

Modelagem Matemática de Ondas de Ruptura de Barragens e Informações para o PAE

Marcelo Gomes Miguez
marcelomiguez@poli.ufrj.br

Contexto

- ◆ A preocupação com a segurança de barragens é antiga e existem registros de utilização de barragens e de acidentes com barragens, que remontam a Antiguidade.
- ◆ A necessidade de estabelecer normas que regulamentam sua construção e operação e o estabelecimento de planos de emergência, começaram a se intensificar somente depois de alguns acidentes graves que aconteceram no passado recente, especialmente na segunda metade do século XX.
- ◆ Marco legal brasileiro: A Lei Federal Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, estabelece no Brasil a Política Nacional de Segurança de Barragens e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens.

Contexto

- ◆ Os quesitos de segurança propostos pela nova Lei variam em função da classificação do risco e do dano potencial associado à barragem.
- ◆ Para as barragens classificadas como de dano potencial alto será obrigatória a elaboração, pelos empreendedores, do Plano de Ação de Emergência (PAE).
- ◆ Para as demais barragens, a obrigatoriedade ou não do PAE fica a critério da entidade fiscalizadora.
- ◆ A possibilidade de ruptura de uma barragem tem enorme poder destrutivo sobre o vale à jusante e, nesse contexto, a elaboração do PAE surge como um elemento fundamental para auxiliar nas respostas necessárias ao enfrentamento deste evento e reduzir os danos potenciais.

Plano de Ação de Emergência - PAE

- ◆ A informação básica para a construção do PAE se refere ao conhecimento dos mapas de inundação à jusante.
- ◆ Entretanto, uma série de informações adicionais podem ser úteis, para que as ações de resposta sejam efetivas, com as definições das decisões que devem ser tomadas antes, durante e após este evento, permitindo uma maior possibilidade de minoração de danos e salvamento de vidas
- ◆ Nesse sentido, pode ser interessante, além de mapear até onde chega o alagamento dado pela onda de cheia, definir também quando chega esta onda, com que velocidade de escoamento, qual seu potencial destrutivo, que caminhos continuarão acessíveis, quais são os locais de abrigo seguro para assistência e evacuação, entre outros.
- ◆ Apenas a modelagem matemática pode fornecer antecipadamente essas informações, uma vez que não é usual ter qualquer registro prévio desta natureza.

Plano de Ação de Emergência - PAE

Informações típicas obtidas com a modelagem matemática:

- ◆ Hidrogramas: fornecem vazões de pico e tempos de viagem da onda ao longo do vale. Esse item é importante para o alerta e evacuação.
- ◆ Cotogramas: definem os mapas de alagamento, permitindo avaliar áreas afetadas pela inundação. A partir desta informação, pode-se definir quais seriam possíveis áreas de abrigo e rotas de resgate e de fuga seguras. Pode-se avaliar também os tempos de permanência de alagamentos, oferecendo uma estimativa de quando as ações de recuperação poderão ser iniciadas.
- ◆ Velocidades: estão relacionadas com a topografia e com a presença de obstáculos

Plano de Ação de Emergência - PAE

- ◆ Uma outra informação que pode ser interessante refere-se ao cálculo do fator de velocidade, que é o produto da velocidade pela lâmina de escoamento.
- ◆ O fator de velocidade, portanto, resulta de pós-processamento de velocidades e profundidades e permite avaliar a capacidade de arraste da onda, relacionando-se com o seu potencial destrutivo.
- ◆ Com esta estimativa, é possível planejar a capacidade requerida para os abrigos e estimar custos para a recuperação de infraestruturas perdidas.

Aspectos Teóricos sobre Ondas de Ruptura

1. RITTER (1892)

- Ø Solução analítica
- Ø Ruptura Instantânea e Total;
- Ø Canal de Jusante Seco;
- Ø Retangular e Horizontal;
- Ø Sem Resistência do Fundo.

2. DRESSLER (1952) e Whitham (1955)

- Ø Com Resistência de Fundo.

3. STOKER (1957)

- Ø Canal de Jusante com Água.

4. Modelos UNIDIMENSIONAIS

- Ø DAMBRK, SMPBRK e FLDWAV (National Weather Service)
- Ø HEC-RAS (U.S. Army Corp of Engineers)
- Ø PROPAG (Mascarenhas, COPPE/UFRJ)

5. Modelos PSEUDO-BIDIMENSIONAIS

- Ø MODCEL (Miguez, COPPE/UFRJ)

6. Modelos BIDIMENSIONAIS

- Ø MIKE, Infoworks, ...

Configuram uma tendência atual

Modelagem Matemática da Onda de Ruptura

- ◆ A modelagem matemática deste tipo de evento é bastante complexa.
- ◆ Há várias dúvidas iniciais, sobre :
 - Como se forma a brecha de ruptura?
 - Como se desenvolve o hidrograma de ruptura?
 - Como representar a onda de choque ?
 - Qual a representação mais adequada para o vale de jusante?
Pode um modelo unidimensional ser representativo?

Modelagem Matemática da Onda de Ruptura

∅ Brecha de ruptura?

- ◆ Uma ruptura completa e instantânea pode ser admitida para as barragens de concreto em arco;
- ◆ Uma ruptura parcial e instantânea pode ser adotada para as barragens de concreto a gravidade ou contrafortes, com seções mais longas;
- ◆ Rupturas progressivas são mais comumente admitidas para as barragens de terra.
- ◆ O mecanismo de formação e desenvolvimento da brecha, porém, não é simples de representar.
- ◆ Modelos que não calculam a brecha devem ter essa informação como dado de entrada.

Modelagem Matemática da Onda de Ruptura

∅ Hidrograma de ruptura:

- ◆ A ruptura de uma barragem gera uma onda de cheia que se propaga para jusante na forma de um hidrograma.
- ◆ Magnitude >> hidrograma cheias excepcionais.
- ◆ Suas características dependem de como se dá a ruptura: hidrogramas triangulares ou parabólicos são geralmente utilizados, mas também trazem uma grande dúvida para a modelagem

Modelagem Matemática da Onda de Ruptura

Ø Tratamentos matemáticos para a frente da onda de choque:

- ◆ A frente de onda gerada a partir da ruptura de uma barragem é abrupta e faz falhar as hipóteses tradicionais dos modelos hidrodinâmicos. Na região do choque há descontinuidade de inúmeras propriedades físicas, invalidando as equações de Saint-Venant.
- ◆ Método da pseudo-viscosidade – introdução de um termo dissipativo nas equações de Saint-Venant, de forma a espalhar o choque sobre uma região maior;
- ◆ Método baseado nas soluções fracas das equações de Saint-Venant – equações na forma conservativa + esquemas numéricos para controlar a formação do choque;
- ◆ Método do ajuste de choque – mais complexo, trata a descontinuidade como condição de contorno.

Modelagem Matemática da Onda de Ruptura

O problema da confiabilidade:

- ◆ Mesmo os modelos mais complexos adotam simplificações da natureza, que demandam ajustes para fornecer resultados confiáveis.
- ◆ A confiabilidade de um modelo depende de seu processo de calibração
- ◆ O processo de calibração de modelos hidrodinâmicas, por sua vez, demanda a medição de eventos ocorridos, o que é uma impossibilidade no caso da ruptura de barragens.
- ◆ Muitas vezes faltam dados básicos, inclusive de topografia.

Modelagem Matemática da Onda de Ruptura

- ◆ A ruptura de uma barragem, dependendo da configuração do vale a jusante, será um problema tipicamente bidimensional, o amortecimento nas planícies será diferente do que ocorre em calha e as velocidades serão menores do que na área dinâmica de escoamento. Essas são incertezas associadas à modelagem deste tipo de fenômeno.
- ◆ A maioria dos modelos correntes no meio técnico, entretanto, é unidimensional, o que pode ser um fator de preocupação.
- ◆ Existem vários motivos que podem levar à simplificação de um modelo, mas a representatividade física deve ser garantida. Se não existem dados suficientes e um modelo que não guarda relação física com o fenômeno é escolhido apenas pela sua facilidade de uso ou adequação aos dados existentes, erra-se duas vezes.

Exemplos de Aplicações de Modelos e Resultados Divergentes

Funil



- Localizada no rio Paraíba do Sul, em Itatiaia (RJ);
- Inaugurada em 1969;
- Capacidade instalada de 216 MW;
- Grande importância para o sistema, por estar próxima a grandes centros consumidores, garantindo a confiabilidade do suprimento de energia elétrica aos estados RJ, SP e ES.
- A barragem atua de forma positiva para a regularização de vazões.



