

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

**LIU MING**

**SISTEMA COMPUTACIONAL PARA PREVISÃO DE INUNDAÇÕES:**  
aplicação à bacia hidrográfica do Rio São Bento - SC

Florianópolis  
2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

**LIU MING**

**SISTEMA COMPUTACIONAL PARA PREVISÃO DE INUNDAÇÕES:**  
aplicação à bacia hidrográfica do Rio São Bento - SC

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária Ambiental.

Orientador: Reinaldo Haas

Co-Orientador: Masato Kobyama

Florianópolis  
2007

**LIU MING**

**SISTEMA COMPUTACIONAL PARA PREVISÃO DE INUNDAÇÕES:  
aplicação à bacia hidrográfica do Rio São Bento - SC**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Florianópolis, \_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2007.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Reinaldo Haas – orientador  
Departamento de Engenharia Ambiental, UFSC

---

Prof. Dr. Masato Kobayama – co-orientador  
Departamento de Engenharia Ambiental, UFSC

---

Prof. Dr. Heinz Dieter Oskar August Fill  
Departamento de Hidráulica, UFPR

---

Prof. Dr. Davide Franco  
Departamento de Engenharia Ambiental, UFSC

Aos meus pais pela direção e aprendizado.  
Ao Professor Liu Kai, meu irmão, conselheiro e exemplo de vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos Professores Doutores Reinaldo Haas, Masato Kobiyama e Henrique de Melo Lisboa pela orientação firme e criativa compartilhando seus valiosos conhecimentos e pelo contínuo incentivo para a conclusão deste trabalho.

À Coordenação e Secretaria do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade de estar atingindo mais uma de minhas metas profissionais e pelo contínuo suporte e orientação nos desentrelaçamentos burocráticos desta jornada, em especial ao Sr. Maurício Pereira Paiva.

À Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN) pela disponibilização das informações técnicas e dados operativos da Barragem São Bento.

À minha família pela sua compreensão da minha ausência no dia a dia e apoio incondicional aos meus compromissos acadêmicos.

Às minhas parceiras e colegas de trabalho Bernadete R. Steinwandter e Karine T. Xavier, pelas incansáveis discussões técnicas e apoio na digitação e formatação deste trabalho.

Aos colegas Carlos R. Ruchiga Corrêa Filho e Roberto Valmir da Silva pelas inúmeras contribuições nos debates sobre o desenvolvimento deste trabalho e no meu aprendizado com os assuntos abordados.

MING, Liu. **Sistema computacional para previsão de inundações**: aplicação à bacia hidrográfica do Rio São Bento – SC. 2007. 222 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

## RESUMO

A modelagem hidrológica conceitual de uma bacia hidrográfica pode se caracterizar como uma ferramenta eficaz para a determinação de hidrogramas de cheias provocadas por eventos críticos de precipitações. Estes hidrogramas, propagados de forma adequada na calha de um rio, onde as áreas marginais são ocupadas por comunidades ribeirinhas, podem determinar a planície de inundação a ser atingida e conseqüentemente serem utilizados para o suporte de planos de evacuação daquelas áreas. O trabalho de dissertação de mestrado foi aplicado à bacia hidrográfica do rio São Bento, ao sul do estado de Santa Catarina, onde se encontra implantado um reservatório de regularização de vazões (Barragem São Bento) para o abastecimento de água urbano e irrigação das áreas vicinais, na região dos municípios de Siderópolis e Nova Veneza, de propriedade da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento - CASAN. O trecho de rio imediatamente a jusante daquele aproveitamento é ocupado pelas comunidades de São Bento Alto, no município de Siderópolis e São Bento Baixo, no município de Nova Veneza, abrangendo uma população de mais de 5000 habitantes, afetados pela operação dos extravasores do reservatório. A possibilidade de se prever as descargas de cheias extremas naquele trecho de rio configura uma ferramenta de grande utilidade para o mapeamento de inundações nas áreas ocupadas. O principal objetivo do trabalho é verificar o comportamento de cheias ocorridas na região de inserção do aproveitamento (Região Hidrográfica Nº 10 do estado de SC), que tenham provocado situações de inundações, comparando estes resultados com os eventos previstos no mesmo período, a partir de um sistema de previsão meteorológica quantitativa de precipitações, como o ARPS. Este modelo foi estudado por Haas (2000), e vem sendo aplicado com sucesso para a previsão de eventos de precipitação de grande magnitude na região Sul do país.

**Palavras-chave:** Sistema de suporte à decisão. Cheias. Sistema de alerta contra cheias. Hidrograma Unitário Sintético. Modelagem hidrológica.

MING, Liu. **Sistema computacional para previsão de inundações**: aplicação à bacia hidrográfica do Rio São Bento – SC. 2007. 222 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

### **ABSTRACT**

Conceptual hydrological watershed modeling may be characterized as an efficient tool to determine flood hydrographs caused by critical rainfall events. The routing of these hydrographs, along the main river channel, where floodplains are occupied by local communities, define water levels, and, consequently, may be utilized to develop the emergency procedures and rules to be followed by the local population. The case study presented in this dissertation is located in São Bento River watershed, located in the south of Santa Catarina State, Brazil, with an existing water supply reservoir (Barragem São Bento) which is owned by the Santa Catarina State Companhia Catarinense de Águas e Saneamento – CASAN. The reservoir provides flow regulation, for urban water supply and irrigation within the area of the cities of Siderópolis and Nova Veneza. The downstream river reach includes at least two communities, known by São Bento Alto e São Bento Baixo, corresponding to more than 5,000 inhabitants, which are affected by the operation of the Barragem São Bento spillway. The possibility of using streamflow forecasting for this river reach is a useful tool for flood mapping of the inhabited areas. The main objective of this work is to verify the behavior of historical floods occurred in that river (Hydrographical Region N. 10 of Santa Catarina State) that has affected those communities comparing observed results with predicted rainfall of a regional atmospheric model known as ARPS. This model was studied by Haas (2000) and has been used successfully for prediction of rainfall precipitation events of large magnitude in South Brazil.

**Key-words:** Decision Support System. Floods. Flood Warning System. Synthetic Unit Hydrograph. Hydrologic Modeling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de Informações Geográficas.....	22
Figura 2: Componentes de um SIG.....	23
Figura 3: Etapas da Modelação.....	29
Figura 4: Localização do rio São Bento.....	43
Figura 5: Mapa topológico da rede hidrográfica que integra a bacia do rio São Bento....	45
Figura 6: Mapa topológico detalhado da rede hidrográfica que integra a bacia do rio São Bento.....	46
Figura 7: Representação da bacia hidrográfica do rio São Bento.....	47
Figura 8: Mapa da área do reservatório da Barragem São Bento.....	56
Figura 9: Área do reservatório da Barragem São Bento.....	57
Figura 10: Arranjo Geral.....	57
Figura 11: Barragem do Rio São Bento – Lago Formado pelo Aproveitamento.....	63
Figura 12: Barragem São Bento: Dique principal – vista de montante.....	65
Figura 13: Barragem do Rio São Bento – Vertedor.....	66
Figura 14: Estrutura do Sistema de Alerta contra Cheias – SACC.....	67
Figura 15: Volume Unitário.....	71
Figura 16: Hidrograma Unitário.....	73
Figura 17: Método de Snyder – Representação gráfica das variáveis.....	76
Figura 18: Hidrograma unimodal típico.....	79
Figura 19: Curva típica de recessão.....	80
Figura 20: Bacia hidrográfica típica.....	82
Figura 21: Hidrogramas típicos de afluência e defluência.....	83
Figura 22: Curva descarga-armazenamento.....	84
Figura 23: Hidrogramas de afluência e defluência.....	84
Figura 24: Curvas para o método de Puls.....	86
Figura 25: Exemplo de Hidrograma Afluente – Método Puls Modificado.....	89
Figura 26: Exemplo de Curva $2S/\Delta t + O$ .....	89
Figura 27: Exemplo de Hidrograma – Método Puls Modificado.....	91
Figura 28: Curva $2S/\Delta t + O$ .....	93
Figura 29: Equação da continuidade.....	96
Figura 30: Equação Dinâmica – seção transversal irregular.....	98
Figura 31: Representação de uma planície de inundação.....	103
Figura 32: Hidrograma para chuva 1.....	114
Figura 33: Hidrograma para chuva 2.....	115
Figura 34: Hidrograma para chuva 3.....	115
Figura 35: Hidrograma para chuva 4.....	116
Figura 36: Hidrograma para chuva 5.....	116
Figura 37: Hidrograma para chuva 6.....	117
Figura 38: Hidrograma para chuva 7.....	117

Figura 39: Hidrograma para chuva 8.....	118
Figura 40: Hidrograma Unitário Sintético. Bacia Hidrográfica da Barragem do rio São Bento.....	118
Figura 41: Correlação Precipitação x Coeficiente de Escoamento.....	121
Figura 42: Componentes do hidrograma unitário sintético.....	122
Figura 43: Curva de recessão típica para a bacia da barragem São Bento.....	124
Figura 44: Curva de recessão: HUS Bacia hidrográfica da Barragem São Bento.....	124
Figura 45: Curva de recessão: HUS Bacia hidrográfica da Barragem São Bento: eixo das ordenadas (vazões) em escala logarítmica.....	125
Figura 46: Tela inicial do SACC.....	126
Figura 47: Tela de entrada de dados do SACC.....	127
Figura 48: Hidrograma Previsto pelo SACC.....	128
Figura 49: Posicionamento das aberturas da tomada d'água.....	130
Figura 50: Esquema de aduções e descargas do reservatório.....	131
Figura 51: Tela inicial do SHR.....	132
Figura 52: Tela para entrada de dados no SHR.....	132
Figura 53: Tela de resultados da simulação do Amortecimento da Cheia Afluente no Reservatório.....	133
Figura 54: Gráficos dos Hidrogramas Afluentes e Defluentes Simulados e Cotagrama dos níveis do reservatório.....	134
Figura 55: HEC-RAS – Rio São Bento a jusante da barragem.....	135
Figura 56: Simulação de Cheia Observada.....	139
Figura 57: Cheia de Tempo de Recorrência 100 anos.....	142
Figura 58: Cheia de Tempo de Recorrência 1000 anos.....	142
Figura 59: Cheia Observada - Seção Transversal junto a São Bento Alto.....	148
Figura 60: Cheia Observada - Seção Transversal junto a São Bento Baixo.....	149
Figura 61: Cheia 100 anos – Seção Transversal junto a São Bento Alto.....	149
Figura 62: Cheia 100 anos - Seção Transversal junto a São Bento Baixo.....	150
Figura 63: Cheia 1000 anos - Seção Transversal junto a São Bento Alto.....	150
Figura 64: Cheia de 1000 anos - Seção Transversal junto a São Bento Baixo.....	151
Figura 65: Seções utilizadas no HEC-RAS.....	151
Figura 66: Mapa de Área Inundação – Simulação da Cheia Observada.....	152
Figura 67: Mapa de Área Inundação – Simulação da Cheia de 100 Anos.....	153
Figura 68: Mapa de Área Inundação – Simulação da Cheia de 1000 Anos.....	154
Figura 69: São Bento Baixo - Planície de Inundação na El. 30 m.....	155
Figura 70: São Bento Baixo - Planície de Inundação na El. 31 m.....	156

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Modelos utilizados no Gerenciamento de Recursos Hídricos.....	27
Tabela 2: Caracterização das diferentes classes hipsométricas identificadas na região do aproveitamento.....	50
Tabela 3: Caracterização das diferentes classes de solos identificadas na região do aproveitamento.....	50
Tabela 4: Principais classes de uso do solo identificadas na região do aproveitamento...	51
Tabela 5: Postos hidroclimatológicos.....	52
Tabela 6: Variáveis climatológicas da estação Urussanga - Valores médios mensais - 1942 a 1992.....	53
Tabela 7: Precipitações médias mensais na estação Meleiro (1942 a 1992).....	53
Tabela 8: Vazões mensais no local do barramento.....	54
Tabela 9: Áreas de drenagem das bacias e sub-bacias hidrográficas.....	55
Tabela 10: Resumo das Demandas Progressivas para Diversos Horizontes de Projeto....	62
Tabela 11: Demandas de irrigação consideradas pelo projeto.....	64
Tabela 12: Método de Puls.....	87
Tabela 13: Método Puls Modificado.....	90
Tabela 14: Método Puls Modificado.....	90
Tabela 15: Método Puls Modificado.....	91
Tabela 16: Método Puls Modificado.....	92
Tabela 17: Método Puls Modificado.....	92
Tabela 18: Método Puls Modificado.....	93
Tabela 19: Método Puls Modificado.....	94
Tabela 20: Método Puls Modificado.....	94
Tabela 21: Método Puls Modificado.....	95
Tabela 22: Eventos de cheias selecionados.....	111
Tabela 23: Principais eventos de chuva observados na estação Barragem São Bento e simulados pelo ARPS.....	111
Tabela 24: Comparação entre dados de precipitação entre a estação pluviométrica Barragem São Bento e estações vizinhas.....	112
Tabela 25: Hidrograma Unitário Sintético da bacia da barragem São Bento.....	119
Tabela 26: Coeficientes de ajuste da equação de separação do escoamento de base.....	123
Tabela 27: Resultado Simulação Hidrológica e Amortecimento da Cheia Observada....	140
Tabela 28: Resultado da Simulação Hidrológica e Amortecimento da Cheia de 100 Anos.....	143
Tabela 29: Resultado da Simulação Hidrológica e Amortecimento da Cheia de 1000 Anos.....	144
Tabela 30: Resultados Simulação da Propagação Hidrodinâmica da Cheia Observada...	146
Tabela 31: Resultados Simulação da Propagação Hidrodinâmica da Cheia de 100 anos.	146
Tabela 32: Resultados Simulação da Propagação Hidrodinâmica da Cheia de 1000 anos.....	147

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>
$\Delta t$	intervalo de tempo adotado
$A$	área da seção transversal
A.D.	área de drenagem da bacia
$A_{\text{mont}}$	área a montante da barragem
$A_{\text{inc},i}$	área da bacia incremental entre a seção anterior ( $i - 1$ ) e a seção “ $i$ ”
$A_T$	área total de escoamento no volume de controle
$C$	coeficiente de escoamento
$C$	coeficiente de Chezy
$C_D$	coeficiente de empuxo
$C_p$	coeficiente numérico variável entre 0,56 e 0,69. Para a Califórnia, Linsley (1986) constatou valores entre 0,35 e 0,50
$C_t$	coeficiente numérico, variável entre 1,8 e 2,2. É interessante notar que Linsley (1986), em estudo análogo para bacias da vertente oeste da Serra da Nevada, na Califórnia, obteve valores entre 0,7 e 1,0
$F_B$	força exercida pelas margens na direção $x$ , sobre o fluido
$F_f$	força de atrito entre o canal e o fluido
$F_g$	força devido à gravidade sobre o fluido no volume de controle, na direção $x$
$F_P$	força de pressão na direção $x$ no ponto central do volume de controle
$F_{Pn}$	força de pressão líquida para o volume de controle
$g$	aceleração da gravidade
$h$	profundidade
$I$	vazão afluente
$I_1, I_2$	vazão afluente nos intervalos de tempo $t_1$ e $t_2$ , respectivamente
$K_c$	condução no canal
$K_f$	condução na planície de inundação (área de extravasamento)
$K_r$	constante de recessão
$L$	comprimento da bacia em km, medido ao longo do curso principal do rio, desde a seção considerada até o divisor
$L_a$	distância do centro de gravidade da bacia em km, medido ao longo do curso principal, desde a seção considerada até a projeção do centro de gravidade sobre o rio
$M_c$	fluxo de momento no canal
$M_f$	fluxo de momento na planície de inundação

MV	fluxo do momento ou a massa do fluido multiplicado pelo vetor de velocidade na direção do escoamento
$n$	coeficiente de atrito de Manning
O	vazão defluente
$O_1, O_2$	vazão defluente nos intervalos de tempo $t_1$ e $t_2$ , respectivamente
P	perímetro molhado
$P_{ef}$	chuva efetiva
$P_{tot}$	precipitação total
$P_u$	chuva unitária
Q	descarga total ( $m^3/s$ )
$q$	vazão lateral por unidade de distância
$Q = Q_s + Q_b$	descarga total
$Q(x,t)$	vazão total que passa pelo volume de controle
$Q_0$	descarga superficial de recessão inicial ( $m^3/s$ )
$Q_b$	descarga de base
$Q_c$	vazão no canal principal
$Q_e$	ordenada do hidrograma superficial
$Q_{ei}$	vazão que escoa superficialmente
$Q_i$	vazão afluente na seção de cálculo “i”
$\bar{Q}_l$	escoamento lateral médio
$q_l$	descarga lateral por unidade de comprimento do volume de controle
$q_{l_i}$	vazão incremental da área incremental entre a seção anterior ( $i - 1$ ) e a seção “i” de cálculo
$Q_{obsi}$	vazão observada no posto fluviométrico
$Q_s$	descarga superficial
$Q_t$	descarga superficial para um tempo t
$Q_u$	ordenada do hidrograma unitário
R	raio hidráulico
$R^2$	coeficiente de determinação
S	armazenamento das partes de não condução da seção transversal
$S_1, S_2$	armazenamento nos intervalos de tempo $t_1$ e $t_2$ , respectivamente
$S_f$	ângulo de atrito
t	tempo (horas)
T(y)	função de largura que relaciona a largura da seção transversal com a distância acima do fundo do canal
$t_p$	tempo de retardamento da bacia, em horas
$V_e$	volume escoado superficialmente

$V_{\text{tot}}$	volume total precipitado sobre a bacia
$x$	distância medida longitudinalmente ao longo do canal
$y$	distância acima do fundo do canal
$z_0$	elevação do fundo do canal
$\beta$	fator de distribuição de velocidades
$\Delta S$	armazenamento
$\Delta x_e$	caminho de escoamento equivalente
$\rho$	densidade do fluido
$\tau_0$	média das tensões cisalhantes (força/unidade de área agindo nos limites do fluido)
$\frac{\partial Z}{\partial x}$	declividade da linha superfície d'água
$\phi$	$= K_c / (K_c + K_f)$

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	19
2.1 OBJETIVO GERAL.....	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	20
3.1 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS.....	20
3.1.1 Componentes de um sistema de informações geográficas.....	22
3.2 MODELOS MATEMÁTICOS.....	24
3.2.1 Elementos e etapas na modelação.....	27
3.3 SISTEMAS DE SUPORTE À DECISÃO.....	30
3.4 SISTEMAS DE ALERTA CONTRA ENCHENTES NO BRASIL.....	39
<b>4 LOCAL DO ESTUDO</b> .....	43
4.1 A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO BENTO.....	44
4.1.1 Geologia, geomorfologia e pedologia.....	48
4.1.2 Cobertura vegetal, uso e ocupação do solo.....	50
4.1.3 Hidroclimatologia.....	51
4.1.3.1 <i>Climatologia</i> .....	52
4.1.3.2 <i>Pluviometria</i> .....	53
4.1.3.3 <i>Fluviometria</i> .....	54
4.2 A BARRAGEM DO RIO SÃO BENTO.....	55
4.2.1 Características do reservatório e dos órgãos de descarga.....	57
4.2.1.1 <i>Níveis d'água a montante</i> .....	58
4.2.1.2 <i>Níveis d'água a jusante</i> .....	58
4.2.1.3 <i>Áreas</i> .....	58
4.2.1.4 <i>Volumes</i> .....	58
4.2.1.5 <i>Vazões típicas</i> .....	58
4.2.1.6 <i>Vertedouro</i> .....	59
4.2.1.7 <i>Tomada d'água</i> .....	59
4.2.2 Demandas para abastecimento urbano.....	62
4.2.3 Irrigação de áreas cultivadas.....	63

4.2.4 Vazão mínima de jusante.....	64
4.3 OPERAÇÃO DO RESERVATÓRIO.....	65
<b>5 O SISTEMA DE ALERTA CONTRA CHEIAS DA BACIA DO RIO SÃO BENTO.....</b>	<b>67</b>
5.1 MODELO DE PREVISÃO QUANTITATIVA DE CHUVAS.....	68
5.2 MODELO HIDROLÓGICO.....	70
5.2.1 Hidrograma Unitário (H.U.).....	70
5.2.2 Determinação do H.U. a partir de dados observados.....	72
5.2.3 Hidrograma unitário sintético.....	75
5.2.4 Método de Snyder.....	76
5.2.5 Curva de recessão de escoamento de base.....	78
5.3 MODELO HIDRÁULICO DE AMORTECIMENTO EM RESERVATÓRIOS.....	81
5.3.1 Base conceitual.....	81
5.3.2 O método de Puls.....	85
5.3.2.1 <i>Método de Puls modificado (Modified Puls)</i> .....	87
5.4 MODELO HIDRÁULICO DE PROPAGAÇÃO EM CANAIS - HEC-RAS.....	95
5.4.1 Equação da continuidade.....	95
5.4.2 Equação dinâmica.....	97
5.4.3 Aplicação das equações do regime não permanente no programa HEC-RAS.....	103
5.5 MAPEAMENTO DE PLANÍCIES DE INUNDAÇÃO.....	107
5.5.1 Modelo digital de elevação da área total do trecho jusante.....	107
5.5.2 Modelo digital de elevação das comunidades.....	108
5.5.3 Ortofoto.....	108
5.5.4 Dados cadastrais.....	109
5.5.5 Compilação do sistema.....	109
<b>6 APLICAÇÃO DO SISTEMA DE PREVISÃO DE INUNDAÇÕES À BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO BENTO.....</b>	<b>110</b>
6.1 DADOS DE PRECIPITAÇÃO E VAZÕES AFLUENTES.....	110
6.2 PARÂMETROS DO MODELO HIDROLÓGICO.....	113
6.2.1 Cálculo do hidrograma unitário sintético.....	113
6.2.2 Coeficiente de escoamento superficial.....	119
6.2.3 Separação do escoamento de base.....	121
6.2.4 Curva de recessão.....	123

6.2.5 Modelo Hidrológico.....	126
6.3 SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DO AMORTECIMENTO NO RESERVATÓRIO..	128
6.3.1 Política de operação adotada.....	129
6.3.2 Simulador Hidráulico – SHR.....	131
6.4 SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DA PROPAGAÇÃO DE VAZÕES NO CANAL A JUSANTE.....	134
6.4.1 Seções topobatimétricas.....	134
6.4.2 Cheias Simuladas.....	136
6.4.3 Contribuição lateral da bacia incremental.....	137
<b>7 RESULTADOS.....</b>	<b>139</b>
7.1 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA.....	139
7.2 PROPAGAÇÃO DE VAZÕES NO CANAL NATURAL.....	145
7.3 MAPAS DE INUNDAÇÕES GERADOS PELO ARCGIS.....	155
<b>8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>158</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>162</b>
<b>ANEXO 1 – DADOS DA BARRAGEM SÃO BENTO.....</b>	<b>167</b>
<b>ANEXO 2 - MAPAS DAS MANCHAS DE INUNDAÇÃO.....</b>	<b>180</b>
<b>ANEXO 3 - MAPAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO BENTO.....</b>	<b>191</b>
<b>ANEXO 4 - CÓDIGO FONTE DO MODELO HIDROLÓGICO SACC.....</b>	<b>196</b>
<b>ANEXO 5 - CÓDIGO FONTE DO MODELO DE PROPAGAÇÃO DE DESCARGAS EM RESERVATÓRIOS.....</b>	<b>209</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O sistema abordado neste trabalho pode ser identificado como um sistema operacional de suporte à decisão para o mapeamento de áreas sujeitas à riscos de inundação, previsão de cheias e gerenciamento. Apresenta-se como uma ferramenta integrada para o planejamento e gerenciamento, permitindo: (1) a previsão de cheias e identificação do fenômeno da inundação com base numa análise em tempo real da situação meteorológica vigente e previsões quantitativas de precipitações disponíveis em diferentes escalas de tempo e espaço; (2) a localização de áreas de risco sujeitas a danos por inundação; (3) a organização de decisões que objetivam a redução de danos sociais e econômicos com base em cenários previstos em tempo real; (4) o contínuo treinamento do pessoal envolvido nas ações preventivas e de mitigação dos efeitos de cheias.

Este sistema compõe-se basicamente de 4 módulos, a saber:

- a modelagem hidrológica a partir da previsão quantitativa de precipitações;
- a modelagem hidráulica da operação de um reservatório de regularização de vazões afluentes;
- a modelagem hidráulica da propagação de vazões em um trecho de rio em canal natural;
- a conexão com um sistema integrado georreferenciado que possibilita a identificação das planícies de inundação atingidas pelas cheias.

Cada um destes módulos utiliza-se de sistemas computacionais criados a partir de métodos quantitativos e frequentemente utilizados por estudiosos das áreas de Hidrologia e Hidráulica de canais. Estes sistemas podem ser utilizados para a identificação de totais de chuva precipitáveis em um horizonte de tempo e espaço definidos; a sua transformação em escoamento para simular na bacia hidrográfica, a modelagem da transformação de chuva em vazão; para a identificação dos efeitos de amortecimento de estruturas hidráulicas e reservatórios; e para a caracterização do fenômeno de propagação de descargas em canais naturais.

O sistema proposto neste trabalho utiliza-se das seguintes metodologias ou sistemas computacionais para atingir seu objetivo:

- método do hidrograma unitário sintético;
- método de propagação e amortecimento através de reservatórios e estruturas hidráulicas, conhecido como “Modified Puls”;

- modelo computacional HEC-RAS, desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers, versão 3.1.3, no seu módulo de propagação de vazões em canais naturais;
- modelo Advanced Regional Prediction System (ARPS), desenvolvido no Center for Analysis and Prediction of Storms (CAPS), da Universidade de Oklahoma, Estados Unidos.
- Sistema de Informações Geográficas desenvolvido em ArcGIS para o manuseio de informações georrefenciadas, utilizado na identificação das planícies de inundação em escala espacial tridimensional.

O sistema operacional apresentado utiliza-se de ferramentas obtidas no mercado tecnológico com relativa facilidade, demonstrando a possibilidade de se disponibilizar, com certa rapidez, ferramentas de suporte à decisão aplicáveis ao cotidiano do gerenciamento de sistemas de alerta para áreas sujeitas a inundações.

O sistema apresentado é aplicado à bacia hidrográfica do rio São Bento, estudo de caso apresentado nesta dissertação. Entretanto, sua estrutura define um esquema básico geral aplicável a sistemas de alerta para locais sujeitos a inundações desde que sejam adequados os parâmetros que caracterizam as bacias estudadas. O Sistema de Alerta Contra Cheias (SACC) deve ser implantado junto aos órgãos e entidades responsáveis pelo gerenciamento de bacias hidrográficas como suporte permanente tanto para a vigilância em tempo real como para o treinamento de equipes de apoio. Como benefício direto, portanto, podem ser enumerados os seguintes pontos:

- Identificação em tempo real de áreas inundáveis;
- Determinação do tempo e rotas de fuga;
- Determinação de danos materiais previstos.

Como utilidade adicional o sistema pode ser utilizado em ações de treinamento e na conscientização do pessoal envolvido no gerenciamento das áreas inundáveis. O SACC pode ser utilizado para simular situações atmosféricas atípicas, caracterizando o impacto e a evolução do fenômeno de propagação de cheias e identificando claramente o tempo necessário para a tomada de decisões nas ações preventivas e mitigatórias.

O presente trabalho aplica o sistema desenvolvido à bacia do rio São Bento, afluente do rio Mãe Luzia, na bacia do rio Araranguá, componente da rede hidrográfica da bacia Atlântica, no Estado de Santa Catarina.

A escolha deste estudo de caso se deve principalmente à composição do sistema de aproveitamento da bacia, onde se encontra implantado um reservatório de regularização de vazões naturais para o abastecimento de água e para a irrigação, inserindo os reflexos da operação de uma estrutura hidráulica no amortecimento das cheias ocorridas. Sua capacidade de regularização é definida apenas por órgãos de descarga controlados, de pequena capacidade quando comparados à magnitude das vazões afluentes. Portanto, o amortecimento dos hidrogramas afluentes provocados por tempestades se dá basicamente de forma não controlada, através da soleira livre vertente implantada para descarregar os volumes excedentes.

Adicionalmente, o vale do rio São Bento, a jusante do local do barramento, é povoado por pequenas comunidades que mantêm sua infra-estrutura urbana basicamente na planície de inundação. Este cenário é agravado pelo fato de que o vale drenante apresenta topografia amena, com pequenas ondulações e extensas planícies de baixa declividade. Além das estruturas e benfeitorias atingíveis por cheias de baixa recorrência, as planícies também são exploradas para o cultivo de arroz e outras culturas, constituindo uma importante atividade econômica regional. As comunidades acima referidas são as de São Bento Alto, em Siderópolis, e São Bento Baixo, no município de Nova Veneza.

A presente dissertação define em seu capítulo 2 os objetivos geral e específicos do trabalho. Em seu capítulo 3 é desenvolvida uma revisão bibliográfica dos modelos e métodos utilizados. No capítulo 4 apresenta-se uma descrição detalhada da bacia hidrográfica onde se realiza a aplicação do sistema. O capítulo 5 detalha o Sistema de Alerta Contra Cheias - SACC, definindo suas características conceituais e operacionais, equações e definições teóricas. O capítulo 6 apresenta a aplicação do modelo à bacia do rio São Bento e o capítulo 7 apresenta e comenta os resultados atingidos e interpreta os mesmos quanto aos objetivos almejados. Finalmente, o capítulo 8 resume as conclusões do trabalho realizado, indicando próximas investigações que podem dar seqüência à linha de pesquisa apresentada, na busca de um aperfeiçoamento de sistemas similares que possam produzir, cada vez mais, maiores benefícios ao público usuário potencial, principalmente aqueles ligados aos organismos gestores responsáveis pelo planejamento da utilização dos recursos hídricos.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é a concepção de uma ferramenta efetiva de suporte à decisão, aplicável a bacias hidrográficas que detêm significativo potencial de cheias que afetem áreas povoadas, podendo causar danos sociais, econômicos e ambientais. O trabalho apresentado busca demonstrar a possibilidade de se desenvolver uma ferramenta eficaz, com características metodológicas consistentes e robustas, utilizando-se de sistemas computacionais disponíveis no mercado tecnológico ou através de modelos computacionais facilmente desenvolvidos com linguagens estruturadas de uso comum em nível acadêmico. Através desta ferramenta os gestores de bacias hidrográficas têm a possibilidade de gerir um sistema de alerta eficaz para áreas sujeitas a inundações, proporcionando um sistema de suporte à decisão para os grupos envolvidos com a prevenção de cheias e a mitigação dos seus efeitos danosos.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolvimento de um sistema operacional de suporte à decisão adequado e eficaz para a previsão de vazões e níveis de cheias, com base no monitoramento de precipitações existentes e nas previsões quantitativas de chuva. Este sistema deverá prever a atenuação das cheias em reservatórios, propagação da onda de cheia no trecho a jusante do barramento e indicar as áreas atingidas para cada cenário de precipitações extremas.
- Aplicação do Sistema de Alerta Contra Cheias à bacia hidrográfica do rio São Bento, no Estado de Santa Catarina, consolidando uma ferramenta de auxílio à Defesa Civil e ao órgão gerenciador da barragem do São Bento, a Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN), como suporte à prevenção de cheias na região a jusante do local de barramento, especificamente as localidades de São Bento Alto e São Bento Baixo.
- Simulação de cenários de cheias para a bacia hidrográfica do rio São Bento, com identificação das áreas inundadas em sistema de informações geográficas.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A previsão de chuvas intensas e o conhecimento antecipado de grandes vazões é uma informação valiosa na gestão dos recursos hídricos. Anualmente, grandes desastres naturais decorrentes de precipitações extremas ocorrem em áreas povoadas. Muitos danos causados pelas cheias podem ser evitados quando o planejamento da ocupação territorial é associado ao conhecimento dos fenômenos naturais. Um sistema de alerta contra cheias, associado a um plano de gerenciamento de risco, que contemple ações preventivas, de alerta e emergenciais pode ajudar na prevenção de prejuízos econômicos e perdas de vidas decorrentes de grandes inundações. Os esforços no desenvolvimento de sistemas computacionais de alerta e auxílio à decisão para gerenciamento de recursos hídricos vêm ocorrendo em escala mundial. Neste capítulo apresentam-se algumas definições a respeito dos componentes do sistema de alerta desenvolvido neste trabalho, bem como a descrição e aplicações de sistemas de suporte à decisão, com características semelhantes, em estudos de casos em diversos países.

#### 3.1 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Sistemas de Informação Geográfica (SIG's) são sistemas automatizados usados para armazenar, analisar e manipular dados geográficos, ou seja, dados que representam objetos e fenômenos em que a localização geográfica é uma característica inerente à informação e indispensável para analisá-la como citado em Câmara et al. (1996).

O Federal Interagency Coordinating Committee (1988) define sistema de informações geográficas como um conjunto de hardware, software e de procedimentos desenvolvidos para dar suporte à captura, ao gerenciamento, à manipulação, à análise e à apresentação de dados espaciais referenciados, com o fim de resolver problemas complexos de gerenciamento e de planejamento.

Para Calkins e Tomlinson (1977) os sistemas de informações geográficas são seqüências ordenadas de operações, desenvolvidas para auxiliar o usuário nas tarefas de observar, coletar, armazenar e analisar dados, com a finalidade de dar apoio aos processos de decisões.

Hanigan (1988 apud RÖHM, 2004) define sistema de informações geográficas como qualquer sistema de informações que pode:

- coletar, armazenar e recuperar informações espaciais;

- identificar locais que pertencem a um dado ambiente, segundo algum critério pré-definido;
- explorar relações entre os conjuntos de dados relacionados com um dado ambiente;
- analisar os dados relacionados espacialmente com o fim de auxiliar a tomada de decisões sobre o ambiente;
- facilitar a seleção e a transferência de dados para aplicação de modelos analíticos capazes de avaliar o efeito de alguns procedimentos que alteram o ambiente;
- apresentar o ambiente selecionado em forma gráfica ou numericamente, antes e depois da análise.

Os SIG's comportam diferentes tipos de dados e aplicações, em várias áreas do conhecimento. Permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados. Tornam ainda possível automatizar a produção de documentos cartográficos (CÂMARA; DAVIS, 2004).

Os principais benefícios na utilização de SIG's para análises ambientais refletem-se no ganho de produtividade, redução ou eliminação de custos ou riscos, qualidade na execução de tarefas e automatização de tarefas trabalhosas e rotineiras. Como exemplo de aplicações, temos (CÂMARA et al., 1996):

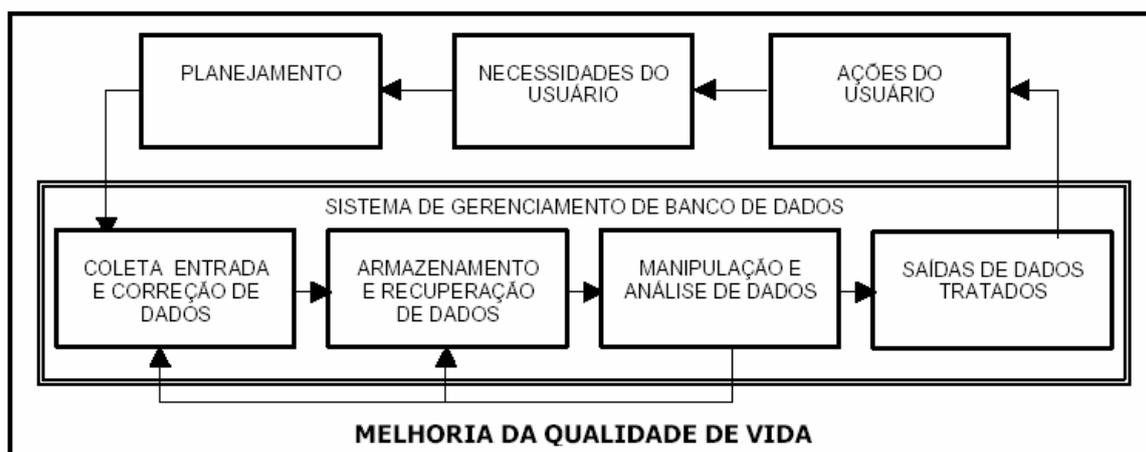
- otimização de tráfego;
- controle cadastral;
- gerenciamento de serviços de utilidade pública;
- demografia;
- cartografia;
- administração de recursos naturais;
- monitoramento costeiro;
- controle de epidemias;
- planejamento urbano e gerenciamento ambiental.

A utilização de SIG's facilita a integração de dados coletados de fontes heterogêneas, de forma transparente ao usuário final. Os usuários não estão restritos a especialistas em um domínio específico, cientistas, gerentes, técnicos, funcionários de

administração de diversos níveis e o público em geral vêm usando tais sistemas com frequência cada vez maior.

### 3.1.1 Componentes de um sistema de informações geográficas

Os sistemas de informações geográficas são desenvolvidos para trabalhar com dados georreferenciados e são compostos por um banco de dados que opera com estes tipos de dados espaciais e por um conjunto de operações que os beneficia. De forma simplificada, um sistema de informações geográficas é mostrado na Figura 1.

