

TOMO VI

MAPEAMENTO DAS ZONAS DE INUNDAÇÃO PELA RUPTURA DA BARRAGEM JABURU I

2010

CONTRATO: Nº 004/SRH/CE/2010

**Dezembro/2010
Fortaleza – Ceará**

Sumário

APRESENTAÇÃO	4
1 - RELATÓRIO DE ANÁLISE DE ROMPIMENTO DA BARRAGEM JABURU I.....	5
1.1 – Acontecimentos Históricos – Intervenções	6
2 - MODELO DE ROMPIMENTO DE BARRAMENTOS.....	8
2.1 - Dados Básicos.....	9
2.2 - Características Gerais da Barragem Jaburu I.....	9
2.3 - Curva CAV (COTA – ÁREA – VOLUME).....	9
3 - MODELAÇÃO DA BRECHA.....	10
3.1 - Determinação da Geometria da Brecha.....	10
4 - TEMPO DE RUPTURA.....	11
5 - HIDROGRAMA NA BRECHA.....	11
6 - DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE RUGOSIDADE.....	12
7 - MODELO DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA.....	13
8 - FORMULAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA	14
8.1 - Integração Modelo Hidráulico & SIG.....	16
9 - CALCULO DOS PARÂMETROS BÁSICOS.....	16
9.1 - Formação da Brecha.....	16
9.2 - Hidrograma de Ruptura.....	17
9.3 - Modelo do Terreno.....	19
9.4 - Caracterização Geomorfológica.....	19
10 - APLICAÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO.....	20
11 - DELIMITAÇÃO DAS ZONAS INUNDÁVEIS.....	21
12 - ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	25

Índice de Figuras

Figura 1 - Registros de ocorrências históricas da barragem Jaburu I.....	7
Figura 2 - Curva cota x área x volume	9
Figura 3 - Hidrograma de ruptura triangular simplificado.....	12
Figura 4 - Hidrograma de ruptura triangular simplificado	18
Figura 5 - Seções a jusante da barragem Jaburu I traçadas com base no MDT ajustado	19
Figura 6 - Mapeamento das zonas potenciais de risco de inundação	22
Figura 7 - Mapeamento dos níveis máximos de elevação d'água.....	23
Figura 8 - Mapeamento das zonas potenciais de riscos e respectivas variações de escoamento	24

APRESENTAÇÃO

A Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH/CE), em antecipação às implicações legais, vem implementando estudos de modelagem para eventos extremos, como essencial para implantação de metodologias de gestão de riscos induzidos por ruptura de barragens com vistas à criação de sistemas de segurança, e um SIG (Sistema de Informações Geográficas) avançado permitindo o traçado das zonas inundáveis, no âmbito dos danos causados pela inundação.

Atualmente, a COGERH dispõe de equipe técnica especializada, locada na GESIN (Gerência de Segurança e Infraestrutura de Barragem), que atua na análise de segurança de barragens desempenhando ações quanto à resistência e estabilidade das obras, funcionamento e manutenção dos equipamentos de segurança e operação vinculados aos respectivos órgãos gestores, além dos fatores ambientais e socioeconômicos associados à construção e exploração da reserva hídrica.

Este relatório, parte integrante do Contrato 004/SRH/CE/2010, Projeto Executivo e das Obras para Recuperação da Barragem do Açude Jaburu I, corresponde ao relatório de Mapeamento das Zonas de Inundação pela Ruptura da Barragem Jaburú I – Dam Break.

O Projeto e Acompanhamento dos trabalhos é de responsabilidade da COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos, de acordo com o Primeiro Aditivo – Sub-rogação do Contrato Nº 04/SRH/CE/2010, firmado entre a Secretaria dos Recursos Hídricos e a COGERH, com a anuência da Empresa S & V Ltda.

Os trabalhos desenvolvidos no referido Contrato foram divididos em 7 (sete) Tomos conforme descritos a seguir:

Tomo I – Execução dos Serviços de Recuperação da Barragem Jaburu I – 2010;

Tomo II – Boletins das Sondagens - Volumes 1 e 2;

Tomo III – Registros Fotográficos;

Tomo IV – Levantamentos Topográficos da Barragem e Topobatimétrico do Reservatório;

Tomo V – Estudos Hidrológicos;

Tomo VI – Mapeamento das Zonas de Inundação pela Ruptura da barragem Jaburu I;

Tomo VII – Anteprojeto da Recuperação do Vertedouro.

Este documento integra o **Tomo VI** .

1 - RELATÓRIO DE ANÁLISE DE ROMPIMENTO DA BARRAGEM JABURU I

Para as populações fixadas em vales a ocorrência de eventos extremos e não delineados, associados ao risco de ruptura de barramentos, induzem a um fator de risco devido ao extraordinário potencial destrutivo que constitui o volume de água armazenado.

O presente relatório tem por objetivo mostrar os resultados das análises hidrodinâmicas efetuadas para a barragem Jaburu I Figura 1, no sentido de avaliar as implicações que poderiam advir de uma eventual ruptura e, conseqüente, formação de uma onda de cheia artificial que se propagaria rapidamente para jusante.

A ruptura da estrutura poderia provocar sérios danos à população ribeirinha situada a jusante. Dado o volume armazenado de água no reservatório da ordem de 138hm^3 para o N.A. máximo normal (cota: 716,38), podendo atingir a cota de coroamento (720,40) com um volume retido de, aproximadamente, 167hm^3 .

Na literatura técnica, vários autores têm analisado as causas de acidentes em barragens e observaram que as causas comuns são: transbordamento, ruptura hidráulica, escorregamentos, vazamentos de galerias, falta de proteção de taludes e outras causas de menor incidência.

Desta forma para efetuar a análise técnica da barragem Jaburu I foram realizadas vistorias no local e realizado um levantamento topográfico do maciço e vale a jusante da barragem, com o objetivo de explanar causas plausíveis de um rompimento no maciço.

O mapeamento das zonas de risco é abalizado na análise de dois cenários de ruptura estabelecidos, após discussões precedentes com a equipe técnica da GESIN, levando em conta as questões da estabilidade geotécnica relativas ao maciço de terra zoneada e os fatores dominantes da geologia estrutural dos vales. De acordo com as limitações geofísicas impostas pela fundação rochosa da barragem, conforme demonstrando no histórico de intervenções discriminado a seguir, foram estabelecidos os cenários de ruptura: (1) “*Overpiping*” - que idealiza uma situação fictícia excepcional de estarem ocorrendo níveis d’água elevados, cerca de 0,30 m acima da cota de coroamento da barragem (720,70); e, (2) “*Piping*” - esta situação refere-se ao rompimento do maciço de terra que seria parcialmente erodido formando um canal trapezoidal com formação próxima a ombreira direita.

Os procedimentos metodológicos se desenvolvem com a aplicação de formulações hidráulicas para o cálculo dos parâmetros básicos do modelo hidrodinâmico (HEC-RAS) para obtenção das vazões e os níveis máximos de inundação; e, Plataforma SIG, associada ao software ArcGIS extensão HEC-GeoRAS, para importação das informações e mapeamento das zonas de inundação.