BARRAGEM



VERTEDOUROS
MARGEM
DIREITA



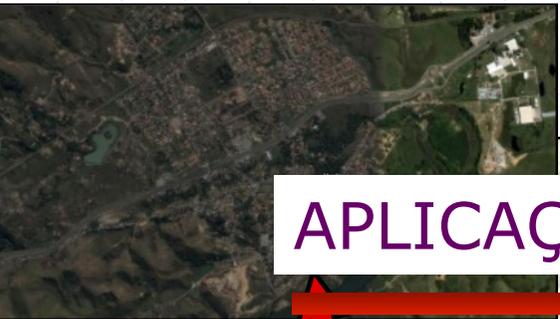
VERTEDOUROS
MARGEM
ESQUERDA



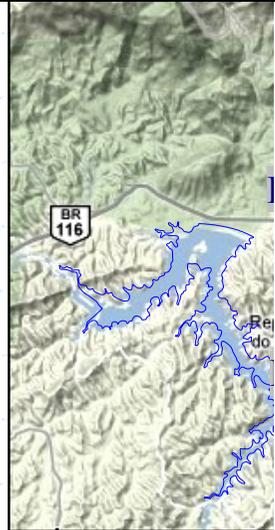
APLICAÇÕES E RESULTADOS

Funil

Dado	Unidade	Valor
<i>Barragem</i>		
Tipo	-	Arco duplo
Altura máxima	m	85,0
Desenvolvimento no coronamento	m	385,0
Largura no coronamento	m	3,6
Elevação no coronamento	m	468,0
Volume Total	m ³	270.000
<i>Reservatório</i>		
Nível máximo de armazenamento	m	466,5
Nível máximo de cheia	m	466,5
Nível mínimo de operação	m	444,0
Área inundada	km ²	39,7
Volume total	m ³	888,3 x 10 ⁶
Volume útil	m ³	605,7 x 10 ⁶



APLICAÇÕES E RESULTADOS



Funil – trecho de estudo

- 
- Barragem de Funil até a área a montante da barragem de Santa Cecília, a cerca de 120 km de Funil;
 - Principais cidades do trecho: Itatiaia, Resende, Barra Mansa e Volta Redonda;
 - Atividades rurais e urbanas, com forte vocação para o setor industrial;
 - O trecho até Floriano é uma ampla planície de inundação, com grandes curvas e declividades bem suaves, se tornando um vale bem encaixado até Barra Mansa e voltando a ter planícies de inundação, menores que as primeiras, após esta cidade.

APLICAÇÕES E RESULTADOS

Condições de Simulação (Mascarenhas, 1990)

Dado	Unidade	Valor
Volume de armazenamento do reservatório	m ³	620 x 10 ⁶
Profundidade média no reservatório	m	29
Vazão máxima de ruptura	m ³ /s	18550
Trecho de propagação considerado	km	120
Declividade média do fundo no trecho	m/m	0,0004
Espaçamento entre seções considerado	km	20
Tempo estimado para a propagação	s	66800
Incremento temporal	s	668
Intervalos de tempo	-	100

APLICAÇÕES E RESULTADOS

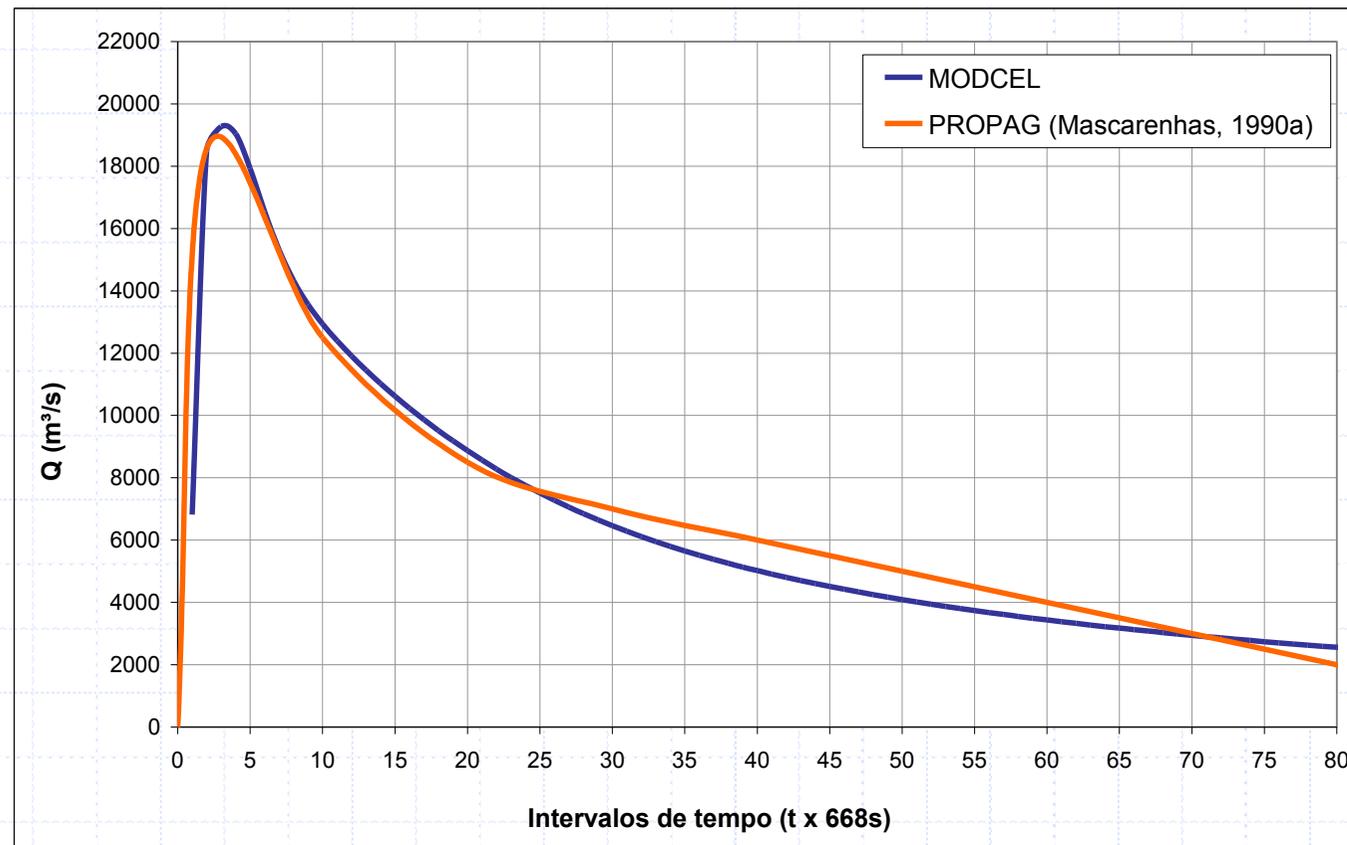
A literatura apresenta para este trecho, nas mesmas condições (com reservatório parcialmente cheio):

Ø resultados de Mascarenhas (1990);

Ø Estudo elaborado pela UFMG, por intermédio da Financiadora de Projetos (FINEP), simulando o mesmo hidrograma de ruptura de Mascarenhas com NWS FLDWAV;