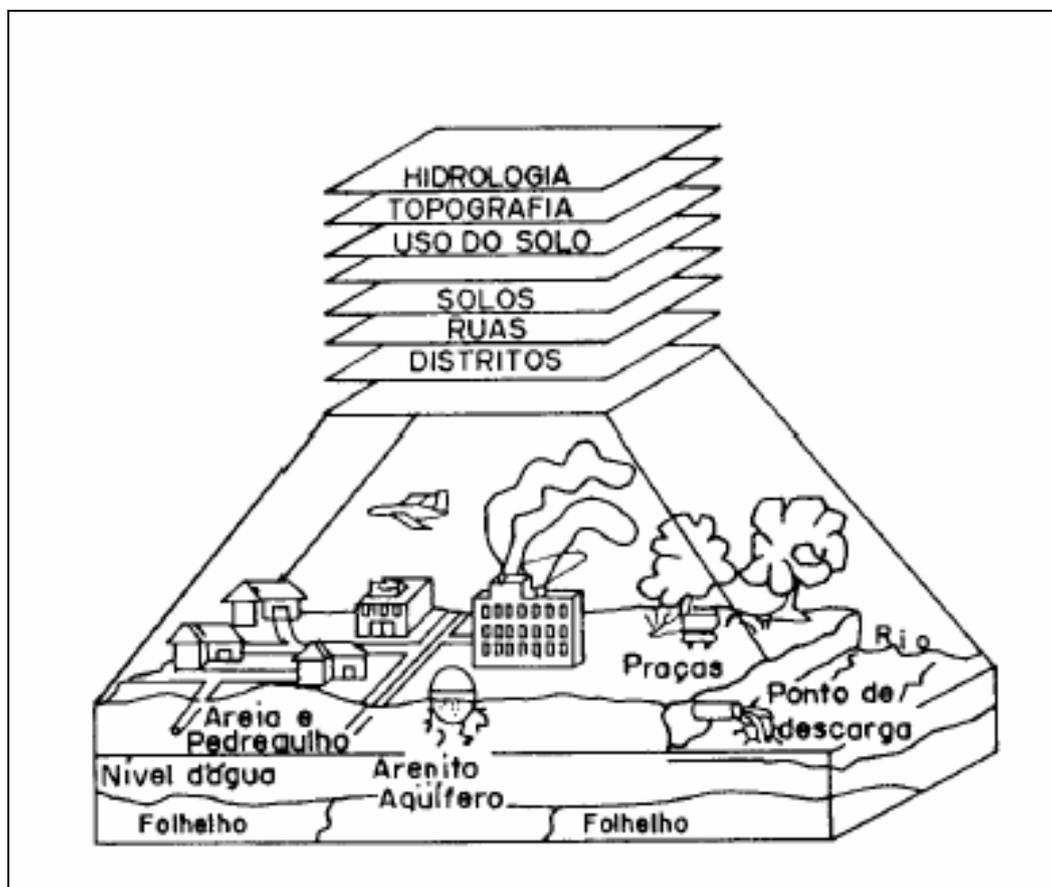


**Figura 1:** Sistema de Informações Geográficas.  
Fonte: Röhm ( 2004).

A Figura 1 mostra que os sistemas de informações geográficas só existem, de fato, quando aplicados e atendendo às necessidades do usuário, segundo suas ações sobre as informações contidas no sistema, que busca uma interação com o mundo real. Assim, a utilização efetiva dos sistemas de informações geográficas exige o cumprimento de diversas fases preparatórias que incluem: a aquisição de equipamentos e programas adequados; treinamento de pessoal; desenvolvimento de aplicativos específicos; instalação e integração de todos os componentes do sistema; a construção de um grande banco de dados; e teste de todo o sistema como um todo. Estes pré-requisitos diferenciam os sistemas de informações geográficas da grande maioria dos programas disponíveis comercialmente (tais como editores de texto, planilhas eletrônicas, CADs e outros), que podem ser usados imediatamente após suas instalações (RÖHM, 2004).

Nos sistemas de informações geográficas, as feições do mundo real podem ser representadas em várias camadas de dados relacionados, que são divididos em dois grandes

grupos, como se observa na **Figura 2**. Um deles refere-se à forma e à posição das ocorrências presentes em um terreno. O outro descreve quantitativamente ou qualitativamente tais ocorrências. Este conjunto de informações compõe o banco de dados de um sistema de informações geográficas.



**Figura 2:** Componentes de um SIG.  
Fonte: adaptado de RÖHM (2004).

O cruzamento das informações das diversas camadas através de ferramentas de consulta, confere aos SIG's uma imensa potencialidade de aplicações, como em sistemas de transportes, análises ambientais, cadastros técnicos multifinalitários, etc.

### 3.2 MODELOS MATEMÁTICOS

Os modelos, de uma forma geral, podem ser interpretados através de diferentes enfoques. Wendland (2003) define modelo como uma tentativa de reprodução idealizada de algumas ou todas as características físicas de um sistema. Assim, modelo é um ente real ou abstrato que reproduz, pelo menos em parte, o comportamento de um processo natural. É uma representação simplificada de um sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar respostas para diferentes entradas (TUCCI, 1998). O modelo é uma representação do comportamento de um sistema. Os modelos usualmente são classificados em: físicos, analógicos e matemáticos.

Os sistemas são definidos como conjuntos de fenômenos físicos naturais, interligados, que respondem a um dado estímulo (perturbação), produzindo uma resposta (saída) relacionada ao estímulo e às propriedades do sistema.

Um modelo físico representa o sistema, ou parte dele, por outro sistema físico, geralmente em escala menor, denominado modelo. Este tipo de modelo encontra grande aplicação na Engenharia Hidráulica. A teoria da semelhança é utilizada para o estabelecimento das escalas e as limitações das previsões sobre o sistema original (protótipo) a partir de medidas de grandezas físicas no modelo.

Os modelos analógicos são baseados na analogia entre diferentes processos físicos. Valem-se da analogia entre as equações básicas que regem diferentes fenômenos como, por exemplo, redes elétricas e hidráulicas. Essa analogia permite a representação de um sistema hidráulico por um campo elétrico, por um custo mais reduzido (TUCCI, 1998; WENDLAND, 2003).

Os modelos matemáticos são abstrações no sentido de substituir corpos, forças, deformações, etc, por equações que contém variáveis, parâmetros e constantes numéricas (CHRISTOFOLETTI, 1999). Também chamados de digitais, estes modelos são mais versáteis, e, geralmente, mais econômicos, pela facilidade na mudança de sua lógica, obtendo-se, com relativa facilidade, resultados de diferentes situações de um sistema ou de diferentes sistemas, e com grande velocidade de resposta.

A desvantagem desse tipo de modelo está na discretização de processos contínuos e na dificuldade da representação matemática de alguns processos físicos, pois em determinadas áreas de estudo ainda não existem funções matemáticas que representem convincentemente certos fenômenos físicos (TUCCI, 1998). Também a escala de discretização no caso da formulação matemática envolver equações diferenciais pode colocar

sérios obstáculos à modelagem matemática como acontece, por exemplo, no caso de escoamentos turbulentos.

Segundo Tucci (1998), um modelo matemático pode ser classificado segundo vários critérios.

Quanto a continuidade, os modelos podem ser classificados em contínuos e discretos. Modelo contínuo é quando os fenômenos são modelados por funções contínuas no tempo. Exemplo: Uso do linígrafo gráfico para registrar níveis de rios e reservatórios. Discreto é quando as mudanças de estado se dão em intervalos discretos. Exemplo: Registro de níveis de rios efetuado por observadores, apenas em determinadas horas do dia.

Quanto à variabilidade espacial, os modelos podem ser classificados em concentrados e distribuídos. Concentrado (*lumped*): é quando não se leva em conta a variabilidade espacial e, em geral, utilizam apenas o tempo como variável independente. Exemplo: Consideração da precipitação média de uma bacia. Distribuído (*distributed*): são aqueles em que as variáveis e os parâmetros do modelo dependem do espaço e do tempo. Tem a capacidade de representar melhor a variabilidade do comportamento físico de diferentes partes do sistema, como a precipitação. O grau de detalhamento está ligado diretamente às informações disponíveis e à precisão desejada para retratar a bacia.

Quanto ao enfoque probabilístico, dividem-se em estocásticos e determinísticos. Estocástico: é quando o resultado se apresenta na forma de variável aleatória, e o conceito de probabilidade é introduzido na formulação do modelo. Christofolletti (1999) define modelos estocásticos (ou probabilísticos) como expressões que envolvem variáveis, parâmetros e constantes matemáticas, juntamente com um ou mais componentes aleatórios resultantes de flutuações imprevisíveis dos dados de entrada ou de incertezas nos parâmetros do modelo. Determinístico: é quando a natureza aleatória das variáveis envolvidas no processo é ignorada e o modelo segue uma lei definida, pelo princípio de causalidade. Quando, para uma mesma entrada, o sistema produz sempre a mesma saída, o sistema é determinístico. Quando o relacionamento entre a entrada e a saída é definido por uma lei de probabilidades, o sistema é estocástico.

Em relação às funções matemáticas, podem ser conceituais ou empíricos. Conceitual quando as funções utilizadas na sua elaboração levem em consideração as leis que regem os processos físicos envolvidos. Empíricos (“caixa-preta”) são aqueles em que se ajustam os parâmetros do modelo aos dados observados, através de funções matemáticas que, em princípio, não tem nenhuma relação com os processos físicos envolvidos. As dificuldades dos modelos conceituais concentram-se na estimação dos parâmetros das suas relações

matemáticas, dada à variabilidade espacial dos processos modelados.

Com relação à aplicação, especificamente na gestão dos recursos hídricos, os modelos podem ainda ser assim classificados:

- Modelos de simulação: são utilizados para descrever o comportamento de um sistema. Prognosticam a resposta de um sistema sujeito a diferentes entradas ou devido a modificações nas suas características.
- Modelos de otimização: buscam definir as chamadas variáveis de decisão de um sistema específico, de modo a maximizar (ou minimizar) uma função objetivo.
- Modelos de planejamento: simulam condições globais de um sistema maior. Normalmente, o modelo de planejamento envolve uma região ou uma bacia e busca não somente a solução meramente hidráulica, hidrológica ou econômica, mas engloba, também, quantificação socioeconômica e ambiental (TUCCI, 1998). Os modelos hidrológicos têm sido utilizados em processos globais, buscando prognosticar as condições em que o meio estará sujeito, para que seja possível mitigar seus impactos.

O campo da hidrologia foi altamente beneficiado com a difusão das técnicas de modelagem. Nos simpósios nacionais e internacionais são constantes as aplicações de modelos matemáticos na análise de recursos hídricos superficiais e subterrâneos, em seus aspectos quantitativos e qualitativos. A Tabela 1 apresenta alguns modelos matemáticos mais utilizados no gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos.

**Tabela 1:** Modelos utilizados no Gerenciamento de Recursos Hídricos

Nome	Tipo	Estrutura	Características	Usos
Chuva-Vazão;	Determinístico Empírico; Conceitual	Comportamento	calcula a vazão de uma bacia a partir da precipitação	extensão de séries de vazão; dimensionamento; previsão em tempo real; avaliação de usos da terra
Vazão-vazão	Determinístico; Empírico; Conceitual	Comportamento	Calcula a vazão de uma seção a partir de outra a montante.	Extensão de séries de vazão, dimensionamento, previsão de cheia.
Geração estocástica de vazão	Estocástico Empírico	Comportamento	Calcula a vazão com base nas características da série histórica Determina o movimento, vazão potencial de águas subterrâneas a partir de dados de realimentação, bombeamento, etc.	Dimensionamento de um reservatório
Fluxo Saturado	Determinístico Conceitual / Empírico	Comportamento	Propaga vazões em rios e rede de canais	Capacidade de bombeamento; nível do lençol freático; interação rio-aquífero
Hidrodinâmico	Determinístico Conceitual	Comportamento	Propaga vazões em rios e rede de canais	Simula alterações do sistema; efeitos de escoamento de jusante. Impacto de efluentes; eutrofização de reservatórios; condições ambientais.
Qualidade de água de rios e reservatórios	Determinístico Conceitual / Empírico	Comportamento	Simula a concentração de parâmetros de qualidade da água	Redes de abastecimento de água; redes de irrigação.
Rede de canais e condutos	Determinístico Conceitual	Comportamento e otimização.	Otimiza o diâmetro dos condutos e verifica as condições de projeto	Redes de abastecimento de água; redes de irrigação.
Operação de reservatórios	Determinístico Conceitual		Determina a operação ótima de sistemas de reservatórios	Usos múltiplos.
Planejamento e Gestão de usos múltiplos	Estocástico; Determinístico	Comportamento, otimização e planejamento.	Simula condições de projeto e operação de sistemas (usa vários modelos)	Reservatórios, canais, estações de tratamento, irrigação, navegação fluvial, etc.

Fonte: adaptado de TUCCI (1998).

### 3.2.1 Elementos e etapas na modelação

Wendland & Ruber (1998), consideram importantes as seguintes etapas para uma modelação:

Primeiramente, devem-se realizar suposições sobre o problema físico, através da definição das questões relevantes e suposição sobre o processo natural estudado. Após esta etapa, são feitas as simplificações do modelo conceitual, com a definição das principais relações causa-efeito e a descrição qualitativa do comportamento do sistema natural, através da qual podem ser feitas simplificações. Igualmente, são praticadas as simplificações do modelo matemático. Descreve-se o processo físico através de igualdades matemáticas, tendo

em vista o princípio da conservação de massa, energia e quantidade de movimento. São simplificados alguns fenômenos físicos.

Na etapa seguinte, definem-se as condições iniciais e de fronteira. Adotam-se aproximações para o modelo numérico com a descrição aproximada da expressão matemática diferencial. A formulação diferencial é aproximada por uma formulação algébrica, determinando as variáveis (carga hidráulica, por exemplo) em pontos discretos do modelo. As principais dificuldades ocorrem nesta etapa, incluindo a tradução do modelo numérico em linguagem computacional, resolução do sistema com diferentes técnicas numéricas e determinação da precisão adequada do resultado final. As grandezas calculadas são interpretadas com base em conhecimentos físicos específicos.

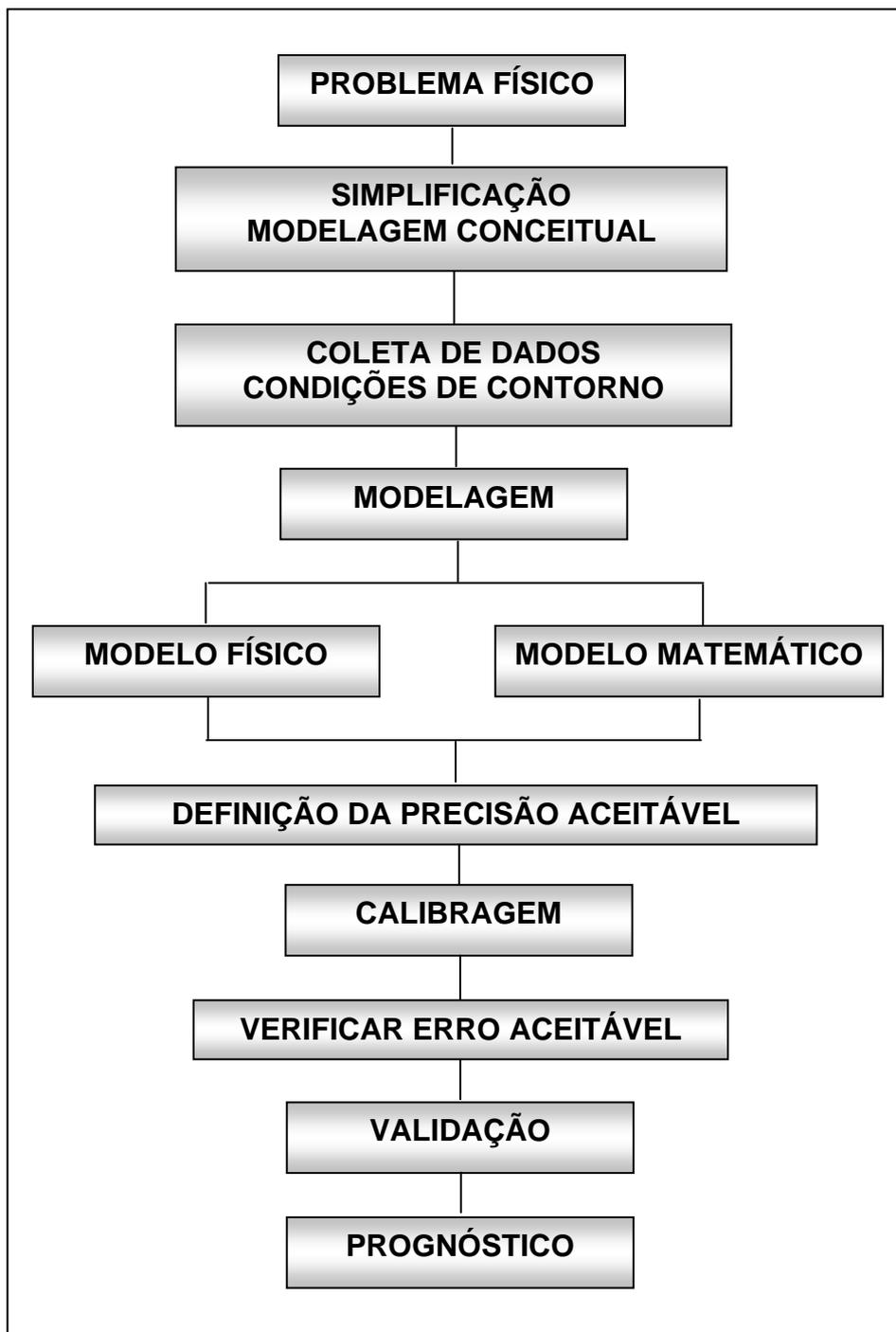
Subseqüentemente, comparam-se os resultados numéricos obtidos com valores reais medidos (históricos). Havendo diferença, realiza-se a calibragem do modelo. Os valores de parâmetros físicos obtidos da literatura, freqüentemente não são números absolutos, mas indicados como intervalo de valores. A calibragem é realizada com base em uma série de dados históricos.

A calibragem é o ajuste dos parâmetros do modelo, ou, no caso dos modelos físicos, de certas características geométricas para que este reproduza, aproximadamente, e em média, os valores medidos para a saída. Significa inverter as equações do modelo fazendo com que os parâmetros sejam as incógnitas e calculá-las para um determinado critério de ajuste.

Validar um modelo é determinar os valores da saída com o modelo calibrado (sem alterar os parâmetros) e para ocorrências distintas das usadas na calibragem, comparando os resultados teóricos do modelo com os resultados medidos, verificando se o erro dos prognósticos do modelo se situa em uma faixa aceitável para o estudo em pauta.

A validação do modelo utiliza, preferencialmente, uma série histórica de medidas de um período, com condições variadas. Sendo o erro aceitável e aleatório, considera-se o modelo pronto para realizar prognósticos. Nesta etapa, o modelo é adaptado a determinadas perguntas (por exemplo: que conseqüência terá a perfuração de um poço no lençol freático?). Para responder a essas perguntas é interessante que o resultado do modelo seja complementado com análises econômicas, sociais e ambientais. Para assegurar o grau de confiabilidade nas respostas do modelo, aplicam-se testes estatísticos e análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo, identificando a margem de erro dos prognósticos.

Com base nessas considerações, pode-se dizer que as etapas de modelação podem ser planejadas segundo a Figura 3.



**Figura 3:** Etapas da Modelação.

Os modelos apresentam limitações que devem ser consideradas na suas aplicações. Wendland e Ruber (1998) afirmam que após a decisão sobre a utilização de um modelo, deve-se considerar que *“o modelo é somente uma ferramenta para apoiar decisões. Estas só podem ser tomadas quando existe a familiaridade necessária com os conceitos, técnicas, empregos e limitações da modelação”*.

Todos os modelos têm vantagens e desvantagens. Para as soluções possíveis de um modelo devem ser consideradas as alternativas: “Solução errada para problema bem-posto” e “Solução correta para problema interpretado de forma incorreta”.

Deve-se ter em mente que nenhum modelo é capaz de descrever exatamente os processos naturais. A complexidade dos mesmos, a falta de conhecimento dos parâmetros requeridos e simplificações e generalizações que são introduzidas são algumas das causas de divergências entre os resultados e a situação real. Portanto, a resposta de um modelo é altamente dependente de simplificações acertadas e da exatidão dos parâmetros de entrada.

### 3.3 SISTEMAS DE SUPORTE À DECISÃO

As soluções para os complexos problemas de recursos hídricos dependem de conhecimentos multidisciplinares, envolvendo informações de diversas áreas de estudo, tais como Geografia, Biologia, Geologia, Engenharia, Economia, Meteorologia, Sociologia, entre outras.

A integração destas ciências encontra nos Sistemas de Informação Geográficas (SIG) um terreno fértil para a integração de dados de diversas origens em diferentes formatos. A combinação de modelos matemáticos, bases de dados e informações georeferenciadas consolidou-se nesta última década e vem sendo bastante explorada nas mais variadas combinações, formando sistemas de suporte à decisão.

No campo da Engenharia de Recursos Hídricos, os Sistemas de Suporte à Decisão (SSD) atuam como ferramentas de planejamento, projeto, análise, operação e manutenção de diversos sistemas hídricos. A união das informações especializadas dos SIG's com a análise temporal dos modelos matemáticos, cria ferramentas de grande utilidade para os tomadores de decisão.

Martin et al. (2005), no artigo “Interfacing GIS with water resource models: a state-of-the-art review” apresentam uma interessante análise crítica sobre os SSD com interface gráfica baseada em SIG. Citam os sistemas mais utilizados, enfatizando suas aplicações, limitações e perspectivas futuras. Os autores ressaltam a funcionalidade da

obtenção de dados de entrada para os modelos através do SIG e a praticidade da visualização dos dados de saída dos modelos, na interface gráfica, para a realização de análises espaciais.

Instituições de grande importância em pesquisas hídricas vêm desenvolvendo sistemas combinando SIG e modelos matemáticos.

O Texas Water Resource Institute desenvolveu, desde o início da década de 1990, o Soil & Water Assessment Tool (SWAT) (ARNOLD et al., 1998). O sistema utiliza o GRASS - Geographic Resources Analysis Support System, Srinivasan e Arnold (1994 apud MARTIN et al., 2005) como a interface SIG. O GRASS fornece os dados de entrada para o SWAT através da subdivisão das bacias em células ou sub-bacias, que permitem obter os dados de entrada do modelo a partir da superposição das informações geográficas e da base de dados do SIG.

O Soil & Water Assessment Tool (SWAT), desenvolvido pelo United State Department of Agriculture – Agriculture Research Service é um desenvolvido para simular processos físicos em bacias hidrográficas, quantificando o impacto das práticas de gestão do uso do solo nas vazões e transporte de sedimentos. Modela o ciclo hidrológico, incluindo evapotranspiração, infiltração, percolação a aquíferos profundos e vazões laterais.

Uma vez que quantidade significativa de dados de entrada do SWAT são informações espaciais (rede de drenagem, divisores de águas, uso do solo, tipo de solo, etc...), foram desenvolvidas diversas ferramentas SIG para extração de informações diretamente dos dados espaciais digitais.

Bian et al. (1996) apud OLIVERA et al. (2006) desenvolveram uma interface utilizando a plataforma ARC/INFO (ESRI, EUA) rodando no sistema operacional UNIX. Di Luzio et al. (1998) apud OLIVERA et al., (2006) utilizaram o Microsoft Windows como sistema operacional associado à interface gráfica do ESRI ArcView 3.1. em um sistema mais amigável para o usuário. Olivera et al. (2006) criaram o ArcGIS-SWAT, uma interface mais atualizada em compatibilidade com as versões atuais do Windows e do ArcGIS. Para validar seu sistema, os autores aplicaram os dados obtidos através do ArcGis-SWAT combinados com um modelo para análise de cheias na bacia do rio Seco (Seco Creek) no Texas, EUA.

Santhi et al. (2006), aplicaram o SWAT na estimativa do impacto da implementação do plano de gestão da qualidade da água na bacia do rio Trinity (4554 km<sup>2</sup>), no Texas, EUA. Nesta bacia, a poluição difusa é uma preocupação das autoridades gestoras. A avaliação foi realizada para cenários de longo prazo, com ênfase nas principais fontes de poluição, como nutrientes e sedimentos provenientes da erosão de terras agrícolas. O SWAT

foi a ferramenta escolhida para a realização deste estudo devido à sua capacidade de simular processos de manejo de uso do solo em grandes bacias.

A agência de proteção ambiental dos Estados Unidos – U.S. Environmental Protection Agency – US EPA disponibiliza em seu *site* e incentiva a aplicação do sistema BASINS.

Originalmente lançado em 1996, o BASINS - Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources (U.S. EPA, 2001) é um sistema de análise ambiental de múltiplas finalidades, desenvolvido para uso de agências regionais, estaduais e locais de gestão de recursos hídricos e qualidade da água. O sistema possibilita o acesso a uma grande quantidade de dados pontuais e não pontuais em um formato simples. Instalado em um computador pessoal, o BASINS permite ao usuário a consulta da qualidade de água em trechos de rio e em toda a bacia. Esta ferramenta integra dados ambientais, ferramentas analíticas e modelos matemáticos, auxiliando no planejamento e gestão da bacia hidrográfica e na proteção ambiental.

O BASINS é composto de seis módulos, providenciando as ferramentas necessárias para a realização de análises quantitativas e qualitativas dos recursos hídricos de bacias hidrográficas. São os seguintes (U.S. EPA, 2001):

- base de dados ambientais dos EUA;
- ferramentas de avaliação;
- aplicativos;
- relatórios de caracterização da bacia hidrográfica;
- modelo de qualidade de água;
- modelos de balanço quantitativo na bacia hidrográfica.

No BASINS, os dados fisiográficos, de monitoramento e as ferramentas de avaliação associadas são integradas em um ambiente SIG personalizado. O Sistema de Informações Geográficas é o ArcView 3.1, desenvolvido pelo Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI). Os modelos de simulação são integrados ao ambiente SIG através de *links* nos quais os dados de entrada são gerados no ArcView e enviados diretamente aos modelos. Os modelos rodam em ambiente DOS e Windows e os resultados das simulações podem ser visualizados e utilizados em outras análises e interpretações.

Os modelos que compõem o BASINS são os seguintes:

- qualidade de água: QUAL2E;

- modelos de Bacia Hidrográfica: WinHSPF e SWAT;
- estimativa de cargas de poluentes em fontes difusas: PLOAD

A combinação destes modelos nas rotinas do BASINS permite ao usuário a visualização, navegação e todos os tipos de análises geográficas possibilitadas pelo ArcView 3.1.

Exemplos de aplicações do BASINS são encontradas em Bergman, Green e Donnangelo (2002) e Di Luzio, Srinivasan e Arnold (2002).

Desenvolvido na década de mil novecentos e oitenta, o Sistema Hidrológico Europeu – SHE (ABBOTT et al., 1986 apud MARTIN et al., 2005) foi um projeto que tinha como objetivo a construção de um modelo hidrológico distribuído com base física, utilizando um conjunto de equações diferenciais que procuravam descrever os diferentes processos físicos do ciclo hidrológico.

O SHE é um modelo distribuído de bacia hidrográfica, fisicamente baseado, produzido em parceria pelo Danish Hydraulic Institute (DHI) (Instituto Dinamarquês de Hidráulica), o British Institute of Hydrology (Instituto Britânico de Hidrologia) e o SOGREAH (Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques – França) com suporte financeiro do Commission of the European Communities (Comissão das Comunidades Européias). O SHE é fisicamente baseado, no sentido de que os processos hidrológicos do movimento da água são modelados tanto pelas representações de diferenças finitas das equações diferenciais parciais de massa, momento e conservação de energia, ou por equações empíricas derivadas de pesquisas experimentais independentes. A distribuição espacial dos parâmetros da bacia, dados de chuvas e a resposta hidrológica são obtidos no plano através de um *grid* ortogonal e na vertical por uma coluna de camadas horizontais a cada célula da grade. Cada um dos principais processos da fase terrestre do ciclo hidrológico são modelados em um componente separado da seguinte forma:

- interceptação: pelo procedimento de contagem de Rutter;
- evapotranspiração, pela equação de Penman-Monteith;
- excedentes hídricos e vazão superficial pelas Equações de Saint-Venant simplificadas;
- fluxo na zona insaturada: pela Equação Unidimensional de Richards;
- fluxo na zona saturada: Equação de Boussinesq bi-dimensional;
- derretimento da neve: por um método de balanço de energia.

O desenvolvimento de sistemas de alerta contra enchentes é uma prioridade na Europa. Neste sentido, Todini (1999) apresentou o Flood Operacional Decision Support System (FLOODSS), um sistema de suporte a decisão com o objetivo de avaliação de riscos de inundação e gerenciamento de emergências visando analisar e antecipar eventos de cheia catastróficos e prevenir e mitigar seus efeitos econômicos, sociais, ambientais e de herança cultural.

O FLOODS é uma ferramenta integrada para o planejamento e gerenciamento que, aproveitando-se da disponibilidade de plataformas computacionais de alto desempenho, permite a localização de áreas de risco e estimativa de cálculo dos danos, previsão de cheias e fenômenos de inundação com base na análise em tempo real da situação meteorológica presente e previsões disponíveis em diferentes escalas espaciais e temporais. Permite também avaliar o efeito das decisões que visam reduzir os estragos sociais, econômicos e ambientais com base nos cenários planejados ou previstos em tempo real.

Muitas são as pesquisas com sistemas de suporte a decisão específicos para determinadas bacias hidrográficas. Correia et al (1998) apresentam o resultado de um estudo aplicado à gestão de planícies de inundação para prever as conseqüências de diferentes cenários de chuvas intensas em termos de áreas inundadas e risco associado. O estudo contempla uma combinação dos Sistemas de Informações Geográficas Intergraph GIS e Idrisi GIS com um modelo hidrológico concentrado (XSRAIN) e um distribuído (OMEGA) para simular hidrogramas de cheias. O modelo hidrodinâmico HEC-2 foi utilizado para determinar as áreas inundadas. Estes modelos foram aplicados na bacia do rio Livramento, de 24 km<sup>2</sup>, localizada em Setúbal, 35 km ao sul de Lisboa, com resultados muito bons. Nesta bacia, um modelo hidrológico concentrado bastante simplificado provou ser adequado para computar as vazões de pico.

Simões e Hipólito (2002) desenvolveram o sistema MODCHEIAS. Trata-se de um modelo do escoamento superficial direto resultante da precipitação efetiva sobre uma bacia hidrográfica que se apóia no conceito da onda difusiva e em modelos digitais do terreno. Na sua dedução considera-se a perda de carga unitária do escoamento superficial igual ao declive da superfície livre o que permite lidar com singularidades do terreno, como zonas planas e zonas deprimidas, sem necessidade de se adequar o respectivo modelo digital. As equações foram discretizadas com base num esquema implícito, tendo-se obtido um sistema de equações lineares que se resolve em cada passo temporal para todos os elementos do modelo do terreno da bacia hidrográfica.

O modelo foi aplicado na bacia do rio Loures (77 km<sup>2</sup>), próximo a Lisboa, Portugal. Os resultados indicam que o modelo pode desempenhar de forma útil o objetivo de definir antecipadamente as zonas eventualmente inundáveis na bacia.

Na Itália, Anselmo et al (1996) realizaram uma modelagem hidráulico-hidrológica integrada para a análise de risco de uma área propensa a cheias e sua aplicação analisando o efeito de eventos de cheias extremas na área de inserção da usina termelétrica de Montalto di Castro. A técnica é baseada em quatro passos principais. O primeiro é baseado na análise detalhada dos eventos críticos disponíveis, bem como a série de dados hidrometeorológicos e dados cartográficos para a avaliação estatística de eventos de chuva e a estimativa a precipitação máxima provável (PMP). O segundo passo envolve a calibragem de um modelo chuva-vazão para a área da bacia de contribuição, baseada nos dados observados durante um evento recente de cheia. O terceiro passo envolve a calibragem de um modelo hidráulico bidimensional para simular a cheia na planície de inundação utilizando a vazão gerada pelo modelo e a comparação com os resultados com os níveis máximos observados durante o mesmo evento. Finalmente, o quarto passo é a realização da simulação pelo modelo hidráulico bidimensional de onda de cheia obtido por meio do modelo chuva-vazão usando os valores da PMP definidos no passo 1. Os resultados encontrados apresentam grande aplicabilidade, sendo facilmente transferíveis a outros locais.

O desenvolvimento de sistemas computacionais para gestão de eventos hidrológicos extremos também ocorre em ritmo acelerado no continente americano. Ahmad e Simonovic (2006) desenvolveram um Sistema de Suporte à Decisão inteligente para gerenciamento de cheias, denominado Decision Support for Management Of Floods – DESMOF. O sistema utiliza uma combinação de um modelo hidrodinâmico e modelo de análise econômica, integrados em um sistema inteligente, baseado em técnicas de Redes Neurais Artificiais. O DESMOF tem a capacidade de auxiliar na seleção da melhor opção para reduzir os danos causados pela cheia, através de um sistema especialista, que armazena as opções selecionadas formando uma base de dados para otimizar a definição das próximas decisões. Pode prever cheias, utilizando redes neurais artificiais, modelar a operação de estrutura de controle de cheias e descrever os impactos de cheias (área inundada e danos) no tempo e no espaço.

O sistema foi aplicado na bacia do rio Vermelho (116.000 km<sup>2</sup>), em Manitoba, Canadá. Os resultados da aplicação para uma cheia ocorrida em 1997 foram muito promissores. O DESMOF foi capaz de prever cheias com erros máximos de 2% e revelou que, com regras operacionais revisadas, as enchentes na cidade de Winnipeg podem ser reduzidas

significativamente. O DESMOF foi desenvolvido para as necessidades específicas da bacia do rio Vermelho, em Manitoba, Canadá, mas a sua rede estrutural é genérica e pode ser utilizada para o gerenciamento de enchentes em outras áreas.

O risco de cheias causadas pelo rio Atrato na cidade de Quibdó, capital da província de Choco, localizada no noroeste da Colômbia, foi avaliado por Mosquera-Machado e Ahmad (2007), utilizando técnicas de modelagem estatísticas (Gumbel e Gradex), modelagem hidráulica com HEC-RAS e Sistemas de Informações Geográficas (SIG). O rio Atrato tem 750 km de extensão e é considerado o rio de maior velocidade do mundo, desaguando 4.900 m<sup>3</sup>/s no mar do Caribe. A pluviosidade mais alta das Américas, e uma das maiores do mundo é observada região. Em Quibdó a precipitação é intensa, com uma média anual de incríveis 8.700 mm. A temperatura média fica em torno dos 27 °C e a umidade relativa tem média de 98%.

Três mapas de danos para períodos de retorno de 10, 20 e 50 anos foram gerados neste estudo. A modelagem de danos de cheias revela que a zona inundada é mais significativa na margem esquerda (oeste) do que na margem direita (leste) do rio Atrato. Para os três períodos de retorno, a máxima profundidade de água alcançada pelo rio e a extensão da cheia foram estimadas. Foi realizada uma análise de sensibilidade para o coeficiente de rugosidade e a vazão de pico. Os autores concluíram que os resultados podem ser úteis para planos de evacuação, definição de medidas estruturais, estimativa de danos, e esforços de recuperação de danos após as cheias.

No Brasil, especialmente na última década, diversos pesquisadores têm usado as funcionalidades dos modelos matemáticos e sistemas de informações geográficas em análises urbanas e ambientais.

Campana & Tucci (2001) estudaram o efeito da urbanização na bacia do rio Dilúvio, a mais densamente urbanizada da cidade de Porto Alegre-RS. No referido artigo, os autores apresentam a relação entre parâmetros do modelo hidrológico e características do desenvolvimento urbano, tal como descrito no plano diretor da cidade de Porto Alegre. Um modelo hidrológico (IPH IV) foi utilizado em combinação com um Sistema de Informações Geográficas para prever os hidrogramas correspondentes a diferentes cenários de urbanização. Os parâmetros do modelo foram calibrados e verificados utilizando dados da série histórica do rio Dilúvio. O modelo foi aplicado para prever o hidrograma para diferentes categorias de risco, de acordo com o Plano Diretor. A urbanização começou na parte de jusante da bacia e se estendeu para áreas de montante, aumentando o risco potencial de aumento de cheias em áreas construídas a jusante, onde os custos de estragos pela cheia são altos. O Plano Diretor

foi desenvolvido sem levar em consideração os impactos da drenagem devido ao desenvolvimento planejado. Os autores identificaram áreas inundadas correspondentes a tempestades com período de retorno de 25 anos. O resultado mostrou que o Plano Diretor deverá incrementar a vazão de pico entre 20 a 50 % comparada com a alternativa e, apesar da alta convergência do canal, eventos de chuva com período de retorno de 25 anos deverão causar inundações em alguns trechos, particularmente onde a vazão no canal é reduzida pela presença de pontes. Este efeito pode ser aliviado com o melhoramento das pontes e pelo incremento das áreas permeáveis entre os terrenos construídos.

Este estudo mostrou como ferramentas de modelagem podem ser usadas para estudar os efeitos potenciais de um desenvolvimento urbano progressivamente planejado na área de drenagem urbana.

Em dezembro de 2001, Colischonn (2001) apresentou a descrição de um modelo hidrológico distribuído, adaptado do modelo LARSIM, previamente apresentado por Bremicker (1998, apud COLISCHONN, 2001), desenvolvido para a simulação de grandes bacias, considerando a variabilidade de suas características físicas. O autor descreve os procedimentos de preparação de dados para o modelo hidrológico, dentro de ambientes típicos de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), e alguns programas de processamento de dados espaciais raramente disponíveis em um SIG comercial. Neste trabalho, desenvolve um método de calibragem automática multi-objetivo para modelos hidrológicos, validando o modelo em três bacias brasileiras, de aproximadamente 30.000 km<sup>2</sup> a 75.000 km<sup>2</sup>, de características físicas muito distintas: a bacia do rio Uruguai, a bacia do rio Taquari – Antas, no Rio Grande do Sul, e a bacia do rio Taquari, no Mato Grosso do Sul.

Libos (2002) desenvolveu uma modelagem hidrológica distribuída de longo curso, baseada em geoprocessamento através de sistema de informações geográficas (SIG) para a identificação e quantificação de alterações da qualidade da água na bacia do rio Cuiabá (área de drenagem de 29.000 km<sup>2</sup>) em função da cobertura e uso do solo. No trabalho, foi avaliada a distribuição espacial dos poluentes nitrogênio total e fósforo total na bacia a partir da integração de dados hidrometeorológicos, de qualidade da água, fisiográficos, de uso e ocupação do solo e imagens do sensor Landsat 7 - ETM+ em ambiente SIG. Os resultados obtidos pela modelagem, quando confrontados com séries históricas de qualidade de água da bacia do rio Cuiabá, apontaram a aceitabilidade da metodologia proposta como indicadora da variabilidade espacial da qualidade média de água.

Enomoto (2004) elaborou mapas de inundação para a bacia urbana do rio Palmital, na região metropolitana de Curitiba-PR, utilizando técnicas combinadas de modelagem

hidrológica, propagação de cheias e técnicas de geoprocessamento. O modelo chuva-vazão utilizado foi o consagrado IPH-II, para a determinação das vazões máximas a partir das chuvas de projeto. Estas chuvas de projeto foram determinadas pela utilização do método Chicago, que discretiza as chuvas obtidas pelas curvas intensidade-duração-freqüência em intervalos de tempo definidos pelo usuário. Determinadas as vazões, foi aplicado o programa HEC-RAS, do Hydraulic Engineering Corps, dos Estados Unidos, para estimar os níveis de inundação. Uma vez determinados, os níveis de inundação foram carregados no *software* ArcView para a elaboração dos mapas de inundação.

A bacia selecionada para o estudo de caso localiza-se entre os municípios de Colombo e Pinhais e apresenta um histórico de problemas de enchentes urbanas. Foram simulados oito eventos, sendo os períodos de retorno escolhidos de 10, 25, 50 e 100 anos e os cenários definidos como atual, com taxa de impermeabilização de 15% e tendencial com taxa de impermeabilização de 22,5%. Os cenários foram determinados de acordo com as características de zoneamento definidas comumente em planos diretores urbanos.