1.1 – Acontecimentos Históricos – Intervenções

(1983)

- Enchimento do reservatório;
- Abatimento com aparecimento de fissuras no coroamento;
- Reconstituição do maciço.

(1988)

- Identificada surgência na ombreira esquerda, com vazão registrada de 47 l/s;

(1989-90) - 1ª. INTERVENÇÃO

- Aumento da surgência ocasionando erosão regressiva em parte da ombreira esquerda ;
- Campanha de impermeabilização por injeção de cimento e asfalto na fundação;
- Finalização dos serviços de regularização da surgência, com vazão final em 2,4 l/s;

(1993) - 2ª. INTERVENÇÃO

- Aparecimento de surgências na ombreira direita e de uma caverna na margem direita do canal escavado para implantação da tomada d'água;
- Campanha de impermeabilização por injeção de cimento na fundação;
- Implantação de 07 piezômetros no talude de jusante;

(1997)

- A vistoria técnica realizada pelo Painel de Inspeção e Segurança de Barragem (PISB) e por técnicos da SRH, COGERH e SOHIDRA consideraram urgente a necessidade de estudos complementares para o diagnóstico da ocorrência e definição das obras de engenharia necessárias para recuperação da estrutura;

(1998 - 2001)

- Vistoria, realizada pelo consórcio Geodinâmica / COBA, para inspeção das irregularidade para quantificação dos serviços a serem realizados nas obras de recuperação da barragem;
- Licitação das obras de recuperação;

(2002 - 2003)- 3ª. INTERVENÇÃO

- Reforço no tratamento da fundação ;
- Estabilização e drenagem da barragem;
- Alçamento da crista, e execução da pavimentação em TSD (Tratamento Superficial Duplo);
- Reposição do enrocamento à montante;
- Recuperação das canaletas;
- Construção dos medidores de vazão;
- Execução de impermeabilização e estabilização do canal do sangradouro;
- Instalação de dispositivos de observação (piezômetros, referências geodésicas de nível e posicionamento);

(2007)

- Destruição de um medidor de vazão por deslocamento de rocha;

(2009)

- Rigoroso período de chuvas, houve o registro da presença de resíduos de asfalto provenientes da ombreira esquerda com indicativo de erosão interna;
- Vistoria técnica realizada pelo Painel de Inspeção e Segurança de Barragem (PISB) e por técnicos da SRH e COGERH;

(2010) - 4ª. INTERVENÇÃO

- Reconstrução da laje do canal de aproximação em concreto armado;

(2010) - 5ª. INTERVENÇÃO

- Levantamento topográfico da área a jusante da barragem;
- Estudos para geração do PAE (Plano de Ação Emergencial);
- Tratamento da fundação através de impermeabilização com injeções de cimento e asfalto;
- Estabilização dos taludes da tomada d'água, evitando deslizamentos de terra.



Figura 1 - Registros de ocorrências históricas da barragem Jaburu I

2 - MODELO DE ROMPIMENTO DE BARRAMENTOS

As cheias decorrentes da ruptura de uma barragem são, na maioria dos casos, muito severas. Este processo faz com que uma grande quantidade de água chegue abruptamente ao curso d'água, podendo advir de uma precipitação máxima provável, um abalo sísmico ou falhas na construção.

As simulações de rompimento da barragem são essenciais para caracterizar e reduzir o verdadeiro potencial de falha das barragens, podendo ser usadas também para desenvolver planos de ações de emergências, prevendo as cotas e local onde a onda de cheia pode alcançar. Estes modelos de rompimento são dependentes dos parâmetros de formação da brecha (fratura), que na maioria das vezes são estimados por análises estatísticas dos dados históricos já observados, e dentre eles destacam: largura da fratura, profundidade da fratura, forma geométrica e ângulo da fratura, razão e tempo de desenvolvimento da fratura e tipo da barragem.

O rompimento de barragens por overtopping em barragens de terra, as falhas começam quando uma quantidade considerável de água começa a vazar sobre ou em torno da face barragem, erodindo-a. Uma vez iniciada a erosão é quase que impossível retardar o processo de falha, pois, esta começa em um ponto do topo da barragem e expande em uma forma trapezoidal até alcançar um tamanho máximo (WAHL, 2004).

O método de rompimento de barragens por piping é característico das barragens de terra. Este tipo de falha acontece naturalmente quando a água penetra através da barragem com um aumento de velocidade e vazão considerável, erodindo as partículas finas do maciço de solo. Se bastante material erodir, o processo de *piping* conectará com a água do reservatório, impossibilitando a recuperação. O processo começa em um ponto da face da barragem e expande de forma circular, chegando a uma forma trapezoidal no fim (rompimento). A vazão através da brecha circular é modelada como um orifício, enquanto o segundo estágio é modelado conforme uma barreira (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2006).

Barragens de terra não falham instantaneamente desde que o intervalo de tempo de formação da brecha seja determinado por uma equação empírica que descreva o processo (FREAD; LEWIS, 1998).

2.1 - Dados Básicos

Os dados de projeto foram óbitos, principalmente, do Plano de Operações e Manutenções (POM), emendadas por revisões topográficas e outras análises técnicas realizadas pela GESIN (2010), constando de desenhos e relatórios técnicos.

2.2 - Características Gerais da Barragem Jaburu I

A seguir são resumidas as principais características do reservatório e das estruturas do barramento de interesse para as análises:

N.A. máximo normal de funcionamento: 716,38 m

Vertedouro - perfil Creager: 716,38 m

Largura da soleira vertente: 25,00 m

Coroamento das estruturas: 720,4 m

Extensão total da barragem (crista): 770,00 m

Volume de água no N.A. máximo normal: 138 hm³

Máxima descarga: 197,4 m³/s (cheia milenar)

2.3 - Curva CAV (COTA – ÁREA – VOLUME)

De acordo com os estudos Topobatimétricos realizados pela COGERH (Dez.2010) foram considerados os seguintes valores de áreas e volumes, conforme Figura 2, a seguir:

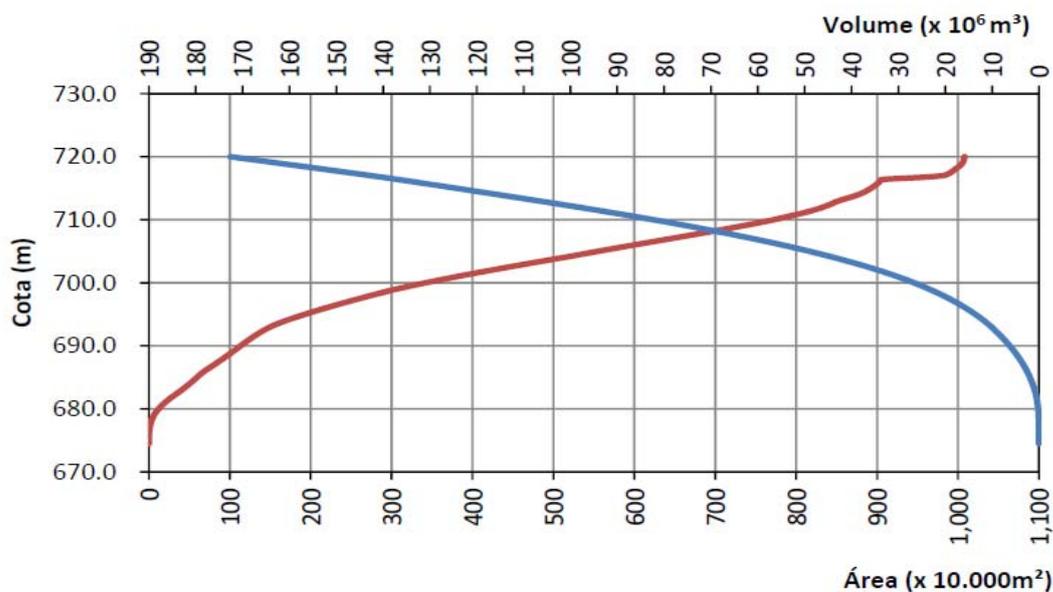


Figura 2 - Curva cota x área x volume

3 - MODELAÇÃO DA BRECHA

A modelação da brecha é um aspecto fundamental na simulação computacional das cheias induzidas pelo cenário que se pretende estudar. Durante a simulação, a dimensão da erosão aumenta conforme a passagem de fluxo. Devendo variar os seguintes parâmetros: tipo de geometria ou caráter de ruptura durante as fases, inicial e final, do processo; dimensão final; e, duração da fase de abertura da brecha.

É importante destacar que o processo de formação da brecha depende, basicamente, do tipo de barragem e da causa da ruptura. Nas barragens de aterro, caso do estudo, são as mais susceptíveis à ruptura pela maior fragilidade dos materiais à erosão (solos e enrocamentos) e pelo menor controle de qualidade dos mesmos (grande heterogeneidade do material). No entanto, em barragens de solo compactado a ruptura é, em geral, gradual e parcial; é o tipo de barragem onde a brecha iniciada por erosão interna, percolação ou galgamento apresenta um maior tempo de evolução no processo erosivo.

As características das brechas influenciam os valores dos caudais, níveis e tempos de chegada da onda, assim como o intervalo de tempo disponível para uma eventual evacuação. Petrascheck e Sydler (1984) demonstraram que a sensibilidade da vazão de pico, níveis de inundação e tempo de chegada da onda à mudança da largura e tempo de formação da brecha apresentando grande influencia para locais próximos das barragens, mas para locais muito a jusante das estruturas, o tempo da formação da onda de cheia pode mudar significativamente com o tempo de formação da brecha, mas o pico de vazão e níveis de inundação é insensível à mudança dos parâmetros da brecha.

3.1 - Determinação da Geometria da Brecha

Devido às incertezas do mecanismo real de ruptura, os parâmetros de abertura e formação, é feito uma caracterização paramétrica simplificada da abertura da brecha baseado geralmente numa geometria trapezoidal. Outros parâmetros básicos representando o tempo de formação, largura final do fundo também são considerados.

É importante ressaltar que para ocorrer instabilidade de taludes, não é necessário que ocorra uma erosão regressiva (início de piping), uma vez que pequenos incrementos de permeabilidade podem causar o aumento da poropressão resultando na perda de estabilidade. Porém os fatores responsáveis pelo início e progressão do piping, são altamente influenciados pelo nível de água do reservatório.

Assim, o tempo de formação da brecha é definido como o tempo que começa com a primeira brecha na barragem na face de montante até atingir a face de jusante. Para falhas devido ao overtopping o início se dá quando a brecha é formada a jusante após a erosão do topo da barragem e alcança a barragem a montante.

Em Froehlich (1987) é proposta uma equação de formação de brecha, baseada em dados referentes a análise de diversos casos de rupturas, que incluem a ruptura da barragem Orós, CE.

$$\Delta x \leq 166,67 \text{ m}$$

$$t_B = 0,00254 \times V_0^{0,53} \times h_B^{-0,9}$$

onde:

W_B - Largura média de brecha (m)

t_B - Tempo de formação da brecha (h)

K_0 - Coeficiente adimensional (1,0 para erosão interna; 1,4 para galgamento)

h_B - Altura de água na base da brecha (m)

4 - TEMPO DE RUPTURA

O modelo é baseado numa metodologia simples de esvaziamento do reservatório (reservoir routing), tendo como condição fronteira de jusante a vazão na brecha que, por sua vez, é dependente da erosão da brecha. O cálculo da evolução da brecha será fundamentado em duas abordagens:

(1) Empírica, que se baseia no conhecimento a priori dos parâmetros da brecha (geometria final, tempo de formação e tipo de evolução da brecha);

(2) Racional, que requer o conhecimento da geometria final da brecha, mas a sua evolução é controlada pela erodibilidade do material da barragem, usando para tal uma equação de erosão.

No modelo empírico, conforme Froehlich (1987) o tempo de ruptura de uma barragem de aterro pode ser estimado por:

$$t_{ruptura} = 0,007 \times \left(\frac{V_{barr}}{H_0^2} \right)^{0,50}$$

onde:

$t_{ruptura}$ - Tempo de rotura da barragem (h)

H_0 - Altura inicial de água acima da cota final da brecha (m)

V_{barr} - Volume de armazenamento (m³)

5 - HIDROGRAMA NA BRECHA

A ocorrência da rotura de uma barragem induz um rápido aumento de caudal à jusante da estrutura. Em geral, é superior ao caudal de cheia máxima de projeto, porém depende do nível de água no reservatório no momento da ruptura.

Dentre as diversas fórmulas empíricas existentes na bibliografia, optou-se por utilizar a formula

de Lou (1981 *apud* Mascarenhas, 1990):

$$Q_M = 7,683 \times H_0^{1,909}$$

onde:

Q_M - Vazão de máxima devido à formação da brecha (m^3/s)

H_0 - Altura inicial de água acima da cota final da brecha (m)

Conforme a USACE (1997) o hidrograma de falha da barragem pode ser estimado por um hidrograma de ruptura triangular simplificado, conforme observado na Figura 3.