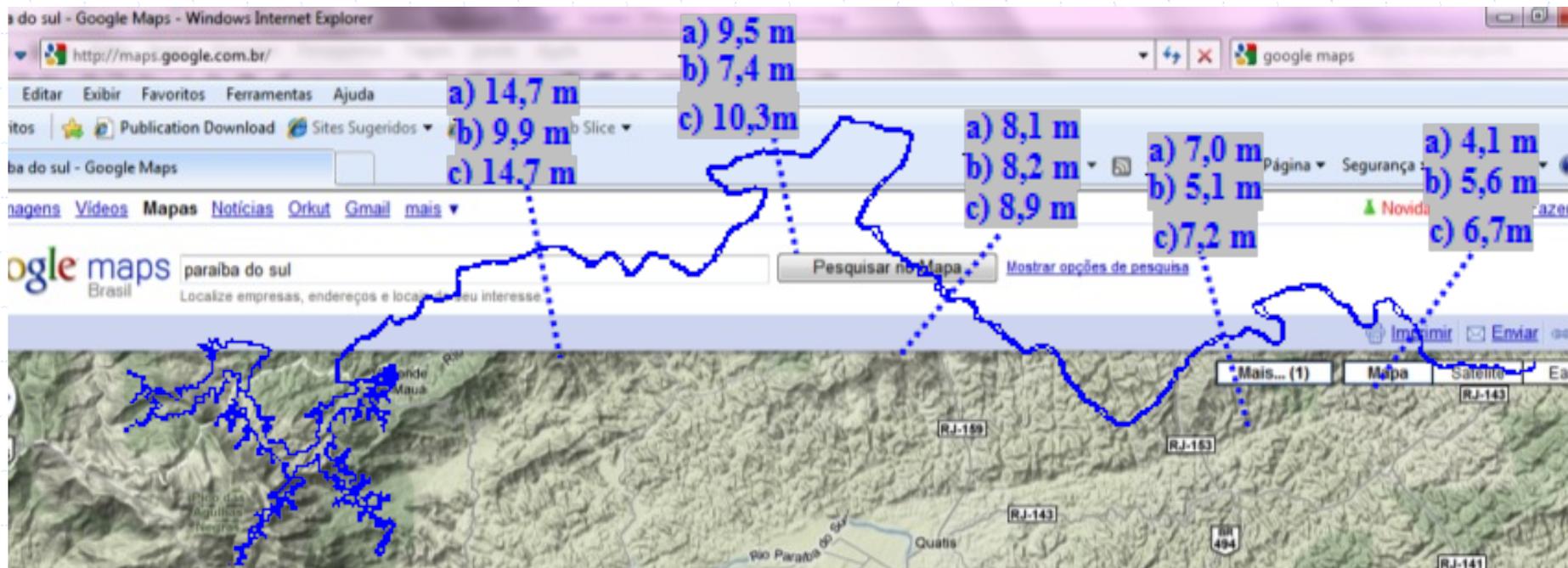
APLICAÇÕES E RESULTADOS

Ø Hidrograma de ruptura



APLICAÇÕES E RESULTADOS

Ø Níveis máximos de água após a ruptura



a) PROPAG; b) NWS FLDWAV; c) MODCEL

APLICAÇÕES E RESULTADOS

Seção – distância da barragem (m)	Altura máxima PROPAG (m)	Altura máxima NWS FLDWAV (m)	Altura máxima MODCEL (m)
20000	14,7	9,9	14,7
40000	9,5	7,4	10,3
60000	8,1	8,2	8,9
80000	7,0	5,1	7,2
100000	4,0	5,6	6,7

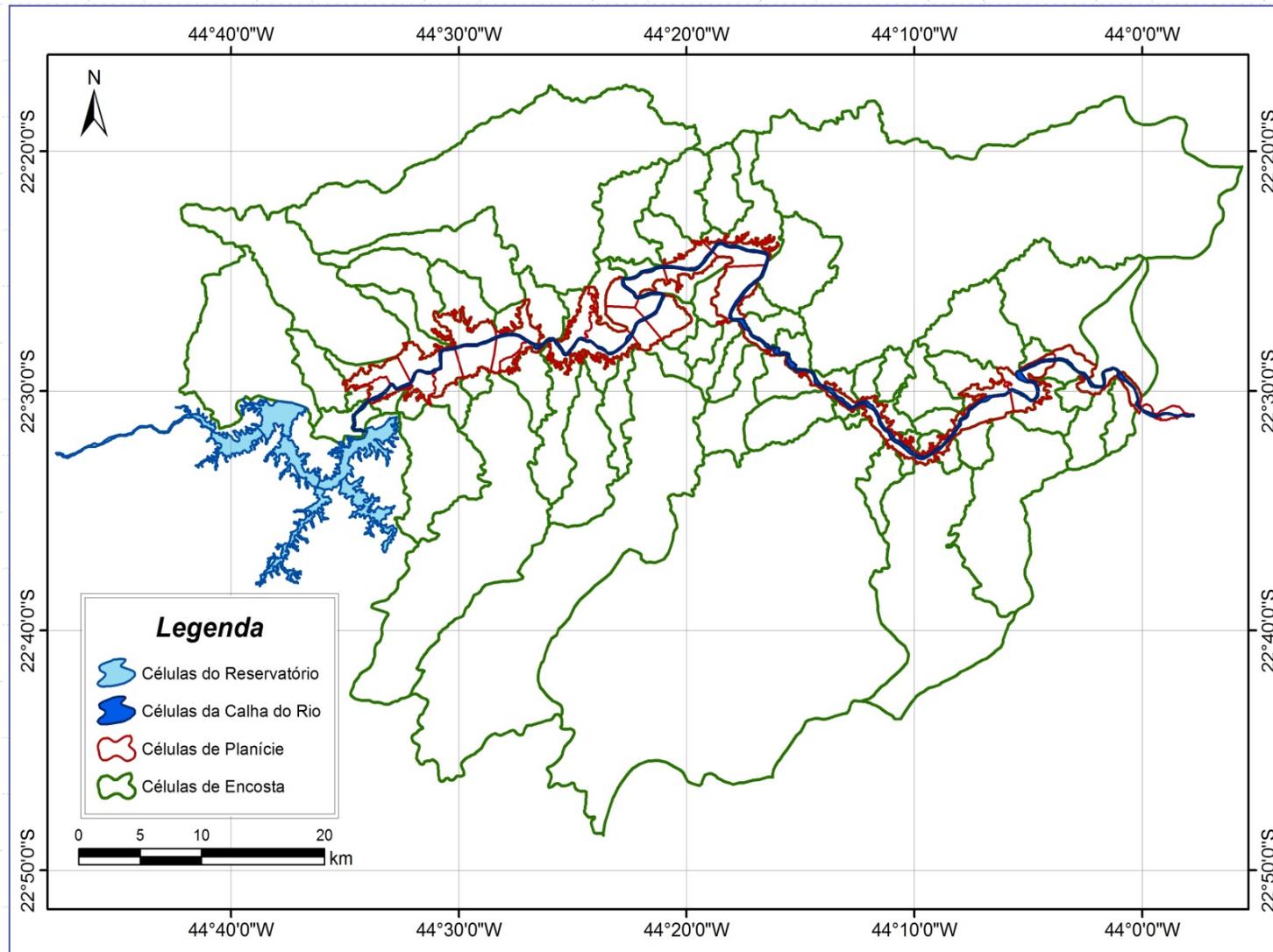
Seção – distância da barragem (m)	Tempo máximo PROPAG (h)	Tempo máximo NWS FLDWAV (h)	Tempo máximo MODCEL (h)
20000	1,1	9,7	5,2
40000	1,4	15,6	10,4
60000	2,0	22,0	11,7
80000	2,6	27,4	14,5
100000	4,1	32,7	18,0

Seção – distância da barragem (m)	Velocidade máxima NWS FLDWAV (m/s)	Velocidade na seção no momento da altura máxima da onda / Velocidade média até a chegada da onda na seção MODCEL (m/s)
20000	1,53	3,34 / 1,07
40000	1,51	3,58 / 1,07
60000	1,61	3,99 / 1,42
80000	1,56	4,84 / 1,53
100000	1,32	5,05 / 1,54

Modelagem Matemática da Onda de Ruptura

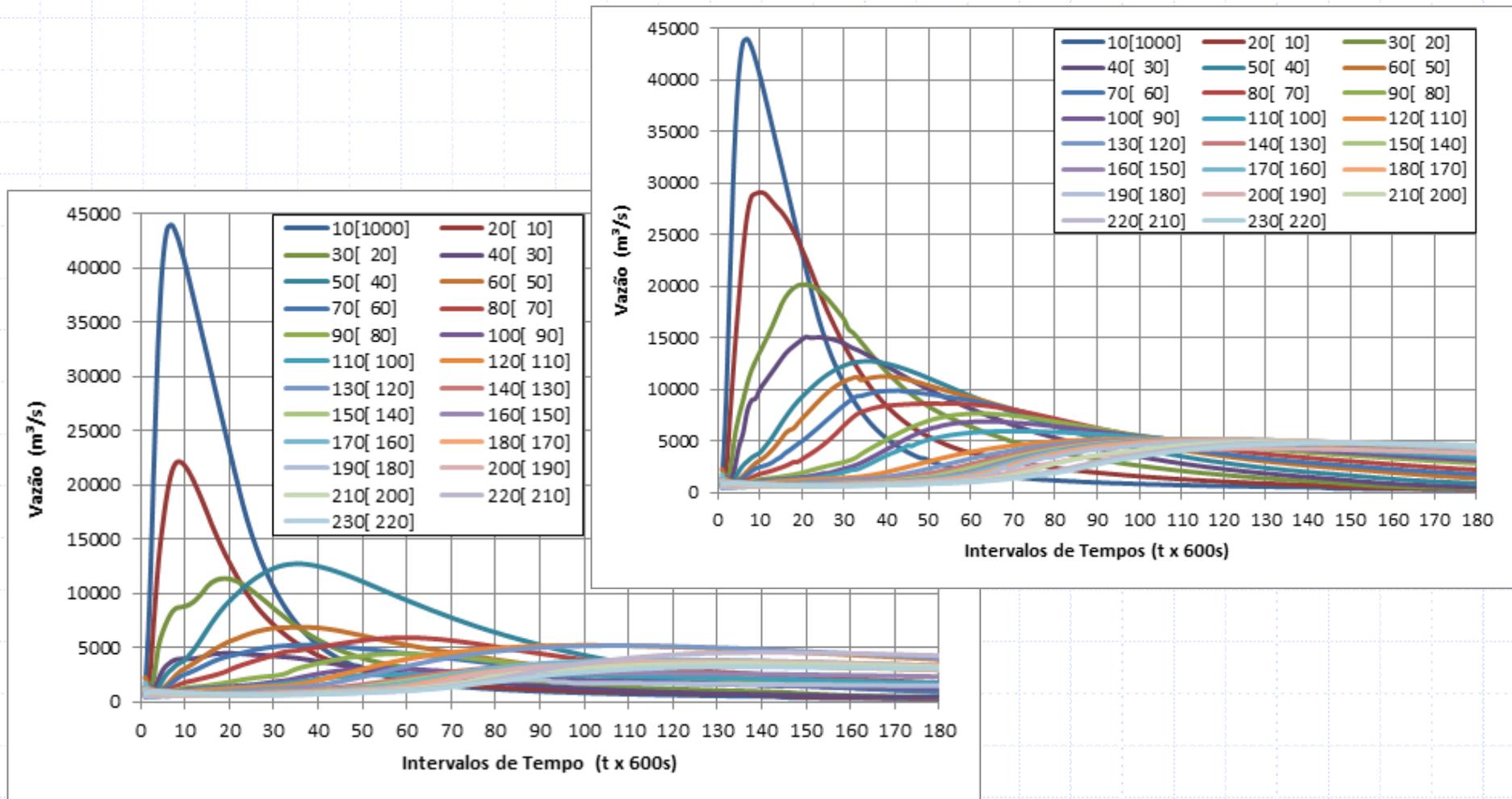
- ◆ A análise física da situação e a definição das respostas requeridas são necessárias para direcionar a escolha do modelo mais adequado. As simplificações podem ser úteis, em termos de controle do processo, compreensão dos resultados, necessidade de dados e tempo de simulação, mas não pode ser motivada pela ausência de dados, introduzindo também um erro de interpretação física, onde a carência de dados já era crítica.
- ◆ Se o vale contém planícies significativas e se é importante mapear as velocidades nestas planícies, o modelo deve ter características bidimensionais.
- ◆ Eventualmente, modelos quasi-bidimensionais podem ser utilizados, mas modelos unidimensionais podem oferecer respostas distorcidas.
- ◆ Na sequência, são mostrados os resultados obtidos com um Modelo quasi-2D – MODCEL, para o mesmo reservatório do Funil, com nível d'água em seu valor máximo.