Andreolli et al. (2006) descrevem uma metodologia de previsão de vazão afluente a reservatórios hidrelétricos baseada na transformação de chuva em vazão utilizando um modelo hidrológico distribuído e incorporando previsões quantitativas de precipitação do um modelo meteorológico regional ARPS (Advanced Regional Prediction System). A metodologia foi aplicada na bacia do rio Uruguai, até o reservatório da UHE Machadinho, localizado na divisa entre os estados brasileiros de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. O método proposto foi verificado para três eventos de cheias ocorridos nos anos de 2001 e 2002. Os resultados mostram que a previsão de vazões pode beneficiar-se significativamente da previsão quantitativa de chuvas.

Os casos apresentados neste item situam o leitor em relação ao atual estágio de desenvolvimento das técnicas computacionais para avaliação de impactos das cheias. Aplicações na Europa e América reforçam a preocupação com a gravidade dos danos causados pelas enchentes e oferecem soluções tecnológicas para viabilizar a redução dos impactos negativos. O sistema desenvolvido neste trabalho está inserido nesta linha de pesquisa, apresentando como diferencial a união de modelos gratuitos para aplicação em uma bacia de escala reduzida e características bem peculiares.

### 3.4 SISTEMAS DE ALERTA CONTRA ENCHENTES NO BRASIL

O sistema de alerta contra enchentes é uma medida não-estrutural adotada na minimização de prejuízos causados por cheias nas bacias hidrográficas (ANA, 2006). O objetivo é prever, com relativa precisão, eventos de chuva ou aumento do nível de água de um rio, para avisar às populações, com antecedência, que desocupem áreas sujeitas a inundações. Em geral, a Defesa Civil é acionada e começa a funcionar o seu Plano de Emergência. Ações como circular com veículos de som pela cidade, avisando à população que é preciso evacuar áreas de risco, colocar caminhões à disposição para retirada de móveis e objetos de valor, encaminhar pessoas para abrigos seguros, recolher alimentos e agasalhos são típicas de uma situação de emergência. A Agência Nacional de Águas tem participado ativamente na elaboração dos planos de prevenção à inundação nas principais bacias brasileiras.

Na bacia hidrográfica do rio Itajaí, em Santa Catarina, está em fase de implantação um sistema de alerta contra enchentes, disponível em [www.comiteitajai.org.br](http://www.comiteitajai.org.br) (COMITÊ..., 2005). O Vale do Itajaí possui uma população da ordem de 900.000 habitantes e o maior parque industrial do Estado. A bacia do Itajaí sofre, tradicionalmente, o efeito de cheias dos rios Itajaí-Açu e Itajaí-Mirim, devido à rápida resposta às chuvas fortes que ocorrem em suas bacias. Em quase 150 anos de existência, foram registradas 67 enchentes, atingindo cidades como Blumenau, Rio do Sul, Gaspar e outras (ANA, 2006). Para a prevenção das cheias, já existe um sistema de barragens. Entretanto, este sistema, por si só, não é suficiente para garantir a segurança da população. Face às características da bacia, tais como, tempo de concentração da ordem de 8 a 12 horas, vales encaixados, ocorrência sistemática de chuvas fortes e rápidas nas cabeceiras, entre outras, é fundamental dispor de um sistema de alerta contra enchentes e previsão de eventos críticos de chuva, baseado num acompanhamento hidrometeorológico permanente. Um convênio assinado entre a ANA e a Secretaria do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente o Estado de Santa Catarina – SDM, por intermédio da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina – EPAGRI viabilizou o planejamento, aquisição, instalação e operação de cinco estações telemétricas, em pontos estratégicos da bacia do Itajaí, para futura previsão hidrológica. Os dados provenientes das estações telemétricas são disponibilizados diariamente na Internet ([www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br)) em tempo real. Os próximos passos incluem o desenvolvimento de modelos matemáticos de previsão de cheias em diversas localidades da bacia, elaboração de um modelo operacional de gestão do sistema de barragens para controle de cheias, implantação de uma estrutura de comunicação e divulgação das informações ambientais

disponíveis e a disponibilização de informações do radar meteorológico de Fraiburgo (SC) para a sociedade em geral.

Em Minas Gerais, o Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do Rio Doce tem como objetivo informar 16 municípios da bacia quanto ao risco de ocorrência de enchentes. No caso da bacia do rio Doce, o Sistema vem sendo operado desde janeiro de 1997.

A operação do Sistema de Alerta é composta de 5 etapas:

- coleta de dados;
- armazenamento e atualização dos dados coletados;
- análise;
- elaboração da previsão hidrológica;
- transmissão das informações para os 16 municípios beneficiados pelo Sistema;
- localizados ao longo dos rios Piranga, Piracicaba e Doce.

Para as estações automáticas integrantes do Sistema de Alerta, a coleta de dados é feita 24 horas por dia, de duas em duas horas, durante a operação normal e de uma em uma hora em situações de alerta. Para as demais estações e usinas hidrelétricas, a coleta é feita duas vezes por dia, às 7 e 17 horas.

O armazenamento dos dados é feito em um banco desenvolvido em ACCESS, permitindo análises do traçado de cotogramas, fluviogramas e hietogramas, bem como o cálculo das vazões das estações fluviométricas e a confecção do boletim de acompanhamento dos dados. Além disso, diariamente, às 7 horas, é feita a atualização dos dados na página da Internet ([www.2xr.com.br/simge](http://www.2xr.com.br/simge)), que divulga regularmente a previsão dos níveis para as diversas localidades beneficiadas pelo Sistema. A partir dos dados coletados e devidamente armazenados, foram realizadas a análise da evolução dos níveis dos rios, bem como a previsão hidrológica com antecedência de 6, 12 e 24 horas, dependendo da localidade, principais produtos produzidos pelo Sistema de Alerta.

Um exemplo bem sucedido da eficácia do sistema ocorreu quando o rio Doce, em Governador Valadares, transbordou às 3:00 h da madrugada do dia 01/01/2002, tendo atingido a cota máxima de 424 cm (régua da ANA) às 8:00h do dia 02/01/2002, 54 cm acima da cota de inundação, que é de 370 cm. Esta cota foi prevista com 12 horas de antecedência e a prefeitura, a polícia militar e a defesa civil alertaram a população. Isso resultou na desocupação das casas construídas nas áreas de risco, evitando as perdas de vida e

favorecendo a retirada de móveis e objetos de valor dos locais possíveis de inundação (SIMGE).

Através do convênio ANA N°009/2002, assinado com o Estado de Minas Gerais e o IGAM, está sendo implantado o Sistema de Alerta na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí. A bacia do rio Sapucaí compreende uma área de cerca de 1.000 km<sup>2</sup>, tendo seu talvegue principal, até suas nascentes, próximas a Campos do Jordão, num comprimento total de 66 km. As declividades variam desde extremos máximos de 25%, juntos às nascentes, até atingir valores médios de 0,05%, no trecho de 12 km da planície, onde está localizada a cidade de Itajubá. Com a cheia do ano de 2000, contabilizaram-se 13 eventos com transbordamento do rio Sapucaí para a planície de inundação adjacente, ao longo dos últimos 122 anos. Esta cheia atingiu 300.000 pessoas, em 54 municípios, deixando cerca de 82.500 desabrigados e provocando 10 mortes.

A partir de outubro de 1990, a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) assumiu o sistema de previsão de níveis de água no Pantanal, desenvolvido em conjunto pelo Departamento Nacional de Obras contra a Seca (DNOS) e a UNESCO, que estava sendo operado desde 1972. Com a experiência adquirida, a CPRM desenvolveu um novo sistema de previsão de níveis para a região do Pantanal, que prevê níveis de alerta e indica a necessidade de remanejamento de populações e gado para cinco locais na região: Porto São Francisco – Rio Paraguai; Ladário – Rio Paraguai; Porto Esperança – Rio Paraguai; Porto Murtinho – Rio Paraguai e Porto do Alegre – Rio Cuiabá. Essa previsão é realizada através de um modelo gráfico, constituído por cotagramas e correlações de níveis. Cada local para onde se faz a previsão possui um gráfico em papel milimetrado, no qual estão plotados cotagramas, para três comportamentos de níveis: grandes enchentes, níveis médios e anos secos, com cores diferentes para cada ano. À medida que os dados são coletados pelos postos pertencentes ao sistema de previsão, os cotagramas são prolongados, verificando-se as tendências do comportamento do gráfico em comparação com os cotagramas de anos anteriores. Na definição da tendência e, principalmente, na previsão dos máximos e sua data de ocorrência, leva-se em conta a translação da onda de cheia a partir de estações de montante.

A cada semana, novos dados são recebidos no escritório da CPRM, no Rio de Janeiro – RJ, que permitem realizar a confirmação ou correção das previsões anteriores e as previsões para as próximas quatro semanas. Os postos fluviométricos controlados pelo sistema pertencem à Rede Hidrometeorológica da ANA. A divulgação da previsão dos níveis é feita pelo site [www.cprm.gov.br/rehi/prev.htm](http://www.cprm.gov.br/rehi/prev.htm) (CPRM, 200?) e também através de fax,

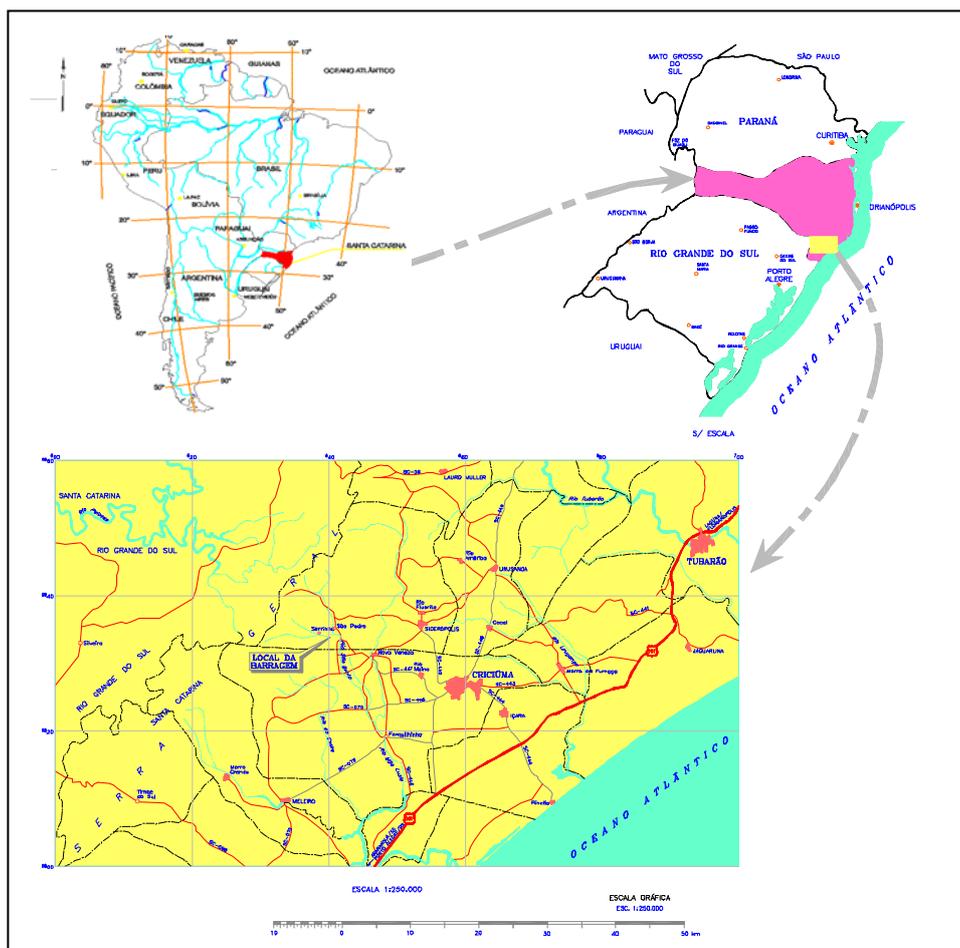
transmitindo-se boletim informativo para prefeituras locais, Defesa Civil, imprensa, associações rurais, ANA, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), empresas agropecuárias, Marinha e Secretarias de Meio-Ambiente.

Estes exemplos ressaltam a importância dos sistemas de alerta contra enchentes, qualificando o presente trabalho como um importante esforço no sentido de desenvolver um Sistema de Alerta Contra Cheias em escala de microbacia, visando a preservação de vidas e a redução de prejuízos econômicos às comunidades catarinenses de São Bento Alto e São Bento Baixo.

#### 4 LOCAL DE ESTUDO

O Sistema de Alerta Contra Cheias proposto neste trabalho foi desenvolvido para a bacia hidrográfica do rio São Bento, localizada no estado brasileiro de Santa Catarina. Após a instalação de uma barragem formadora de um reservatório de usos múltiplos, no ano de 2006, os dados provenientes da operação do reservatório e do monitoramento hidrometeorológico disponibilizados pela CASAN favoreceram a escolha do local para o desenvolvimento do Sistema de Alerta Contra Cheias. As comunidades de São Bento Alto e São Bento Baixo, no município de Nova Veneza são as áreas urbanas a jusante do aproveitamento sujeitas aos efeitos danosos de enchentes no rio São Bento. As áreas agrícolas localizadas na planície de inundação de jusante também estão sujeitas aos prejuízos provocados por vazões extremas.

A Figura 4 abaixo mostra a localização da área de estudo.



**Figura 4:** Localização do rio São Bento.

#### 4.1 A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO BENTO

A bacia hidrográfica do rio São Bento localiza-se no sul do Estado de Santa Catarina e é uma sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Araranguá. As bacias dos rios Urussanga, Mampituba e Araranguá formam a Região Hidrográfica do Extremo Sul Catarinense – RH10 (Figura 5), pertencente ao sistema integrado de drenagem da vertente Atlântica. (SEDUMA, 1998).

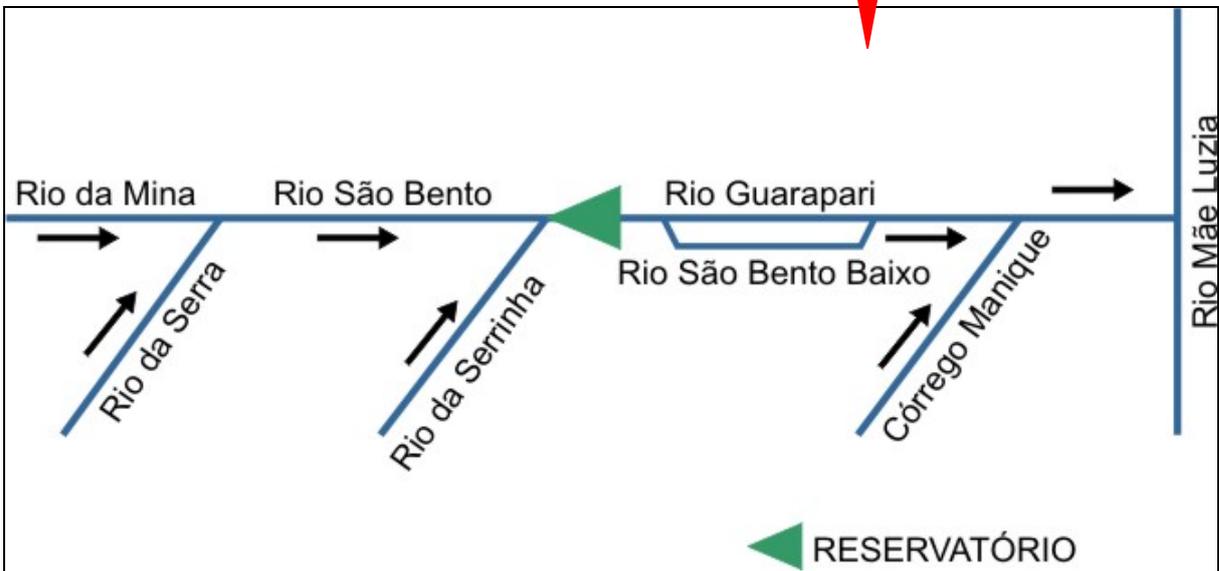
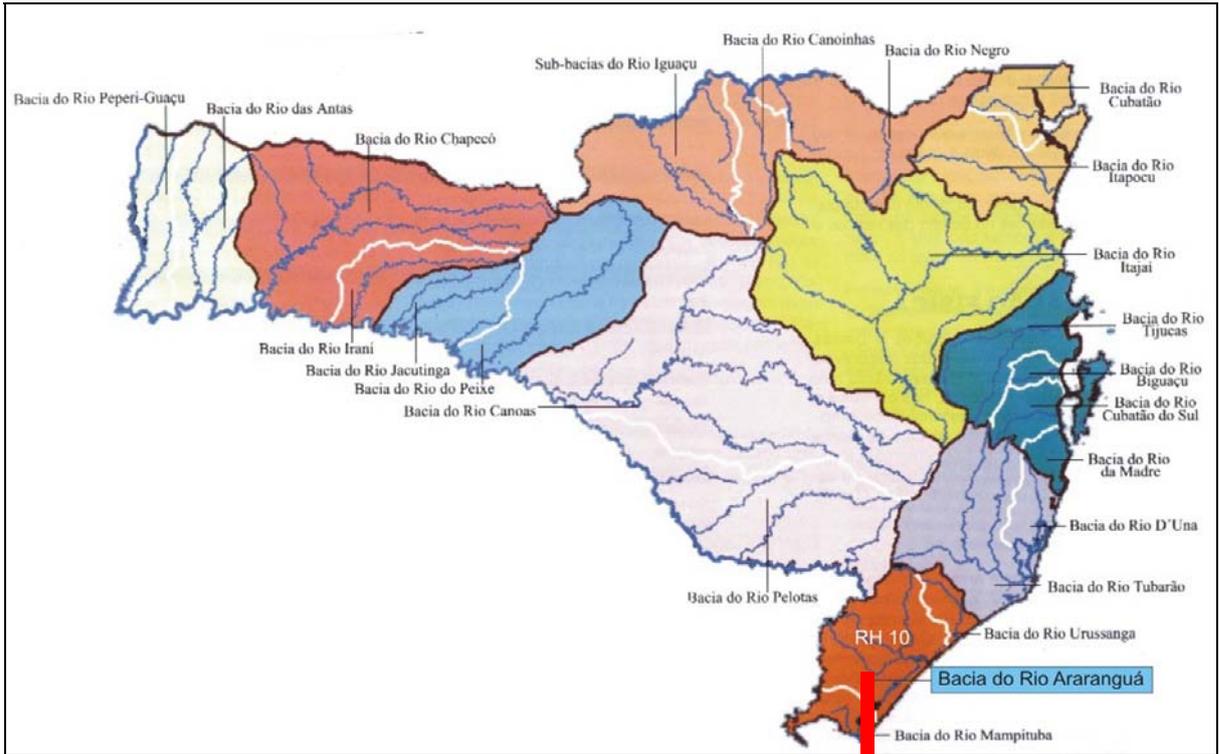
Como as demais bacias da região hidrográfica do extremo sul, a bacia do rio São Bento tem suas nascentes localizadas junto à Serra Geral, tendo como formadores o rio da Serra e o rio da Mina. Os municípios catarinenses de Siderópolis e Nova Veneza possuem área territorial inserida na bacia.

O rio São Bento é represado por uma barragem de mesmo nome, localizada no município de Siderópolis, a aproximadamente 10 quilômetros da cidade de Nova Veneza.

O sistema hídrico dessa bacia é composto pelos rios da Serra, da Mina, Seco e Serrinha, a montante do local do barramento, rio Guarapari e córrego Manique, a jusante do barramento, como mostra a Figura 6.

Assim como os demais rios da bacia do Araranguá, o rio São Bento apresenta um perfil longitudinal bastante íngreme em seu curso superior, onde a topografia é muito acidentada, com altitudes da ordem de 1.000 a 1.400 metros junto à serra. No curso inferior, onde corta planícies aluviais, os perfis longitudinais demonstram declividades médias, caracterizando-se neste curso, como rio de planície, com altitudes baixando para aproximadamente 40 metros próximo à sua foz, na confluência com a margem direita do rio Mãe Luzia. A altitude do rio na seção do barramento é de aproximadamente 120 metros.

A bacia do rio São Bento possui uma área de drenagem total de 157,40 km<sup>2</sup> (Figura 7), com o rio principal desenvolvendo-se por aproximadamente 35 km desde sua nascente, rio da Mina, até a sua foz.



**Figura 5:** Mapa topológico da rede hidrográfica que integra a bacia do rio São Bento.  
 Fonte: CASAN (2004).

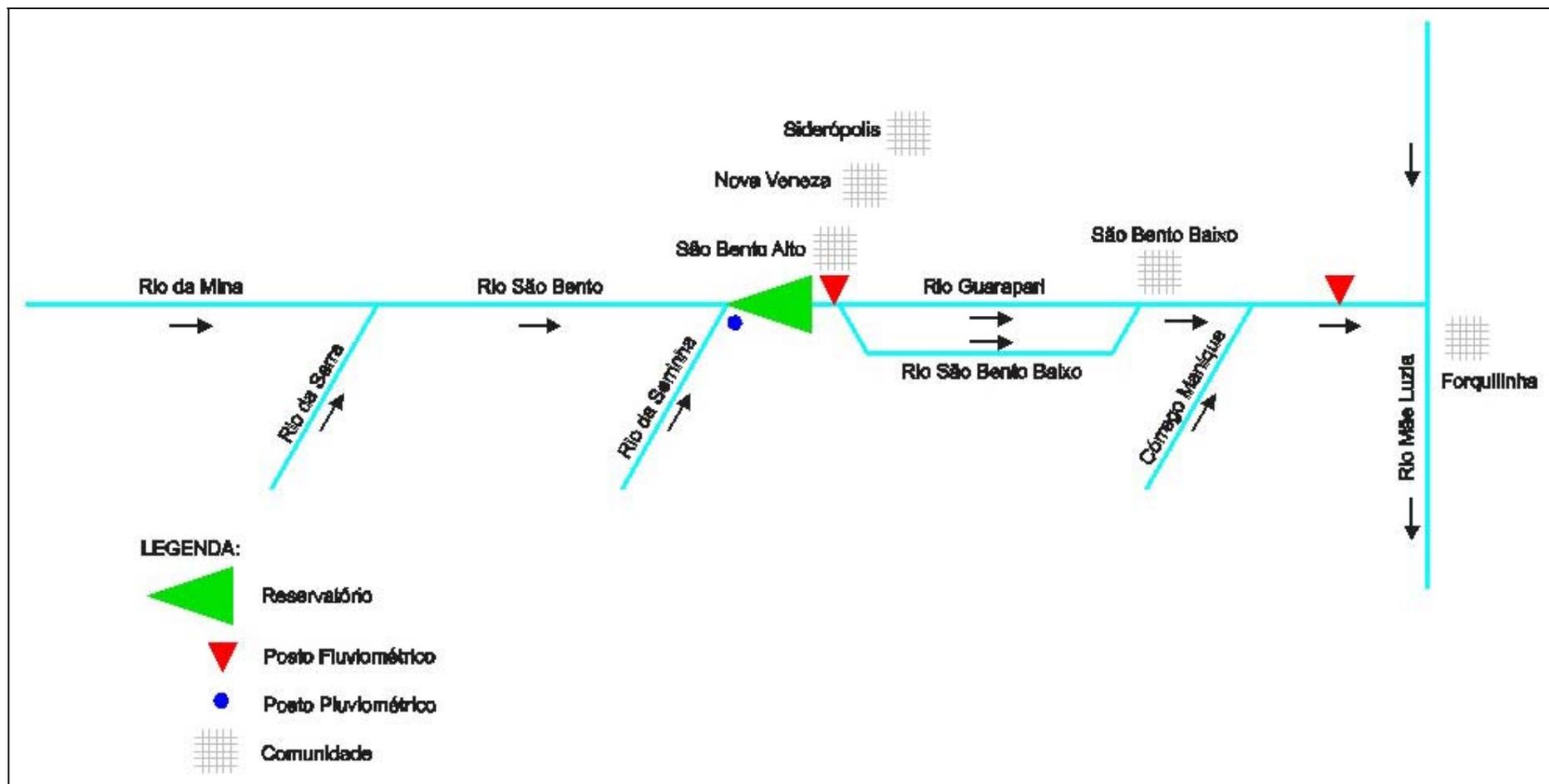
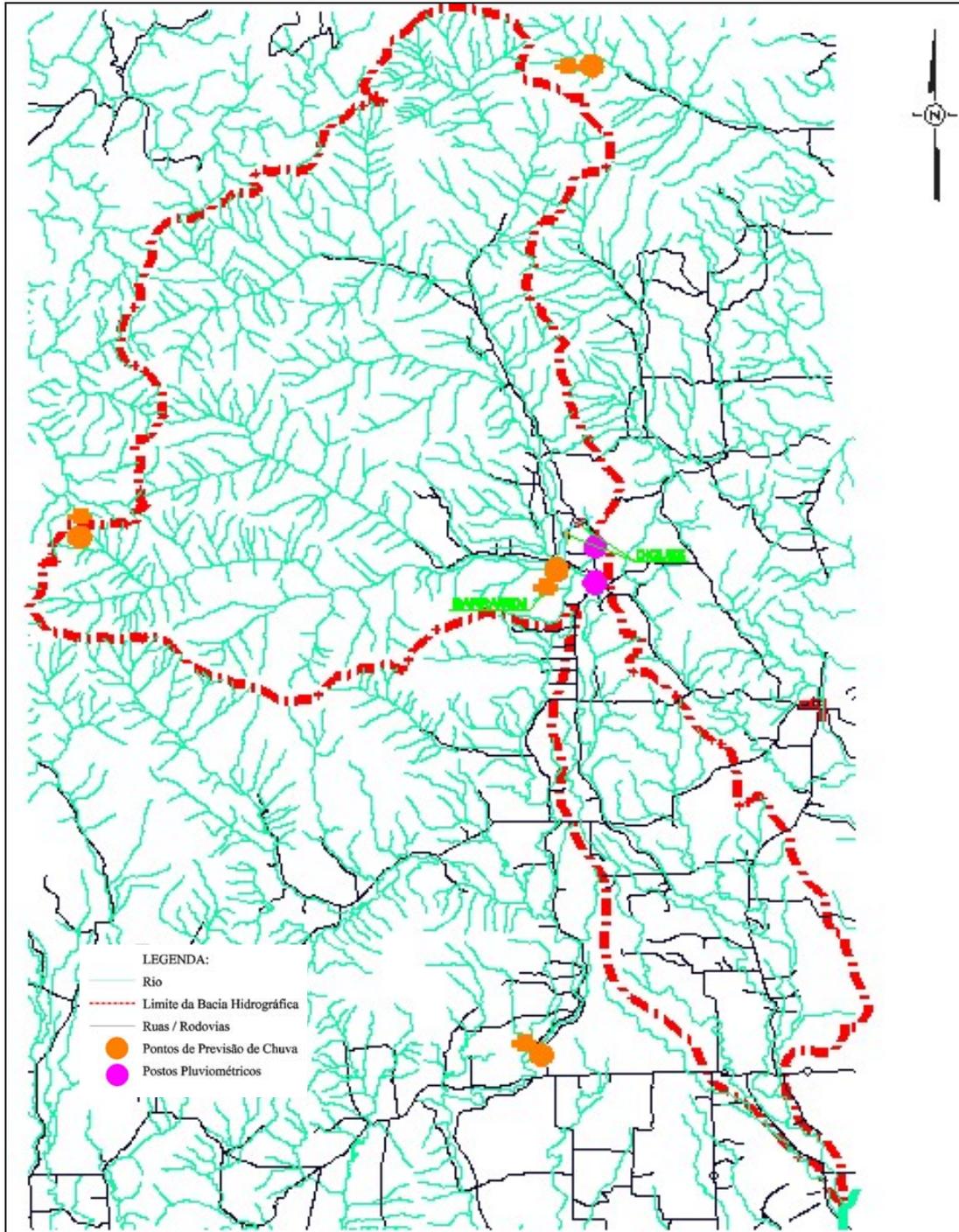


Figura 6: Mapa topológico detalhado da rede hidrográfica que integra a bacia do rio São Bento.

Fonte: CASAN (2004).



**Figura 7:** Representação da bacia hidrográfica do rio São Bento.  
Fonte: Adaptado de CASAN (2004).

#### 4.1.1 Geologia, geomorfologia e pedologia

A Bacia do rio São Bento é formada por rochas sedimentares, com a ocorrência de argilitos e predominância de siltitos (CASAN, 2004). Há também a presença de rochas ígneas representadas por basaltos e diabásios e depósitos de sedimentos recentes (cascalho aluvionar).

A região do aproveitamento, localizada nas proximidades dos últimos contra-fortes da Serra Geral, situa-se numa zona de transição entre a escarpa e a planície litorânea. A atuação da erosão regressiva da escarpa sobre o planalto ocasionou a completa remoção da cobertura basáltica e grande parte da seqüência sedimentar da bacia do Paraná, deixando exposta quase que a totalidade dessas rochas. Sob o ponto de vista geomorfológico, as principais características da área em estudo são:

- existência de escarpamentos íngremes, de relativa juventude;
- afloramentos de “sill” de diabásio, sobre o qual foram locados os eixos barráveis;
- deposição de mantos de solos aluviais, onde predominam os seixos rolados de tamanhos variados, nas planícies de inundação dos cursos d’água que descem do planalto;
- formação de solos residuais e mantos de colúvio junto às encostas e sopé das elevações, devido às acentuadas divergências da topografia, associadas à ação intempérica.

A região a montante do barramento situa-se no início dos contrafortes da Serra Geral, que assume a forma de grandes escarpas basálticas cortadas por vales profundos, com ombreiras extremamente íngremes em forma de “V”. É uma situação de drenagem jovem, com corredeiras e trechos de alta declividade, havendo um desnível de 1.280 metros entre a parte mais elevada da bacia de contribuição e o local da barragem (CASAN, 2004).

A jusante do barramento inicia-se uma planície aluvial com características de formação em ambiente lacustre, uma situação muito comum no litoral catarinense e no norte do litoral riograndense.

Estas regiões, que se caracterizam por serem extremamente planas e com uma drenagem incipiente, foram formadas durante o final da última glaciação, há cerca de 10.000

anos. As condições climáticas de alternância de secas com chuvas torrenciais naquele período, juntamente com o rebaixamento do nível do mar, ocasionou a formação da camada de seixos rolados e polidos, existente tanto a montante como a jusante do local do barramento.

Em alguns locais podem ser visualizadas nas barrancas do rio espessuras de até 3 metros desta camada.

Os seixos são constituídos de rocha basáltica e, em menor proporção, de arenitos silicificados.

Devido à forma de deposição, as camadas podem ter profundidades e extensões laterais bastante variáveis, o que foi comprovado através de informações de moradores locais a respeito de poços.

As formações de seixos, principalmente no local do barramento, repousam diretamente sobre rocha basáltica alterada (saprolito), onde são comuns blocos e matações de basalto alterado com formas angulares em meio à argila originada da decomposição da rocha. A camada de cascalho foi observada até a localidade de Forquilha, cerca de 8 quilômetros a jusante do barramento.

É importante salientar que as observações locais demonstraram a ausência de deposição de seixos e cascalhos pelo rio São Bento, mesmo por ocasião de cheias maiores, significando que a drenagem a montante do barramento já se encontra em vales permanentes e com pouca contribuição de materiais rochosos.

As informações de moradores locais evidenciam que o rio São Bento transporta pouco sedimento em suspensão, a não ser em épocas de cheias de maior porte. Neste caso, a carga de sedimentos do rio é originada de roças e várzeas cultivadas, cujo solo é facilmente removível. Aparentemente não há, também, contribuição de sedimentos transportados a partir da bacia de contribuição mais a montante, que se encontra ainda com florestas densas.

A Tabela 2 apresenta as diferentes fases de relevo identificadas na bacia. A Tabela 3 relaciona as diferentes classes de solo identificadas na região do aproveitamento.

**Tabela 2:** Caracterização das diferentes classes hipsométricas identificadas na região do aproveitamento

<b>Altitude (m)</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Área (%)</b>
< 200	1.456,5702	12,21
200 – 400	2.083,2698	17,46
400 – 600	2.409,3173	20,20
600 – 800	2.590,2075	21,72
800 – 1.000	1.787,3175	14,98
> 1.000	1.139,4922	9,56
Reservatório	462,1313	3,87
Total	11.928,3058	100,00

Fonte: CASAN (2004).

**Tabela 3:** Caracterização das diferentes classes de solos identificadas na região do aproveitamento

<b>Classes de solos</b>	<b>Relevo Predominante</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Área (%)</b>
CAMBISSOLO HÁPLICO Eutrófico em associação com NEOSSOLO FLÚVICO	Plano a suavemente ondulado	1.253,6872	10,51
CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico em associação com NITOSSOLO HÁPLICO	Ondulado	1.284,1694	10,77
CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico em associação com NEOSSOLO LITÓLICO	Fortemente ondulado	819,0384	6,87
NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico em associação com CAMBISSOLO HÁPLICO	Montanhoso	1.001,3321	8,39
NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico com inclusões de AFLORAMENTOS DE ROCHAS	Escarpado	7.090,4521	59,44
CAMBISSOLO HÚMICO Aluminoférrico em associação com NITOSSOLO HÁPLICO e LATOSSOLO BRUNO	Ondulado em campos de cima da serra	17,4959	0,15
Total		11.928,31	100,00

Fonte: CASAN (2004).

#### 4.1.2 Cobertura vegetal, uso e ocupação do solo

A cobertura vegetal nativa da Região Hidrográfica do Extremo Sul Catarinense, onde está inserida a bacia do rio São Bento, era, quase na totalidade, representada pela Floresta Ombrófila Densa. Esta região, em face da grande atividade agrícola e do intenso processo de retirada da madeira de qualidade, apresenta hoje um panorama fitoecológico bastante alterado.

Em função disso, a mata nativa primária praticamente inexistente, ocorrendo quase que somente vegetação secundária. É intensa, também, a utilização das áreas de desmatamento com o cultivo de culturas cíclicas, predominando neste caso, as lavouras de arroz, feijão, fumo, mandioca e milho. As poucas exceções remanescentes da floresta nativa estão localizadas a oeste da região, nas partes altas, correspondendo às escarpas do basalto, onde ainda se encontram espécies pertencentes à Floresta Ombrófila Densa Montana e Submontana.

A Tabela 4 apresenta as principais classes de uso do solo na região da bacia hidrográfica que abrange o aproveitamento:

**Tabela 4:** Principais classes de uso do solo identificadas na região do aproveitamento

Classe de uso	Área (ha)	Área (%)
Área urbana	10,2733	0,09
Solo exposto	15,2761	0,13
Cultura anual	250,7215	2,10
Cultura anual irrigada	143,2274	1,20
Campo	572,9436	4,80
Reflorestamento	13,0953	0,11
Floresta Ombrófila Densa	10.460,6373	87,70
Total	11.466,1751	96,13

Fonte: CASAN (2004).

OBS: A diferença em área corresponde à área do reservatório (462,1313 ha – 3,87%)

#### 4.1.3 Hidroclimatologia

Os estudos hidroclimatológicos relativos à bacia do rio São Bento e região, foram iniciados na fase de estudos preliminares e anteprojeto do aproveitamento (1982/1983), contemplando, entre outros aspectos, a análise das precipitações e a frequência e duração das descargas, utilizadas como base para o pré-dimensionamento das galerias de desvio, estruturas de barramento, órgãos de descarga e demais obras hidráulicas complementares.

Estes estudos se desenvolveram através da coleta e análise de dados de postos hidroclimatológicos da região, com séries históricas do período de 1942 a 1981, as quais foram estendidas nos estudos complementares posteriores (1993), através da coleta e

compilação de dados do período de 1982 a 1992. Na fase de projeto final de engenharia (1999), foram revistos os estudos realizados, verificando-se os dados hidrológicos utilizados e as demandas de projeto.

A relação dos postos hidroclimatológicos utilizados naquele estudo é apresentada na Tabela 5.

**Tabela 5:** Postos hidroclimatológicos

ESTAÇÃO	RIO	ÁREA (km <sup>2</sup> )	TIPO DE DADO	ENTIDADE	CÓDIGO	LATITUDE / LONGITUDE	PERÍODO
Forquilha	Mãe Luzia	523	F	ANA	84820000	28° 44' / 49° 28'	1942 a 2004
Foz do Manuel Alves	Manuel Alves	404	F	ANA	84853000	28° 12' / 49° 32'	1977 a 2004
Meleiro	Manuel Alves	344	F	ANA	84850000	28° 49' / 49° 38'	1942 a 1950
Serrinha	São Bento	120 (1)	N (2)	CPRM	84800000	(3)	1985 a 2004
Forquilha			P	ANA	02849006	28° 44' / 49°28"	1945 a 2000
Foz de Manuel Alves			P	ANA	02849024	28° 44' / 49°32"	1977 a 2000
Meleiro			P	ANA	02849005	28° 49' / 49°38"	1942 a 2000
Araranguá			C	INMET	02849012	28° 53' / 49° 31'	1926 a 1980
Urussanga			C	INMET	02849011	28° 31' / 49° 19'	1923 a 1981

F = Fluviométrica P = Pluviométrica C = Climatológica N = Níveis d'água  
(1) = Estimativa (2) = Curva-chave não determinada (3) = Informação não disponível

Fonte: CASAN (2004).

#### 4.1.3.1 Climatologia

A localização geográfica e o relevo são condicionantes básicas que determinam o clima das regiões de Santa Catarina. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região onde se localiza o aproveitamento pode ser definido como do tipo Cfa, temperado moderado chuvoso, sem estação chuvosa definida.

A precipitação média anual é da ordem de 1500 mm, sendo que a estação mais chuvosa, em média, é o verão, representando cerca de 36% do total precipitado, seguido da primavera e outono, ambos com 23,5% e, por último, o inverno, onde se concentram apenas cerca de 17% das precipitações anuais. Devido à topografia acidentada e a característica dos ventos, além das chuvas frontais e convectivas, a região está sujeita também a chuvas orográficas.

Os valores médios referentes à temperatura, umidade relativa do ar e evaporação foram obtidos da Estação Climatológica de Urussanga, considerada a mais adequada para o desenvolvimento dos estudos, com os dados obtidos conforme a Tabela 6.

**Tabela 6:** Variáveis climatológicas da estação Urussanga – Valores médios mensais – 1942 a 1992

VARIÁVEL	MESES DO ANO												MÉDIA ANUAL
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Temperatura do ar (°C)	23,8	24,1	22,9	19,8	17,0	14,7	14,7	15,6	17,2	19,2	20,8	22,7	19,38
Umidade Relativa do Ar (%)	78,9	82,6	82,4	82,1	83,4	84,4	81,4	79,9	79,8	78,3	77,1	76,2	80,5
Evapotranspiração Potencial (mm)	122	115	91	62	48	37	35	43	55	73	90	112	73,6

Fonte: CASAN (2004).