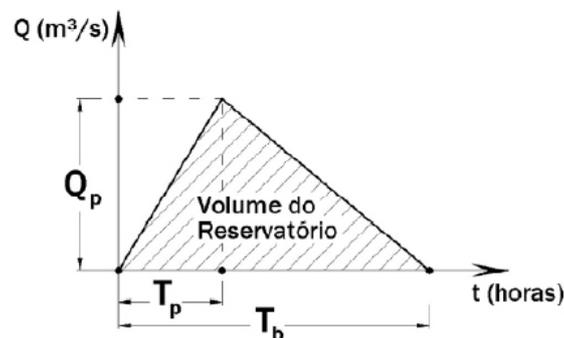


Figura 3 - Hidrograma de ruptura triangular simplificado

A equação utilizada para a elaboração do hidrograma de ruptura.

$$Q_{Max} = \frac{2 \cdot V_r}{T_b}, \text{ para } T_p = 0$$

onde:

Q_{Max} – Descarga máxima efluente da barragem em ruptura (m^3/s);

V_r – Volume do reservatório no momento da ruptura (m^3);

T_p – Tempo de pico (s) e T_b – Tempo de base (s)

Morris e Galland (2000) mostram que as diferentes abordagens existentes na determinação das vazões de pico e do hidrograma de ruptura podem afetar a taxa de escoamento da água e o potencial de inundação das áreas a jusante. Verifica-se, assim, que para cada barragem podem ser construídos um elevado número de cenários.

6 - DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE RUGOSIDADE

A seleção do valor apropriado para este coeficiente é bastante significativa na confiabilidade dos dados calculados, as incertezas na escolha do indicador de rugosidade afetam diretamente a altura de

inundação. O coeficiente de Manning é bastante variável e depende de um grande número de fatores, incluindo: vegetação, irregularidades da superfície, alinhamento e forma do canal, deposições, obstruções, vazão e mudanças sazonais. Para tanto, considerou-se como valor único para o número de Manning: 0,30 para calha fluvial; 0,40 - baseado na literatura como valor médio - para áreas mediamente florestadas e 0,80 para zonas urbanizadas.

Conforme FREAD, (1998) o valor da rugosidade de Manning em inundações é consideravelmente maior do que quando o rio está confinado no seu curso normal. As obstruções temporárias devido à alta velocidade da água e os resíduos levados pela onda de enchente provocam um aumento significativo do coeficiente.

Os coeficientes de rugosidade foram ser estimados em função das características do solo e revestimento vegetal presente e baseados vistorias “in-loco”, através de pesquisas bibliográficas em canais com características similares; imagens de satélite foram utilizadas para zonear as áreas análogas para a aplicação de valores do coeficiente de rugosidade de Manning.

7 - MODELO DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA

O regime a ser aplicado no estudo é o não permanente, adequado para análises relacionadas à propagação de cheias em rios de planícies ou vales, onde aparecem componentes de armazenamento lateral. A sistemática agrega, também, a vantagem de incorporar a componente de variação temporal dos hidrogramas. Assim, o regime não permanente é uma ferramenta adequada para os estudos de trânsito de cheias e a previsão de vazões em tempo real.

O cálculo destes fenômenos deve necessariamente empregar abordagens numéricas que considerem as peculiaridades hidráulicas deste tipo de escoamento: perda de carga por fricção, canais não prismáticos, superfície da água variável, dentre outras. Neste contexto, existe uma grande dificuldade de se tratar as regiões de onda de cheia, em que ocorre uma variação rápida do fluxo, também chamada de descontinuidade (MACCHIONE; MORELLI, 2003).

Para modelar a propagação da onda de cheia causada pela ruptura da barragem, será utilizado o modelo hidráulico HEC-RAS para cálculo da onda de cheia na simulação de fluxo não-permanente, baseado na solução das equações completas unidimensionais de Saint-Venant, por meio de métodos implícitos de diferenças finitas. Observa-se que apesar de tratar da propagação de uma onda de ruptura, o modelo não isola a onda de choque que pode ocorrer devido ao colapso de uma barragem, nem utiliza outras equações que não as de Saint-Venant nas regiões do choque.

Para uma abordagem unidimensional as equações de Saint-Venant podem ser descritas pelas seguintes relações matemáticas (Lauriano, 2008):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (\text{Conservação de massa})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_f) \quad (\text{Conservação da Quantidade de}$$

Movimento)

onde: t: é a variável independente relativa ao tempo (s);

x: é a variável independente relativa à direção do escoamento (m);

u: é a velocidade média do escoamento (m/s);

g: é a aceleração da gravidade (m/s²);

h é a espessura da lâmina líquida (m);

So: é a declividade média da calha fluvial ou do fundo do canal (m/m);

Sf: é a declividade da linha de energia (m/m).

8 - FORMULAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA

Uma consideração interessante dessa análise refere-se à quantidade de material erodido do maciço de terra, que é diretamente associado com o volume de água e altura da barragem; Assim, durante a formação de um piping ou um overtopping, o tempo de formação da brecha depende da quantidade de material arrastado, também em função do volume de água e altura da brecha, que influenciam na estimativa das vazões de pico.

Conforme Oliveira (2005) citado por Carneiro Neto (2009) a aplicação do modelo de simulação hidráulica HEC-RAS requer as seguintes informações básicas:

a) Diagramas esquemáticos dos cursos d'água – definem como os diversos cursos d'água são conectados, onde cada trecho do rio possui uma única identificação. A seção transversal é caracterizada por três identificadores: "River" (rio), "Reach" (trecho) e "River Station" (estação ou posto do rio). As confluências dos rios são consideradas junções;

b) Dados das seções transversais – o contorno geométrico para a análise do escoamento em rios naturais é especificado em termos dos perfis transversais das seções e das distâncias medidas entre essas seções. As seções são localizadas em intervalos ao longo do rio para caracterizar a capacidade de escoamento do rio e suas planícies de inundação adjacentes. Samuels (1989) um espaçamento mínimo entre as seções transversais, em regime não permanente, baseado na profundidade de inundação e no desnível médio:

$$\Delta x \leq \frac{0,15 \cdot D}{S}$$

onde: Δx : é o espaçamento mínimo adotado entre as seções transversais (m)

D: é o espaçamento entre margens no ponto de maior profundidade do canal (m)

S: é o declividade do trecho (m/m).

- c) As seções podem se estender através de toda a planície de inundação e podem ser perpendiculares as linhas de escoamento (aproximadamente perpendiculares à linha de contorno do leito);
- d) Comprimento dos trechos dos rios – as distâncias medidas entre as seções transversais se referem aos comprimentos dos trechos dos rios;
- e) Informações sobre as confluências dos cursos d'água – as confluências de cursos d'água são definidas nos locais onde dois ou mais escoamentos se juntam ou se separam. Os dados das junções consistem de comprimentos dos trechos nas junções e ângulos entre os tributários, quando a equação do momento for selecionada;
- f) Coeficientes de perda de energia – diferentes tipos de coeficientes são utilizados pelo modelo para avaliar as perdas de energia: coeficiente de Manning para avaliar a perda de atrito; coeficientes de contração e expansão;
- g) Regime de escoamento – no caso de estudo, o escoamento é não permanente;
- h) Condições de contorno – são especificadas nos extremos da bacia hidrográfica – seções situadas mais a montante ou a jusante do sistema, para que o modelo dê início aos cálculos da superfície da linha d'água. O HEC-RAS permite que se utilize de quatro tipos de condições de contorno, quais sejam: elevação da superfície da água, profundidade crítica, profundidade normal (neste caso deverá ser informada a declividade média do talvegue no local onde se iniciarão os cálculos) e, ainda, a curva Vazão Total x Elevação da Superfície da Água (Curva-Chave);
- i) Vazões - as informações sobre vazões são fornecidas ao modelo de montante para jusante, em cada segmento do sistema, para cada perfil que se pretende calcular.