Esquema de Modelagem – Divisão em Células de Escoamento - MODCEL



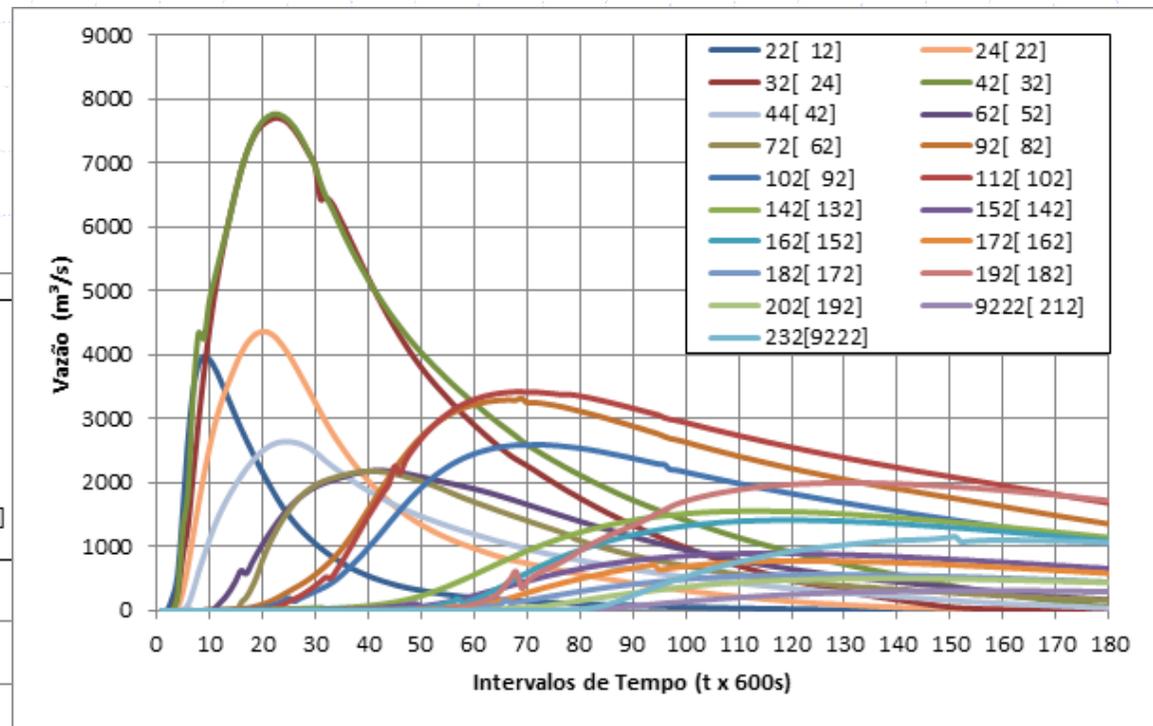
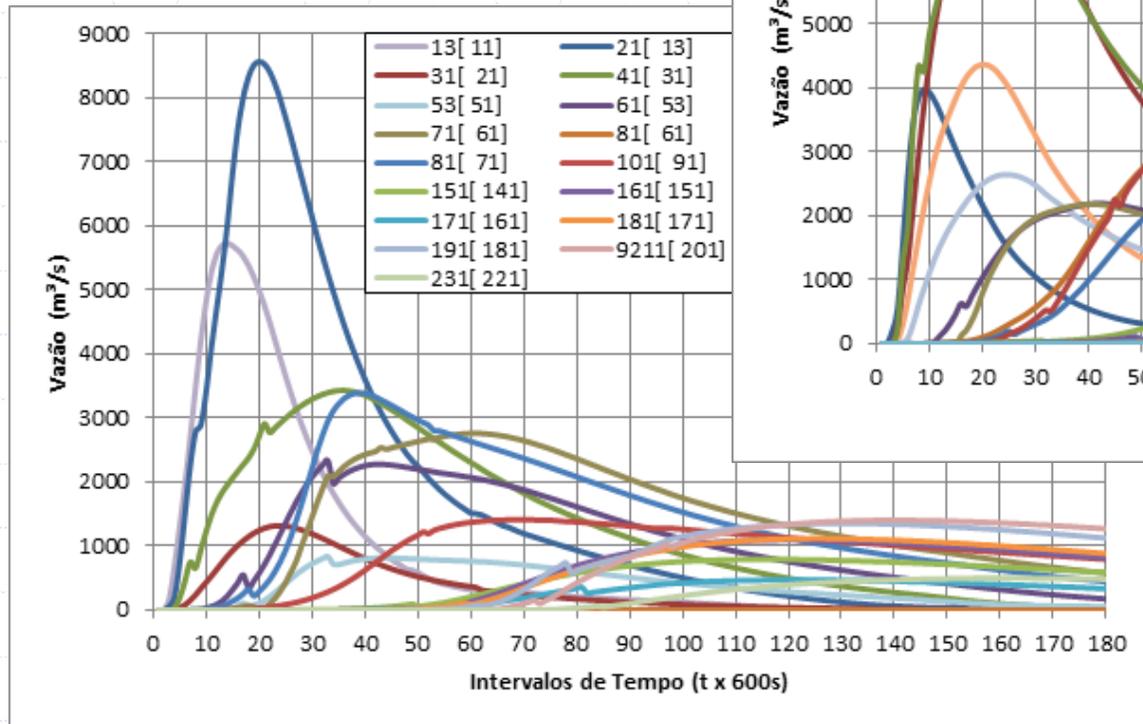
Resultados