#### 4.1.3.2 Pluviometria

Por não haver um posto com dados pluviométricos na bacia do rio São Bento à época dos estudos preliminares (1982/1983), foram selecionados os dados existentes no Posto Pluviométrico Meleiro, sendo este, considerado como o mais representativo da região em estudo por localizar-se na bacia do rio Manoel Alves, cujas condições topográficas são semelhantes às da bacia do rio São Bento.

Os dados deste posto já tinham sido utilizados na fase de estudos preliminares (1982/1983), com série histórica de precipitações do período de 1942 a 1981, sendo estendida a série dos totais mensais precipitados com dados de 1982 a 1992 nos estudos posteriores (1993).

Os valores de precipitação obtidos do Posto Pluviométrico Meleiro são apresentados conforme a Tabela 7.

**Tabela 7:** Precipitações médias mensais (mm) na estação Meleiro (1942 a 1992)

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	
Média	169,3	179,8	167,1	101,9	78,9	86,3	92,3	112,8	137,2	121,6	114,2	129,7	1491,1
Máx.	392,3	556,8	454,3	238,8	323,8	184,3	392,8	389,3	364,1	279,4	279,4	359,4	2119,1
Min.	18,8	20,7	37,3	11,4	3,5	6,6	10,5	0,0	46,5	17,1	25,3	0,5	722,1

Fonte: CASAN (2004).

#### 4.1.3.3 Fluviometria

Por não existirem postos fluviométricos na bacia do rio São Bento com período de observação adequado e curva chave determinada, durante a fase de estudos preliminares (1982/1983), as vazões afluentes à seção do barramento foram estimadas a partir da análise de dados e informações disponíveis em postos fluviométricos localizados em outras bacias, também pertencentes à bacia do rio Araranguá.

O Posto Forquilha, localizado no rio Mãe Luzia, a jusante da confluência do rio São Bento, com série histórica de vazões de 1942 a 1966 e de 1976 a 1981, estendida de 1982 a 1992, foi escolhido para fundamentar a análise.

A análise efetuada nos referidos postos, em termos de vazões médias, máximas e mínimas específicas considerou um período comum de observação dos postos, 1977 a 1992.

Verificou-se uma considerável variabilidade das vazões específicas na bacia do Araranguá, fato este certamente correlacionado com a exploração agrícola regional, uma vez que alguns postos estão localizados a jusante dos pontos de captação para lavouras de arroz.

A série de vazões afluentes ao reservatório, obtida através de transposição de vazões do Posto Forquilha, é apresentada na Tabela 8.

**Tabela 8:** Vazões mensais no local do barramento

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÉDIA
Média	3,49	4,91	4,60	2,92	2,21	1,80	2,17	2,47	3,10	2,35	2,97	3,58	3,12
Máx.	11,49	19,27	15,14	11,64	10,29	6,07	14,90	10,61	8,47	11,98	12,05	23,15	12,92
Min.	0,23	1,03	1,00	0,45	0,23	0,13	0,23	0,13	0,63	0,43	0,48	0,32	0,44

Fonte: CASAN (2004).

De acordo com o quadro apresentado no Projeto Básico, a bacia do rio São Bento, com uma área de drenagem de 112,12 km<sup>2</sup>, apresentava suas vazões máximas no período de outubro a março, com as vazões mínimas ocorrendo no período de abril a agosto, sendo obtidos os seguintes valores de vazões afluentes à seção do barramento:

- vazão mínima mensal: 0,13m<sup>3</sup>/s
- vazão máxima mensal: 23,15m<sup>3</sup>/s
- vazão média de longo termo: 3,12m<sup>3</sup>/s

## 4.2 A BARRAGEM DO RIO SÃO BENTO

O aproveitamento, localizado logo após a confluência do rio Serrinha com o rio São Bento, possui uma área de drenagem a montante de 113,79 km<sup>2</sup>. Este valor foi revisado (CASAN, 2004) na elaboração do Manual de Operação do Reservatório. A jusante, uma área de 43,61 km<sup>2</sup> compõe a bacia até a sua foz no rio Mãe Luzia, totalizando uma área de 157,40 km<sup>2</sup>.

A área de drenagem de montante passou a ter como áreas de contribuição até a seção da barragem a sub-bacia do rio Serrinha e a sub-bacia do rio São Bento, esta última contribuindo com 60% do total da bacia de montante.

Na área de drenagem de jusante, o rio São Bento recebe uma importante contribuição em sua margem esquerda, o rio Guarapari, com uma significativa área de drenagem de 12,76 km<sup>2</sup>, que representa aproximadamente 30% da bacia de jusante.

As dimensões da área de drenagem da bacia do rio Araranguá e da bacia do rio São Bento, bem como das bacias de montante e de jusante ao barramento, encontram-se na Tabela 9 abaixo.

**Tabela 9:** Áreas de drenagem das bacias e sub-bacias hidrográficas

<i>BACIA HIDROGRÁFICA</i>	<i>ÁREA DE DRENAGEM</i>
Rio Araranguá	3.020 km <sup>2</sup>
Rio Mãe Luzia	1.501 km <sup>2</sup>
Rio São Bento	157,40 km <sup>2</sup>
Rio São Bento a montante da barragem	113,79 km <sup>2</sup>
Rio São Bento a jusante da barragem	43,61 km <sup>2</sup>

Fonte: CASAN (2003).

A Barragem do rio São Bento foi implantada com a finalidade principal de abastecimento de água de uma região densamente povoada, onde se destacam os seguintes municípios e localidades beneficiados: Criciúma, Siderópolis, Morro da Fumaça, Forquilha, Treviso, Içara, Nova Veneza, Maracajá, rio Maina e São Bento Baixo, além da irrigação de áreas cultivadas a jusante do aproveitamento e a manutenção da vazão ecológica.

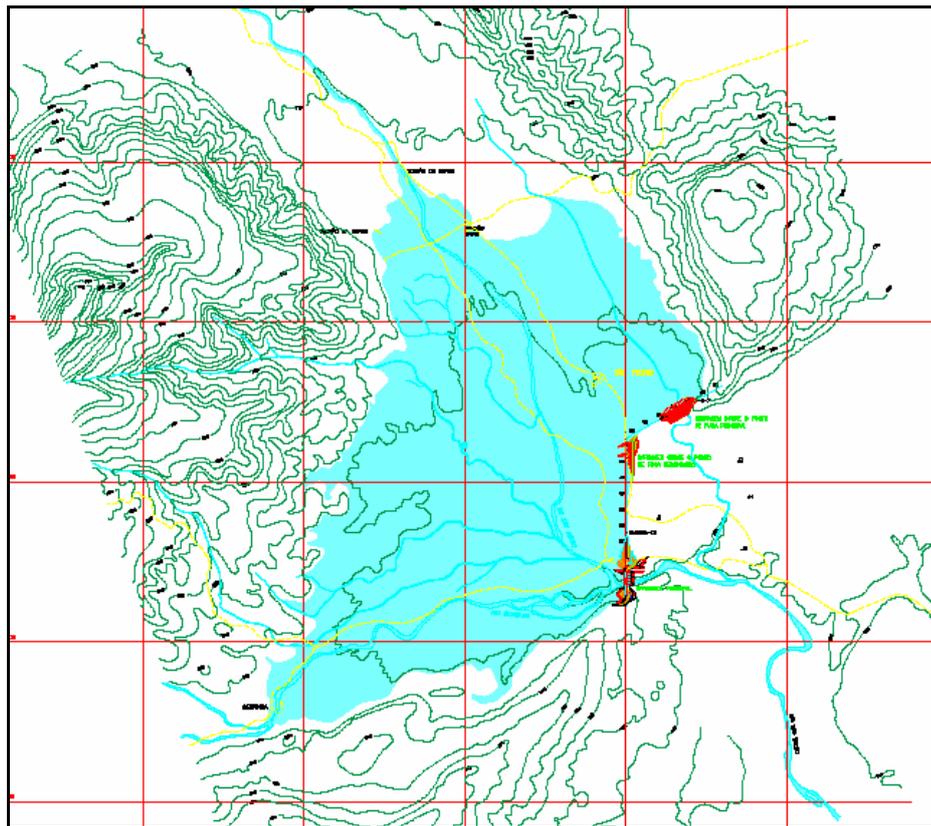
Como benefícios adicionais o aproveitamento possibilita ainda, a laminação de cheias no reservatório formado pelo barramento, a proteção das florestas integrantes das escarpas da Serra Geral, além de outras vantagens relativas à formação do lago artificial.

Portanto, a Barragem do rio São Bento caracteriza-se como um aproveitamento de usos múltiplos, tendo como objetivo garantir uma vazão regularizada que atende as seguintes demandas:

- abastecimento urbano;
- irrigação de áreas cultivadas a jusante (cultivo de arroz) e;
- manutenção da vazão ecológica a jusante;

além de contribuir significativamente para o amortecimento de cheias formadas a montante do barramento.

A Figura 8 apresenta um mapa com a caracterização da área do reservatório formado pela Barragem São Bento. A Figura 9 mostra uma vista aérea sobre o reservatório.



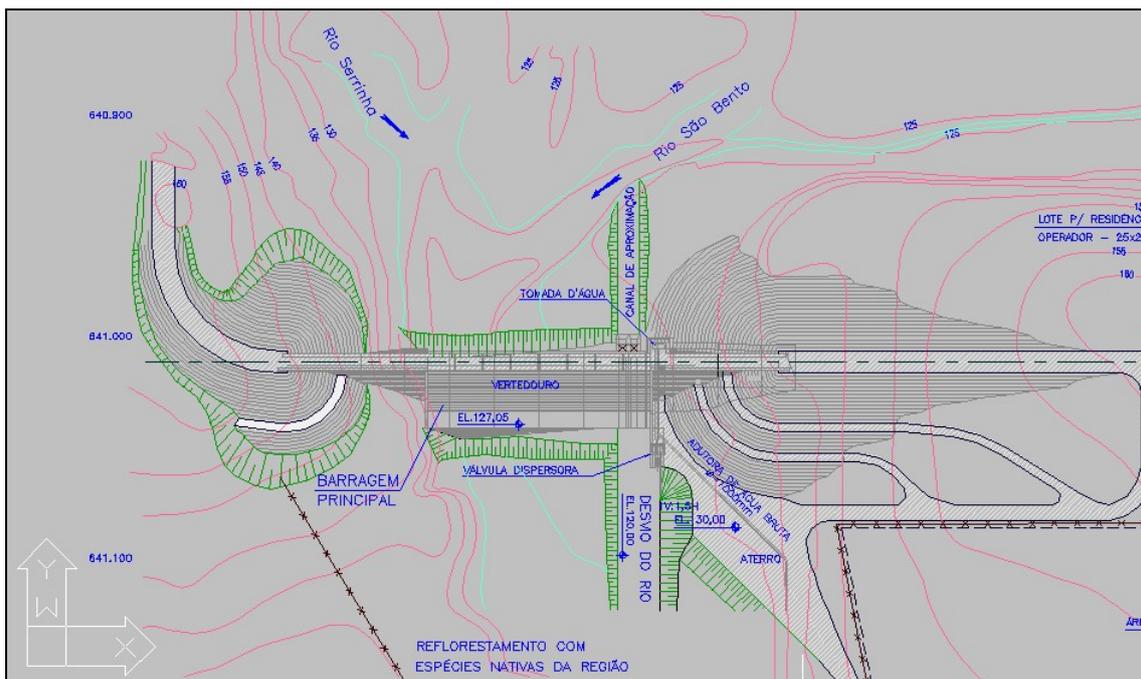
**Figura 8:** Mapa da Área do Reservatório da Barragem São Bento.  
Fonte: CASAN (2003).



**Figura 9:** Área do Reservatório da Barragem São Bento.  
Fonte: CASAN (2004).

#### 4.2.1 Características do reservatório e dos órgãos de descarga

As características do reservatório e dos órgãos de descarga foram obtidas no projeto executivo do empreendimento, cedido pela CASAN.



**Figura 10:** Arranjo Geral.  
Fonte: CASAN (2003).

#### 4.2.1.1 Níveis d'água a montante

- Máximo normal (CSV - Cota da Soleira do Vertedor).....157,50 m
- Máximo maximorum (Cota de Coroamento da Barragem).....159,50 m
- Mínimo operativo da 1ª abertura .....156,18 m
- Mínimo operativo da 2ª abertura .....151,18 m
- Mínimo operativo da 3ª abertura .....146,18 m
- Mínimo operativo da 4ª abertura .....141,18 m
- Mínimo operativo da 5ª abertura .....136,18 m
- Mínimo operativo (Soleira da 4ª abertura) .....137,50 m
- Mínimo de captação (Soleira da 5ª abertura).....132,50 m

#### 4.2.1.2 Níveis d'água a jusante

- Máximo maximorum (relativo à vazão efluente decamilenar-360,5 m<sup>3</sup>/s)123,10 m
- Elevação da Bacia de Dissipação .....121,95 m

#### 4.2.1.3 Áreas

- Bacia hidrográfica até a seção do aproveitamento: ..... 113,79 km<sup>2</sup>
- Inundação (nível máximo normal): ..... 4,5 km<sup>2</sup>
- Inundação (nível máximo maximorum): ..... 4,9 km<sup>2</sup>

#### 4.2.1.4 Volumes

- No nível máximo maximorum (El. 159,50 m) ..... 68,1 hm<sup>3</sup>
- No nível máximo normal (El. 157,50 m)..... 58,2 hm<sup>3</sup>
- No nível mínimo operativo (El. 137,50 m)..... 5,0 hm<sup>3</sup>
- No nível mínimo de captação (El. 132,50 m)..... 1,3 hm<sup>3</sup>
- Útil acumulado (entre El. 157,50 e El. 137,50)..... 53,2 hm<sup>3</sup>

#### 4.2.1.5 Vazões típicas

- Mínima mensal .....0,13 m<sup>3</sup>/s

- Máxima mensal.....23,15 m<sup>3</sup>/s
- Média de longo termo .....3,12 m<sup>3</sup>/s

#### 4.2.1.6 Vertedouro

- Posicionamento ..... centro da barragem de concreto
- Tipo..... soleira livre, conformado a um perfil Creager
- Calha de descarga ..... em degraus
- Altura da crista sobre o leito natural do rio .....36,00 m
- Comprimento total da estrutura .....105,00 m
- Cota da soleira .....157,50 m
- Vazão máxima no nível máximo maximorum.....729,00 m<sup>3</sup>/s
- Vazão de dimensionamento (TR = 1000 anos).....235,00 m<sup>3</sup>/s
- Dissipação de energia ..... soleira em degraus e bacia de dissipação

#### 4.2.1.7 Tomada d'água

- Estrutura
  - Posicionamento..... esquerda do paramento de montante da barragem
  - Tipo..... torre com cinco aberturas controladas por comporta
  - Altura da torre..... aprox. 36,00 m
- Níveis das Soleiras de Cada Abertura
  - Soleira da 1<sup>a</sup> abertura de captação .....152,50 m
  - Soleira da 2<sup>a</sup> abertura de captação .....147,50 m
  - Soleira da 3<sup>a</sup> abertura de captação .....142,50 m
  - Soleira da 4<sup>a</sup> abertura de captação .....137,50 m
  - Soleira da 5<sup>a</sup> abertura de captação .....132,50 m
- Captação/Operação
  - Número de aberturas (com gradeamento) para captação.....5 un
  - Dimensões das aberturas ..... 1,40 m x 1,70 m (b x h)
  - Dimensões das comportas ..... 1,58 m x 1,78 m (b x h)
  - Acionamento das comportas.....eletromecânico com talha

- Descargas de Fundo:
  - Tubulação Adutora Principal (1500mm):
    - Número de comportas.....1 un
    - Dimensões da comporta ..... 1,66 m x 1,57 m (b x h)
    - Acionamento da comporta vagão ..... hidráulico com haste
    - Elevação da soleira da abertura controlada pela comporta:124,95 m
  
    - Torre de Tomada d'Água
    - Número de comportas.....5 un
    - Dimensões das comportas ..... 1,58 m x 1,78 m (b x h)
  
  - Tubulação de 1000 mm
    - Posicionamento.....lateral esquerda da barragem, utilizando uma das unidades da galeria de desvio
    - Elevação do eixo da tubulação .....121,40 m
    - Elevação do ponto de captação.....127,95 m
    - Material..... aço
    - Diâmetro ..... 1000 mm
    - Comprimento ..... ≈ 40,00 m
  
    - Registro de operação
    - Posicionamento..... dentro da casa de comando inferior
    - Tipo..... gaveta
    - Material..... F°F°
    - Diâmetro ..... 1000 mm
    - Acionamento..... mecânico
  
    - Registro de manutenção
    - Posicionamento..... atrás da casa de comando inferior
    - Tipo..... gaveta
    - Material..... F°F°
    - Diâmetro ..... 1000 mm
    - Acionamento..... mecânico
    - Operação
    - Local de operação ..... casa de comando inferior
      - Posicionamento do local de operação.....lateral esquerda da barragem, à frente do paramento de jusante

- Controle ..... através do registro de operação
  - Manutenção ..... através do registro de manutenção
- Tubulação de 800 mm
- Posicionamento da tubulação.....lateral esquerda da barragem, utilizando uma das unidades da galeria de desvio
  - Elevação do eixo da tubulação .....121,30 m
  - Elevação do ponto de captação.....127,95 m
  - Material..... aço
  - Diâmetro ..... 800 mm
  - Comprimento .....  $\approx 40,00$  m
- Registro de operação
  - Posicionamento..... dentro da casa de comando inferior
  - Tipo..... gaveta
  - Material..... F°F°
  - Diâmetro ..... 800 mm
  - Acionamento..... mecânico
- Registro de manutenção
  - Posicionamento..... atrás da casa de comando inferior
  - Tipo..... gaveta
  - Material..... F°F°
  - Diâmetro ..... 800 mm
  - Acionamento..... mecânico
- Tubulação de 400 mm
- Posicionamento..... lateral esquerda da barragem, atravessando transversalmente o maciço de concreto
  - Elevação do eixo da tubulação .....121,35 m
  - Elevação do ponto de captação.....121,35 m
  - Material..... aço
  - Diâmetro ..... 400 mm
  - Comprimento .....  $\approx 38,00$  m
- Registro de Operação
  - Posicionamento....junto à interligação com a tubulação de 800mm
  - Tipo.....de gaveta com alavanca
  - Material..... F°F°

- Diâmetro ..... 400 mm
- Acionamento..... mecânico

#### 4.2.2 Demandas para abastecimento urbano

O projeto básico da Barragem São Bento (CASAN, 2004) estimou as demandas relativas ao abastecimento d'água às localidades beneficiadas pela implantação da Barragem. A estimativa foi baseada na análise do sistema de abastecimento existente, anterior à implantação da barragem, bem como a projeção do crescimento populacional e a estimativa das demandas futuras.

O resultado dos estudos de projeção e as demandas progressivas de projeto encontram-se na Tabela 10.

**Tabela 10:** Resumo das Demandas Progressivas para Diversos Horizontes de Projeto

Ano	Alcance (anos)	População Total (hab)	População Atendida (hab)	Q máx diária (l/s)	Q média (l/s)
1997	0	288.248	207.747	577	481
2007	10	393.440	294.461	818	682
2017	20	537.022	417.054	1158	965
2027	30	733.003	590.258	1640	1366
2037	40	1.000.504	834.813	2319	1932
2047	50	1.365.628	1.179.902	3278	2731

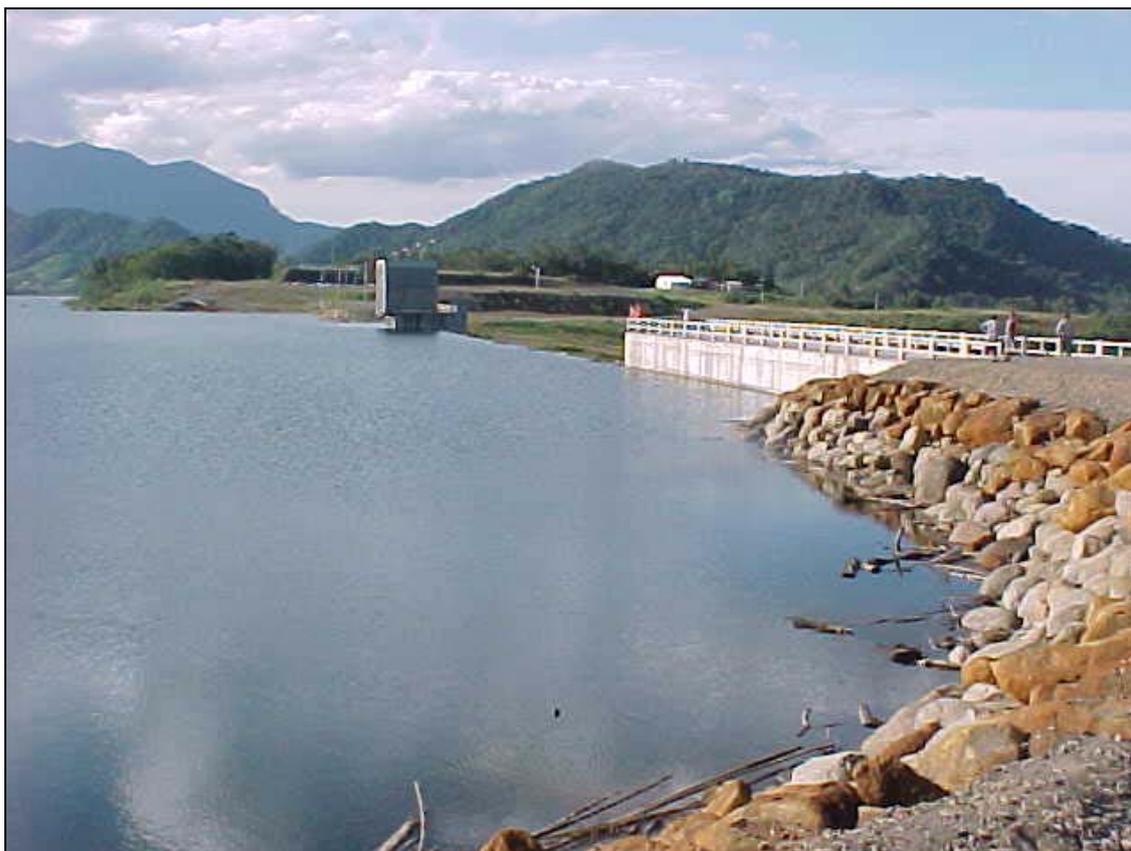
Fonte: CASAN (2003).

Localidades consideradas: Criciúma, Forquilha, rio Maina, Siderópolis, Treviso, Nova Veneza, São Bento Baixo, Morro da Fumaça, Içara e Maracajá.

As demandas consideradas pelo projeto para abastecimento urbano são aquelas referentes ao ano de 2027, ou seja:

- Vazão máxima diária: 1.640 l/s;
- Vazão média 1.366 l/s.

A Figura 11 mostra a Barragem do rio São Bento.



**Figura 11:** Barragem do rio São Bento – Lago Formado pelo Aproveitamento.

#### 4.2.3 Irrigação de áreas cultivadas

Para a avaliação das demandas relativas à irrigação de áreas cultivadas a jusante do local, foi considerada a existência de uma barragem de nível a cerca de 6,5 km a jusante do aproveitamento, na localidade de São Bento Alto, com uma área de drenagem incremental de 7,57 km<sup>2</sup>, destinada à irrigação de aproximadamente 2.000 ha de áreas com cultivo de arroz (CASAN, 2003).

A Barragem do Rio São Bento é responsável apenas pela complementação do atendimento aos agricultores nos períodos de estiagem, uma vez que existe essa pequena bacia de contribuição incremental entre a seção do aproveitamento e a captação (barragem) dos agricultores.

A Tabela 11 apresenta as demandas consideradas pelo projeto para a irrigação das áreas cultivadas a jusante do aproveitamento, considerando a área irrigada à época dos estudos e uma previsão de aumento da mesma.

**Tabela 11:** Demandas de irrigação consideradas pelo projeto

Área Cultivada (ha)	Demandas Durante Os Meses Do Ano (l/s)												Demanda Média (l/s)
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
2000	1000	800	100	-	-	-	-	-	200	2000	1600	1400	1010
2500	1250	1000	130	-	-	-	-	-	250	2500	2000	1750	1270

Fonte: CASAN (2004).

A demanda média considerou apenas os sete meses onde foi exigida. A demanda média unitária considerada foi de 0,51 l/s/ha.

Segundo a Tabela 11, as demandas consideradas pelo projeto para irrigação de áreas cultivadas foram:

- Vazão para 2.000 ha de área cultivada (início da implantação do projeto): 1.010 l/s;
- Vazão para 2.500 ha de área cultivada (futura): 1.270 l/s.

#### 4.2.4 Vazão mínima de jusante

Segundo orientações da Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina - FATMA, órgão regulador e fiscalizador do estado, a vazão mínima a jusante do barramento não pode ser inferior a 50% da vazão mínima com 7 dias de permanência e 10 anos de tempo de retorno ( $Q_{7,10}$ ).

Não havendo a disponibilidade da série histórica, foi utilizado índice regional de vazões específicas para a obtenção da vazão mínima ( $Q_{7,10}$ ). O valor adotado foi igual a  $Q_{7,10} = 1,7471$  l/s/km<sup>2</sup>.

Como a área de drenagem da bacia formada a montante da Barragem era considerada igual a 112,12 km<sup>2</sup>, o valor da vazão mínima seria da ordem de 195,9 l/s. Obteve-se a Licença Ambiental de Operação do órgão ambiental com uma condicionante de vazão ecológica (vazão mínima a jusante) equivalente a 100 l/s.

De acordo com a mesma metodologia, a jusante da barragem (captação) dos

agricultores a vazão mínima requerida passa a ser maior, por ser também maior a área de drenagem. A área de drenagem da bacia formada a montante da área dos agricultores é de aproximadamente 121,36 km<sup>2</sup> tendo-se então como vazão mínima a jusante da barragem dos agricultores um valor de 110 l/s.

### 4.3 OPERAÇÃO DO RESERVATÓRIO

O nível máximo normal do reservatório formado pela Barragem do rio São Bento, correspondente à cota da soleira do vertedouro, encontra-se na elevação 157,50 m, correspondendo a uma área inundada de 4,5 km<sup>2</sup> (ou 450 ha) e um volume acumulado de aproximadamente 58,2 hm<sup>3</sup>.

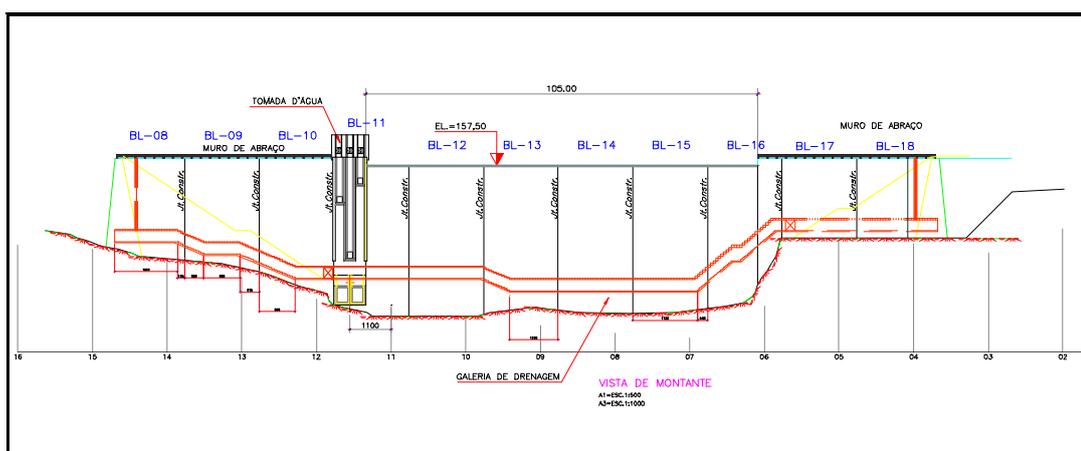
O nível mínimo operativo, situa-se ao nível da soleira da quarta abertura de captação da torre de tomada d'água (enumerado de cima para baixo) e encontra-se na elevação 137,50 m, com um volume total acumulado de apenas 5 hm<sup>3</sup>.

O volume útil acumulado então, é da ordem de 53,2 hm<sup>3</sup>.

No nível máximo maximorum, equivalente à elevação 159,50 metros, o volume total do reservatório é de aproximadamente 68,1 hm<sup>3</sup>.

No nível da soleira da quinta abertura de captação da torre de tomada d'água, ou seja, na elevação 132,50 metros, onde a captação d'água torna-se nula, o volume acumulado é da ordem de 1,3 hm<sup>3</sup>.

A Figura 12 mostra a vista de montante da Barragem São Bento.



**Figura 12:** Barragem São Bento: Barramento principal – Vista de Montante.  
Fonte: CASAN (2003).

A cota de coroamento da barragem de concreto situa-se na elevação 159,50 m, estando dois metros acima da cota da soleira do vertedouro (157,50 m), ou seja, no nível

máximo operativo tem-se uma borda livre de 2,0 m.

A cota de coroamento das ombreiras de enrocamento, assim como a do Dique do Ponto de Fuga Principal e do Dique do Ponto de Fuga secundário, situa-se na elevação 160,00 metros.

A Figura 13 apresenta o vertedouro da Barragem São Bento.

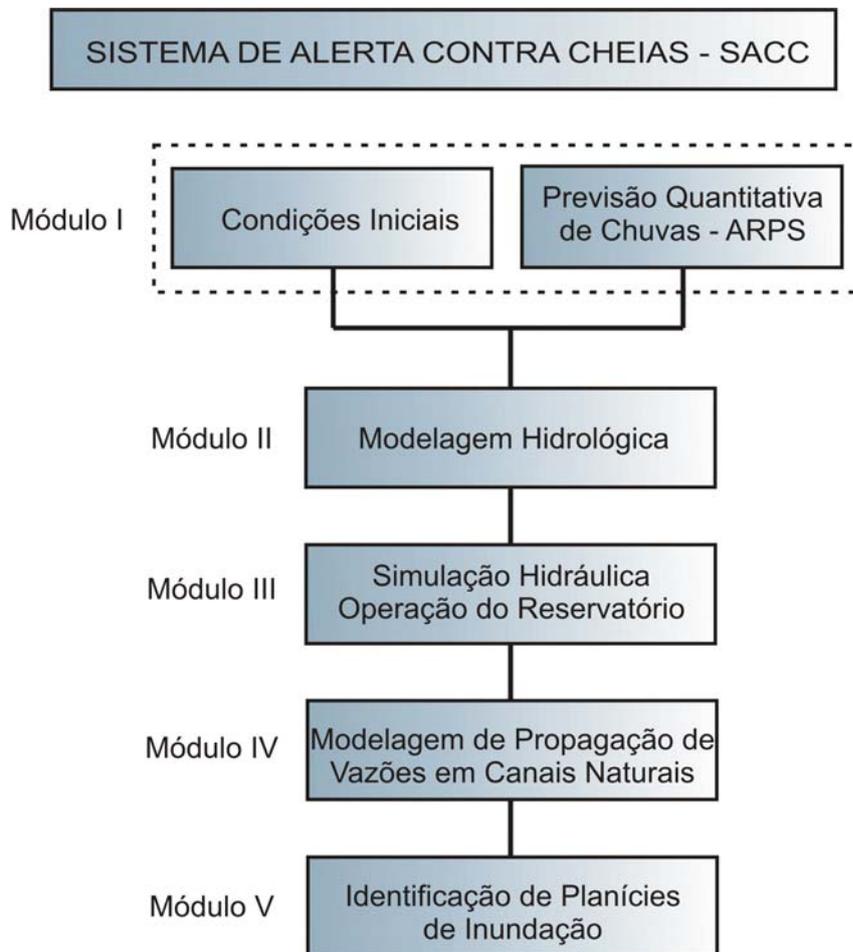


**Figura 13:** Barragem do Rio São Bento – Vertedor.

## 5 O SISTEMA DE ALERTA CONTRA CHEIAS DA BACIA DO RIO SÃO BENTO

Este capítulo apresenta a descrição dos conceitos teóricos aplicados ao Sistema de Alerta Contra Cheias da bacia do rio São Bento. Os aspectos metodológicos do desenvolvimento do sistema são enfatizados a seguir, com a exposição dos diversos componentes e seus aspectos teóricos, e memória de cálculo para o ajuste às características da bacia hidrográfica do rio São Bento.

O sistema de alerta proposto é composto de cinco módulos. A Figura 14 mostra a estrutura básica do Sistema de Alerta Contra Cheias (SACC), agregando ferramentas gratuitas disponíveis no mercado e sistemas computacionais de baixo custo que podem ser desenvolvidos ou adquiridos.



**Figura 14:** Estrutura do Sistema de Alerta contra Cheias – SACC.

## 5.1 MODELO DE PREVISÃO QUANTITATIVA DE CHUVAS

A previsão quantitativa de chuvas deve fornecer totais de precipitação, preferencialmente desagregados segundo uma discretização horária e distribuída espacialmente.

No caso específico estudado, com uma bacia afluenta de 113,79 km<sup>2</sup>, adotou-se o critério de homogeneidade do comportamento meteorológico, aceitando-se que os totais previstos precipitam de forma equitativa e homogênea na bacia. Este critério é compatível com o modelo hidrológico aplicado, descrito no item 5.2.3.

Segundo Haas, Ambrizzi e Pereira Filho (2000), o Sistema de Previsão Regional Avançado, ou *Advanced Regional Prediction System – ARPS*, é um sistema de modelos para a previsão do tempo desenvolvido pelo Centro de Análise e Previsão de Tempestades (CAPS) da Universidade de Oklahoma. A formulação teórica e numérica do modelo pode ser encontrada no Guia do Usuário do ARPS versão 4.0 (Xue et al, 1995), além de Xue et al (2000a), Xue et al (2000b) e Xue et al (2001).

O modelo *Advanced Regional Prediction System (ARPS)* foi desenvolvido para previsão numérica na escala de nuvens, com condições de contorno proveniente de modelos globais (XUE et al., 1995). É um modelo regional de previsão numérica de tempo, indicado para simulação de problemas de microescalas, problemas de escala meso-b e meso-g (como previsões de tempestades e tornados) e de fenômenos de escala meso-a (como frentes frias e vórtices) (XUE et al., 2000).

O ARPS pode realizar simulações das condições atmosféricas na escala de tempestade (1 a 3 km) em um tempo de processamento satisfatório (HAAS; DECKER; DOTTA, 2003). Oferece, também, a possibilidade da incorporação de novos dados das condições atmosféricas durante o processamento. Foi adaptado para utilizar uma base fisiográfica de tipos de vegetação e relevos para o sul e sudeste do Brasil, com 30 x 30 segundos de resolução espacial, sendo que o mapa de solo foi adaptado à resolução de 5 x 5 minutos.

Segundo Andreolli et al. (2006), as previsões do modelo ARPS são realizadas rotineiramente duas vezes ao dia, uma correspondendo ao horário 00:00 Z (horário de Greenwich) e outra no horário 12:00 Z, o que corresponde às 21:00 e 09:00 no horário local. A realização das previsões meteorológicas com o modelo ARPS depende de um fluxo de informações que se inicia pela obtenção dos dados de previsão do modelo global. A partir daí é executado o modelo ARPS em resolução de 40 km, em uma área que cobre boa parte do

sul da América do Sul, desde o sul do estado de Goiás, ao Norte, até Bahia Blanca, ao sul, em uma extensão Leste – Oeste de 4.000 km desde o Oceano Pacífico, a Oeste, até o Oceano Atlântico a cerca de 1.500 km da costa do Sul do Brasil, a Leste.

O modelo ARPS de resolução de 40 km pe executado por um período de 60 horas, e seus resultados fornecem as condições de contorno para o modelo ARPS de 12 km de resolução, cuja abrangência espacial é menor, cobrindo os três estados do sul do Brasil, o Uruguai, parte da Argentina e do Paraguai, e parte dos estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul. O modelo ARPS de 4 km de resolução recebe as condições de contorno do modelo de 12 km e sua abrangência limita-se ao Estado de Santa Catarina e o norte do Rio Grande do Sul. Portanto, a seqüência de previsão consiste de: i) obtenção de dados do modelo global; ii) execução do modelo ARPS 40; iii) execução do modelo ARPS 12; iv) execução do modelo ARPS 4 (ANDREOLLI et al., 2006).

O ARPS possui pacotes de controle de qualidade, de análise objetiva, assimilação de dados, que incluem recuperação da velocidade radial do vento e de recuperação da termodinâmica a partir de Radar Doppler, além de pacotes de diagnóstico, verificação e pós-processamento. Na programação do modelo ARPS foi adotado um único estilo, com rótulos globais, usados em todos os códigos, para facilitar a leitura. Ele possui uma abrangente documentação no seu código fonte além de guias e manuais (HAAS; AMBRIZZI; PEREIRA FILHO, 2000).

O núcleo central do ARPS é o componente de integração no tempo e espaço, sendo este último um modelo tri-dimensional não hidrostático, completamente compressível, formulado em coordenadas generalizadas seguindo o terreno. As equações do modelo incluem momento, calor (temperatura potencial), massa (pressão), substâncias de água, energia cinética turbulenta e equação de estado.

Segundo Haas, Ambrizzi e Pereira Filho (2000), as equações são projetadas sobre a “superfície plana” da terra usando as projeções de Mercator ou Lambert Conformal ou Polar. O sistema de equações coordenado curvilíneo resultante é transformado em um sistema cartesiano com igual espaçamento em todas as direções, chamado de espaço computacional. Com esta transformação no espaço, todas as variáveis do modelo devem ser multiplicadas pelo jacobiano da transformação, ou pelo seu inverso, no início e no fim da integração, respectivamente.

O estado básico do modelo pode ser inicializado a partir de uma radiossonda, de funções analíticas e de dados tridimensionais como saídas de outros modelos. Neste último

caso, o estado básico é tomado como a média horizontal na área integrada em níveis de pressão.

O ARPS é totalmente livre de “copyright” e pode ser eficientemente implementado em computadores paralelos de baixo custo.

Uma das aplicações potenciais dos resultados dos modelos de previsão quantitativa de chuva é no apoio à previsão de enchentes. Para validação do sistema de previsão quantitativa de chuvas para o sul do Brasil, foram comparadas as análises espaciais das chuvas observadas com as previstas, gerando excelentes resultados (HAAS; DECKER; DOTTA, 2003). O modelo indicado para dar suporte às previsões quantitativas de chuva na região de interesse foi extensivamente utilizado em pesquisa de doutoramento da USP, desenvolvendo o trabalho “Simulações da Chuva Orográfica Associada a um Ciclone Extratropical no litoral sul do Brasil”, pelo físico Reinaldo Haas (2003).

Portanto, as previsões quantitativas de chuvas para a região de inserção do aproveitamento estudado, são realizadas através do modelo ARPS, assegurando a qualidade das entradas para o modelo de simulação hidrológica.