As diretrizes para a aplicação do modelo são as equações de Saint-Venant, especifica o *Hydrologic Engineering Center*. Operando sobre modelos unidimensionais, de fundo fixo, em regime de escoamento permanente e não permanente, para canais com superfície livre. Esses perfis podem ser calculados em regimes subcrítico, supercrítico, e misto, devendo ocorrer mudanças dos regimes supercríticos para subcrítico reciprocamente.

8.1 - Integração Modelo Hidráulico & SIG

Com a importação dos resultados do modelo hidráulico para a extensão, em conjunto com o MDT, 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

9 - CALCULO DOS PARÂMETROS BÁSICOS

Com a finalidade de uniformizar os critérios para a simulação da onda de inundação provocada pela ruptura de barragens, propõem-se determinados valores para as condições iniciais, dimensões da brecha e tempo de rotura. As considerações iniciais, para o momento da extrusão, foram:

- As aflúncias podem ser ignoradas, excerto no caso de pequenas barragens ou quando advém de um hidrograma de cheia gerado pela ruptura de uma barragem a montante.
- Nas rupturas por galgamento o nível do reservatório deve estar, pelo menos, ao nível do coroamento.
- O cenário será corresponde ao tipo de rotura por mais provável, por galgamento, tendo por base as roturas históricas para barragens de aterro.

9.1 - Formação da Brecha

A barragem assentada sobre fundação em rocha arenítica, com o sangradouro escavado em rocha, tem sofrido constantes intervenções visando à recuperação das boas condições de segurança em razão de dificuldades de na drenagem e estabilidade que tem apresentado. Foram executadas obras de recuperação da barragem que incluem entre outras ações, estabilização e tratamento de fundação com injeções de cimento e obras de drenagem.

Com o início do processo de erosão na zona mais fraca devido a elevada taxa de erosão na vertical, simultaneamente, ocorrerá à erosão lateral e a formação da brecha, que se expande até atingir uma situação de equilíbrio. Neste caso, considerou-se que a brecha expandirá até uma altura de 90% da altura do maciço para uma lâmina média de 50 cm sobre a crista da barragem.

Abertura de brecha por galgamento (overtopping):

$$W_B = 0,1830 \times k_0 \times V_0^{0,32} \times h_B^{0,19}$$

$$W_B = 0,1830 \times (1,4) \times (169.730.000)^{0,32} \times (41,13)^{0,19}$$

$$W_B = 223,25 \text{ metros}$$

Abertura de brecha por galgamento (pinping):

$$W_B = 0,1830 \times k_0 \times V_0^{0,32} \times h_B^{0,19}$$

$$W_B = 0,1830 \times (1,0) \times (169.730.000)^{0,32} \times (41,13)^{0,19}$$

$$W_B = 159,46 \text{ metros}$$

Tempo para o desenvolvimento da brecha:

$$t_B = 0,00254 \times V_0^{0,53} \times h_B^{-0,9}$$

$$t_B = 0,00254 \times 169.730.000^{0,53} \times 45,7^{-0,9}$$

$$t_B = 2,06 \text{ hs.}$$

Tempo para ruptura total:

$$t_{ruptura} = 0,007 \times \left(\frac{V_{barra}}{H_0^2} \right)^{0,5}$$

$$t_{ruptura} = 0,007 \times \left(\frac{169900000}{41,13^2} \right)^{0,5}$$

$$t_{ruptura} = 2,22 \text{ horas} > t_B$$

Vazão máxima devido ao processo de ruptura

$$Q_M = 7,683 \cdot H_0^{1,909}$$

$$Q_M = 7,683 \cdot 41,13^{1,24}$$

9.2 - Hidrograma de Ruptura

$$Q_M = \frac{2 \cdot V_r}{T_b}, \text{ para } T_p = 0$$

$$9.267,44 = \frac{2 \times 169.900.000}{T_b}$$

$$T_b = 36.666,00 \text{ seg} \approx 10,158 \text{ h}$$

O hidrograma de ruptura triangular simplificado esta demonstrado no gráfico da Figura 4 e detalhado na Tabela 1 a seguir.

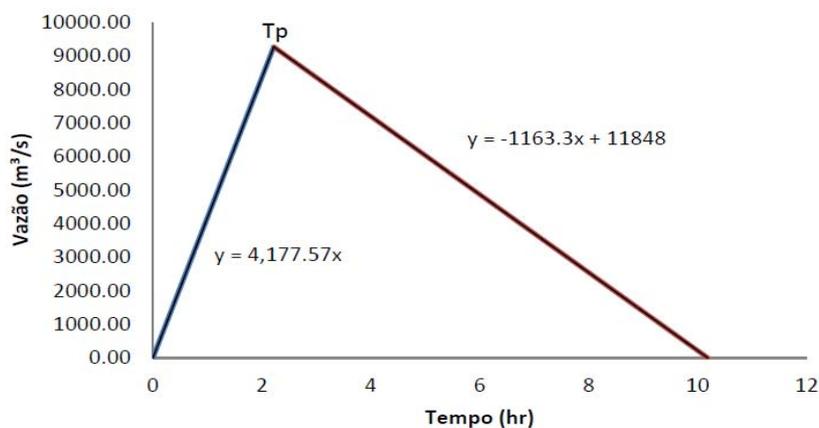


Figura 4 - Hidrograma de ruptura triangular simplificado

Tabela 1 - Curva Cota X Área X Volume

TEMPO	VAZÃO	TEMPO	VAZÃO
0.0	0	5.2	5837.61
0.2	696.26	5.3	5643.73
0.3	1392.52	5.5	5449.85
0.5	2088.78	5.7	5255.96
0.7	2785.04	5.8	5062.08
0.8	3481.30	6.0	4868.20
1.0	4177.57	6.2	4674.31
1.2	4873.83	6.3	4480.43
1.3	5570.09	6.5	4286.55
1.5	6266.35	6.7	4092.66
1.7	6962.61	6.8	3898.78
1.8	7658.87	7.0	3704.90
2.0	8355.14	7.2	3511.01
2.2	9051.40	7.3	3317.13
2.3	9267.44	7.5	3123.25
2.5	8939.75	7.7	2929.36
2.7	8745.86	7.8	2735.48
2.8	8551.98	8.0	2541.60
3.0	8358.10	8.2	2347.71
3.2	8164.21	8.3	2153.83
3.3	7970.33	8.5	1959.95
3.5	7776.4	8.7	1766.06
3.7	7582.56	8.8	1572.18
3.8	7388.68	9.0	1378.30
4.0	7194.8	9.2	1184.41
4.2	7000.91	9.3	990.53
4.3	6807.03	9.5	796.65
4.5	6613.15	9.7	602.76
4.7	6419.26	9.8	408.88
4.8	6225.38	10.0	215.00
5.0	6031.50	10.2	21.12

9.3 - Modelo do Terreno

Utilizou-se o software ArcGIS 9.3 extensão 3D Analyst para geração do MNT (Modelo Numérico do Terreno) a partir da importação das seções transversais obtidas nos levantamentos topográficos.