RESULTADOS MODCEL – VAZÕES



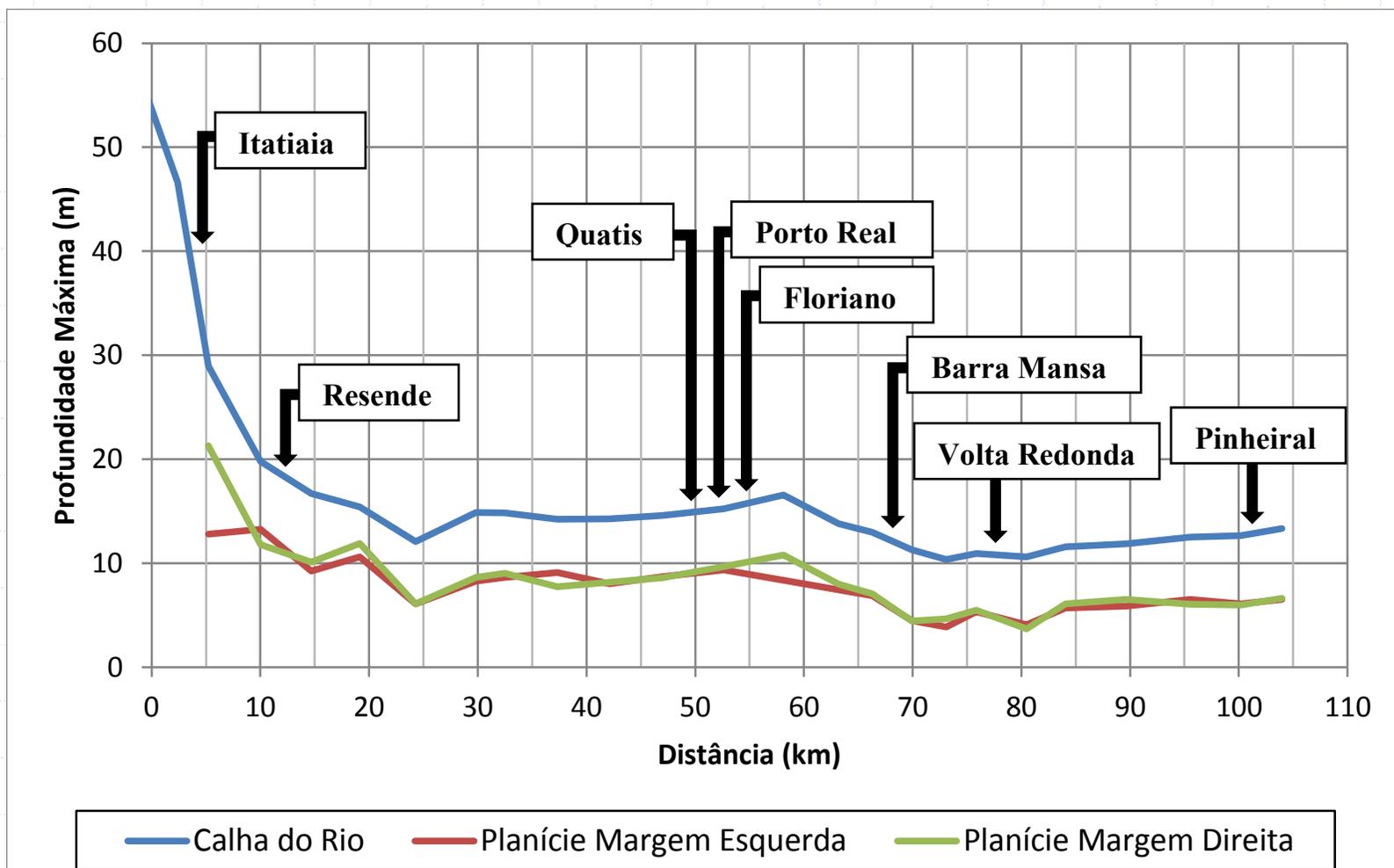
Resultados

RESULTADOS MODCEL – VAZÕES



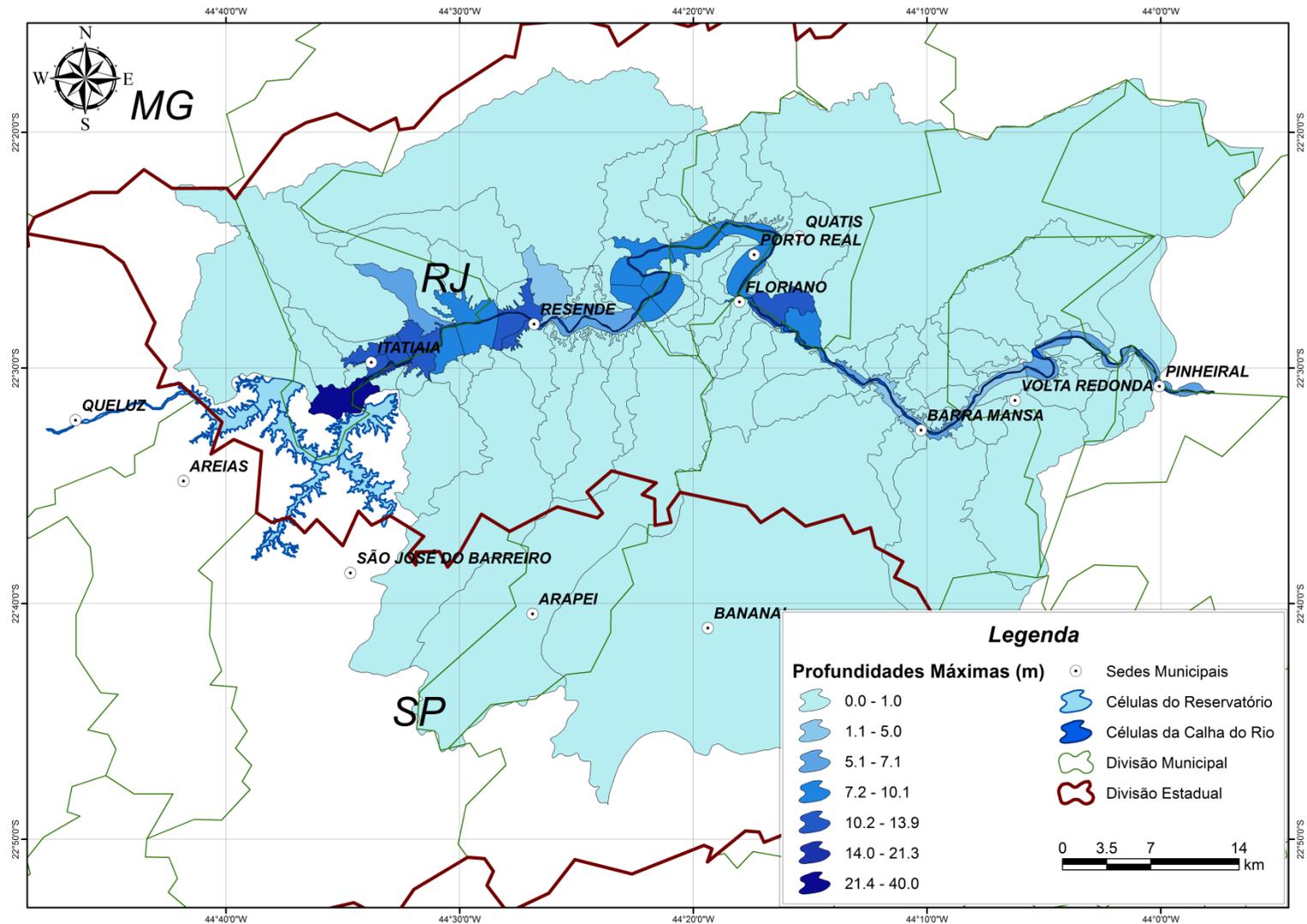
Resultados

RESULTADOS MODCEL – PROFUNDIDADES DE ÁGUA



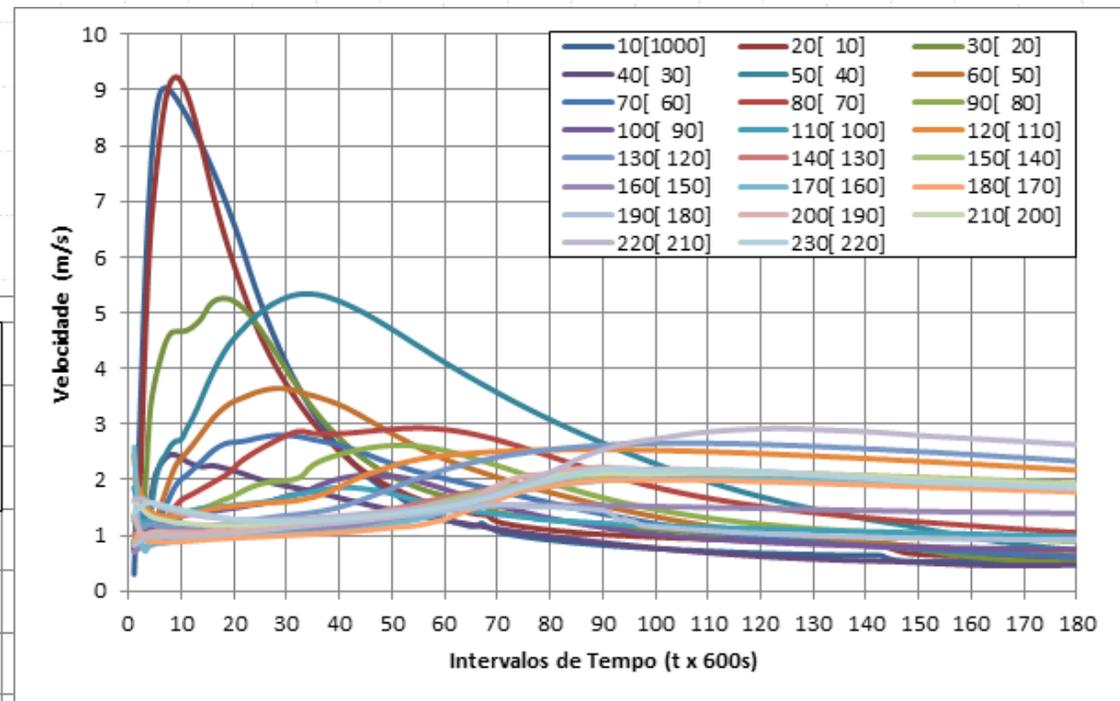
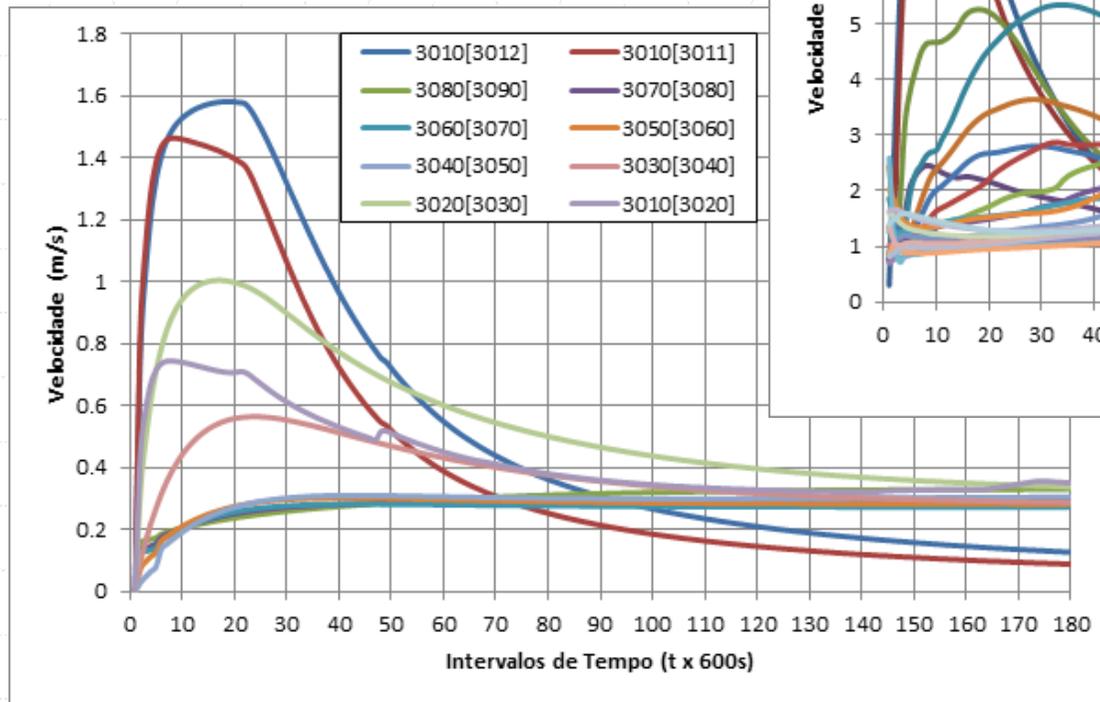
Resultados

MAPA DE PROFUNDIDADES MÁXIMAS



Resultados

RESULTADOS MODCEL – VELOCIDADES



Resultados

FATOR DE VELOCIDADE – Definição