Deve-se ressaltar que a aquisição dos dados de previsões foi considerada como uma etapa trivial, sem a participação ativa do autor deste trabalho, tal como se obtém dados de diferentes modelos numéricos existentes, através de uma simples consulta pela rede mundial Internet.

## 5.2 MODELO HIDROLÓGICO

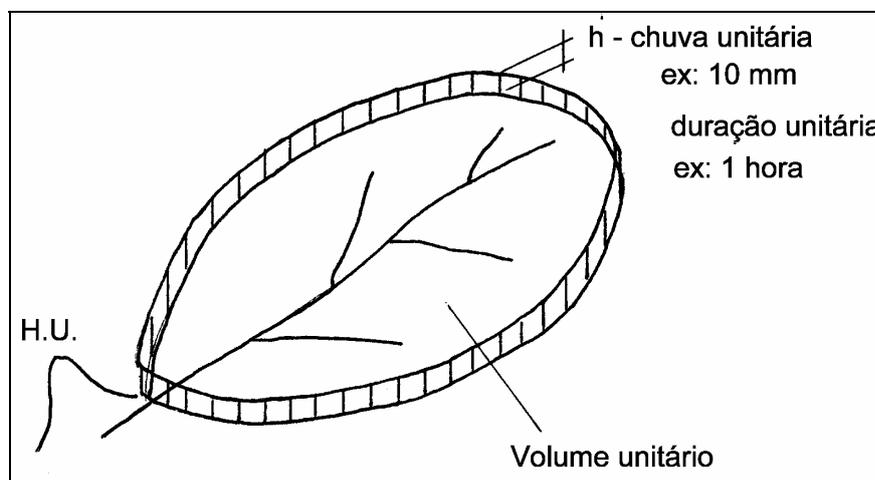
Os componentes deste módulo são agregados, ou modelados, de modo a transformar os totais precipitáveis previstos em descargas naturais afluentes ao reservatório da Barragem São Bento.

O modelo de simulação hidrológica utiliza o método do Hidrograma Unitário Sintético (HUS). Para uma melhor compreensão do método, apresenta-se a seguir uma síntese do conceito introduzido por Sherman do Hidrograma Unitário e a conceituação do método do Hidrograma Unitário Sintético, segundo a metodologia de Snyder.

### 5.2.1 Hidrograma Unitário (H.U.)

O hidrograma unitário é o hidrograma resultante de um escoamento superficial de um volume unitário. O volume unitário é decorrente da chuva unitária, que corresponde a uma

altura pluviométrica unitária de duração unitária (exemplo: chuva com altura unitária de 10 mm e duração unitária de 1 hora) (PEDRAZZI, 2004). A Figura 15 ilustra o volume unitário em uma bacia hidrográfica.



**Figura 15:** Volume Unitário.  
Fonte: Pedrazzi (2004).

O Método do Hidrograma Unitário é um procedimento utilizado para derivar o hidrograma superficial advindo de uma chuva efetiva unitária, uniformemente distribuída na bacia e com intensidade constante durante a duração do evento chuvoso. A partir da suposição dessa chuva, que pode ser estendida para chuvas complexas, e também com base em registros pluviométricos e fluviométricos de inúmeras cheias, Sherman estabeleceu os princípios básicos da metodologia:

- **Princípio da Linearidade:** Duas chuvas de igual duração, produzindo volumes diferentes de escoamento superficial, originam fluviogramas em que as ordenadas, em tempos correspondentes, são proporcionais aos volumes totais escoados (PINTO et al., 1976);
- **Princípio da Superposição:** A distribuição, no tempo, do escoamento superficial de determinada precipitação independe de precipitações anteriores (PINTO et al., 1976). Em outras palavras, o hidrograma superficial de uma dada chuva efetiva pode ser dividido em uma série de hidrogramas superficiais parciais, cada um devido a uma chuva efetiva parcial. Este princípio pode também ser chamado de Princípio da Adição;
- **Princípio da Invariância no Tempo:** uma mesma chuva efetiva produzirá, a qualquer tempo, um mesmo hidrograma superficial. Este princípio poderia

também ser enunciado como: chuvas efetivas de igual duração darão origem a hidrogramas superficiais com mesmo tempo de base (NASCIMENTO, 2000).

Este método define um modelo hidrológico precipitação-vazão conceitual, ou semi empírico, concentrado e determinístico.

### 5.2.2 Determinação do H.U. a partir de dados observados

Para a determinação do Hidrograma Unitário são necessários registros simultâneos de chuvas e vazões, os quais devem ser analisados segundo os princípios básicos do método, de modo a satisfazê-los o mais próximo possível. Assim, deve-se procurar os hidrogramas simples de maiores picos, resultantes de chuvas intensas isoladas com curta duração e intensidade preferencialmente constante e ainda com indícios de que tenha se distribuído uniformemente na bacia (NASCIMENTO, 2000).

Segundo Pedrazzi (2004), a determinação do Hidrograma Unitário segue os seguintes passos:

- a) O volume de água precipitado sobre uma bacia é dado por:

$$V_{tot} = P_{tot} \times A.D. \quad (1)$$

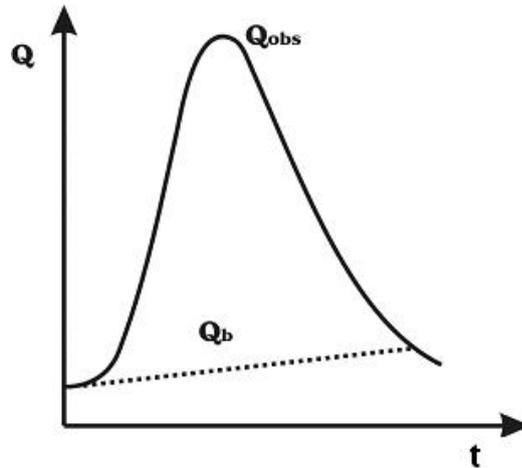
Onde:

$V_{tot}$ : volume total precipitado sobre a bacia

$P_{tot}$ : precipitação total

A.D.: área de drenagem da bacia

- b) A separação do escoamento superficial pode ser feita traçando-se uma reta que une dois pontos do hidrograma ocorrido, um no início da subida e outro no final de descida, conforme mostra a Figura 16 (PEDRAZZI, 2004).



**Figura 16:** Hidrograma Unitário.  
Fonte: Pedrazzi (2004).

Para cada instante  $i$ , a vazão que escoar superficialmente é a diferença entre a vazão observada e a vazão de base, sendo esta estimada a partir do gráfico. Matematicamente, tem-se:

$$Q_{et} = Q_{obst} - Q_{bt} \quad (2)$$

Onde:

- $Q_{et}$ : vazão que escoar superficialmente
- $Q_{obst}$ : vazão observada no posto fluviométrico
- $Q_{bt}$ : vazão base, extraída do gráfico.

- c) O volume escoado superficialmente é determinado calculando-se a área do hidrograma superficial, que pode ser obtida da seguinte forma:

$$V_e = \sum Q_{et} \times \Delta t \quad (3)$$

Onde:

- $V_e$ : volume escoado superficialmente
- $Q_{et}$ : vazão que escoar superficialmente
- $\Delta t$ : intervalo de tempo adotado.

Determina-se o coeficiente de escoamento (C) fazendo-se a relação entre o volume

escoado e o volume total:

$$C = \frac{V_e}{V_{tot}} \quad (4)$$

Onde:

$V_e$ : volume escoado superficialmente

$V_{tot}$ : volume total precipitado

A chuva efetiva, ou seja, a chuva que escoa superficialmente é calculada multiplicando-se a chuva total pelo coeficiente de escoamento:

$$P_{ef} = C \times P_{tot} \quad (5)$$

Onde:

$P_{ef}$ : chuva efetiva

C: coeficiente de escoamento

$P_{tot}$ : precipitação total.

- d) A redução do hidrograma superficial para o hidrograma unitário é feita da seguinte forma:

$$Q_u = \frac{P_u}{P_{ef}} \times Q_e \quad (6)$$

Onde:

$Q_u$ : ordenada do hidrograma unitário

$P_u$ : chuva unitária

$P_{ef}$ : chuva efetiva

$Q_e$ : ordenada do hidrograma superficial.

Segundo Nascimento (2000): (a) é necessário que a chuva efetiva, e não a chuva total, tenha intensidade constante no período analisado, e (b) o Hidrograma Unitário é uma

constante da bacia, portanto, a sua determinação deve ser feita com base em várias precipitações isoladas, e não apenas com uma. A partir de vários hidrogramas unitários determina-se o Hidrograma Unitário (HU) da bacia, mas não como uma simples média dos HU's determinados. Há dois modos de se determinar o HU final. Fazendo coincidir as origens ou fazendo coincidir os picos dos diversos HU's, determinando-se o HU médio. É indispensável verificar se o HU médio tem volume unitário. O primeiro procedimento tende a reduzir o pico e as vazões de cheia (NASCIMENTO, 2000).

### 5.2.3 Hidrograma unitário sintético

O modelo de simulação hidrológica aplicado neste trabalho utiliza o conceito do Hidrograma Unitário Sintético (HUS) desenvolvido por Snyder, em 1938. O motivo da utilização deste modelo neste projeto deve-se a sua simplicidade, eficiência e facilidade de entendimento da metodologia, permitindo assim, a obtenção de previsões de aflúncias com uma clara compreensão dos processos envolvidos.

As diversas características físicas da área drenada devem, em maior ou menor grau, influenciar as condições do escoamento e contribuir para a forma final do hidrograma unitário. Este fato, aliado à freqüente necessidade de estabelecer relações hidrológicas em rios desprovidos de estações hidrométricas, sugeriu o estudo da síntese de hidrogramas, independentemente da existência de dados hidrológicos, e o desenvolvimento do método para a obtenção do chamado Hidrograma Unitário Sintético (PINTO, 1976).

Segundo Pinto (1976), a partir dos estudos de Sherman (1932, *apud* PINTO, 1976) e Bernard (1934, *apud* PINTO, 1976), numerosos investigadores enfrentaram o problema da obtenção de hidrogramas sintéticos. De maneira geral, os diversos estudos obedeceram a uma sistemática mais ou menos análoga que pode ser definida como segue.

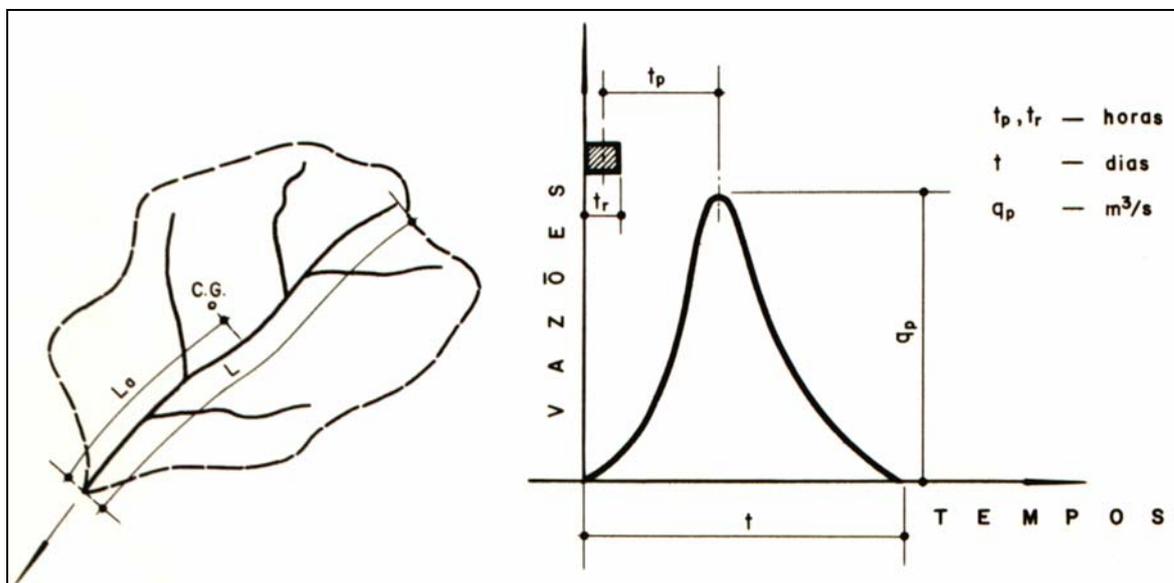
- seleção das características físicas da bacia hidrográfica a serem consideradas e definição quantitativa das mesmas;
- seleção de diversas bacias em que se podem definir aquelas características, abrangendo uma certa gama de variação;
- pesquisa de correlações entre as características físicas e medidas do Hidrograma Unitário observadas para as diversas bacias;

- seleção e representação gráfica ou matemática das correlações mais significativas, permitindo sua utilização para a predição do Hidrograma Unitário em bacias que não se dispõe de medidas de vazão.

#### 5.2.4 Método de Snyder

Para definir o Hidrograma Unitário Sintético, Snyder estabeleceu equações que fornecem o tempo de retardamento, a vazão de pico e a duração total do escoamento superficial, ou seja, a base do hidrograma, em função de índices fisiográficos da bacia hidrográfica.

O tempo de retardamento ( $t_p$ ) é definido como o tempo entre o centro de massa da precipitação efetiva e o pico do hidrograma. É distinto, portanto, da noção utilizada no estudo de hidrogramas unitários, em que se considera a distância até o centro de massa do hidrograma em vez do ponto de máxima vazão. A Figura 17 mostra a representação gráfica das variáveis do Método de Snyder.



**Figura 17:** Método de Snyder - Representação gráfica das variáveis.

Snyder obteve a seguinte expressão:

$$t_p = \frac{C_t}{1,33} (L \times L_a)^{0,3} \quad (7)$$

Onde:

L: comprimento da bacia em km, medido ao longo do curso principal do rio, desde a seção considerada até o divisor;

$L_a$ : distância em km, medido ao longo do curso principal, desde a seção considerada até a projeção do centro de gravidade sobre o rio;

$C_t$ : coeficiente numérico, variável entre 1,8 e 2,2 para bacias na região do Apalaches/USA. É interessante notar que Linsley (1986), em estudo análogo para bacias da vertente oeste da Serra da Nevada, na Califórnia, obteve valores entre 0,7 e 1,0;

$t_p$ : tempo de retardamento da bacia, em horas.

O hidrograma sintético de Snyder considera o tempo de duração da chuva que o provoca ( $t_r$ ) igual a:

$$t_r = \frac{t_p}{5,5} \text{ (horas)} \quad (8)$$

A vazão máxima ( $Q_p$ ) para 1 cm de precipitação efetiva sobre a bacia é dada pela expressão:

$$Q_p = \frac{2,76 \times C_p \times A}{t_p} \quad (9)$$

Sendo:

A: área da bacia em  $\text{km}^2$

$C_p$ : coeficiente numérico variável entre 0,56 e 0,69 para a região dos montes Apalaches/USA. Para a Califórnia, Linsley (1986) constatou valores entre 0,35 e 0,50.

Quando se consideram precipitações de duração ( $t_R$ ) superior ao tempo ( $t_r$ ) dado na equação (7), o valor de  $t_p$  da equação (8) deve ser substituído por  $t'_p$ , onde:

$$t'_p = t_p + \frac{t_R - t_r}{4} \quad (10)$$

A expressão (10) é empírica e não foi completamente justificada pelo autor em seu

trabalho. O tempo de base do hidrograma unitário é estimado por:

$$t = 3 + 3 \left( \frac{t_p}{24} \right) \quad (\text{dias}) \quad (11)$$

em que  $t$  é expresso em dias e  $t_p$  em horas. A Fórmula (11) carece, igualmente, de maiores justificativas e deve ser encarada com reservas.

Obtidos os valores  $t_p$ ,  $Q_p$  e  $t$ , o hidrograma unitário pode ser desenhado a sentimento, com o cuidado de se manter o volume sob o hidrograma igual à unidade equivalente a uma chuva efetiva de 1 cm.

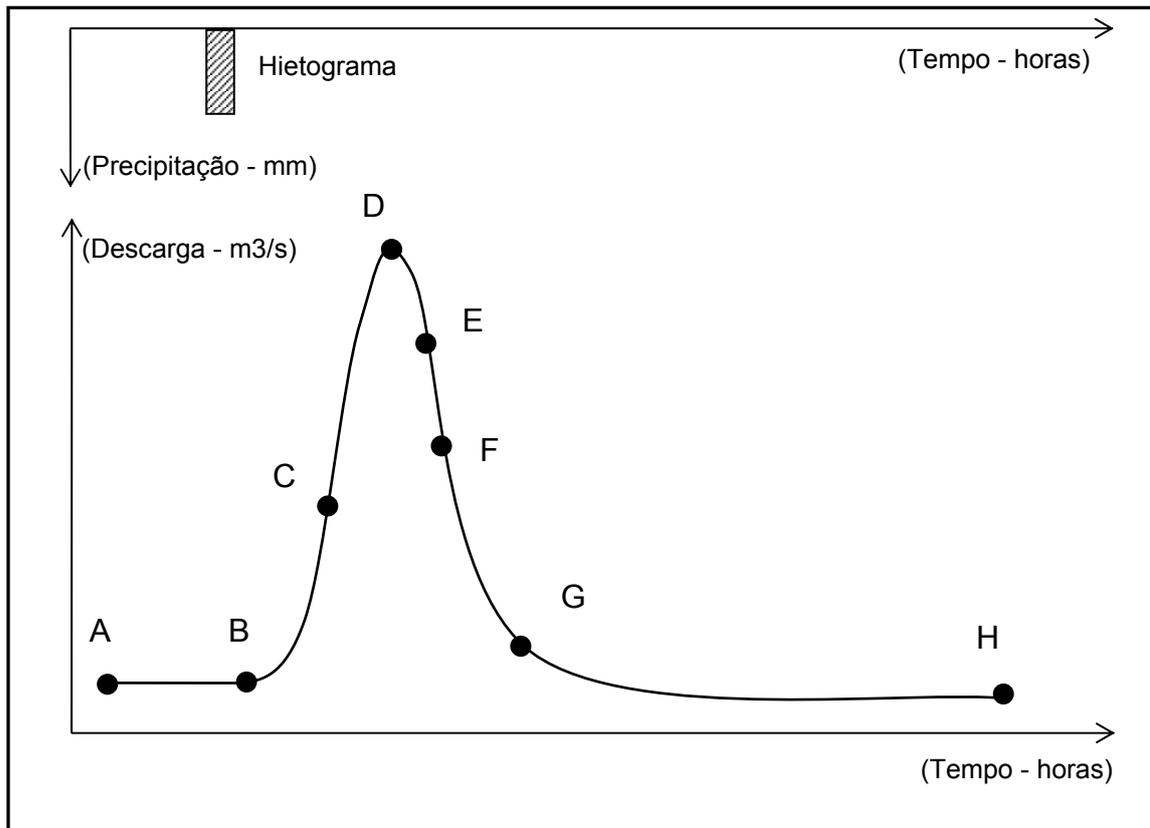
Na literatura vários autores têm aplicado semelhante procedimento em diferentes partes dos Estados Unidos obtendo valores de  $C_p$  e  $C_t$  com intervalo de variação superior ao indicado. O coeficiente  $C_t$  tem influência sobre o tempo de pico e depende das outras características físicas que não foram consideradas na Equação (5). O coeficiente  $C_p$  está relacionado com a vazão máxima de uma determinada bacia e depende das referidas características físicas. Para bacias próximas, com características físicas semelhantes pode-se usar dados de bacias vizinhas para estimativa desses coeficientes (TUCCI, 1993. p 428).

### 5.2.5 Curva de recessão de escoamento de base

Segundo Chow, (1964) um hidrograma unimodal típico (Figura 18) consiste de três partes:

- o segmento de aproximação AB;
- o segmento de ascensão BD;
- o segmento de recessão DH.

A parte inferior do segmento de recessão é a curva de recessão da água de subsolo, que mostra a taxa de decaimento da vazão afluyente do subsolo. Nesses segmentos são mostrados o ponto de subida B; 2 pontos de inflexão C e E; o ponto de pico D e outros dois pontos característicos F e G. O segmento CDE representa a crista da cheia. O tempo contado a partir do centro de massa da chuva ao pico do volume escoado é definido como o tempo de retardamento.



**Figura 18** – Hidrograma unimodal típico.

O segmento de recessão representa a retirada de água do armazenamento depois que toda a afluência ao canal do rio tenha cessado. Portanto, é mais ou menos independente das variações no tempo da chuva e infiltração. Pode ser levemente dependente, entretanto, na distribuição espacial da chuva e bastante dependente das condições do terreno. Combinando os segmentos de recessão de vários hidrogramas observados em uma bacia, uma curva envoltória derivada dos segmentos pode ser desenvolvida para representar a curva de recessão do escoamento subterrâneo. O processo físico da liberação da água subterrânea é um fenômeno que pode ser descrito por uma lei exponencial (CHOW, 1964). Este processo pode ser simulado por um reservatório linear o qual tem sua descarga diretamente proporcional ao seu armazenamento e pode ser descrito pela relação:

$$Q_t = Q_0 K_r^t \quad (12)$$

Onde  $Q_t$  é a descarga em qualquer instante  $t$  depois da ocorrência de  $Q_0$  – descarga inicial de recessão, e  $K_r$  é a constante de recessão, a qual é inferior a 1. Integrando-se a

equação acima e notando-se que  $Q_t dt = -dS_t$ , despreende-se que o armazenamento  $S_t$  remanescente na bacia, no instante  $t$  é  $S_t = -Q_t / \ln k_r$ .

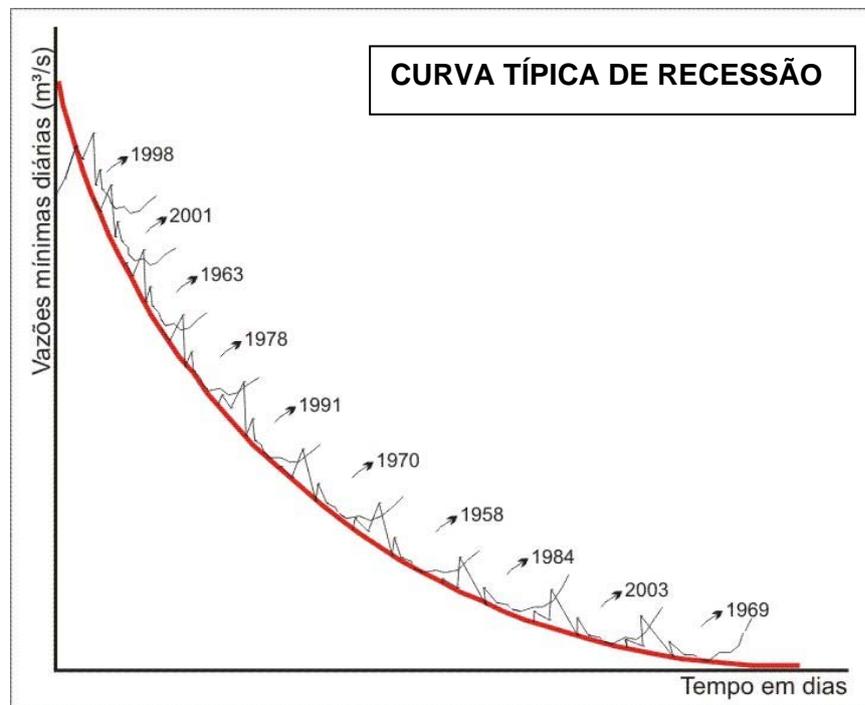
A Equação (12) plotada em escala semi-logarítmica é uma reta, com as descargas na escala logarítmica. A Figura 19 mostra uma curva típica de recessão.

Assim:

$Q_t$  : descarga superficial para um tempo  $t$

$Q_0$  : descarga superficial de recessão inicial

$K_r$  : constante de recessão



**Figura 19:** Curva típica de recessão.

### 5.3 MODELO HIDRÁULICO DE AMORTECIMENTO EM RESERVATÓRIOS

O amortecimento dos picos de cheias afluentes ao reservatório formado pela barragem São Bento através do vertedouro de soleira livre foi calculado utilizando o método denominado “Puls Modificado”.

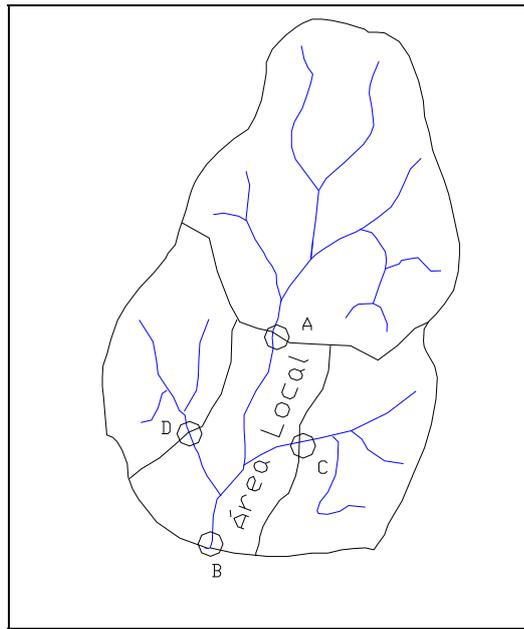
A propagação de uma onda de cheia pode ser definida como um processo onde o hidrograma de uma onda de cheia, em um ponto do rio, é determinada a partir de hidrogramas conhecidos ou assumidos em um ou mais pontos de montante (CHOW, 1964). Pode ser determinada para reservatórios e canais, onde são avaliados os efeitos de modificação na onda de cheia ao passar por estruturas ou seções de controle. Para estudos de projeto e planejamento de usos múltiplos de reservatórios é aplicada na determinação da localização e capacidade de reservatórios, no dimensionamento das estruturas de controle de vazões, como vertedores, descarregadores de fundo, tomadas d'água, desvios, etc.

Uma consideração inicial importante na seleção do método de propagação é a seleção de um período de discretização apropriado. Este é o intervalo de tempo no qual são representadas as ordenadas do hidrograma usado na propagação. O intervalo de tempo precisa ser suficientemente curto para definir o hidrograma de forma adequada. Teoricamente, deve ser menor que o tempo de viagem da vazão no trecho. O período também deve ser suficientemente curto para que o hidrograma, durante o período, possa ser considerado linear.

#### 5.3.1 Base Conceitual

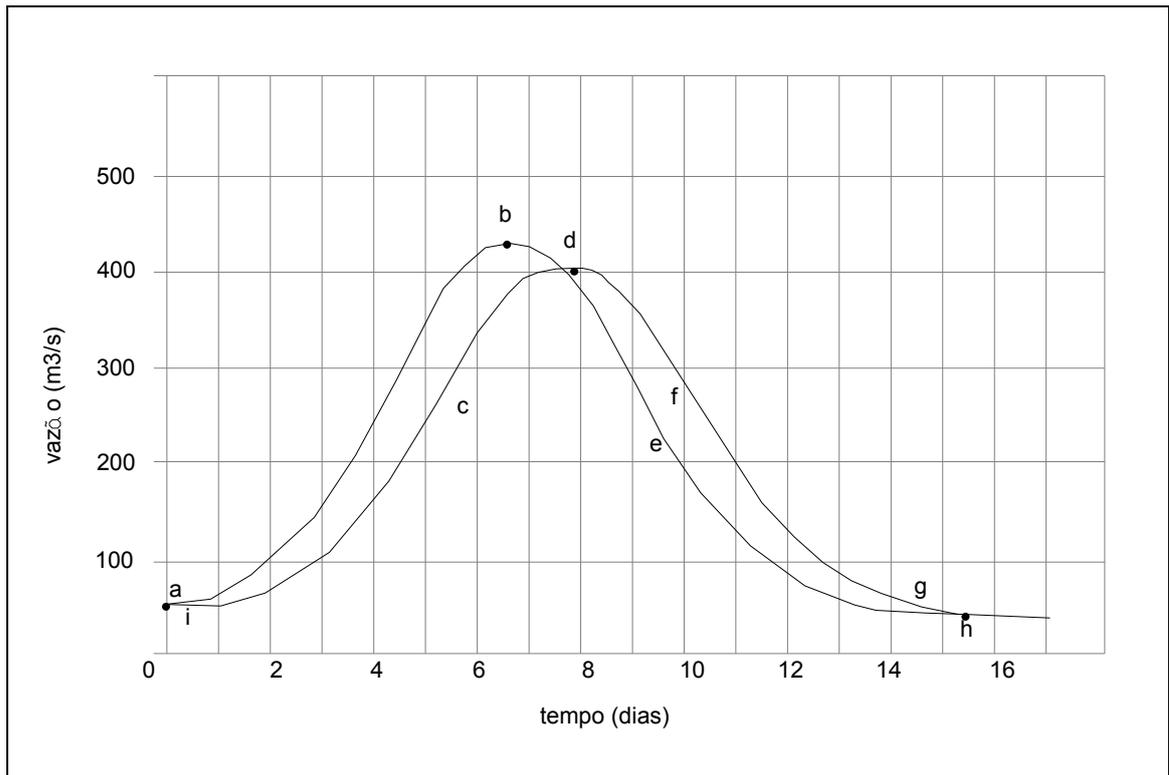
Todos os métodos de propagação de cheias são baseados em algum conhecimento das características hidráulicas e/ou geométricas do trecho de rio em consideração. O conhecimento pode variar desde simples informações sobre a topografia, através de mapas, sem registros de cheias, ou pode incluir um completo histórico de cheias, perfis, seções transversais, etc. Geralmente, os procedimentos de propagação de cheias são baseados nas relações entre níveis e armazenamento (cota-volume) e/ou vazão defluente x armazenamento. Dois métodos são disponíveis para desenvolver estes relacionamentos (CHOW, 1964). O primeiro envolve a determinação dos volumes armazenados em diferentes cotas de níveis de seções transversais ou mapas topográficos. O segundo método, mais comumente utilizado, determina os volumes de armazenamento pela análise dos registros de cheias, assumindo que as relações estabelecidas pela série histórica serão válidas para cheias futuras. Os dados requeridos para esta análise são as séries históricas de vazão de montante, de jusante e dos tributários, bem como os dados de precipitação, para áreas sem registro de vazões. As vazões

em pontos onde não há registro são estimadas através de modelos chuva-vazão, baseado nos registros de chuva. O hidrograma afluente é confeccionado pela soma das vazões medidas, vazões de tributários e vazões estimadas em pontos onde não há medição. A Figura 20 ilustra um típico trecho de rio AB, onde as estações A e B são, respectivamente, as estações de montante e jusante do canal principal e as estações C e D são localizadas em tributários do canal principal.



**Figura 20:** Bacia hidrográfica típica.

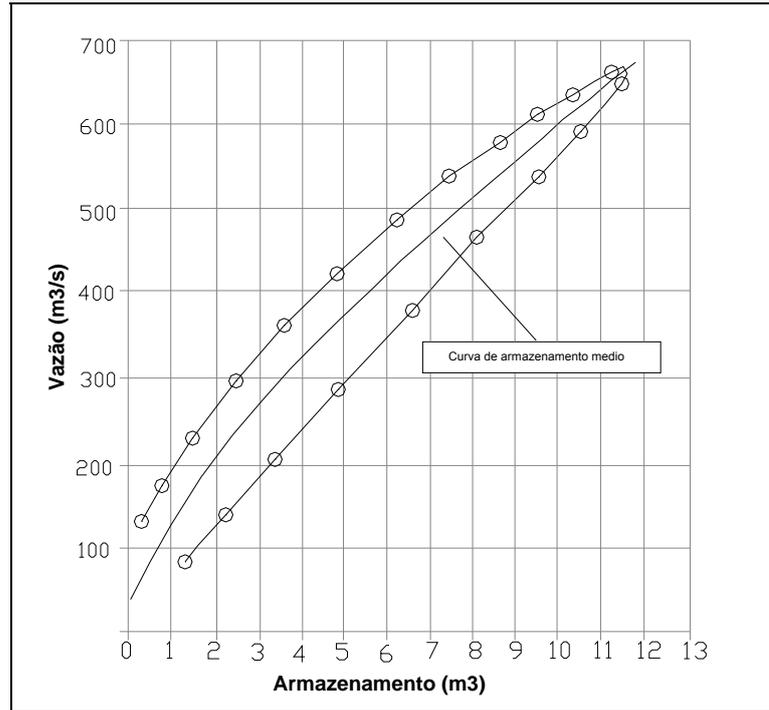
A linha negra no interior da bacia abrange a área sem vazões medidas, denominada “área local”. Na Figura 21, a curva *abeha* representa o hidrograma total de entrada no trecho para uma determinada cheia. A área sob a curva para cada período de tempo é o volume durante aquele período e a área total sob a curva é o volume total da onda de cheia afluente.



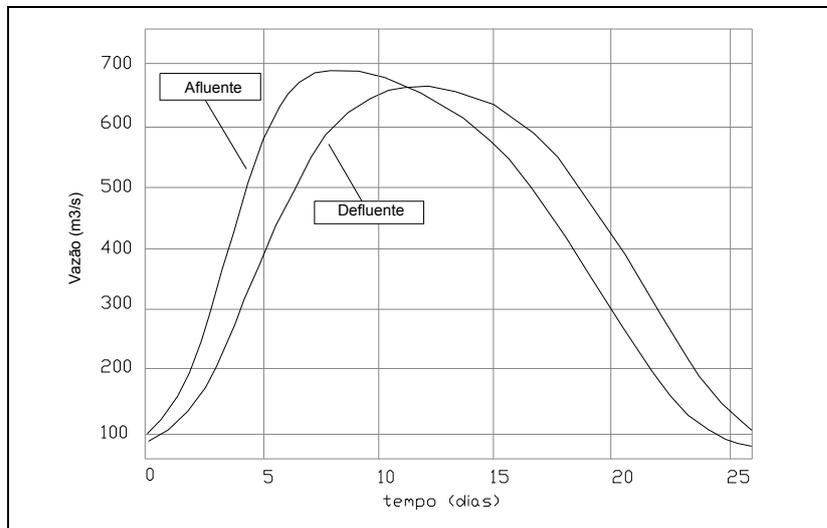
**Figura 21:** Hidrogramas típicos de afluência e defluência.  
Fonte: Adaptado de CHOW (1964).

A curva *icdfgi* representa a vazão na seção de jusante, conhecida como vazão defluente e o seu volume deve ser igual ao total afluente. Durante a primeira porção da onda de cheia, até que os hidrogramas se cruzem no ponto *d*, a vazão afluente supera a defluente. Assim, a água é armazenada no trecho. A área *abdca*, ou a diferença entre os hidrogramas afluente e defluente representam o volume armazenado. Durante os períodos de 9 a 17, a defluência supera a afluência. Assim, a água é liberada do armazenamento.

O volume defluente é representado pela área *dfged*, igual ao volume de armazenamento *abdca*. Em qualquer período de tempo a diferença entre a soma das vazões afluentes e defluentes representa o volume armazenado no trecho. A Figura 22 representa um gráfico “volume armazenado” x “vazão defluente para um período de propagação”. A curva média entre os pontos, que expressa a relação média entre defluência e armazenamento, é denominada “curva média de armazenamento”. Os hidrogramas totais de afluência e defluência são mostrados na Figura 23.



**Figura 22:** Curva descarga-armazenamento.  
Fonte: Adaptado de CHOW (1964).



**Figura 23:** Hidrogramas de afluência e defluência.  
Fonte: Adaptado de CHOW (1964).

### 5.3.2 O Método de Puls

Este método assume que a relação descarga-armazenamento é invariável e negligencia a variação da inclinação que ocorre durante a passagem de uma onda de cheia. O método tem bons resultados para propagação em reservatórios.

Em um dado intervalo de tempo, a diferença entre a vazão afluyente e a vazão defluyente é igual à variação no armazenamento.

$$I - O = \Delta S \quad (13)$$

Onde:

$I$  = vazão afluyente

$O$  = vazão defluyente

$\Delta S$  = armazenamento

Ou, se expresso em intervalos de tempo finitos,

$$\frac{1}{2} (I_1 + I_2) \Delta t - \frac{1}{2} (O_1 + O_2) \Delta t = S_2 - S_1 \quad (14)$$

$I_1, I_2$  = vazão afluyente nos intervalos de tempo  $t_1$  e  $t_2$ , respectivamente;

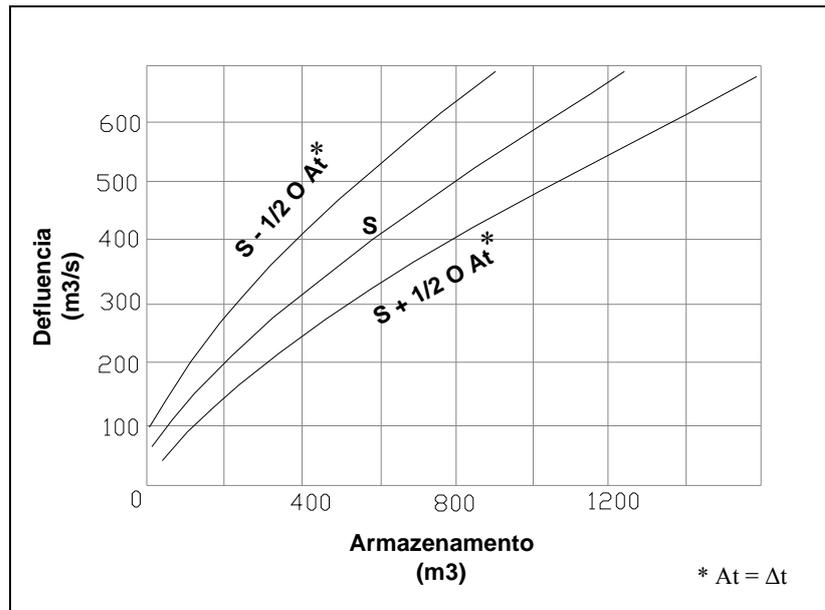
$O_1, O_2$  = vazão defluyente nos intervalos de tempo  $t_1$  e  $t_2$ , respectivamente;

$S_1, S_2$  = armazenamento nos intervalos de tempo  $t_1$  e  $t_2$ , respectivamente.

Arranjando a equação para que os todos os valores conhecidos fiquem no lado esquerdo:

$$\frac{1}{2} (I_1 + I_2) \Delta t + S_1 - \frac{1}{2} O_1 \Delta t = S_2 + \frac{1}{2} O_2 \Delta t \quad (15)$$

A propagação é concluída pela substituição dos valores conhecidos na equação acima para a obtenção de  $S_2 + \frac{1}{2} O_2 \Delta t$ . Assim, o  $O_2$  é obtido pela relação entre  $O_2$  e  $S_2 + \frac{1}{2} O_2 \Delta t$ . A Figura 24 mostra a curva de armazenamento obtida pelo processamento dos dois métodos descritos na subsecção 5.3.1 - Base conceitual.