Devido a quantidade de dados planialtimétricos, ser insuficiente para recobrir todo o vale, optou-se por combinar, através de interposição de planos, com o modelo SRTM 3 arco segundos, com o software Global Mapper 9.03. O resultado apresentou resultados altimétricos razoáveis, quando comparados com RN (Referências de Nível) locais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2009).

Outras adequações no modelo foram o rebaixamento da superfície d'água o reservatório para um novo nível de fundo, adequando um plano inclinado iniciando na cota mínima do talude de jusante (674,49 m) até a cota de sangria (720,4 m).

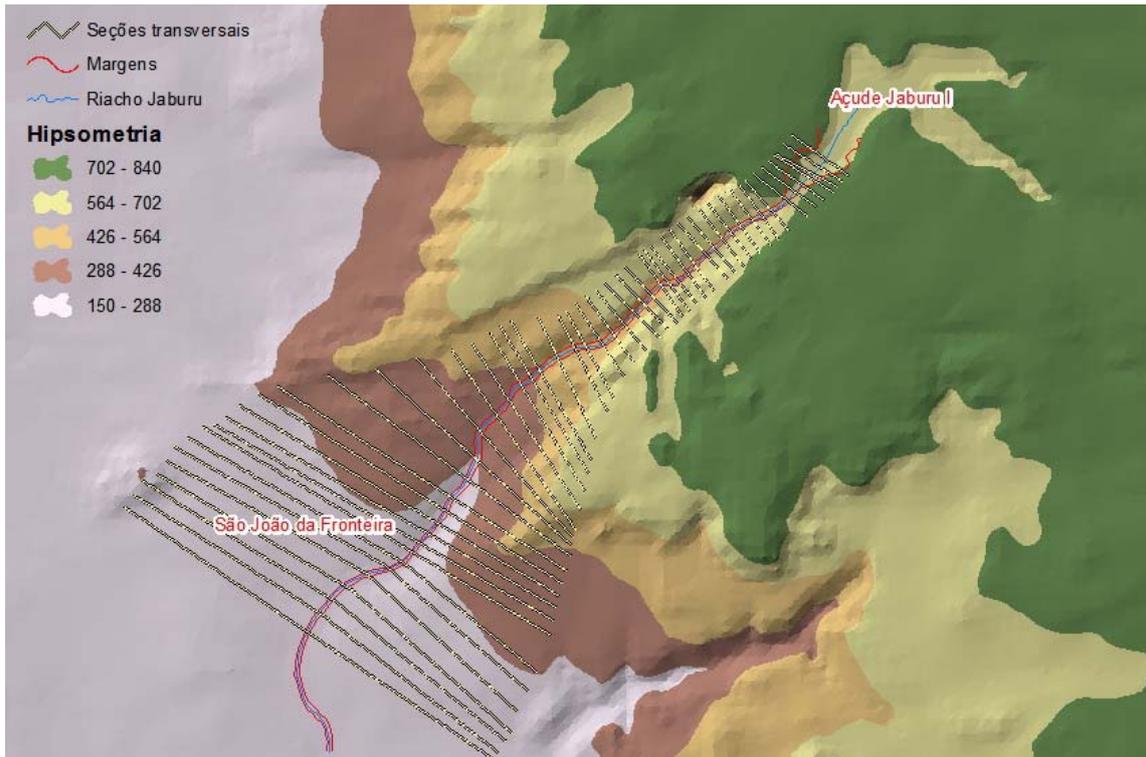


Figura 5 - Seções a jusante da barragem Jaburu I traçadas com base no MDT ajustado

9.4 - Caracterização Geomorfológica

Utilizou-se o software ArcGIS 9.3 extensão GEO-HecRAS para delinear o curso principal do rio, gerado com base no MDT através da identificação das linhas de fluxo que constituem o talvegue. As margens são geradas com base em imagens de satélite identificando as linhas que definem o canal natural principal. As linhas de escoamento são traçadas de modo a identificar o escoamento na margem esquerda, na margem direita e no canal principal.

Adotou-se $D = 20$ km (como o arredondamento da extensão entre o barramento e um trecho posterior a saída da cidade).

$$\Delta x \leq \frac{0,15 \cdot D}{S}$$

$$\Delta x \leq \frac{0,15 \cdot 20}{0,018}$$

$$\Delta x \leq 166,67 \text{ m}$$

As localizações das seções transversais a serem traçadas à jusante do reservatório devem considerar as características das linhas de água, procurando selecionar os cortes transversais de modo a que os trechos entre seções sejam considerados com características praticamente constantes. Foram representadas 50 seções transversais com espaçamentos variando de 170 a 500 metros,

perpendiculares à direção de escoamento.

Nas seções transversais são calculadas as propriedades geométricas, nomeadamente a identificação das linhas de água, a localização das margens e a distância entre cortes, quanto ao traçado do curso d'água, ou linha principal, estabelece a conectividade e a orientação do escoamento (montante e jusante). Ambos os temas obtém por extração os dados de altimetria com base no modelo digital do terreno.