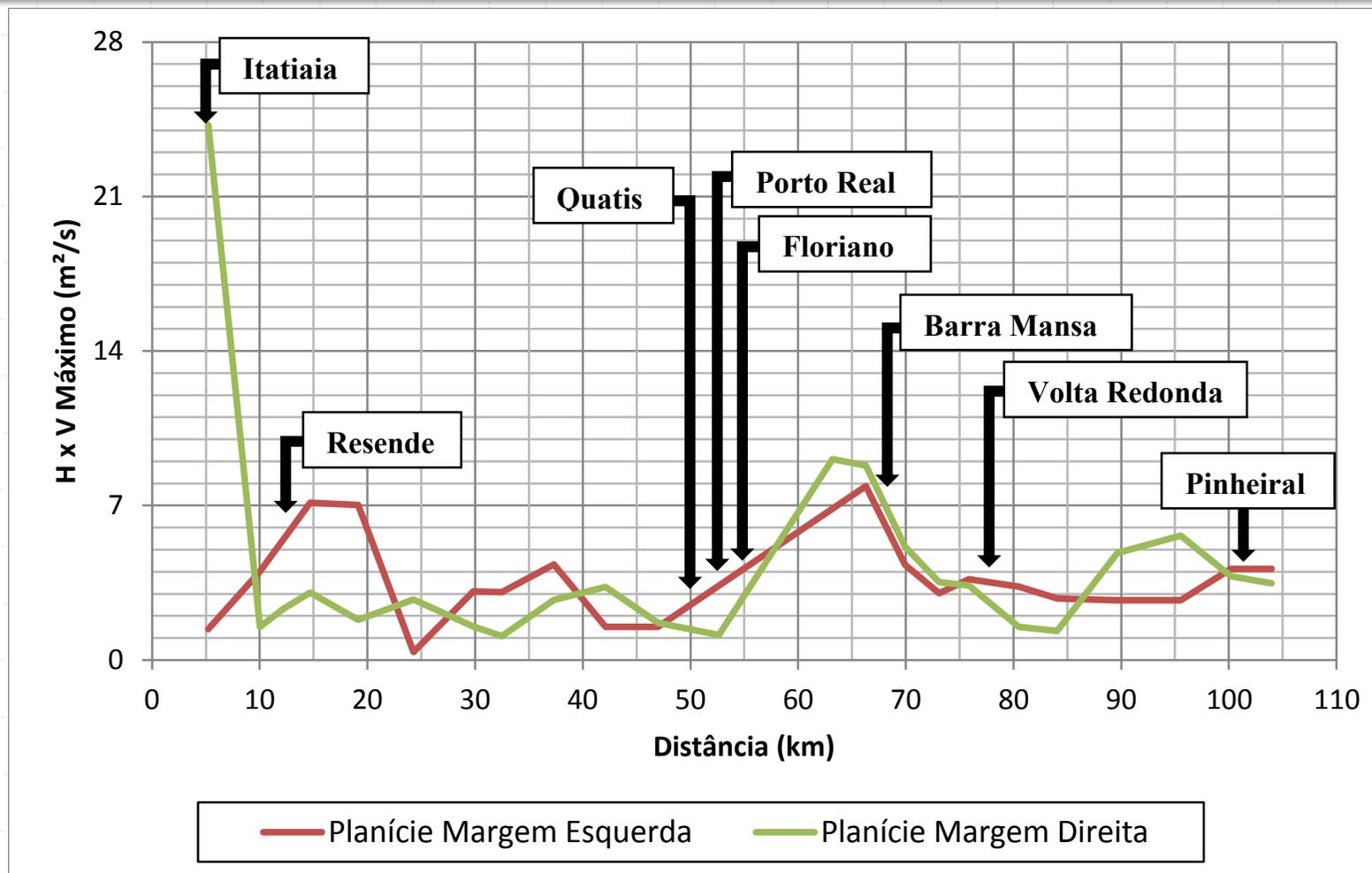
$$FV = h * v$$

Tabela 4.2 – Limites e Efeitos do Fator de Velocidade.

FV (m²/s)	EFEITO
< 0,1	Baixo potencial de danos a crianças
0,25	Alto potencial de danos a crianças
0,7	Alto potencial de danos a adultos
1,5	Alto potencial de danos a veículos (e seus ocupantes)
2,5	Alto potencial de danos a construções leves (barracos)
> 7	Alto potencial de danos a construções pesadas (alvenaria)