**Figura 24:** Curvas para o método de Pulsos.  $\Delta t = 1$  dia.  
Fonte: Adaptado de CHOW (1964).

A Figura 24 também mostra as curvas  $S - \frac{1}{2} O \Delta t$  e  $S + \frac{1}{2} O \Delta t$ , que são obtidas, respectivamente, pela subtração e pela adição da abscissa da curva de armazenamento em metade do valor de  $[Ox\Delta t]$ . No começo de um período de propagação, os valores conhecidos são as afluências para os intervalos de tempo 1 e 2 e a defluência para o período 1. É necessário determinar a defluência para o intervalo 2. Os passos para o preenchimento de uma planilha de propagação (Tabela 12) são os seguintes:

- Passo 1: Calcule  $\frac{1}{2} (I_1 + I_2)$  na coluna 3
- Passo 2: A partir da curva  $S_2 - \frac{1}{2} O \Delta t$ , leia o valor de  $S_2 - \frac{1}{2} O_1 \Delta t$  correspondente ao valor dado de  $O_1$ . Por exemplo,  $S_2 - \frac{1}{2} O_1 \Delta t = 0$  na coluna 5 para  $O_1 = 85$  na coluna 4, onde o índice “2” representa o período de propagação atual e o índice “1”, o período anterior.
- Passo 3: Calcule  $S_2 + \frac{1}{2} O_2 \Delta t$  na coluna 6 adicionando o valor da coluna 3 com aquele da coluna 5. Por exemplo,  $115 + 0 = 115$ .
- Passo 4: Para a curva  $S_2 + \frac{1}{2} O \Delta t$ , leia o valor de  $O_2$  correspondente àquele  $S_2 + \frac{1}{2} O_2 \Delta t$ . Por exemplo,  $O_2 = 103$  para  $S_2 + \frac{1}{2} O_2 \Delta t = 115$ .
- Passo 5: determine  $S_2 - \frac{1}{2} O_1 \Delta t$ , para o próximo período de propagação, subtraindo  $O_2$  de  $S_2 + \frac{1}{2} O_2 \Delta t$  do último período calculado, ou pela leitura pelo valor da curva  $S_2 - \frac{1}{2} O \Delta t$  para um valor de  $O_2$ . Por exemplo,  $S_2 - \frac{1}{2} O_2 \Delta t = 12$  para  $O_2 = 103$ , ou  $S_2 - \frac{1}{2} O_2 \Delta t$ , ou seja,  $115 - 103 = 12$ .

Tabela 12: Método de Puls

1	2	3	4	5	6
Período de propagação	I	(I1 + I2)/2	O	S2 - ½ O <sub>1</sub> Δt	S <sub>2</sub> + ½ O <sub>2</sub> Δt
[dias]	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	(m <sup>3</sup> /s)/dia	(m <sup>3</sup> /s)/dia
1	93		85		
2	137	115	103	0	115
3	208	172,5	143	12	184
4	320	264	206	41	305
5	442	381	288	99	480
6	546	494	373	192	686
7	630	588	456	313	901
8	678	654	527	445	1099
9	691	684,5	582	572	1256
10	692	691,5	621	674	1366
11	684	688	644	745	1433
12	671	677,5	656	789	1467
13	657	664	658	811	1475
14	638	647,5	655	817	1465
15	609	623,5	645	810	1434
16	577	593	626	789	1383
17	534	555,5	602	757	1313
18	484	509	569	711	1220
19	426	455	529	651	1106
20	366	396	482	577	973
21	298	332	427	491	823
22	235	266,5	364	396	662
23	183	209	299	298	507
24	137	160	237	208	368
25	103	120	179	131	251
26	81	92	131	72	164

Para obter O<sub>3</sub> para o período 3, deve-se repetir os passos de 1 a 5, sucessivamente.

### 5.3.2.1 Método de Puls Modificado (Modified Puls)

O método de Puls modificado é um dos métodos mais utilizados na propagação de cheias em reservatórios. O método também é utilizado na determinação da capacidade de armazenamento em reservatórios. A equação principal do método Puls modificado é encontrada considerando a forma de diferenças finitas da equação da continuidade, combinada com uma representação empírica da equação do momento.

O método descrito no item 5.1.3.2 é o Método de Puls Original, desenvolvido por L.G.Puls, em 1928. O método de Puls Modificado requer a construção de apenas duas curvas: a curva S e S + ½ OΔt. Para uma defluência inicial O<sub>1</sub>, o armazenamento S<sub>1</sub> é obtido a partir da curva de armazenamento S e a quantidade S<sub>1</sub> - ½ OΔt pode ser calculada. De acordo com a equação (15), a soma da afluência média mais a quantidade S<sub>1</sub> + ½ O<sub>1</sub>Δt fornece a quantidade

$S_2 + \frac{1}{2} O_2 \Delta t$ . Portanto, a defluência correspondente a  $S_1 + \frac{1}{2} O_1 \Delta t$  pode ser obtida a partir da curva  $S_1 + \frac{1}{2} O_1 \Delta t$ .

O Método de Puls Modificado é, portanto, um método iterativo em que se pode definir a precisão requerida e depende apenas de duas relações intrínsecas à estrutura hidráulica estudada (vertedor) e ao reservatório, ou seja: (i) a curva de descarga da soleira livre e (ii) a curva cota x volume do reservatório.

### **Exemplo de Aplicação para o Método Puls Modificado**

A equação da Continuidade pode ser apresentada como abaixo:

$$\frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{O_1 + O_2}{2} = \frac{S_2 - S_1}{\Delta t}$$

Também pode ser escrita:

$$I_1 + I_2 + \left( \frac{2S_1}{\Delta t} - O_1 \right) = \frac{2S_2}{\Delta t} + O_2$$

A solução do Método Puls Modificado é através do desenvolvimento de um gráfico (ou tabela) da relação “O versus  $[2S/\Delta t + O]$ ”, onde:

$O$  – descarga média do reservatório no intervalo  $\Delta t$

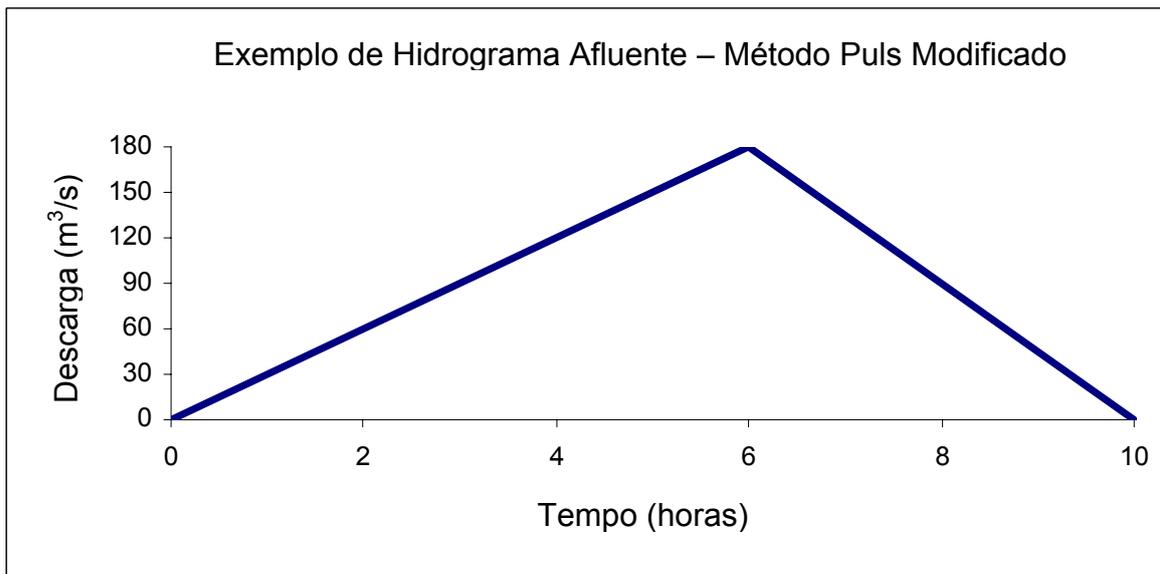
$S$  – armazenamento médio do reservatório no intervalo  $\Delta t$

$\Delta t$  – intervalo de tempo

Para isto uma relação nível – descarga – armazenamento deve ser conhecida.

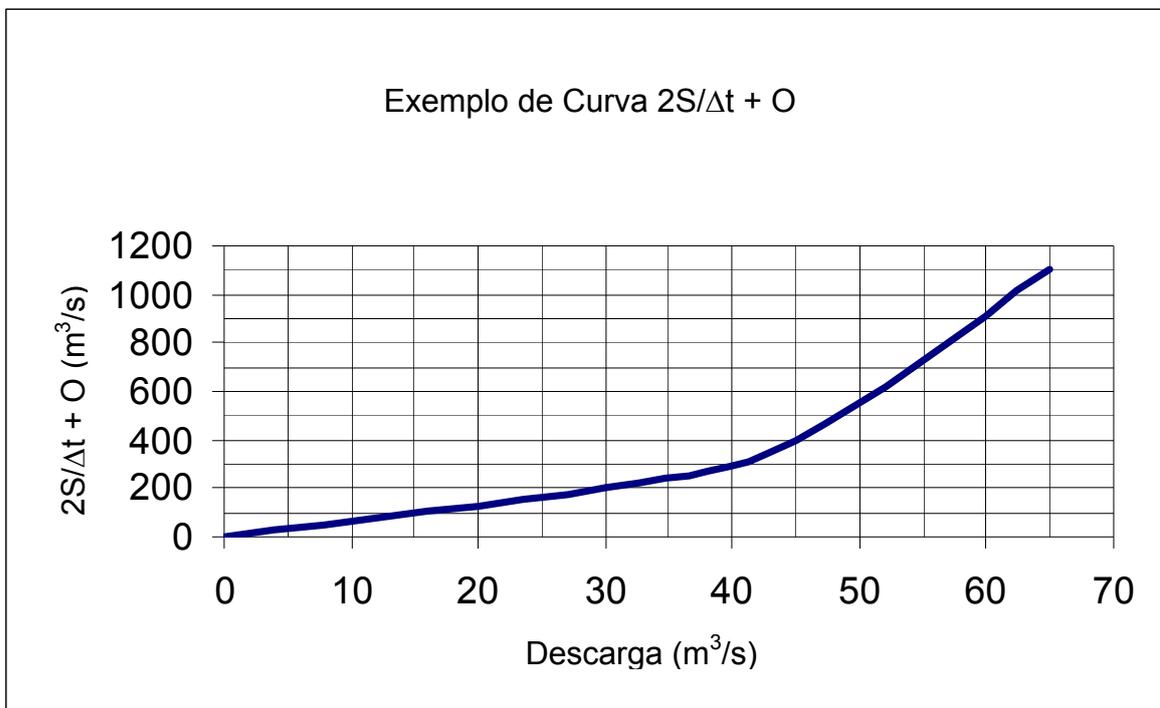
Dado o hidrograma abaixo e a curva  $2S/\Delta t + O$ , determina-se o Hidrograma de descarga para o reservatório assumindo-o completamente cheio no início do evento de precipitação e conseqüente cheia.

O seguinte hidrograma é dado:



**Figura 25:** Exemplo de Hidrograma Afluente – Método Puls Modificado.

A curva seguinte deve ser derivada através da curva cota x volume do reservatório e com a curva de descarga do órgão extravasador (soleira livre no caso da Barragem São Bento):



**Figura 26:** Exemplo de Curva  $2S/\Delta t + O$ .

Uma tabela também pode ser criada como segue abaixo:

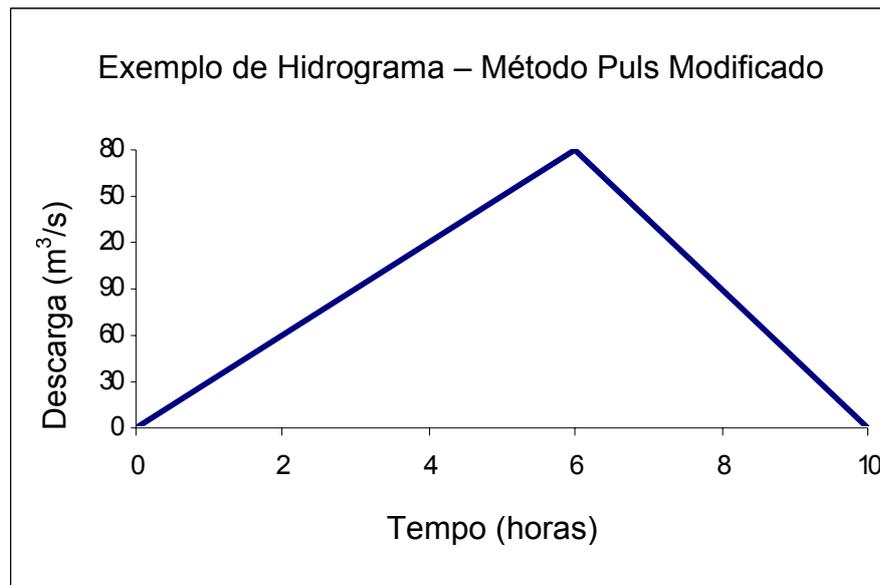
**Tabela 13:** Método Puls Modificado

Tempo (horas)	$I_n$ (m <sup>3</sup> /s)	$I_n+I_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)	$2S_n/\Delta t-O_n$ (m <sup>3</sup> /s)	$2S_n/\Delta t+O_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)	$O_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)
0					
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					

Utilizando-se o Hidrograma afluente insere-se os valores das descargas. Por exemplo, para a hora 1 a vazão afluente é de 30 m<sup>3</sup>/s.

**Tabela 14:** Método Puls Modificado

Tempo (horas)	$I_n$ (m <sup>3</sup> /s)	$I_n+I_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)	$2S_n/\Delta t-O_n$ (m <sup>3</sup> /s)	$2S_n/\Delta t+O_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)	$O_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)
0	0				
1	30				
2	60				
3	90				
4	120				
5	150				
6	180				
7	135				
8	90				
9	45				
10	0				
11	0				
12	0				



**Figura 27:** Exemplo de Hidrograma – Método Puls Modificado.

O próximo passo é adicionar a vazão atual a vazão afluyente do próximo intervalo de tempo. Portanto, para o primeiro espaço em branco a vazão é adicionada à vazão do intervalo da Hora 1 obtendo-se o valor 30.

**Tabela 15:** Método Puls Modificado

Tempo (horas)	$I_n$ (m³/s)	$I_n+I_{n+1}$ (m³/s)	$2S_n/\Delta t-O_n$ (m³/s)	$2S_n/\Delta t+O_{n+1}$ (m³/s)	$O_{n+1}$ (m³/s)
0	0	30			
1	30				
2	60				
3	90				
4	120				
5	150				
6	180				
7	135				
8	90				
9	45				
10	0				
11	0				
12	0				

Isto é repetido para todos os valores da coluna.

Tabela 16: Método Puls Modificado

Tempo (horas)	$I_n$ (m <sup>3</sup> /s)	$I_n+I_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)	$2S_n/\Delta t - O_n$ (m <sup>3</sup> /s)	$2S_n/\Delta t + O_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)	$O_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)
0	0	30			
1	30	90			
2	60	150			
3	90	210			
4	120	270			
5	150	330			
6	180	315			
7	135	225			
8	90	135			
9	45	45			
10	0	0			
11	0	0			
12	0	0			

A coluna correspondente a  $2S_n/\Delta t + O_n$  somada à primeira coluna pode ser calculada utilizando a seguinte equação:

$$I_1 + I_2 + \left( \frac{2S_1}{\Delta t} - O_1 \right) = \frac{2S_2}{\Delta t} + O_2$$

Note que  $2S_n/\Delta t - O_n$  e  $O_n + I$  se tornam iguais a zero.

Ou seja,

$$30 + 0 = 2S_n/\Delta t + O_n + I$$

Tabela 17: Método Puls Modificado

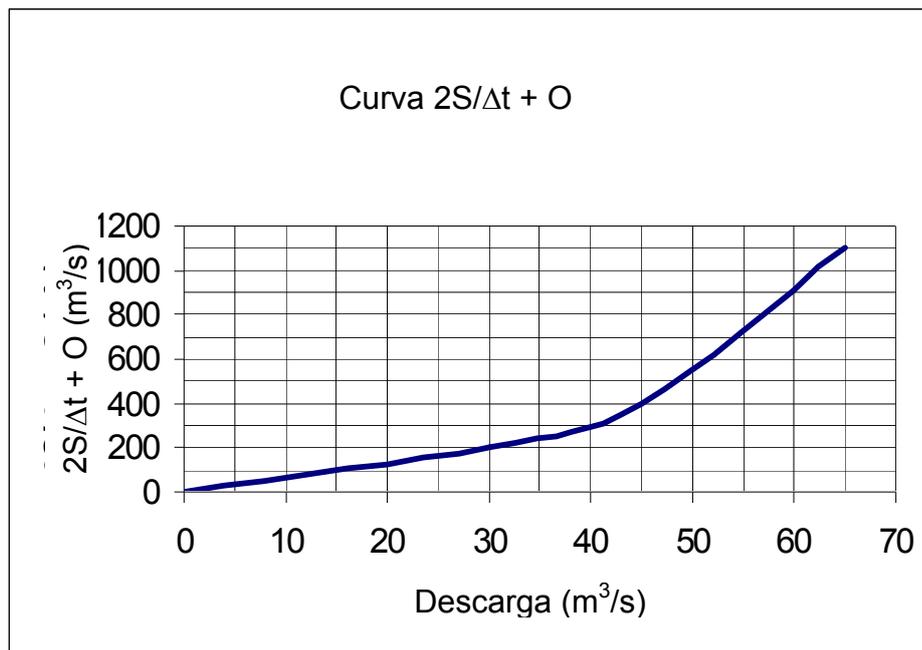
Tempo (horas)	$I_n$ (m <sup>3</sup> /s)	$I_n+I_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)	$2S_n/\Delta t - O_n$ (m <sup>3</sup> /s)	$2S_n/\Delta t + O_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)	$O_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)
0	0	30	0		0
1	30	90		30	
2	60	150			
3	90	210			
4	120	270			
5	150	330			
6	180	315			
7	135	225			
8	90	135			
9	45	45			
10	0	0			
11	0	0			
12	0	0			

Então, utilizando a curva disponível pode ser calculada a vazão defluente.

$$O = 5$$

**Tabela 18:** Método Puls Modificado

Tempo (horas)	$I_n$ (m <sup>3</sup> /s)	$I_n+I_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)	$2S_n/\Delta t - O_n$ (m <sup>3</sup> /s)	$2S_n/\Delta t + O_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)	$O_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)
0	0	30	0		0
1	30	90		30	5
2	60	150			
3	90	210			
4	120	270			
5	150	330			
6	180	315			
7	135	225			
8	90	135			
9	45	45			
10	0	0			
11	0	0			
12	0	0			



**Figura 28:** Curva  $2S/\Delta t + O$ .

Para se obter a coluna final,  $2S_n/\Delta t - O_n$ , o dobro da vazão defluente é subtraída da expressão  $2S_n/\Delta t + O_{n+1}$ .

No exemplo verifica-se:  $30 - 2*5 = 20$

Tabela 19: Método Puls Modificado

Tempo (horas)	$I_n$ (m <sup>3</sup> /s)	$I_n+I_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)	$2S_n/\Delta t-O_n$ (m <sup>3</sup> /s)	$2S_n/\Delta t+O_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)	$O_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)
0	0	30	0		0
1	30	90	20	30	5
2	60	150			
3	90	210			
4	120	270			
5	150	330			
6	180	315			
7	135	225			
8	90	135			
9	45	45			
10	0	0			
11	0	0			
12	0	0			

Estes passos são repetidos sucessivamente.

Primeiramente,  $90 + 20 = 110$

Da Curva dada, 110 equivale a uma vazão de 18 m<sup>3</sup>/s.

Finalmente,  $110 - 2*18 = 74$

Tabela 20: Método Puls Modificado

Tempo (horas)	$I_n$ (m <sup>3</sup> /s)	$I_n+I_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)	$2S_n/\Delta t-O_n$ (m <sup>3</sup> /s)	$2S_n/\Delta t+O_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)	$O_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)
0	0	30	0		0
1	30	90	20	30	5
2	60	150	74	110	18
3	90	210			
4	120	270			
5	150	330			
6	180	315			
7	135	225			
8	90	135			
9	45	45			
10	0	0			
11	0	0			
12	0	0			

Este processo pode ser repetido para o restante das colunas.

Uma lista de valores de vazões defluentes foi gerada e o problema está resolvido.

**Tabela 21:** Método Puls Modificado

Tempo (horas)	$I_n$ (m <sup>3</sup> /s)	$I_n+I_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)	$2S_n/\Delta t-O_n$ (m <sup>3</sup> /s)	$2S_n/\Delta t+O_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)	$O_{n+1}$ (m <sup>3</sup> /s)
0	0	30	0		0
1	30	90	20	30	5
2	60	150	74	110	18
3	90	210	160	224	32
4	120	270	284	370	43
5	150	330	450	554	52
6	180	315	664	780	58
7	135	225	853	979	63
8	90	135	948	1078	65
9	45	45	953	1085	65
10	0	0	870	998	64
11	0	0	746	870	62
12	0	0	630	746	58

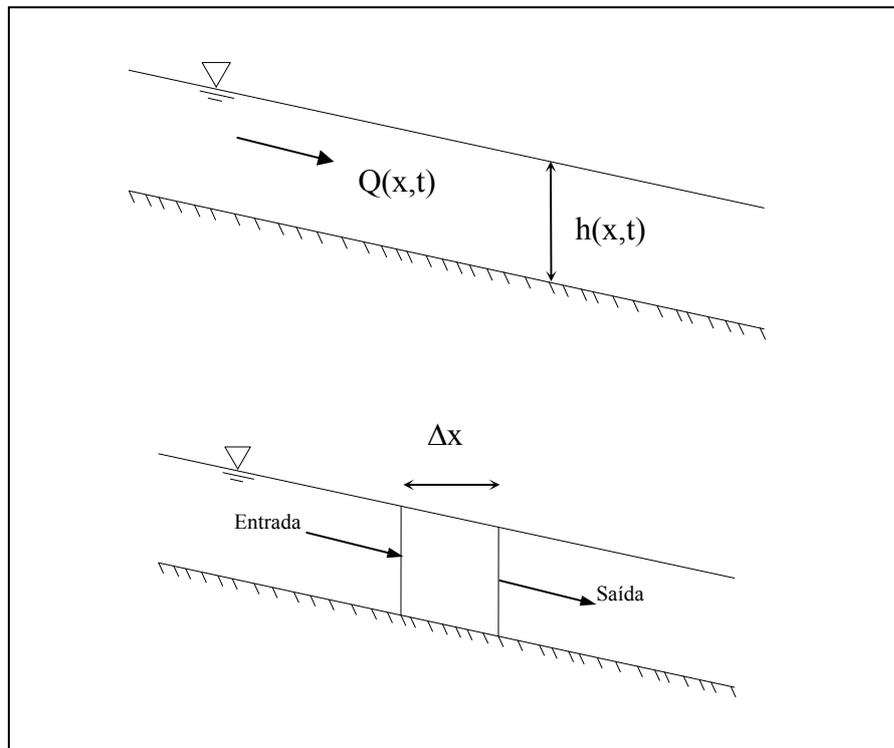
#### 5.4 MODELO HIDRÁULICO DE PROPAGAÇÃO EM CANAIS - HEC-RAS

Segundo Müller e Fill (2003), denomina-se propagação de vazões todo procedimento matemático cuja finalidade é determinar a vazão em um rio, canal, lago ou reservatório, como função do espaço e do tempo. Essencialmente, a propagação de vazões é um problema de escoamento não-permanente em canais, equacionado por Barré de Saint-Venant em 1870 através de um sistema de duas equações diferenciais parciais que levam o seu nome.

As leis físicas que governam os escoamentos em rios e canais são: (1) o princípio da conservação da massa (Continuidade), e (2) o princípio da conservação da quantidade de movimento. Estas leis podem ser expressas matematicamente na forma de equações diferenciais parciais, as quais serão referidas a seguir como a Equação da Continuidade e a Equação Dinâmica.

##### 5.4.1 Equação da Continuidade

Considere o volume de controle elementar apresentado na Figura 29. A distância  $x$  é medida longitudinalmente ao longo do canal. No ponto central do volume de controle a vazão e a área total de escoamento são descritas como  $Q(x,t)$  e  $A_T$ , respectivamente. A área total de escoamento é a soma da área ativa  $A$  e a área de armazenamento  $S$ , fora do canal.



**Figura 29:** Equação da Continuidade.  
Fonte: USACE (2001).

A conservação da massa para um volume de controle estabelece que a taxa média de escoamento entrando no volume é igual à taxa de mudança do armazenamento dentro do volume. A taxa de entrada de vazões no volume de controle pode ser dada como:

$$Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (16)$$

a taxa de saída de vazões como:

$$Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (17)$$

E a taxa de mudança no armazenamento:

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} \Delta x \quad (18)$$

Assumindo  $\Delta x$  muito pequeno, a mudança de massa no volume de controle é igual a:

$$\rho \frac{\partial A_t}{\partial t} \Delta x = \rho \left[ \left( Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) - \left( Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) + Q_l \right] \quad (19)$$

Onde  $Q_l$  é a descarga lateral entrando no volume de controle e  $\rho$  é a densidade do fluido. Simplificando e dividindo por  $\rho \Delta x$  gera-se a forma final:

$$\frac{\partial A_t}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (20)$$

Onde  $q_l$  é a descarga lateral por unidade de comprimento.

#### 5.4.2 Equação Dinâmica

A conservação da quantidade de movimento é expressa pela segunda Lei de Newton:

$$\sum F_x = \frac{d\vec{M}}{dt} \quad (21)$$

A Conservação da Quantidade de Movimento para um volume de controle estabelece que *a variação da quantidade de movimento entrando no volume de controle (fluxo de momento), por unidade de tempo, é igual ao somatório de todas as forças externas agindo sobre ele. É igual à taxa de acumulação de momento.* Esta é uma equação vetorial aplicada na direção  $x$ . O fluxo de quantidade de movimento (MV), ou fluxo de momento, é a massa do fluido multiplicado pelo vetor de velocidade na direção do escoamento. Três forças são consideradas: (1) pressão, (2) gravidade e (3) a força de atrito.

**Força de Pressão:** A Figura 30 ilustra o caso geral de uma seção transversal irregular. A distribuição de pressões é assumida como hidrostática (a pressão varia linearmente com a profundidade) e a força de pressão total é a integral do produto pressão-

área através da seção transversal. A força de pressão em qualquer ponto pode ser escrita assim:

$$F_p = \int_0^h \rho g (h - y) T(y) dy \quad (22)$$

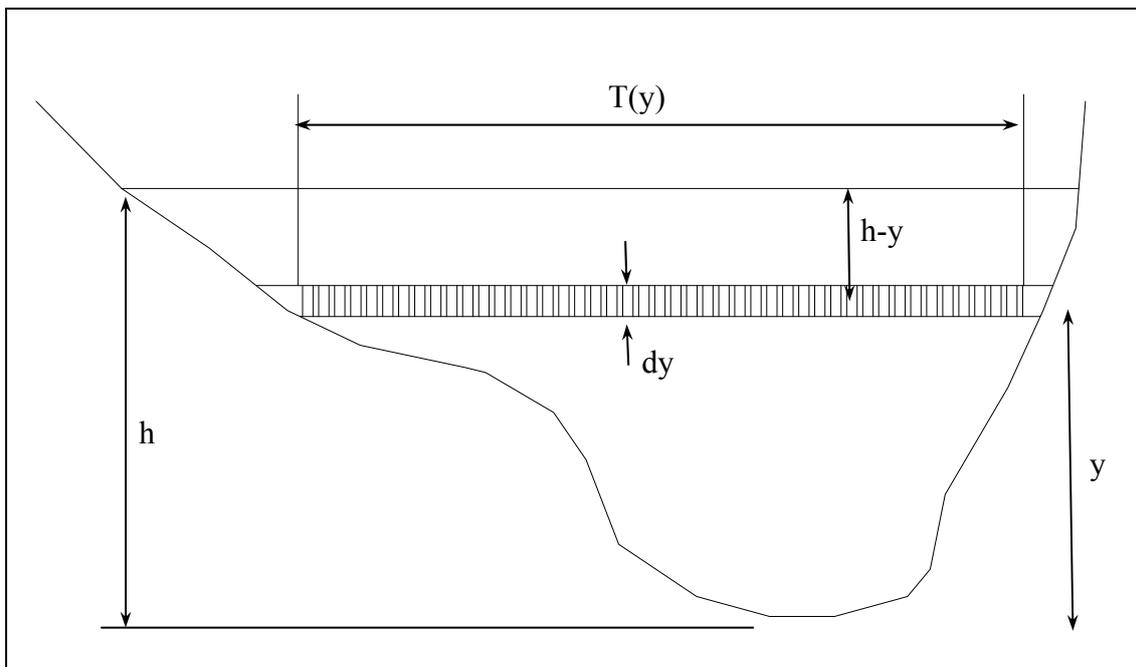
Onde  $h$  é a profundidade,  $y$  a distância acima do fundo do canal, e  $T(y)$  uma função de largura que relaciona a largura da seção transversal com a distância acima do fundo do canal.

Se  $F_p$  é a força de pressão na direção  $x$  no ponto central do volume de controle, a força na extremidade de montante do volume de controle pode ser escrita como:

$$F_p - \frac{\partial F_p}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (23)$$

E a extremidade de jusante como:

$$F_p + \frac{\partial F_p}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (24)$$



**Figura 30:** Equação Dinâmica – seção transversal irregular.

Fonte: USACE (2001).

A soma das forças de pressão para o volume de controle pode ser escrita como:

$$F_{P_n} = \left| F_P - \frac{\partial F_P}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right| - \left| F_P + \frac{\partial F_P}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right| + F_B \quad (25)$$

Onde  $F_{P_n}$  é a força de pressão líquida para o volume de controle, e  $F_B$  é a força exercida pelas margens na direção  $x$ , sobre o fluido. Isto pode ser simplificado para:

$$F_{P_n} = -\frac{\partial F_P}{\partial x} \Delta x + F_B \quad (26)$$

Diferenciando a equação de  $F_P$  acima e substituindo na equação acima resulta no seguinte:

$$F_{P_n} = -\rho g \Delta x \left[ \frac{\partial h}{\partial x} \int_0^h T(y) dy + \int_0^h (h-y) \frac{\partial T(y)}{\partial x} dy \right] + F_B \quad (27)$$

A primeira integral na equação acima é a área da seção transversal  $A$ . A segunda integral (multiplicada por  $-\rho g \Delta x$ ) é a força de pressão exercida pelo fluido sobre as margens, a qual é exatamente igual em magnitude, mas oposta na direção, a  $F_B$ . Portanto a força de pressão líquida pode ser escrita como:

$$F_{P_n} = -\rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x \quad (28)$$

**Força Gravitacional:** A força devido à gravidade sobre o fluido no volume de controle, na direção  $x$ , é:

$$F_g = \rho g A \sin \theta \Delta x \quad (29)$$

Onde  $\theta$  é o ângulo que o fundo do canal faz com a horizontal. Para rios naturais  $\theta$  é pequeno e  $\sin \theta \approx \tan \theta = -\delta Z_0 / \delta X$ , onde  $z_0$  é a elevação do fundo do canal. Portanto, a força gravitacional pode ser escrita como:

$$F_g = -\rho g A \frac{\partial Z_0}{\partial x} \Delta x \quad (30)$$

Esta força será positiva para declividades de leito negativas.

**Força de Atrito**: Forças de atrito entre a superfície lateral da calha e o escoamento podem ser escritas como:

$$F_f = -\tau_0 \cdot P \cdot \Delta x \quad (31)$$

Onde  $\tau_0$  é a média das tensões cisalhantes (força/unidade de área) agindo nos limites do fluido, e P é o perímetro molhado. O sinal negativo indica que, com o escoamento na direção positiva de  $x$ , a força age na direção negativa da direção  $x$ . Da análise dimensional,  $\tau_0$  pode ser expressa em termos de coeficiente de empuxo,  $C_D$ , como segue:

$$\tau_0 = \rho \cdot C_D \cdot V^2 \quad (32)$$

O coeficiente de empuxo pode ser relacionado ao Coeficiente de Chezy C:

$$C_D = g / C^2 \quad (33)$$

Além disso, a equação de Chezy pode ser escrita como:

$$V = C \sqrt{RS_f} \quad (34)$$

Substituindo e simplificando as equações acima, gera-se a seguinte expressão para a força de atrito:

$$F_f = -\rho \cdot g \cdot A \cdot S_f \cdot \Delta x \quad (35)$$

Onde  $S_f$  é a declividade da linha de energia, a qual é positiva para o escoamento na direção positiva de  $x$ . O valor de  $S_f$  deve ser relacionado à vazão de escoamento e à referência de nível (cota). Para isso, tradicionalmente, as equações de Manning e de Chezy têm sido utilizadas. A equação de Manning é a utilizada no programa HEC-RAS. A equação de Manning é escrita assim:

$$S_f = \frac{Q|Q|n^2}{2,208.R^{4/3}.A^2} \quad (36)$$

Onde  $R$  é o raio hidráulico e  $n$  é o coeficiente de atrito de Manning.

**Fluxo de Quantidade de Movimento:** Com a definição das três forças atuantes, pode-se definir o fluxo de quantidade de movimento. O fluxo que entra no volume de controle pode ser apresentado como abaixo:

$$\rho \left[ QV - \frac{\partial QV}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right] \quad (37)$$

E o fluxo deixando o volume de controle pode ser escrito como:

$$\rho \left[ QV + \frac{\partial QV}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right] \quad (38)$$

Portanto a taxa líquida de quantidade de movimento (fluxo de momento) entrando no volume de controle é:

$$- \rho \frac{\partial QV}{\partial x} \Delta x \quad (39)$$

Desde que a quantidade de movimento do volume de controle é  $\rho Q \Delta x$ , a taxa de acumulação da quantidade de movimento pode ser escrita como:

$$\frac{\partial(\rho Q \Delta x)}{\partial t} = \rho \Delta x \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (40)$$

O princípio da conservação da quantidade de movimento pode ser assim colocado:

*A taxa líquida de quantidade de movimento (Fluxo do Momento) entrando no volume de controle adicionado à soma de todas as forças externas atuantes no volume é igual à taxa de acumulação da quantidade de movimento.*

Portanto temos:

$$\rho \Delta x \frac{\partial Q}{\partial t} = -\rho \frac{\partial QV}{\partial x} \Delta x - \rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x - \rho g A \frac{\partial Z_0}{\partial x} \Delta x - \rho g A S_f \Delta x \quad (41)$$

A elevação da superfície da água,  $Z$ , é igual a  $Z_0 + h$ . Portanto:

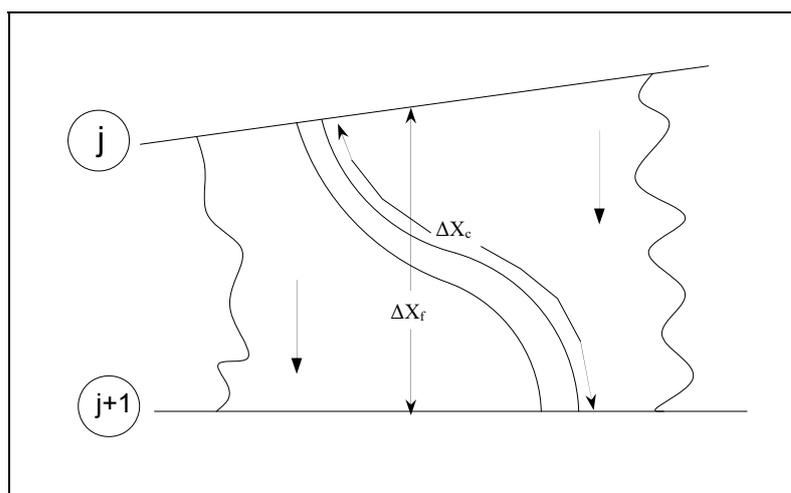
$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial Z_0}{\partial x} \quad (42)$$

Onde  $\frac{\partial Z}{\partial x}$  é a declividade da linha superfície d'água. Substituindo e dividindo a equação por  $\rho \Delta x$  e movendo todos os termos para a esquerda tem-se a forma final:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial Z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (43)$$

### 5.4.3 Aplicação das equações do regime não permanente no programa HEC-RAS

Na Figura 31 se ilustra as características bidimensionais da interação entre o canal e as descargas da planície de inundação. Quando o rio está subindo a água se move lateralmente do canal para as margens, inundando a planície de inundação, preenchendo as áreas de armazenamento disponíveis. Com o aumento da profundidade a planície de inundação começa a conduzir água para jusante através de um caminho mais curto que pode não ser o do canal principal. Quando o rio está caindo, a água se move das margens em direção ao canal suprindo as vazões do canal principal.



**Figura 31:** Representação de uma planície de inundação.

Fonte: USACE (2001).

Devido à direção original do fluxo ser orientada pelo canal, o escoamento bidimensional pode, muitas vezes, ser aproximado por uma representação unidimensional. Os pequenos lagos fora do curso principal do rio podem ser modelados com áreas de armazenamento que trocam água com o canal. O escoamento pela planície de inundação pode ser aproximado como escoamento por um canal separado.

O problema canal/planície de inundação tem sido abordado de diferentes formas. Uma visão comum é ignorar-se a condução da água pelo “*overbank*”, ou melhor, área de

extravasamento do canal principal do rio, assumindo que a área de extravasamento é utilizada apenas para armazenamento. Este critério pode ser aplicado para rios de grande largura tal como o rio Mississippi, nos U.S.A., onde o canal está confinado por diques e a planície de inundação restante é densamente vegetada ou uma área de armazenamento extra-canal. Fread (1976) e Smith (1978) abordaram o problema dividindo o sistema em dois canais separados e aplicando as equações da continuidade e do momento para cada canal. Para simplificar o problema assumiu-se uma superfície horizontal da superfície d'água em cada seção transversal, normal à direção do escoamento, tal que a troca de momentos entre o canal e a planície de inundação fosse desprezível e que a descarga fosse distribuída de acordo com a capacidade de condução, isto é:

$$Q_c = \phi \cdot Q \quad (44)$$

Onde:

$Q_c$  = vazão no canal principal

$Q$  = vazão total

$\phi = K_c / (K_c + K_f)$

$K_c$  = condução no canal

$K_f$  = condução na planície de inundação (área de extravasamento)

Com estas asserções e critérios, as equações unidimensionais de movimento podem ser combinadas num único conjunto, ou seja:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(\phi Q)}{\partial x_c} + \frac{\partial[(1-\phi)Q]}{\partial x_f} = 0 \quad (45)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\phi^2 Q^2 / A_c)}{\partial x_c} + \frac{\partial((1-\phi)^2 Q^2 / A_f)}{\partial x_f} + gA_c \left[ \frac{\partial Z}{\partial x_c} + S_{fc} \right] + gA_f \left[ \frac{\partial Z}{\partial x_f} + S_{ff} \right] = 0 \quad (46)$$

Onde os subscritos  $c$  e  $f$  referem-se ao canal e à planície de inundação ou área de extravasamento, respectivamente. Estas equações foram aproximadas utilizando-se diferenças finitas implícitas e resolvendo numericamente usando a técnica de iteração de Newton-Raphson. Este modelo teve sucesso e produziu efeitos desejados em diversos testes.

