveis da água. Consistem em: regimes de escoamento, condições de contorno e picos de vazão.

- Regime de escoamento

Os cálculos dos níveis começam em uma seção transversal, com condições conhecidas ou estimadas, em um processo de cálculo que progride de montante para cálculos de escoamento subcrítico ou para jusante no caso de escoamento supercrítico. Regimes subcríticos são restringidos à profundidade crítica ou acima, e perfis supercrítico são restringidos à profundidade abaixo da crítica. Nos casos onde o regime irá passar de subcrítico para supercrítico ou vice-versa, o programa deve ser rodado no modo de regime misto.

- Condições de contorno

As condições de contorno são necessárias para estabelecer a cota da superfície no fim do rio (jusante ou montante). Este dado é necessário para que o programa comece os cálculos. No regime subcrítico, as condições de contorno somente são necessárias no final do sistema. Se o regime é supercrítico então as condições de contorno necessárias são as de montante. Se o regime é misto então as duas condições devem ser inseridas.

O editor de condições de contorno contém uma tabela mostrando cada trecho. Cada trecho tem uma condição de contorno de jusante ou montante. As conexões das junções são consideradas condições internas de controle. As condições internas de controle são automaticamente listadas na tabela, baseado em como o sistema foi definido no editor de dados geométricos. Ao usuário somente é solicitado entrar as condições necessárias de contorno externo. Existem quatro tipos de condições de contornos disponíveis para o usuário:

- Elevações conhecidas da superfície de água: para essa condição o usuário deve entrar a elevação conhecida da superfície de água para cada um dos perfis a ser calculado;

- Profundidade crítica: quando este tipo de condição é selecionado, o usuário não precisa colocar mais nenhuma informação. O programa irá calcular a profundidade crítica para cada um dos perfis que será então utilizada como condição de controle.
- Profundidade normal: para esta condição é necessário o usuário para entrar a declividade do canal que é utilizada para calcular a profundidade normal naquela localização. A profundidade normal será calculada para cada perfil baseado na declividade inserida.
- Curva chave: quando este tipo de condição é selecionado, uma janela aparece e permite ao usuário entrar a elevação e vazão. Para cada perfil, a elevação é interpolada da curva-chave dada.

- Informação de vazão

As informações de vazão são necessárias em cada seção transversal para calcular o nível da água. Os dados de vazão são inseridos de montante para jusante em cada trecho. Pelo menos um dado de vazão deve ser inserido para cada trecho do rio. Uma vez que um valor é introduzido a montante do trecho, então presume-se que o escoamento permanente é constante até que outro valor de escoamento seja inserido. A vazão pode ser mudada a qualquer seção transversal dentro do trecho. Entretanto, a vazão não pode ser mudada no meio de uma ponte, bueiro ou junção de canais.

Integração: Modelo Hidráulico e SIG

A extensão HEC-GEORAS, desenvolvida pelo HEC (*Hydrologic Engineering Center*), é projetada, especificamente, para processar dados de informação geográfica a serem aplicados no modelo hidráulico HEC-RAS, permitindo vinculação com ambientes SIG. A interface gráfica para o utilizador permite a criação de uma série de temas fundamentais: o escoamento principal, as margens (opcional), as linhas de escoamento (opcional), e as seções transversais. Poderão ser criados outros temas com informação adicional, como: o uso do solo, o alinhamento dos diques e as áreas de armazenamento.

O software ArcGIS 9.3 extensão HEC-GEORAS utiliza o MNT (Modelo Numérico do Terreno) para a obtenção da geomorfologia do curso da linha de água e informações complementares como o revestimento da linha de água, nomeadamente o escoamento principal, as margens, as linhas de escoamento e as secções transversais. Podendo ser estabelecidos outros temas com informação adicional, tais como: o uso do solo, o alinhamento dos diques e as áreas de armazenamento.

Com a importação dos resultados do modelo hidráulico para a extensão, em conjunto com o MNT, permitem o processamento do perfil da superfície livre ao longo da linha de água, delimitando a superfície do solo inundada. A Figura 3 demonstra a tramitação de dados entre as plataformas ARCGIS e HEC-RAS.

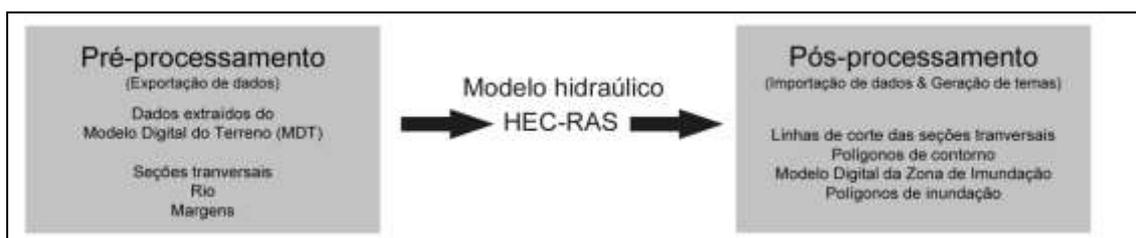


Figura 3 - Tramitação de dados entre as plataformas.

As informações disponibilizadas pelo traçado das zonas inundáveis permitem diversas análises no âmbito dos danos causados pela inundação, da restauração dos ecossistemas, e da prevenção e resposta atempada a eventos de cheia.

A utilização do HEC-RAS em conjunto com SIGs tem sido aplicada por diversos autores para estudo de inundação, como Calçada *et al.* (2004) que realizaram análise de cheias e delimitação de zonas inundáveis em Timor-Leste. Hammouri e El-Naqa (2007), que fizeram simulação e análise hidrológica (chuva-vazão) de bacias sem estações de monitoramento na Jordânia. Hatipoğlu *et al.* (2007) realizaram o delineamento semi-automático de planícies de inundação na Turquia e a simulação do fluxo sobre a planície através do HEC-RAS e HEC GeoRas. Tavares e Castro (2005), Marfai (2003), e Ackerman (2000) são outros exemplos de trabalhos onde foi utilizada modelagem hidráulica (HEC-RAS) para estudo de inundações.