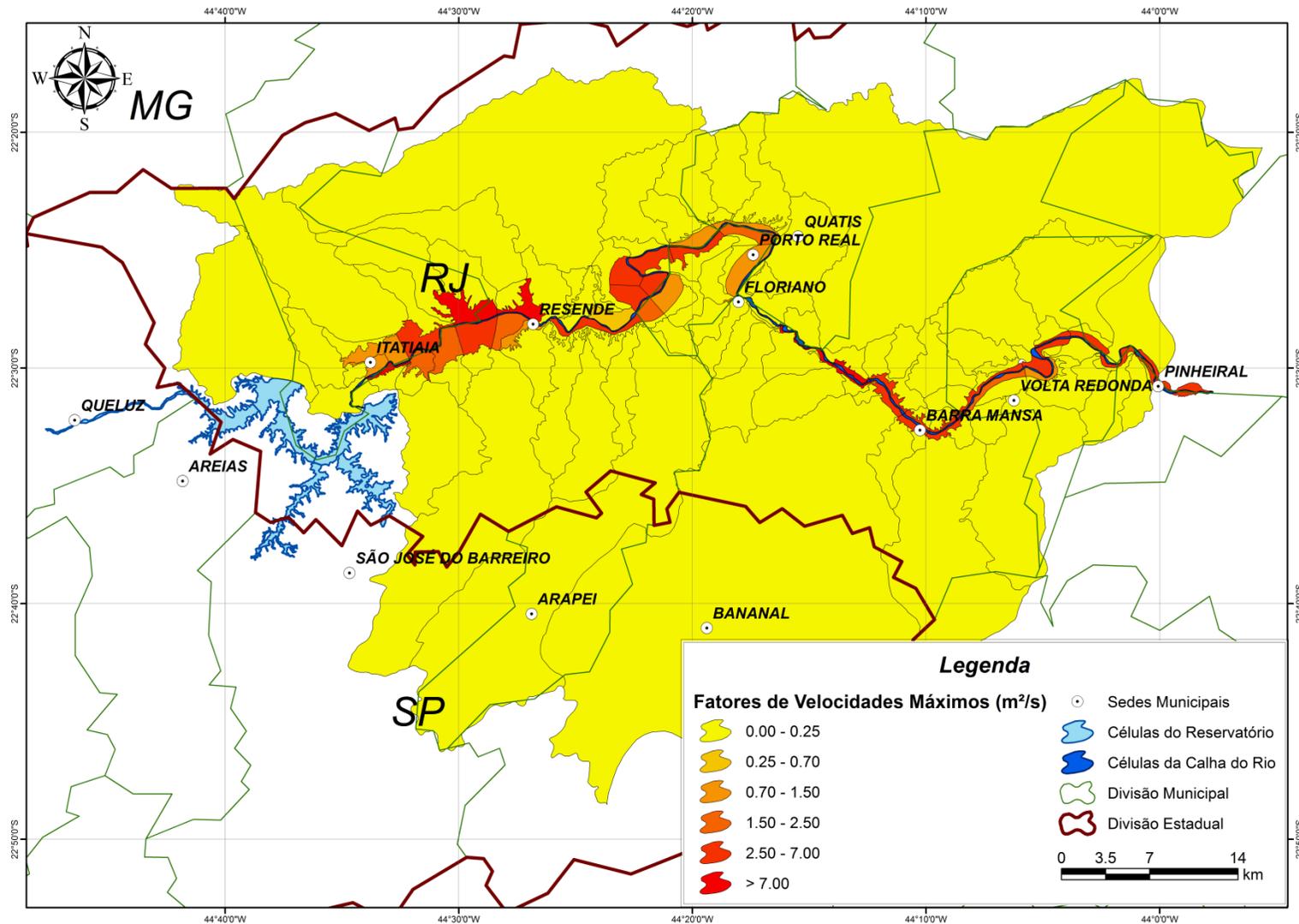
Resultados

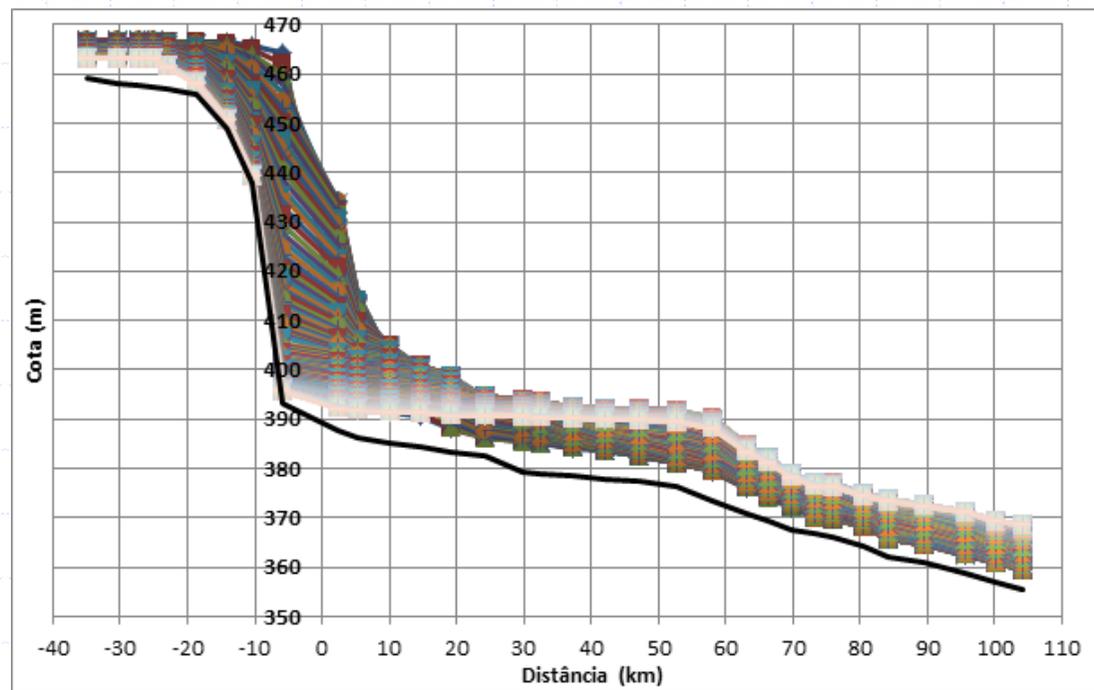
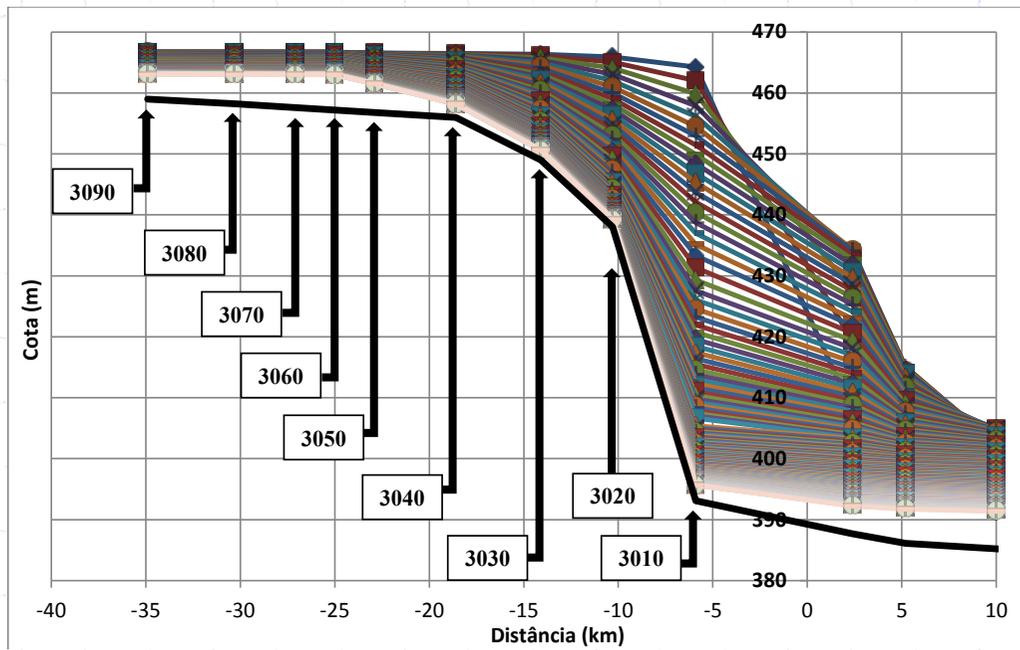
RESULTADOS ADICIONAIS DO MODCEL – FATOR DE VELOCIDADE



Resultados

MAPA DE FATOR DE VELOCIDADE





Algumas Reflexões

- ◆ Algumas questões se põem:
 - Como suprir a lacuna de dados necessários para estudos mais precisos de ruptura de barragem para fomentar os Planos de Ação de Emergência?
 - Deveria haver alguma estratégia de priorização dos estudos, para evitar uma sobrecarga dos agentes fiscalizadores e do meio técnico?
 - Seria possível estimar por algum processo simplificado uma envoltória de inundação, que desse contornos máximos a todos os caso, para depois se fazer uma avaliação detalhada em um tempo mais longo, com dados mais precisos e apenas para os casos críticos?

Obrigado

Marcelo Gomes Miguez
marcelomiguez@poli.ufrj.br

A decorative graphic element in the bottom-left corner consisting of a vertical blue bar and a horizontal blue bar meeting at a right angle.