Oscilações numéricas, entretanto, podem ocorrer quando a vazão em um nó, nos limites de uma célula de diferenças finitas, está junto à margem e o escoamento, em outro nó, não está.

Expandindo o trabalho de Fread (1976), Smith (1978) e Barkau (1982) manipulou as equações de diferenças finitas para o canal e para a planície de inundação e definiu um novo conjunto que era computacionalmente mais conveniente. Usando um fator de distribuição das velocidades ele combinou os termos convectivos. Além disso, definindo um novo caminho equivalente do escoamento, Barkau substituiu os termos com o ângulo de atrito, ou coeficiente de atrito, por uma força equivalente.

As equações derivadas por Barkau formam a base para a solução dos escoamentos de regime não permanente para o Programa HEC-RAS.

A equação da continuidade e a equação dinâmica, já na sua forma final de um esquema implícito de diferenças finitas, são apresentadas como abaixo:

### EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE

$$\Delta Q + \frac{\Delta A_c}{\Delta t} \Delta x_c + \frac{\Delta A_f}{\Delta t} \Delta x_f + \frac{\Delta S}{\Delta t} \Delta x_f - \bar{Q}_l = 0 \quad (47)$$

Onde:

$\bar{Q}_l$	=	escoamento lateral médio
$x$	=	distância ao longo do canal
$t$	=	tempo
$Q$	=	vazão
$A$	=	área da seção transversal
$S$	=	armazenamento das partes de não condução da seção transversal
$q_l$	=	vazão lateral por unidade de distância

### EQUAÇÃO DINÂMICA

$$\frac{\Delta(Q_c \Delta x_c + Q_f \Delta x_f)}{\Delta t} + \Delta(\beta V Q) + g \bar{A} \Delta Z + g \bar{A} \bar{S}_f \Delta x_e = 0 \quad (48)$$

Uma forma mais familiar é obtida dividindo-se ambos os membros por  $\Delta x_e$ :

$$\frac{\Delta(Q_c \Delta x_c + Q_f \Delta x_f)}{\Delta t \Delta x_e} + \frac{\Delta(\beta V Q)}{\Delta x_e} + g \bar{A} \left( \frac{\Delta Z}{\Delta x_e} + \bar{S}_f \right) = 0 \quad (49)$$

Onde:

$g$	=	aceleração da gravidade
$S_f$	=	declividade ou coeficiente de atrito para a seção transversal inteira
$V$	=	velocidade
$M_c$	=	fluxo de momento no canal
$M_f$	=	fluxo de momento na planície de inundação
$\Delta x_e$	=	caminho de escoamento equivalente
$\beta$	=	fator de distribuição de velocidades (coeficiente de Boussinesq)

$$\Delta x_c M_c = -\Delta x_f M_f \quad (50)$$

$$A = \bar{A}_c + \bar{A}_f \quad (51)$$

$$\beta = \frac{(V_c^2 \cdot A_c + V_f^2 \cdot A_f)}{V^2 \cdot A} = \frac{(V_c Q_c + V_f Q_f)}{QV} \quad (52)$$

O Programa HEC-RAS considera também forças adicionais provocadas, por exemplo, por pilares de pontes, barragens para a navegação e ensecadeiras que restringem o escoamento e exercem forças que se opõem ao próprio escoamento.

Em junções de rios a quantidade de movimento, assim como a massa do escoamento de um tributário, é adicionada ao rio receptor. O HEC-RAS também considera esta característica da junção de rios.

Se o esquema implícito de diferenças é aplicado fica o problema da solução de equações não lineares. Fread (1976) e outros resolveram as equações não lineares através da técnica iterativa de Newton-Raphson como já citado anteriormente. Para evitar a solução não linear, Chen (1973) desenvolveram uma técnica de linearização daquelas equações e esta foi a solução adotada no Programa HEC-RAS.

As diversas equações de diferenças finitas adotadas e condições de contorno encontram-se disponíveis em HEC (2006) bem como o detalhamento da solução matemática e

computacional utilizada para a resolução do conjunto de equações lineares que se forma a cada intervalo de tempo.

## 5.5 MAPEAMENTO DE PLANÍCIES DE INUNDAÇÃO

Para o mapeamento das planícies de inundação, foi desenvolvido um Sistema de Informações Geográficas para a bacia hidrográfica do rio São Bento, utilizando o ArcGis 9.1.

O ArcGIS é uma coleção integrada de produtos SIG para a construção de um completo Sistema de Informações Geográficas. O ArcGIS capacita os usuários a desdobrar as funcionalidades do SIG onde quer que seja necessário – em computadores pessoais, servidores, ou aplicações personalizadas, na Internet ou em campo.

A base cartográfica do estudo foi desenvolvida de acordo com as seguintes etapas:

1. Obtenção de dados altimétricos, através da correlação de matrizes de imagens digitais obtidas de sensores instalados em satélites;
2. Geração de Ortofoto Digital, a correção de distorções, permitindo a medida de distâncias sobre a imagem em escala apropriada;
3. Levantamento de dados cadastrais, tais como ruas, lotes, edificações, através de dados secundários e coleta de pontos de controle na região de estudo;
4. Compilação de sistema, através da conversão de dados e elaboração do SIG propriamente dito.

### 5.5.1 Modelo digital de elevação da área total do trecho jusante

Neste procedimento utilizou-se como produto fonte, o par estereoscópico do instrumento ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). O ASTER é um dos Instrumentos a bordo do satélite EOS AM-1 e obtém imagens de alta resolução (15 a 90 m) da Terra nas regiões dos espectros Visível, Infravermelho Próximo (VNIR); Infravermelho médio (SWIR); Infravermelho Térmico (TIR). A correlação de matrizes do produto destes sensores possibilita a extração de dados altimétricos com resolução espacial plana de 15 metros.

Após a extração foi realizada a calibração do Modelo Digital de Elevação – MDE relativo com base em GCPs (pontos de controles georreferenciados) obtidos em campo com RMSE (Erro Médio Quadrático) de 5 mm, através de um equipamento DGPS – Diferencial

Global Positioning System que dá o posicionamento geográfico através de uma constelação de satélites. Este trabalho foi contratado com a empresa ORBTEC Geotecnologias. O procedimento de calibração diferencial é realizado a partir da extração de um coeficiente espacialmente distribuído relativo à diferença de valores altimétricos dos GCPs e o MDE relativo.

Como etapa final do processo foi realizada a extração de curvas de níveis com equidistância de dez metros e RMSE horizontal de 15 metros e vertical de 10 metros, sendo estes valores inversamente proporcionais à distância dos GCPs. Importante considerar que os dados altimétricos são gerados por processo estereofotogramétrico e recebem a interferência de elementos da superfície imageada (árvores, edificações, etc.) e não exclusivamente do terreno.

#### 5.5.2 Modelo digital de elevação das comunidades

Utilizou-se como produto fonte pontos de controles com RMSE de 5 milímetros e par estereofotogramétrico ASTER. Os pontos de controles foram coletados com distribuição homogênea em cantos de quadra, visando uma calibração uniforme do modelo altimétrico relativo.

Os GCPs (pontos de controles) foram coletados com receptor GPS Trimble (L1 e L2) com RMSE horizontal e vertical de 5 milímetros. A integração de GCPs e MDE foi realizada a partir da extração de um coeficiente de calibração específico das duas áreas de estudo: Comunidade São Bento Alto e São Bento Baixo.

Como etapa final do processo foi realizada a extração de curvas de níveis com equidistância interpolada de 1 metro e RMSE horizontal de 2 metros e vertical de 2,5 metros, sendo estes valores diretamente proporcionais à distância dos GCPs.

#### 5.5.3 Ortofoto

A partir da utilização de GCPs foi realizado o georreferenciamento para ortorretificação e mosaicagem de aerofotografias coloridas do ano de 2003 com resolução espacial de 2 metros.

#### 5.5.4 Dados cadastrais

Para a integração com dados altimétricos, nas áreas de interesse das comunidades de São Bento Alto e Baixo foram integrados os mapas cadastrais disponibilizados pela CASAN, do levantamento cadastral de 2003.

#### 5.5.5 Compilação do sistema

O cruzamento de dados altimétricos e planimétricos possibilita a tomada de decisões no planejamento espacial das áreas de estudo.

Nesta perspectiva o MDE, ortofoto e plantas cadastrais são integrados em um SIG (Sistema Informações Geográficas). Nesta etapa os dados foram inseridos em plataforma ESRI (ArcGis 9.1) sendo realizada a criação de planos de informações (layers) com atributos cartográficos (topônimos) e integração em banco de dados georreferenciado (geodatabase).

Foram gerados planos de informações para as faixas de valores altimétricos selecionados, com classificação de um metro para a área das comunidades de São Bento Alto e São Bento Baixo e classificação de dez metros para a área total de interesse do trecho jusante da bacia hidrográfica do rio São Bento. Esses planos de informações integrados em ambiente ArcReader subsidiam a elaboração de documentos cartográficos das diferentes situações de cheias bem como a abrangência das mesmas nas unidades espaciais das comunidades atingidas.

O procedimento final desta etapa é a compilação de um sistema de leitura e análise dos dados em ArcReader para manipulação e análise a partir do intercruzamento espacial das informações.

## **6 APLICAÇÃO DO SISTEMA DE PREVISÃO DE INUNDAÇÕES À BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO BENTO**

Com a definição metodológica dos componentes do sistema iniciou-se a etapa de sua aplicação ao ambiente específico da bacia do rio São Bento. Primeiramente foram selecionados os cenários que contemplam eventos significativos de chuva dentre os registros da série histórica existente, disponibilizadas pelo sistema de supervisão e controle da Barragem São Bento da CASAN. Na seqüência, os dados selecionados foram carregados no sistema já parametrizado para a bacia em questão, procedendo-se então à simulação dos cenários selecionados.

### **6.1 DADOS DE PRECIPITAÇÃO E VAZÕES AFLUENTES**

Os dados de precipitação fornecidos pela CASAN referem-se ao posto pluviométrico localizado na Barragem São Bento, contendo registros entre agosto/2004 e novembro/2006. Este período coincide com a etapa de operação efetiva do reservatório.

No Anexo 1 é apresentada a tabulação dos dados utilizados, destacando-se as aflúências médias naturais ao reservatório e os registros dos totais pluviométricos coletados na estação pluviométrica instalada junto ao local do barramento. A Tabela 22 abaixo indica os eventos de cheia escolhidos da série histórica disponível, onde o critério de escolha baseou-se na busca das seguintes características:

- a) eventos de cheias com totais precipitados mais significativos correspondendo a aflúências naturais bem superiores à media histórica; e
- b) eventos com totais precipitados menores, porém também significativos (bem maiores do que a média), que correspondem a hidrogramas afluentes bem definidos, ou seja, com poucas oscilações.

**Tabela 22:** Eventos de cheias selecionados

Nº. ordem cronológica	Período	Duração (dias)	Vazão de Pico (m <sup>3</sup> /s)	Precipitação (mm)
1	22/03/2005 a 25/03/2005	4	98,98	109,1
2	03/09/2005 a 05/09/2005	3	33,92	112,3
3	08/10/2005 a 09/10/2005	2	32,83	24,6
4	27/10/2005 a 30/10/2005	4	44,60	53,0
5	31/01/2006 a 01/02/2006	2	61,11	47,3
6	25/03/2006 a 28/03/2006	4	168,65	151,4
7	10/05/2006 a 12/05/2006	3	60,78	81,0
8	16/08/2006 a 18/08/2006	2	60,29	73,7

Como a meta principal desta etapa é a simulação de eventos reais e a simulação de cenários previstos por um modelo de previsão de totais precipitáveis, foram obtidas as previsões quantitativas de chuva determinadas pelo Modelo ARPS realizado pelo prof. Reinaldo Haas, UFSC. A Tabela 23 mostra e compara os valores dos totais de chuva registrados e os valores previstos.

**Tabela 23:** Principais eventos de chuva observados na estação Barragem São Bento e simulados pelo ARPS

Evento	Data	Total precipitado (mm)		Duração estimada (horas)	
		Observado	Simulado	Observado	Simulado
1	22/03/2005	109,1	49,34	32	54
2	04/09/2005	26,8	22,59	11	14
3	08/10/2005	24,3	24,05	14	61
4	27/10/2005	43,1	120,84	11	68
5	31/01/2006	47,3	0,28	5	7
6	25/03/2006	151,4	41,60	19	17
7	10/05/2006	81,0	21,06	20	44
8	16/08/2006	41,3	-	11	-

Fonte: Dados Observados – CASAN/ Dados simulados: UFSC – modelo ARPS

A discrepância entre os valores de precipitação registrados junto à barragem e os valores previstos pelo Modelo ARPS indicam um desvio que pode ser justificado pela imprecisão do método de previsão ou mesmo pela imprecisão dos totais coletados. Para se verificar esta inconsistência optou-se por pesquisar as alturas de chuvas ocorridas em postos pluviométricos da região, tais como as estações Serrinha (Cód. 02849029) e Forquilha (Cód. 02849006).

A Tabela 24 compara os dados de chuvas dos eventos pesquisados e demonstra que as chuvas registradas na barragem indicam quase sempre valores muito maiores do que aquelas registradas nas estações pluviométricas vizinhas. Portanto, esta verificação preliminar indica a necessidade de outros pontos de medições na bacia para garantir um bom resultado

no modelo de simulação hidrológica, ao se utilizar o critério de uma chuva homogênea espacialmente.

**Tabela 24:** Comparação entre dados de precipitação entre a estação pluviométrica Barragem São Bento e estações vizinhas

<b>Data</b>	<b>Estação Serrinha (02849029)</b>	<b>Estação Forquilha (02849006)</b>	<b>Estação Barr. São Bento (02849034)</b>
24/11/00	0,0	0,0	-
10/11/02	19,8	21,4	-
21/12/02	8,6	8,7	10,0
22/03/05	1,5	0,8	1,3
04/09/05	50,6	21,5	26,8
08/10/05	3,0	2,3	11,8
29/10/05	9,1	9,8	9,9
31/01/06	0,0	-	0,1
25/03/06	0,0	0,0	0,0
10/05/06	22,9	33,0	32,1
16/08/06	34,1	11,7	41,3

Fonte: EPAGRI/ CIRAM

Com o uso do modelo de previsão quantitativa de chuvas ARPS, foram determinados os totais precipitados para cinco pontos localizados na bacia do rio São Bento. O experimento foi feito com o modelo ARPS rodando de janeiro/2005 a junho/2006. As coordenadas dos 5 pontos escolhidos são as seguintes:

- SB1= longitude = - 49.559532, latitude =-28.609378, próximo da comporta da barragem
- SB2 = longitude =-49.553070, latitude =-28.509838, ao norte da represa
- SB3 = longitude =-49.665489, latitude =-28.604134, a oeste da represa
- SB4 = longitude =-49.561616, latitude =-28.705340, ao sul da represa
- SB5 = longitude =- 49.447800, latitude =-28.612827, a leste da represa

A discrepância na duração dos eventos provavelmente deve-se ao fato de que a estação pluviométrica da Barragem São Bento não dispõe de pluviógrafo, equipamento que determina exatamente a duração e a intensidade das precipitações. A duração dos valores observados foi estimada a partir da análise dos hidrogramas e dos hietogramas diários de chuvas registradas.

## 6.2 PARÂMETROS DO MODELO HIDROLÓGICO

### 6.2.1 Cálculo do hidrograma unitário sintético

Os dados levantados para a bacia do rio São Bento resultaram nos seguintes valores:

- área de drenagem na seção da Barragem São Bento:  $A = 113,79 \text{ km}^2$ ;
- comprimento do rio principal, da barragem até o divisor de bacia:  $L = 14.928,00 \text{ m}$ ;
- distância da seção da barragem ao ponto do rio mais próximo do centro de gravidade da bacia:  $L_a = 5.872,00 \text{ m} = 5,9 \text{ km}$ ;
- coeficientes  $C_t$  e  $C_p$  adotados:  $C_t = 2,0$  e  $C_p = 0,6$ .

Aplicando-se as equações apresentadas no capítulo 5 anterior, temos:

- Tempo de retardamento em horas

$$t_p = \left( \frac{C_t}{1,33} \right) (L \cdot L_a)$$

$$t_p = 5,76 \text{ horas}$$

- Tempo de duração da precipitação

$$t_r = \left( \frac{t_p}{5,5} \right)$$

$$t_r = 1,05 \text{ horas}$$

- Adoção de  $t_r = 1,0$  hora e corrigindo-se  $t_p$  para  $t'_p$

$$t'_p = t_p + \frac{t_R - t_r}{4}$$

$$t'_p = 3,72 \text{ dias}$$

- Vazão de pico do Hidrograma Unitário Sintético

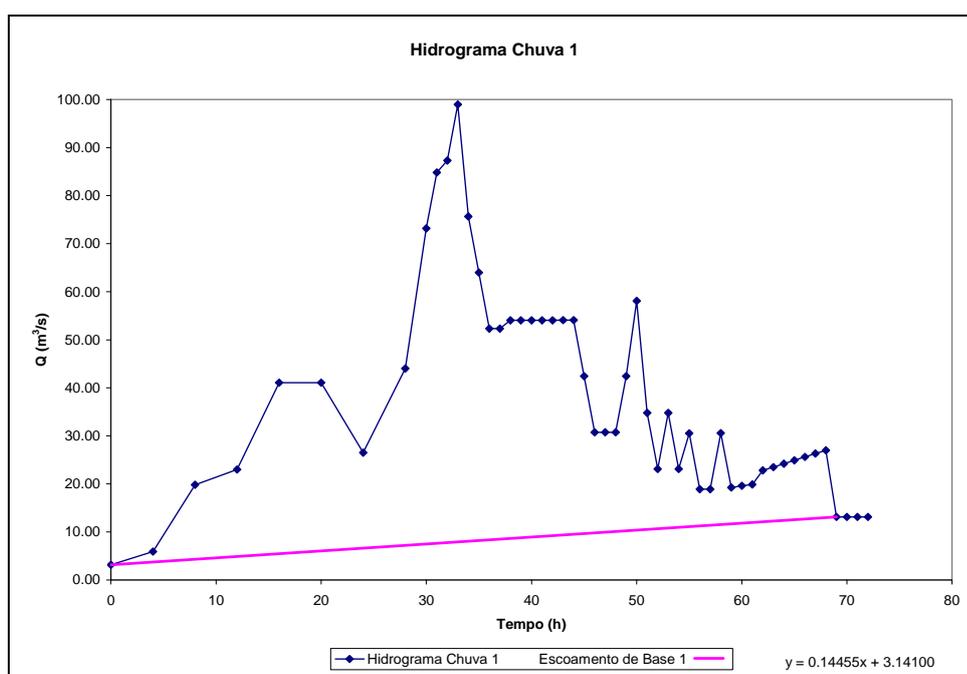
$$Q_p = \frac{2,76 \times C_p \times A}{t'_p}$$

$$Q_p = 32,77 \text{ m}^3/\text{s}$$

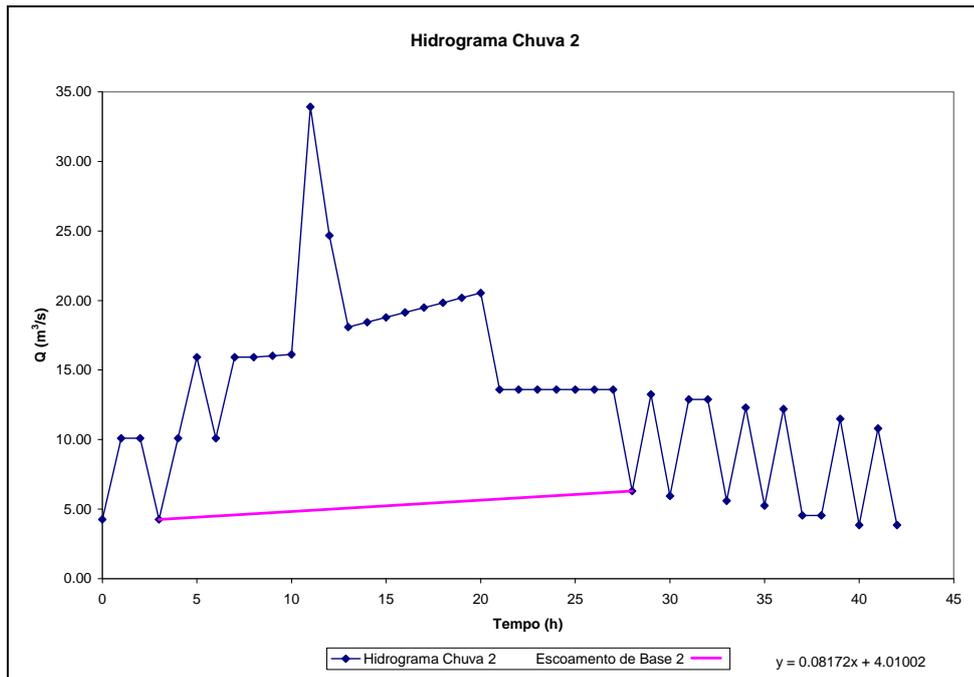
O tempo base estimado pela equação indicada por Snyder parece ser irreal, dadas as dimensões da bacia e o tempo de duração da precipitação. Portanto, a definição da forma final do hidrograma unitário sintético baseou-se fundamentalmente no princípio de que o volume integrado sob este hidrograma deve corresponder a uma chuva efetiva de 1 cm sobre toda a bacia.

Analisando-se hidrogramas ocorridos (eventos escolhidos indicados na Tabela 22), definiu-se um hidrograma adimensional típico para a bacia estudada, dando assim um formato inicial para o Hidrograma Unitário Sintético almejado. Os hidrogramas extraídos da pequena série histórica reconstituída pelos dados operativos da Barragem São Bento são apresentados nas Figuras 32 a 39 abaixo. O Hidrograma Unitário Sintético derivado do hidrograma adimensional acima citado, e ajustado conforme a metodologia de Snyder, está apresentado na Figura 40.

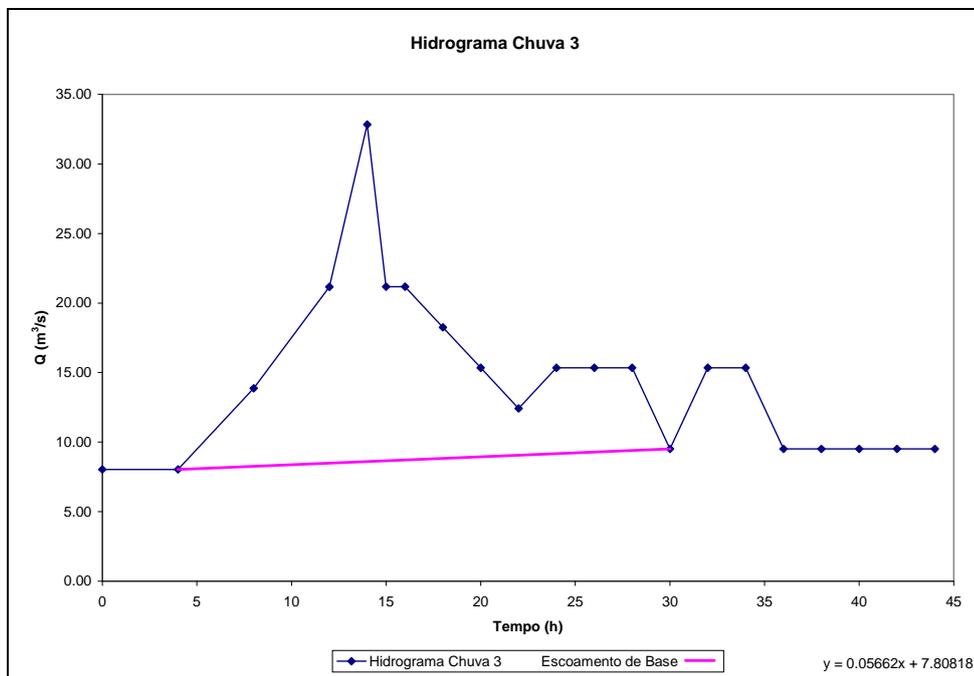
Ressalta-se que as flutuações verificadas nas vazões registradas pela central de operação da barragem São Bento devem ocorrer pela imprecisão das leituras de níveis do reservatório e pela própria precisão da curva de armazenamento (curva cota x volume).



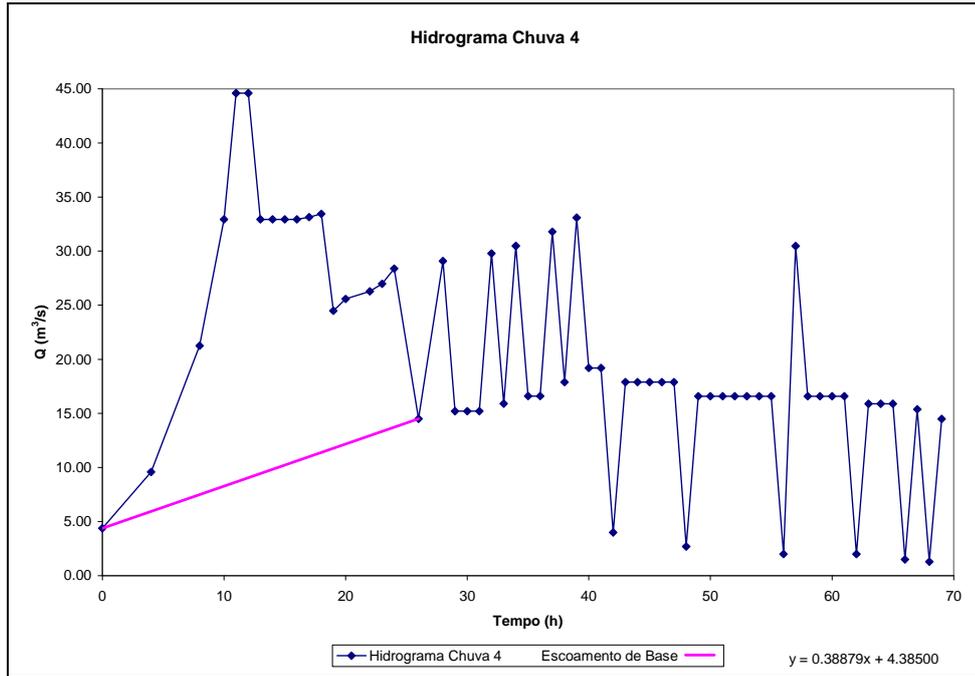
**Figura 32:** Hidrograma para chuva 1.



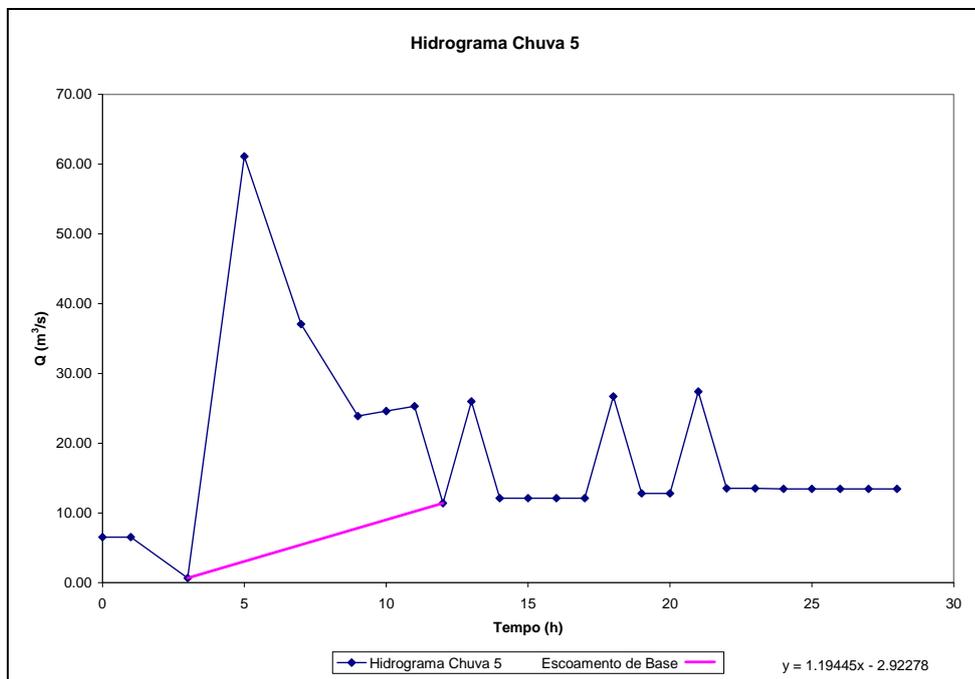
**Figura 33:** Hidrograma para chuva 2.



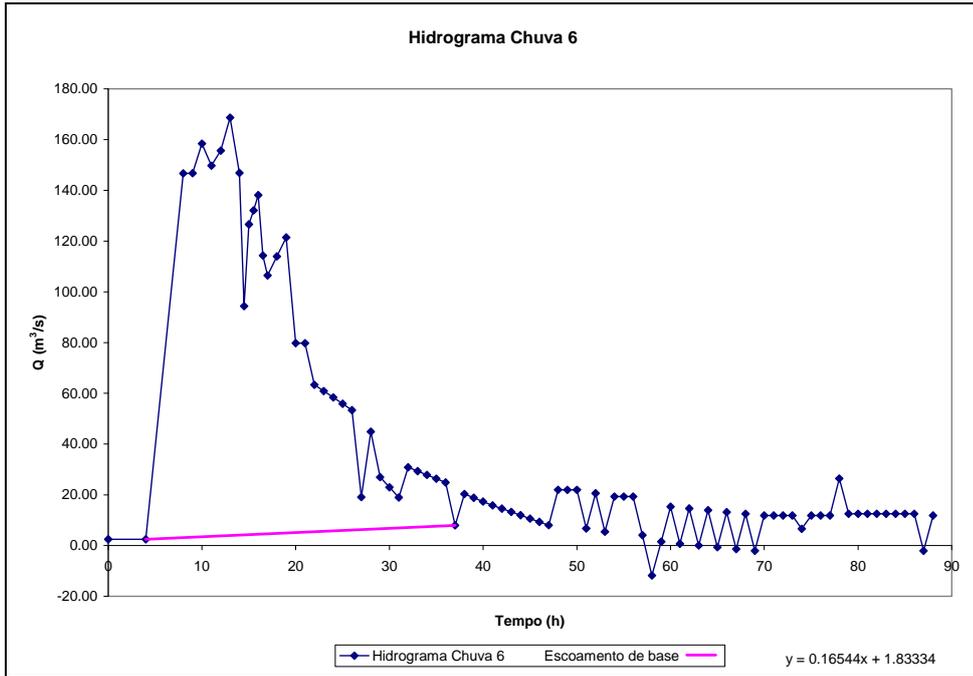
**Figura 34:** Hidrograma para chuva 3.



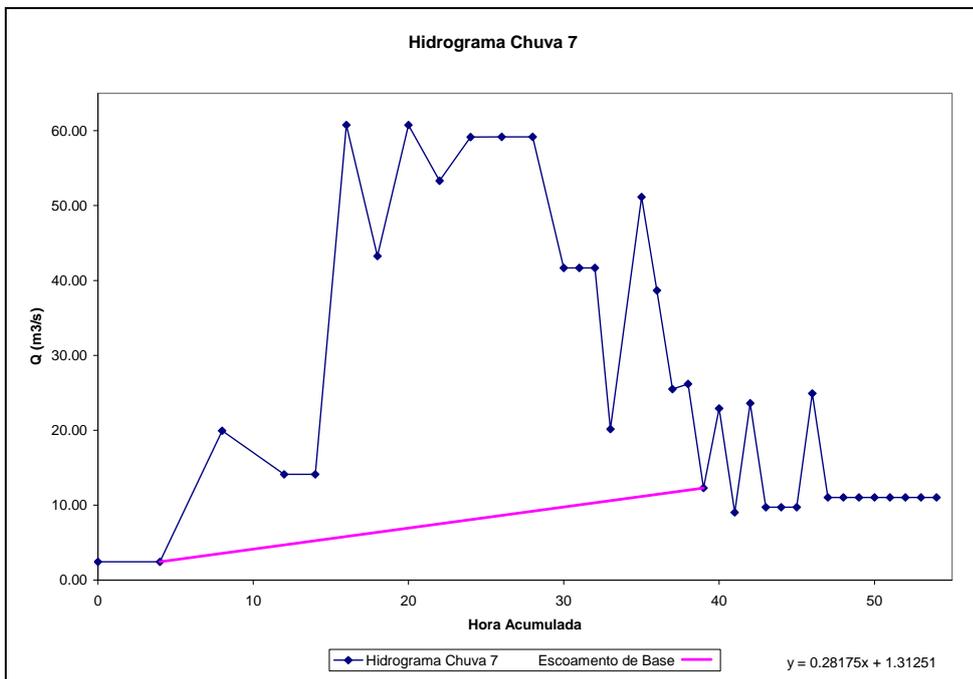
**Figura 35:** Hidrograma para chuva 4.



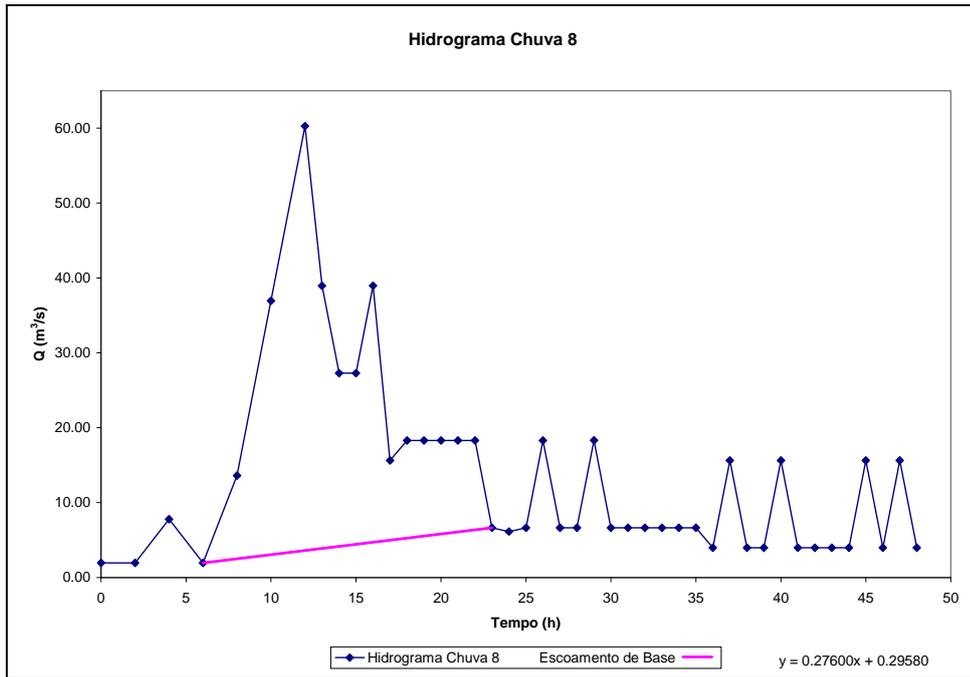
**Figura 36:** Hidrograma para chuva 5.



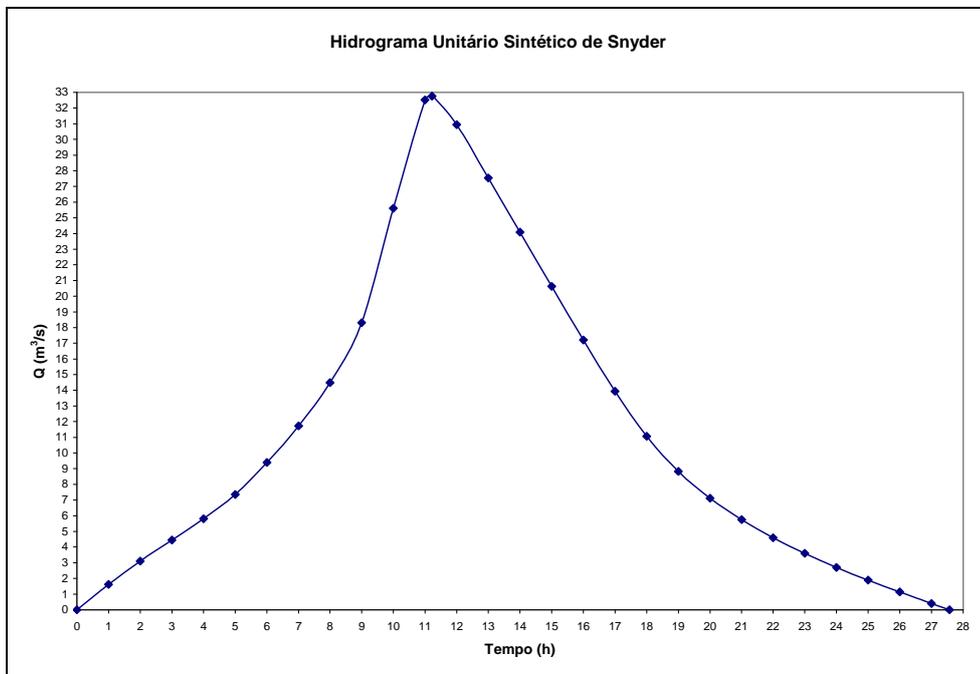
**Figura 37:** Hidrograma para chuva 6.



**Figura 38:** Hidrograma para chuva 7.



**Figura 39:** Hidrograma para chuva 8.



**Figura 40:** Hidrograma Unitário Sintético. Bacia Hidrográfica da Barragem do rio São Bento.

A Tabela 25 abaixo resume as ordenadas e abscissas do Hidrograma Unitário Sintético da bacia da barragem do rio São Bento.

**Tabela 25:** Hidrograma Unitário Sintético da bacia da barragem São Bento

<b>Tempo</b> <b>[horas]</b>	<b>Vazão</b> <b>[m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Tempo</b> <b>[horas]</b>	<b>Vazão</b> <b>[m<sup>3</sup>/s]</b>
0,0	0	14,0	24,08
1,0	1,61	15,0	20,62
2,0	3,10	16,0	17,22
3,0	4,45	17,0	13,93
4,0	5,82	18,0	11,06
5,0	7,35	19,0	8,83
6,0	9,39	20,0	7,11
7,0	11,74	21,0	5,75
8,0	14,49	22,0	4,60
9,0	18,31	23,0	3,60
10,0	25,60	24,0	2,70
11,0	32,51	25,0	1,89
11,2	32,76	26,0	1,13
12,0	30,94	27,0	0,41
13,0	27,54	27,6	0,00

### 6.2.2 Coeficiente de escoamento superficial

O coeficiente de escoamento superficial  $C$  corresponde à relação entre o volume escoado superficialmente pela exutória da bacia e o volume total precipitado na superfície da mesma (CHOW, 1964).

$$C = \frac{V_{\text{sup}}}{V_{\text{tot. prec}}}$$

Onde:

- $C$  – coeficiente de escoamento superficial;
- $V_{\text{sup}}$  – volume escoado superficialmente;
- $V_{\text{tot. prec}}$  – volume total precipitado.