10 - APLICAÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO

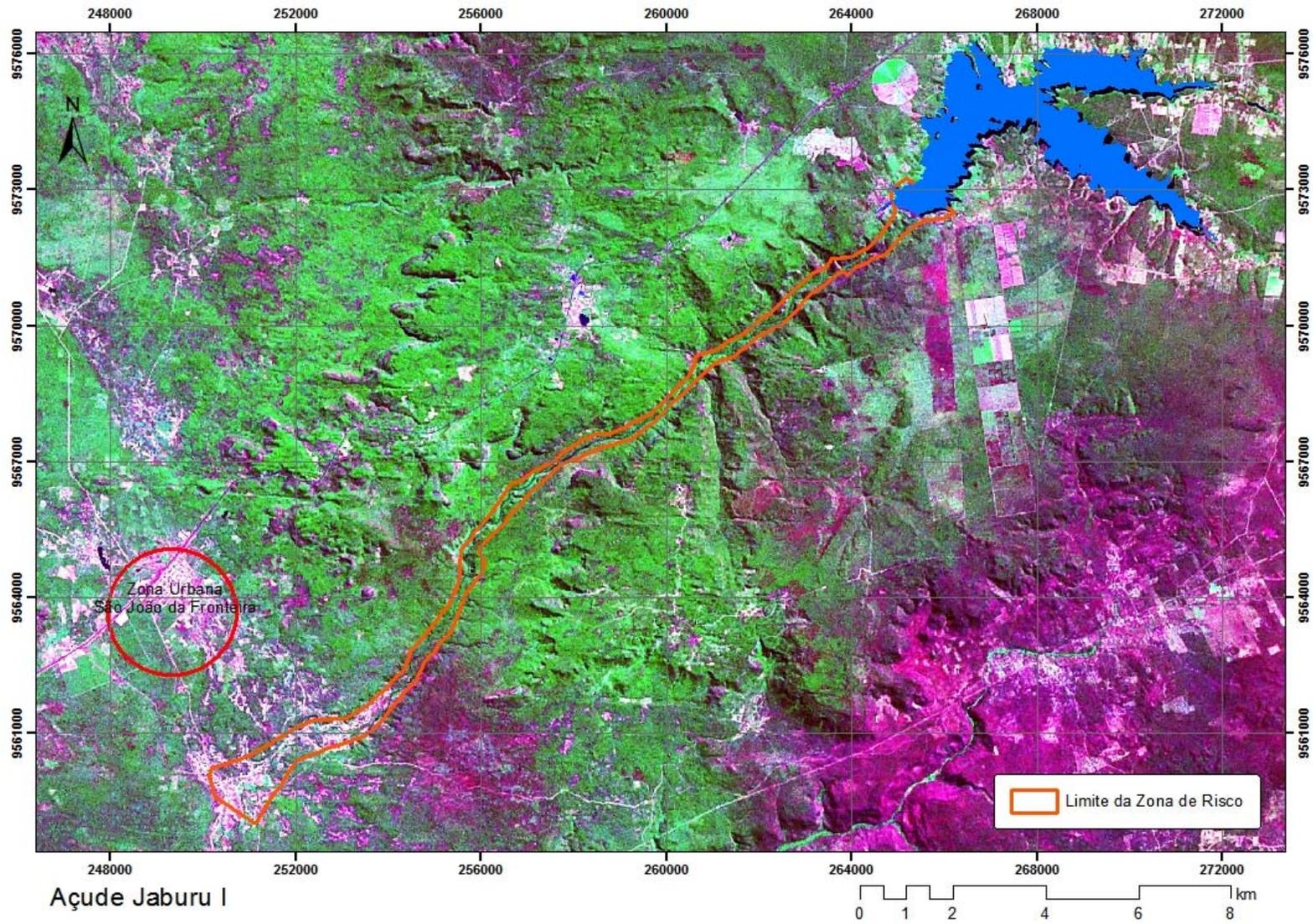
Foram introduzidas as condições de fronteiras (*Reach Boundary Condition*). Nesta simulação opta-se por seleccionar as opções *Flow Hydrographic* e *Normal Depth*. No primeiro caso foi utilizado o Hidrograma de Ruptura Triangular Simplificado, com um intervalo de 10 minutos. Já no segundo caso as seções de montante e jusante apresentam a altura uniforme, sendo introduzido o declive médio do trecho (0,018 m/m) para cálculo da altura uniforme correspondente.

Conforme Oliveira (2005), hidrogramas tipo “pulso” abrupto podem fisicamente provocar o aparecimento de ondas de choque (shock waves), para as quais as equações de Saint-Venant perdem sua validade. Se esses choques não forem acentuados, mecanismos numéricos dissipativos podem ser introduzidos nas equações de Saint-Venant, de forma que soluções descontínuas sejam descartadas. É importante frisar que descontinuidades, em geral, violam a hipótese de distribuição hidrostática de pressões na seção transversal o que é uma hipótese básica na dedução da equação dinâmica (ou conservação da quantidade de movimento).

Assim, a simulação do modelo hidrodinâmico depende de diversos ajustes, adequando as velocidades e os hidrogramas de respostas a desde a interpolação de seções transversais até um ajuste fino nos tempos de processamento. Cessando quando os padrões de formação de brecha e a configuração das linhas de corte permaneceram inalterados, apresentando continuidade no hidrograma de resposta, padrões admissíveis de velocidade (análogos aos obtidos na simulação com fluxo permanente) e estabilidade aparente nos deslocamentos da massa d'água.

11 - DELIMITAÇÃO DAS ZONAS INUNDÁVEIS

A delimitação das zonas inundáveis é obtida pela intercepção entre o MDT e a superfície livre. As cartas imagens a seguir representam o polígono da zona inundável com uma área de ha sobre uma imagem Geocover 2000.