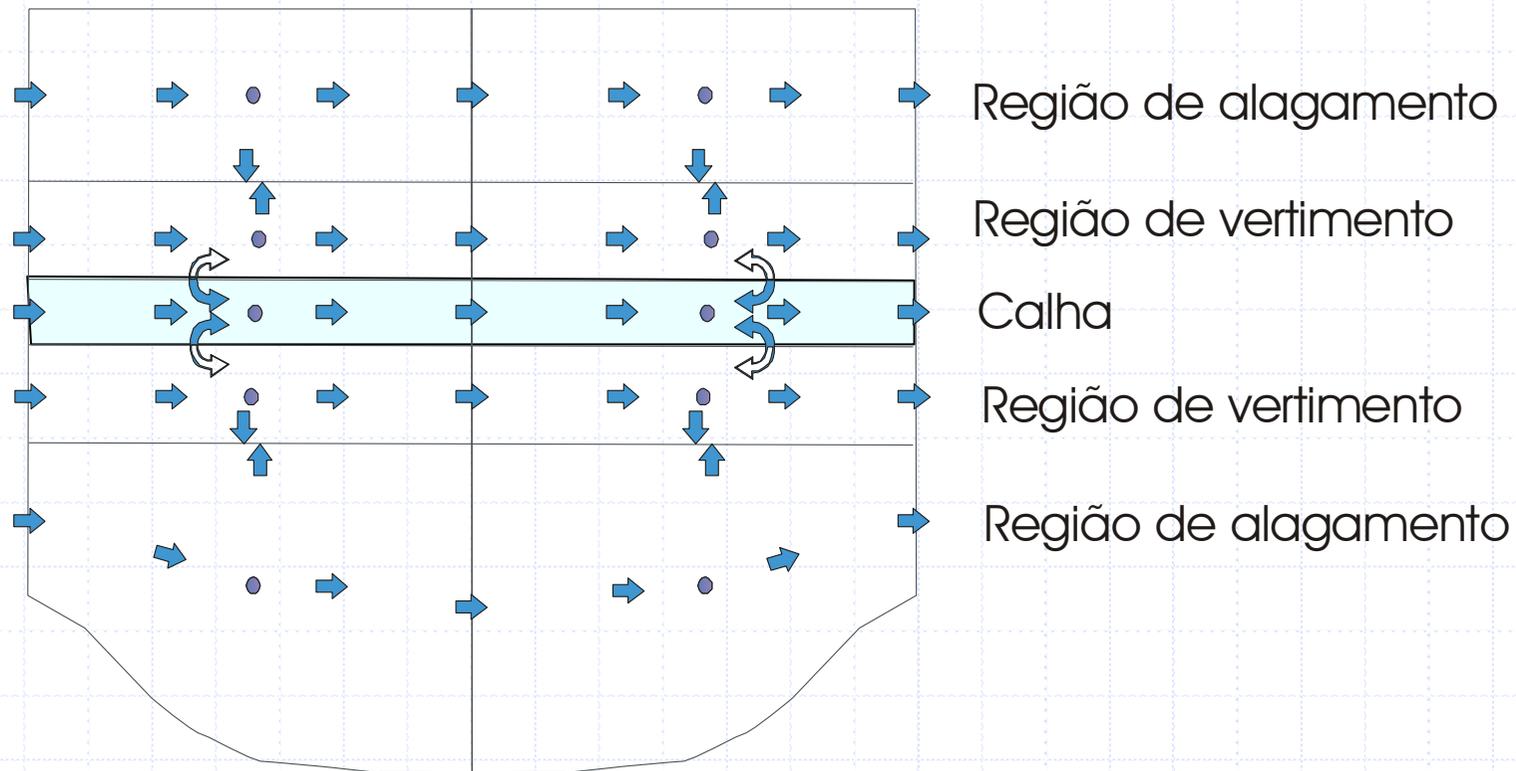
Modelagem Matemática de Ondas de Ruptura de Barragens - MODCEL

Marcelo Gomes Miguez
marcelomiguez@poli.ufrj.br

Modelo de Células de Escoamento - MODCEL

- ◆ Baseado no conceito de células de escoamento (Zanobetti, Lorgerè, Preissman e Cunge)
- ◆ Apresentado, pela primeira vez em 1994.
- ◆ Desenvolvido, inicialmente, para a representação de enchentes rurais.
- ◆ Estendido em MIGUEZ (2001), para aplicação a uma bacia urbana.
- ◆ Utilizado, pela primeira vez para a simulação de ruptura de barragem e da consequente onda de propagação.
- ◆ Pode-se dizer que a concepção do modelo aqui proposto parte do princípio que uma bacia pode ser subdividida em um conjunto de compartimentos homogêneos, também chamados células de escoamento que representa a realidade física articulando uma rede de escoamentos e áreas de armazenagem;
- ◆ Diferentes tipos de células e de conexões hidráulicas entre células são definidos para abarcar a multiplicidade de situações inerentes a uma cheia, propiciando versatilidade para a modelação;

Vista em planta da bacia genérica de um rio e a interação entre calha principal e suas margens



Conjunto tipo de células pré-definido

- ◆ de **rio**, ou **canal**, por onde se desenvolve o escoamento principal da drenagem à céu aberto;
- ◆ de **galeria, subterrânea**, complementando a rede de drenagem;
- ◆ de **superfície urbanizada**, para a representação de escoamentos superficiais, em planícies urbanizadas, simulando áreas de armazenamento em patamares escalonados, que representam o nível das ruas, das calçadas, praças e parques e das edificações;
- ◆ de **superfície plana**, para a representação de escoamentos superficiais, representando áreas aproximadamente planas através de um prisma, simulando áreas naturais de armazenamento, bem como ou áreas que funcionam como soleiras espessas de vertedouros, ou áreas de encosta, sem ocupação, em que uma parte da área é definida como área de armazenagem;
- ◆ de **reservatório**, simulando o armazenamento d'água em um reservatório temporário de armazenagem.

Conjunto de tipos de ligação pre-definidos

- ◆ Ligação tipo rio;
- ◆ Ligação tipo planície;
- ◆ Ligação tipo galeria;
- ◆ Ligações tipo entrada de galeria & saída de galeria;
- ◆ Ligação tipo descarga de galeria secundária em rios ou canais principais;
- ◆ Ligação tipo vertedouro de soleira espessa;
- ◆ Ligação tipo orifício;
- ◆ Ligação tipo reservatório;
- ◆ Ligação tipo bueiro;
- ◆ Ligação tipo bombeamento;
- ◆ Ligação tipo comporta FLAP;
- ◆ Ligação tipo curva cota x descarga genérica;

Modelação Matemática

- ◆ A variação do volume em uma célula i , em um intervalo de tempo t , é dada pelo balanço de massa nesta célula, considerando a precipitação que ocorre sobre sua superfície e as vazões de troca com todas as células vizinhas k .
- ◆ Equação da continuidade:

$$A_{s_i} \frac{dZ_i}{dt} = P_i + \sum_k Q_{i,k}$$

- ◆ A vazão entre duas células i e k sempre será escrita como função apenas do nível d'água dentro destas duas células, em função dos tipos de ligação disponíveis:

$$Q_{i,k} = Q(Z_i, Z_k)$$

Modelação Numérica

- ◆ A formulação numérica inicia-se com o processo de discretização da equação diferencial

$$A_{s_i} \frac{\Delta Z_i}{\Delta t} = P_i + \sum_k Q_{i,k}$$

A_{s_i} - área superficial da célula, considerada no tempo t

ΔZ_i - incremento de nível d'água, é a variável que se deseja conhecer, em $t+1$

P_i - precipitação sobre a célula, considerada conhecida em todos os intervalos de tempo

$\sum_k Q_{i,k}$ - somatório de vazões entre a célula i e suas k vizinhas, tomadas, neste estudo, no tempo $t+1$, em um esquema totalmente implícito

Modelação Numérica

- ◆ Para o esquema totalmente implícito, porém, como as relações de vazão são não-lineares, desenvolveu-se a expressão de $Q_{i,k}$ em série de Taylor para linearizar a equação resultante:

$$Q_{i,k}^{t+1} = Q_{i,k}^t + \frac{\partial Q_{i,k}^t}{\partial Z_i} \Delta Z_i^{t+1} + \frac{\partial Q_{i,k}^t}{\partial Z_k} \Delta Z_k^{t+1}$$

- ◆ Substituindo na equação, tem-se:

$$A_{S_i}^t \frac{\Delta Z_i^{t+1}}{\Delta t} = P_i^t + \sum_k Q_{i,k}^t + \sum_k \frac{\partial Q_{i,k}^t}{\partial Z_i} \Delta Z_i^{t+1} + \sum_k \frac{\partial Q_{i,k}^t}{\partial Z_k} \Delta Z_k^{t+1}$$

- ◆ A solução do sistema resultante, para ΔZ_i^{t+1} e ΔZ_k^{t+1} , consiste, em linhas gerais, em se utilizar o processo de dupla varredura sobre o modelo topológico de células

Modelação matemática da onda de ruptura de barragem

Ø Modelo de Células de Escoamento - MODCEL

- ◆ Modelo hidrodinâmico que possibilita a propagação do hidrograma de ruptura, por ter sido escrito na forma conservativa das equações de Saint-Venant.
- ◆ Possibilita simular o escoamento segundo uma perspectiva bidimensional, considerando as planícies de alagamento também de forma hidrodinâmica (embora utiliza relações unidimensionais, o que lhe dá a característica de quase-bidimensional).
- ◆ Permite a existência de zonas modeladas inicialmente secas, que serão alagadas com a passagem da cheia.
- ◆ Fornece como dados de saída os dados necessários para o mapeamento das áreas potencialmente inundáveis no caso de uma ruptura (cotas máximas atingidas e respectivos tempos de ocorrência, tempos de chegada da frente de onda, velocidade da propagação no canal e nas planícies e duração da inundação).