Açude Jaburu I

Figura 6 - Mapeamento das zonas potenciais de risco de inundação

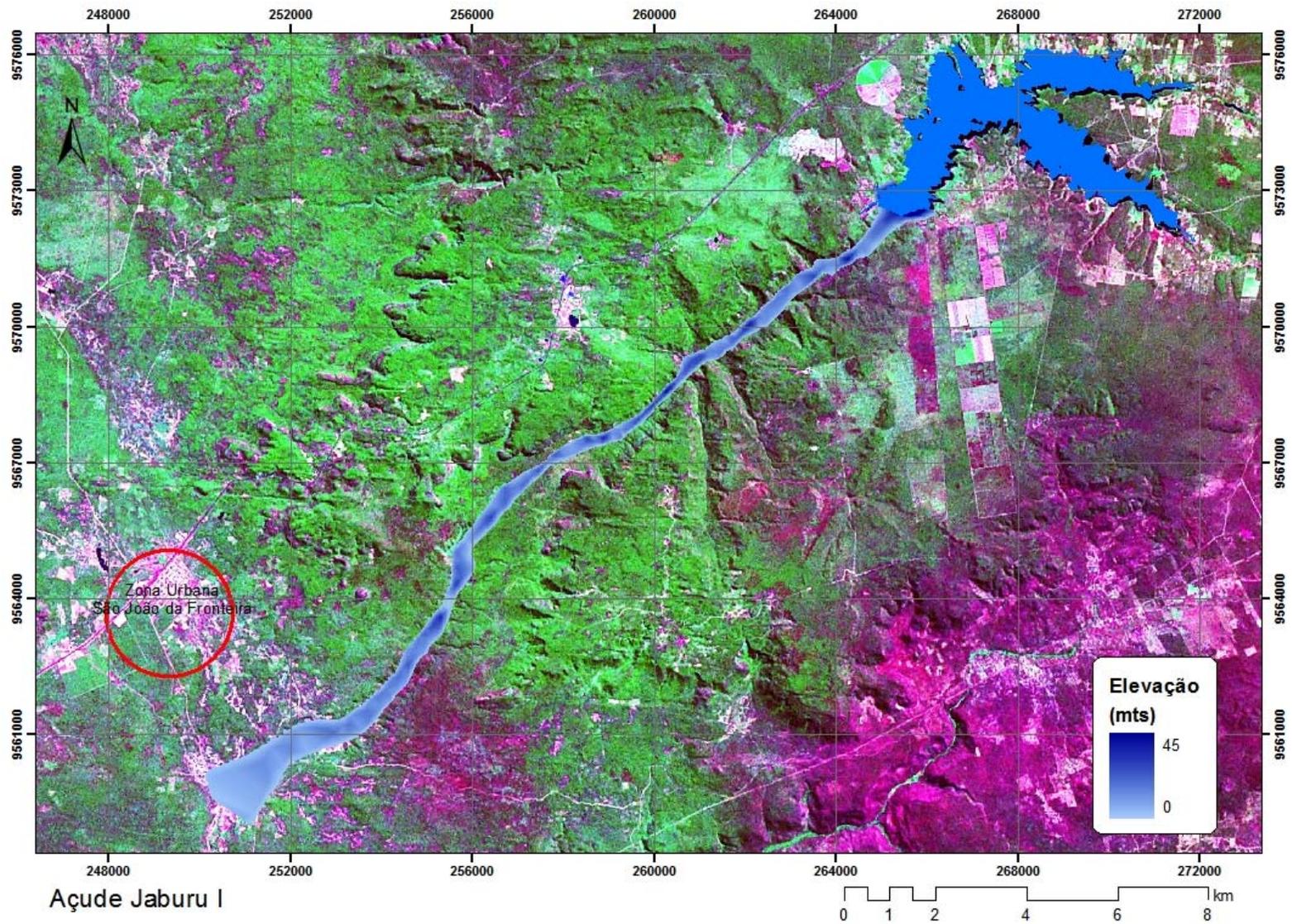


Figura 7 - Mapeamento dos níveis máximos de elevação d'água

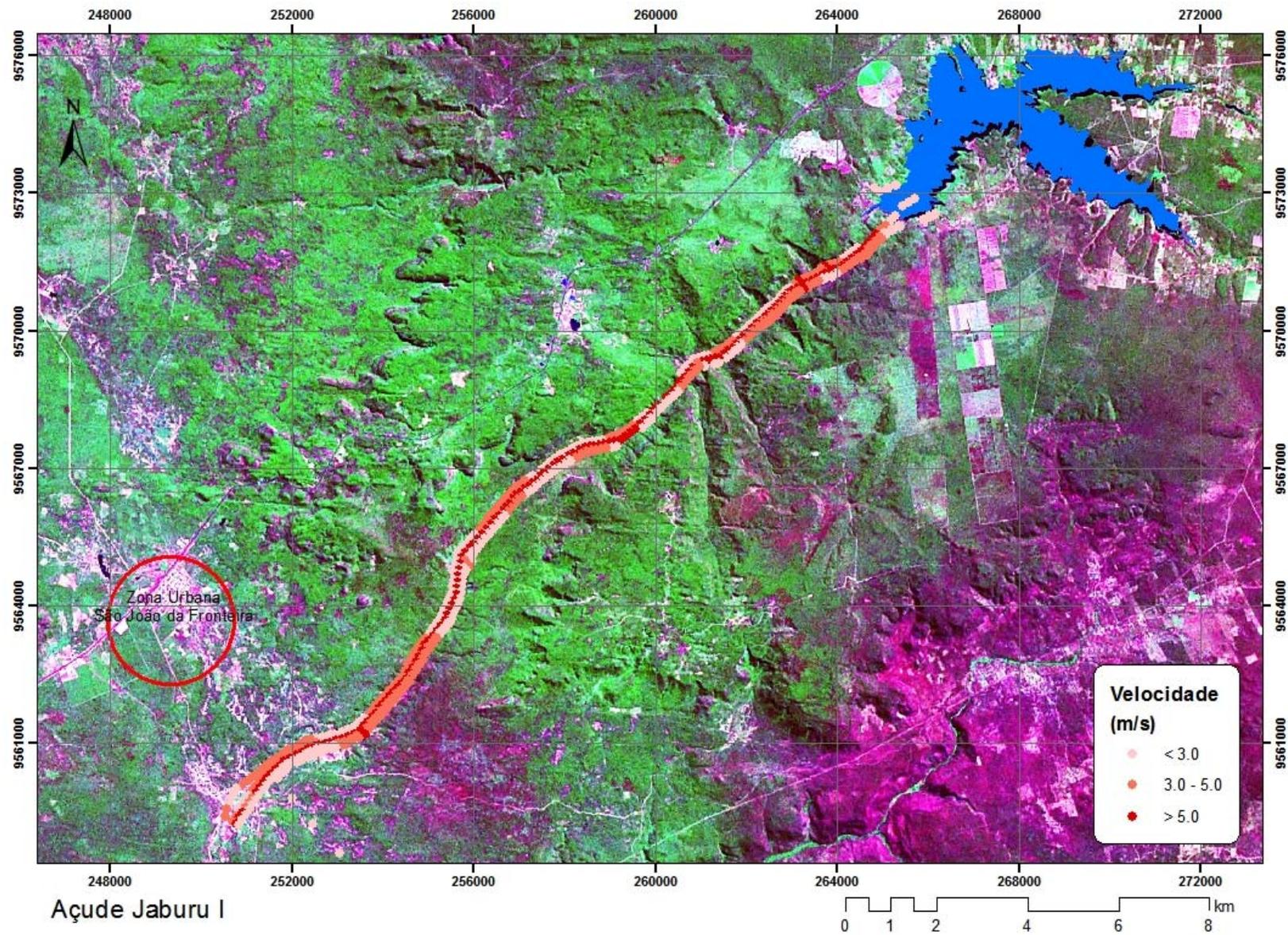


Figura 8 - Mapeamento das zonas potenciais de riscos e respectivas variações de escoamento

12 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

O trabalho desenvolvido foi realizado com o intuito de identificar os pontos críticos provocados pela onda de cheia nas comunidades ribeirinhas e marginais localizadas no vale a jusante da barragem Jaburu I, para o controle de inundação ao longo do trecho de 25 km pelo curso natural do riacho Jaburu a partir da Barragem Jaburu I.

Foi possível representar a envoltória máxima de inundação, porém face às incertezas da conformação do terreno, associadas principalmente ao modelo SRTM. Como o modelo adaptado deriva de um MDE (Modelo de Elevação do Terreno) esta considerando estruturas civis de médio e grande porte como parte do relevo natural, além de apresentar para o trecho em estudo planícies de inundação de pequena declividade com grandes áreas de armazenamento. Fato que, originalmente, levou a considerações mais abrangentes sobre o coeficiente de rugosidade adotado para áreas urbanizadas.

A análise do risco associado à ruptura da barragem de Jaburu I é baseada nos parâmetros que caracterizam a onda de cheia, observando que a profundidade média de inundação obtida é de 1,9 metros acima do fundo da calha fluvial para uma velocidade máxima de 6,66 m/s a distância de 25km a jusante das estruturas.

Ressalta-se a importância do refinamento para diminuir as incertezas dos atuais resultados, possibilitando a inclusão de outros cenários que associem a ruptura com eventos de cheia natural através da incorporação de estudos hidrológicos nas bacias de contribuição.