Este depende da distribuição da chuva na bacia, da direção do deslocamento da temperatura em relação ao sistema de drenagem, da precipitação antecedente, das condições de umidade do solo no início da precipitação, do tipo de solo, do uso do solo, da rede de drenagem existente, da duração e da intensidade da chuva (PINTO, 1976).

Nesta aplicação, o modelo hidrológico adotado determina a precipitação efetiva (CHOW, 1964), ou seja, o volume de chuva que escoar superficialmente, multiplicando-se o total precipitado por um coeficiente de escoamento  $C$ .

Através da pesquisa dos coeficientes de escoamentos médios ocorridos nos eventos de precipitação enumerados na Tabela 22 anterior, provenientes de hidrogramas ocorridos, definiu-se uma correlação logarítmica entre os totais precipitados em cada evento e o coeficiente de escoamento superficial médio.

$$C = 0,09745 \cdot \ln(P) - 0,00545 \quad (53)$$

Onde:

- $C$  – coeficiente de escoamento;
- $P$  – total precipitado num evento.

Obteve-se um coeficiente de determinação  $R^2$  igual a 0,79 para os eventos pesquisados.

Desta forma o modelo adota um critério de que à medida que o total acumulado de chuva vai aumentando, também o coeficiente de escoamento sofre incrementos, porém com uma tendência assintótica a um coeficiente máximo.

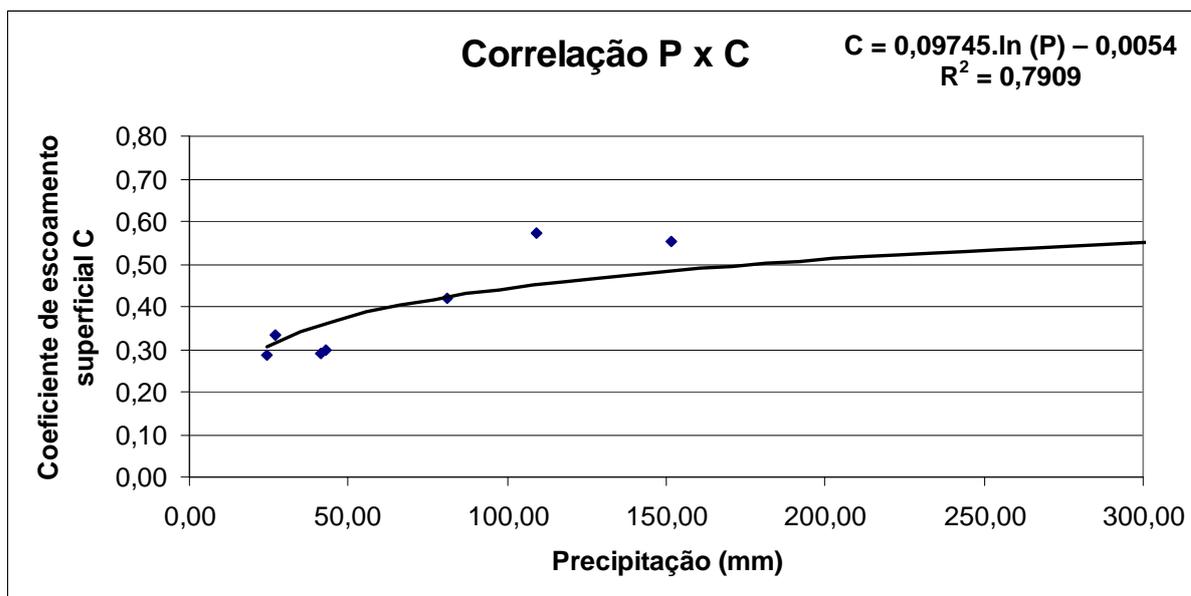
No caso da bacia do rio São Bento, foi adotado um valor limite máximo de coeficiente de escoamento de 0,65. Esta evolução do coeficiente é válida apenas para um único evento de precipitação. Para eventos subsequentes, o primeiro total precipitado em uma duração equivalente à duração padrão do H.U.S., dará entrada novamente na equação acima, para um novo ciclo de crescimento do coeficiente de escoamento superficial. Portanto para cada evento de precipitação os valores de  $C$  ficam assim determinados:

$$C = 0 \text{ para } P \leq 1,06 \text{ mm}$$

$$C = 0,09745 \cdot \ln(P) - 0,00545 \text{ para } P > 1,06 \text{ mm}$$

Portanto

A Figura 41 mostra os pontos calculados e a correlação adotada.

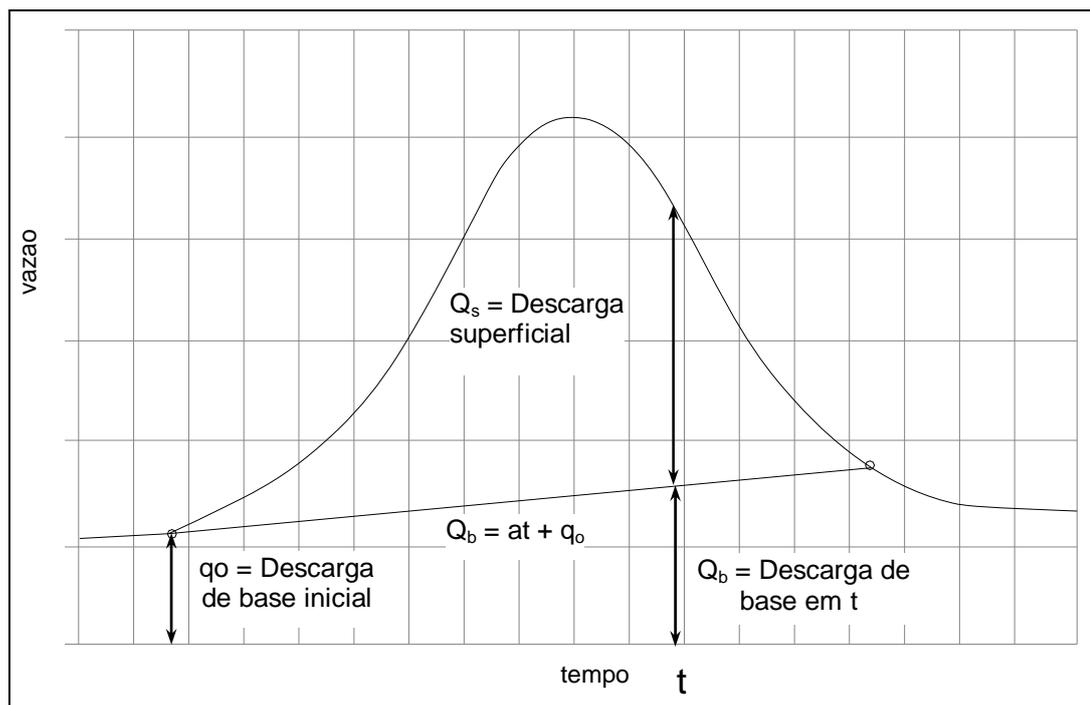


**Figura 41:** Correlação Precipitação x Coeficiente de Escoamento.

### 6.2.3 Separação do escoamento de base

O escoamento de base para os hidrogramas afluentes, ou seja, a separação do escoamento superficial e o escoamento de base durante o evento de uma precipitação excedente foi estudada através da análise dos hidrogramas registrados durante a operação da Barragem São Bento.

Observando esses hidrogramas e adotando-se uma reta como limite de separação desses escoamentos obteve-se uma reta típica para aplicação direta na modelagem hidrológica. Isto capacita o sistema, com base em dados típicos reais verificados, a agregar ao hidrograma de escoamento superficial calculado pela metodologia do H.U.S. uma descarga de base, desde que o início da simulação ocorra a partir do final de um período de estiagem, onde todo o escoamento da bacia é representado por uma descarga de base, advinda da contribuição subterrânea. A Figura 42 a seguir sintetiza o método utilizado.



**Figura 42:** Componentes do hidrograma unitário sintético.

Onde:

- $Q_s$  – descarga superficial;
- $Q_b$  – descarga de base;
- $q_0$  – descarga de base inicial;
- $Q = Q_s + Q_b$  – descarga total;
- $t$  – tempo.

A Tabela 26 abaixo apresenta as equações  $Q_b = a.t + q_0$  ajustadas para os hidrogramas dos eventos escolhidos de série histórica.

A equação adotada para a modelagem do rio São Bento é:

$$Q_b = 0,19927.t + q_0$$

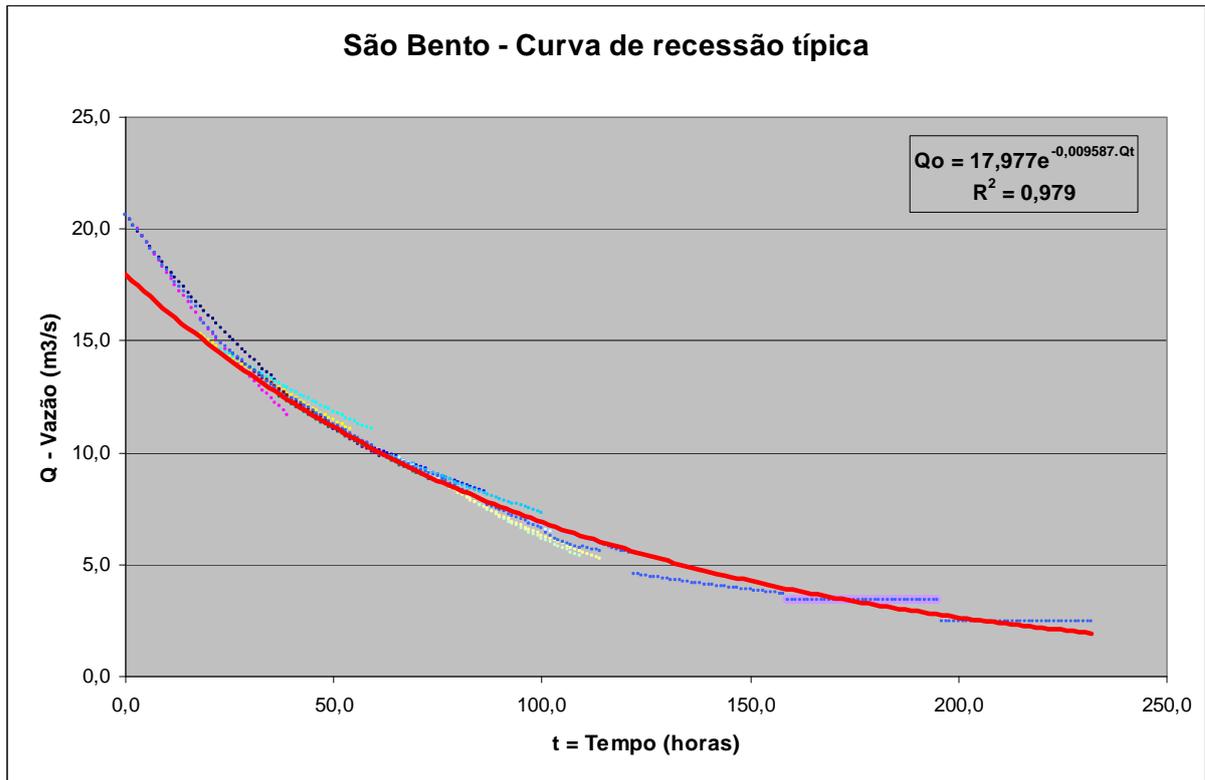
**Tabela 26** – Coeficientes de ajuste da equação de separação do escoamento de base

<b>Hidrograma</b>	<b>a</b>	<b>b</b>
1	0.14455	3.14100
2	0.08172	4.01000
3	0.05662	7.80818
4	0.38879	4.38500
5	-	-
6	0.16544	1.83334
7	0.28175	1.31251
8	0.27600	0.29580
<b>média</b>	<b>0.19927</b>	<b>-</b>
desvio-padrão	0.12035	-
a+dp	0.31962	-
a-dp	0.07891	-

#### 6.2.4 Curva de recessão

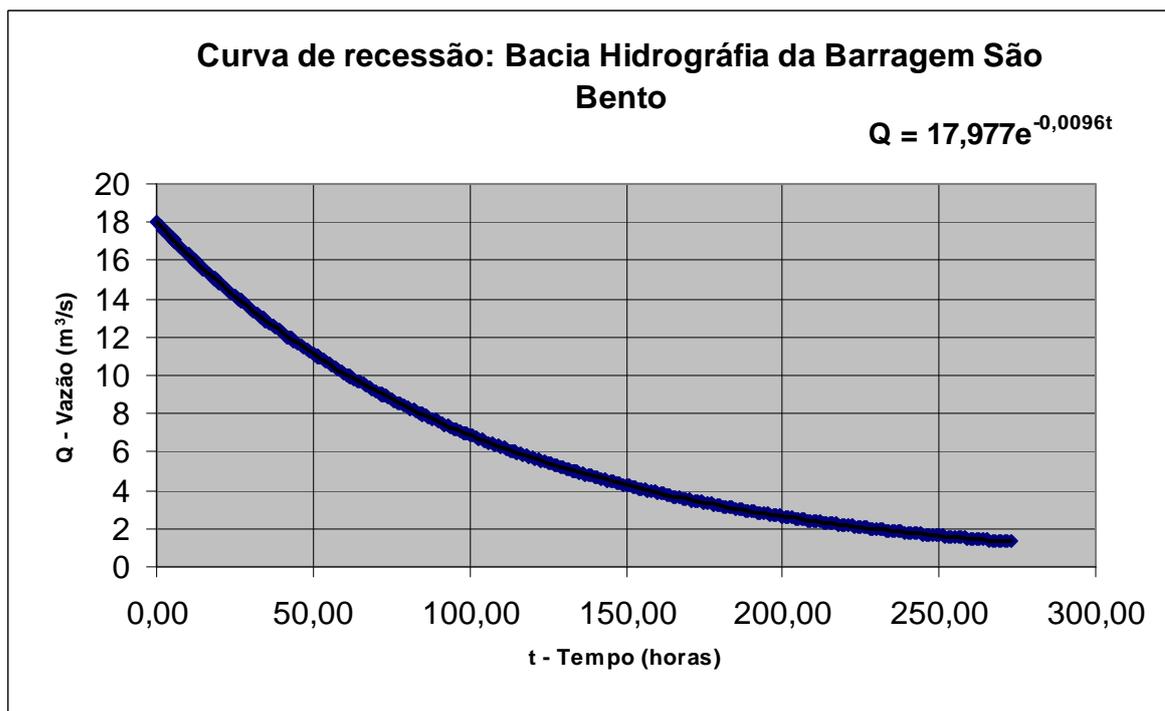
Este trecho do hidrograma, denominado de curva ou trecho de recessão, foi especificado para a modelagem a partir da análise dos vários trechos de recessões registradas. Após o término do escoamento superficial provocado pela chuva efetiva, o hidrograma deve continuar, alimentado apenas pelo afluxo do escoamento subterrâneo.

A curva de recessão foi obtida a partir da análise da série de vazões afluentes ao reservatório no período de monitoramento pela CASAN, entre 2004 e 2006. Foram selecionados os trechos de recessão de hidrogramas para vazões entre 2 e 25 m<sup>3</sup>/s. A curva resultante tem um comportamento de decaimento exponencial, ajustada conforme equação da Figura 43 abaixo.

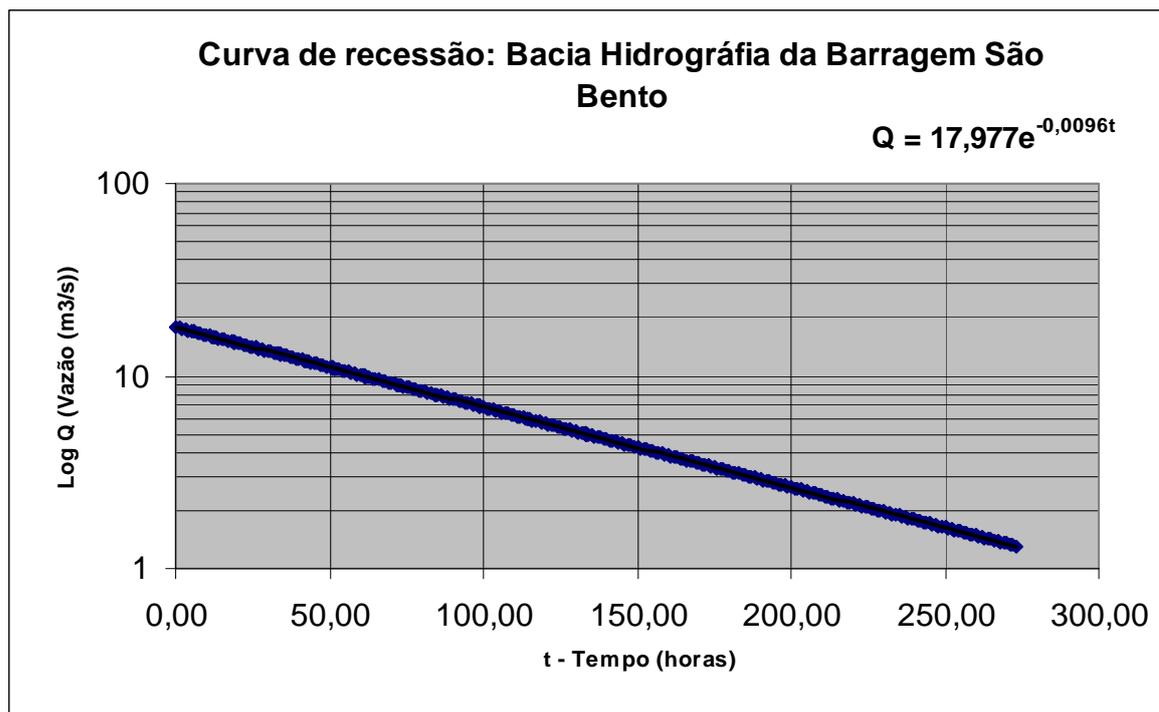


**Figura 43:** Curva de recessão típica para a bacia da barragem São Bento.

A Figura 44 e a Figura 45 apresentam a curva de recessão adotada para a modelagem hidrológica do rio São Bento.



**Figura 44:** Curva de recessão: HUS Bacia hidrográfica da Barragem São Bento.



**Figura 45:** Curva de recessão: HUS Bacia hidrográfica da Barragem São Bento: eixo das ordenadas (vazões) em escala logarítmica.

A equação utilizada na modelagem é:

$$Q = Q_0 \cdot e^{-0,0096 \cdot t}$$

Onde:

- $Q$  – descarga total ( $m^3/s$ );
- $Q_0$  – descarga total no início da recessão ( $m^3/s$ );
- $t$  – tempo (horas).

Para tempo em horas e vazão em  $m^3/s$ .

Para os hidrogramas observados a  $Q_0$  é  $17,97 m^3/s$ . A equação se ajusta bem na faixa de vazões entre 1 a  $18 m^3/s$ .

### 6.2.5 Modelo Hidrológico

O modelo hidrológico do SACC aplicado à bacia do rio São Bento é iniciado pela máscara apresentada na Figura 46.



**Figura 46:** Tela inicial do SACC.

Os dados de entrada são digitados na tela apresentada na Figura 47.

**Sistema de Alerta contra Cheias - SACC**

Data Inicial: 
 Fator de Área:

Vazão Inicial: 
 Num. Dias:

K1: 
 K2: 
 K3: 
 K4:

$C = k1 \cdot \ln(P) \cdot k2$   
 k1 = Coeficiente da relação entre Precipitação (P) e Coeficiente de Escoamento Superficial (C)  
 k2 = Constante da relação entre Precipitação (P) e Coeficiente de Escoamento Superficial (C).  
 Onde:  $C \leq 0,65$

$Qb = k3 \cdot t + qo$   
 k3 = Coeficiente da equação do escoamento de base

$Q = qo \cdot e^{-k4 \cdot t}$   
 k4 = Coeficiente da equação da curva de recessão

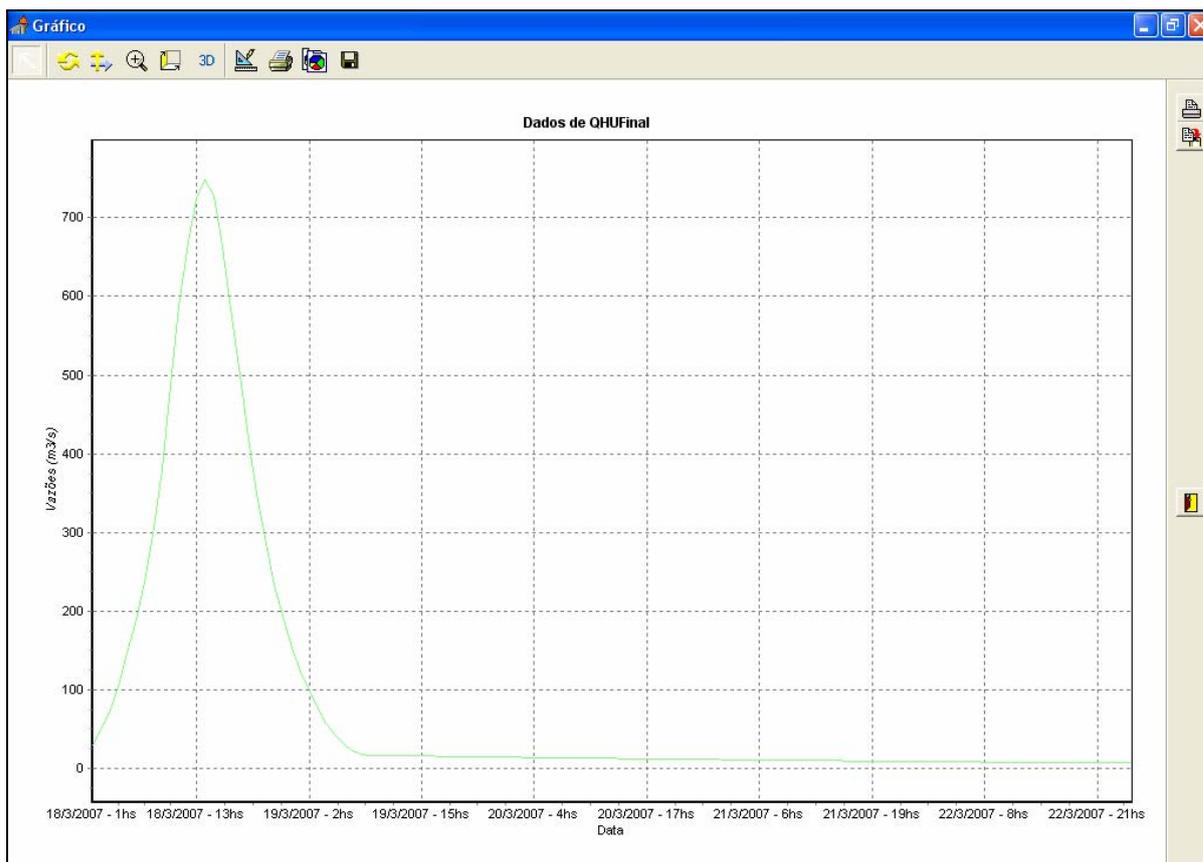
São Bento

Dia	Duração	Hora Início	Chuva (mm)	Fator Correção
18/3/2007	6	0	191,1	0,13
19/3/2007	1	0	0	0,1
20/3/2007	1	0	0	0,1
21/3/2007	1	0	0	0,1
22/3/2007	1	0	0	0,1

Duração Padrão:

**Figura 47:** Tela de entrada de dados do SACC.

A Figura 48 mostra o gráfico do hidrograma gerado a partir do Hidrograma Unitário Sintético e de uma chuva prevista.



**Figura 48:** Hidrograma Previsto pelo SACC.

Sua ativação para o cálculo de hidrogramas se dá através da imposição dos dados e condições iniciais do evento simulado. É necessário fornecer as seguintes informações:

- total precipitado a ser simulado;
- condição inicial da descarga afluente;

O parâmetro Fator de Área existente na tela de entrada de dados pode ser utilizado para correções diretas da precipitação média da bacia. Na tela de apresentação dos resultados o operador tem a possibilidade de solicitar nova simulação.

O código fonte é apresentado no Anexo 4.

### 6.3 SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DO AMORTECIMENTO NO RESERVATÓRIO

Para a construção do simulador de amortecimento no reservatório foram utilizados os parâmetros apresentados no Capítulo 4, item 4.2.1.

### 6.3.1 Política de operação adotada

O sistema adutor atende às demandas de abastecimento a partir das vazões captadas na tomada d'água. Esta alimentação ocorre através de uma das aberturas localizadas na torre de tomada d'água, cuja regra de operação de abertura e fechamento das comportas é a seguinte:

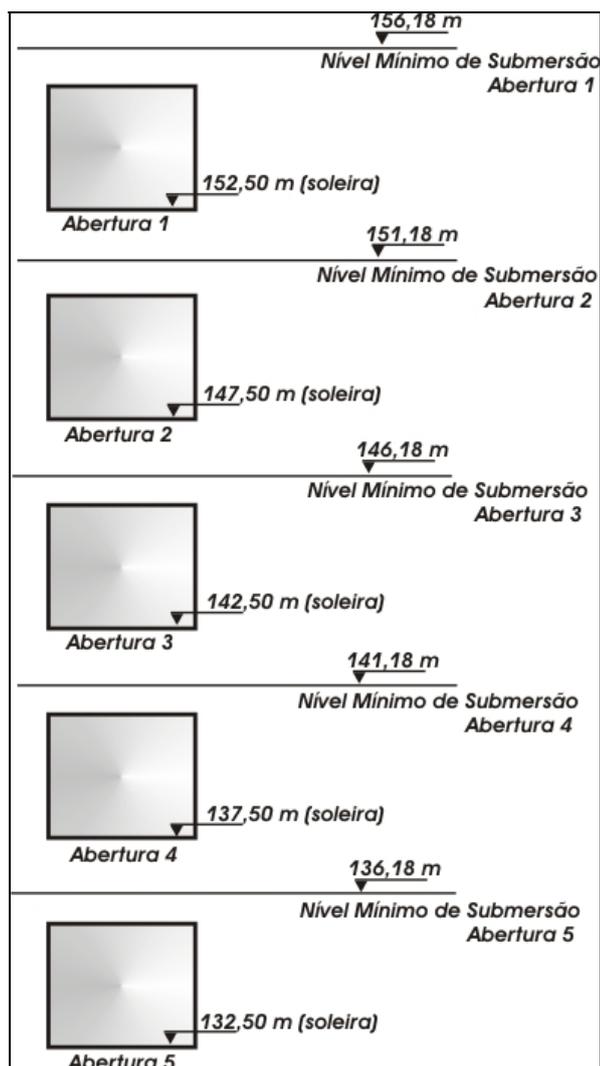
a) A abertura que estiver mais próxima do nível atual do reservatório é aquela que poderá ser utilizada para a adução das vazões de adução;

b) A abertura a ser utilizada deverá ter no mínimo, uma submersão total (acima de sua aresta superior) de 1,00 m mais um “default” de 2,68;

c) As aberturas que não estiverem operantes devem permanecer fechadas;

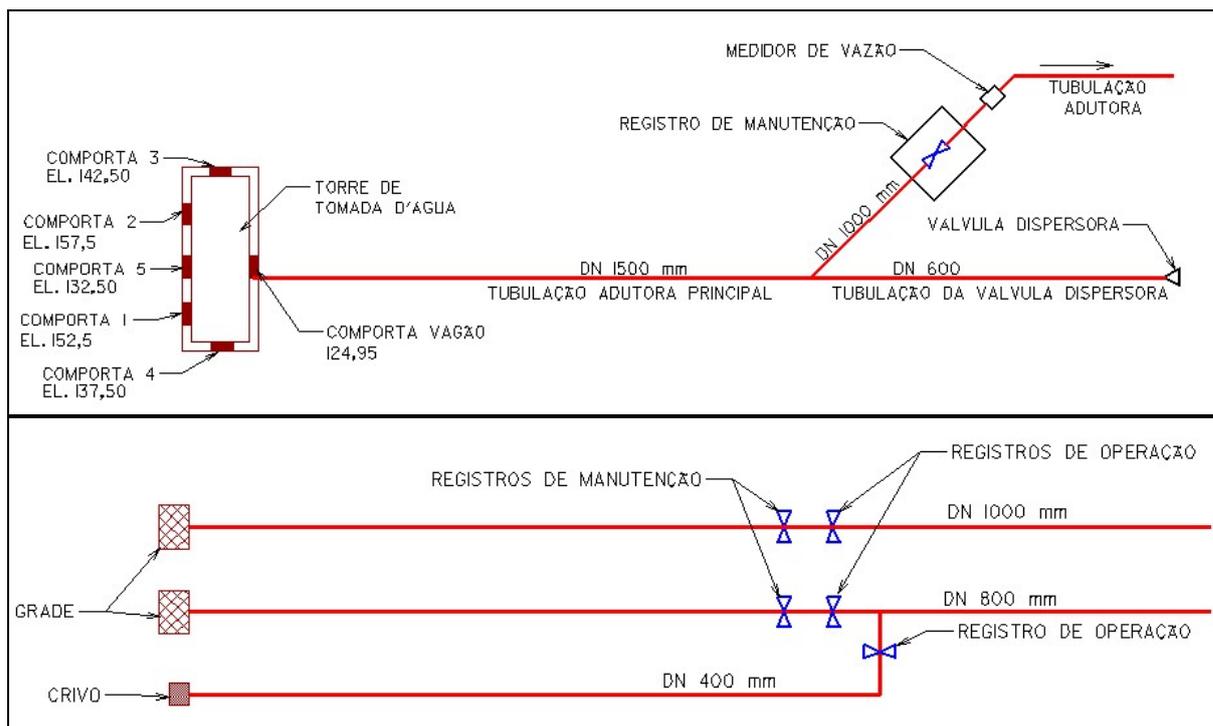
d) Quando sua abertura estiver operante e o nível do reservatório atingir valor abaixo do seu nível mínimo de submersão, o operador local deverá abrir a abertura imediatamente inferior e logo após executar o fechamento da abertura superior.

A Figura 49 mostra o posicionamento relativo das aberturas da tomada d'água, a cota correspondente das soleiras e os respectivos níveis mínimos de submersão de cada abertura. O Centro de Operação, através do monitoramento contínuo dos níveis do reservatório, informa e dá a ordem de fechamento e/ou abertura de comportas para a captação das águas do reservatório.



**Figura 49:** Posicionamento das aberturas da tomada d'água.  
Fonte: CASAN (2003).

A Figura 50 apresenta o posicionamento das tubulações das descargas de fundo. O Anexo 1 apresenta as relações cota x volume e cota x descarga de todos os órgãos de descarga do aproveitamento.



**Figura 50:** Esquema de aduções e descargas do reservatório.

### 6.3.2 Simulador Hidráulico – SHR

O Simulador Hidráulico para a Operação do Reservatório – SHR foi programado em linguagem Delphi e permite realizar o amortecimento de cheias afluentes ao reservatório através de algoritmo baseado no método de Puls modificado, como apresentado na seção 5.3.

O código fonte é apresentado no Anexo 5.

A Figura 51 apresenta a máscara de apresentação do simulador e a Figura 52 apresenta a tela de entrada de dados, onde se insere o hidrograma calculado pelo modelo hidrológico ou outro hidrograma qualquer, devendo-se inserir a condição inicial do nível do reservatório e as descargas programadas para a operação dos descarregadores de fundo.

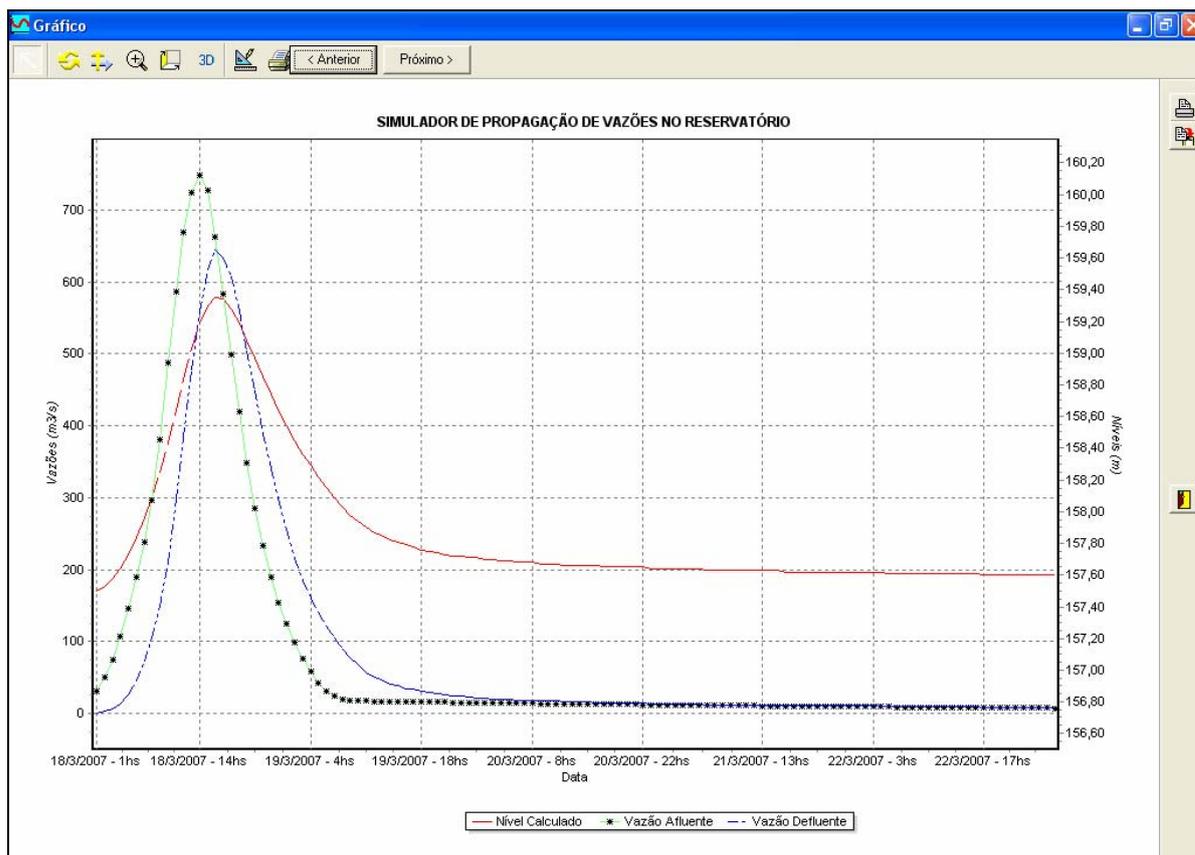


A Figura 53 abaixo apresenta os resultados da propagação das vazões afluentes no reservatório da barragem São Bento.

Dia	Hora	Delta T	Vazão Afl.	Média Afl.	Volume Afl.	Tentativa	N1	Vazão Def.	Média Def.	Volume Def.	Vol. Am. Per	Vol. Am. Tot	Elevação	Iterações
18/3/2007	1	1	31,19597					0				58,443	157,50	
18/3/2007	2	1	50,25872	40,727345	0,147	159,66	157,54	2,800000	1,400000	0,005	0,142	58,585	157,53	7
18/3/2007	3	1	75,10225	62,680485	0,226	159,91	157,59	6,300000	4,550000	0,016	0,210	58,795	157,58	7
18/3/2007	4	1	106,45273	90,777490	0,327	160,26	157,65	13,500000	9,900000	0,036	0,291	59,086	157,64	7
18/3/2007	5	1	146,43711	126,444920	0,455	160,72	157,74	26,000000	19,750000	0,071	0,384	59,470	157,73	7
18/3/2007	6	1	189,50967	167,973390	0,605	161,32	157,85	45,000000	35,500000	0,128	0,477	59,947	157,84	6
18/3/2007	7	1	237,92538	213,717525	0,769	158,03	157,97	72,500000	58,750000	0,212	0,557	60,504	157,96	2
18/3/2007	8	1	296,82292	267,374150	0,963	158,79	158,10	105,000000	88,750000	0,320	0,643	61,147	158,09	5
18/3/2007	9	1	380,82910	338,826010	1,220	159,69	158,26	149,000000	127,000000	0,457	0,763	61,910	158,25	5
18/3/2007	10	1	487,61248	434,220790	1,563	160,80	158,44	211,500000	180,250000	0,649	0,914	62,824	158,43	6
18/3/2007	11	1	586,79773	537,205105	1,934	162,10	158,65	297,500000	254,500000	0,916	1,018	63,842	158,64	6
18/3/2007	12	1	668,34254	627,570135	2,259	159,45	158,85	384,500000	341,000000	1,228	1,031	64,873	158,84	5
18/3/2007	13	1	723,85188	696,097210	2,506	160,73	159,04	478,000000	431,250000	1,553	0,953	65,826	159,03	6
18/3/2007	14	1	748,50431	736,178095	2,650	161,84	159,20	559,000000	518,500000	1,867	0,783	66,609	159,19	6
18/3/2007	15	1	727,59849	738,051400	2,657	162,63	159,31	617,400000	588,200000	2,118	0,539	67,148	159,30	6
18/3/2007	16	1	662,99384	695,296165	2,503	163,02	159,36	644,400000	630,900000	2,271	0,232	67,380	159,35	6
18/3/2007	17	1	583,43944	623,216640	2,244	162,99	159,34	633,600000	639,000000	2,300	-0,056	67,324	159,34	7
18/3/2007	18	1	499,43431	541,436875	1,949	162,64	159,29	606,700000	620,150000	2,233	-0,284	67,040	159,28	6
18/3/2007	19	1	420,37868	459,906495	1,656	162,06	159,20	559,000000	582,850000	2,098	-0,442	66,598	159,19	6
18/3/2007	20	1	348,69378	384,536230	1,384	161,34	159,09	503,000000	531,000000	1,912	-0,528	66,070	159,08	6
18/3/2007	21	1	285,89120	317,292490	1,142	160,57	158,98	448,000000	475,500000	1,712	-0,570	65,500	158,97	5
18/3/2007	22	1	232,64171	259,266455	0,933	159,78	158,86	389,200000	418,600000	1,507	-0,574	64,926	158,85	5
18/3/2007	23	1	189,06761	210,854660	0,759	159,03	158,75	339,750000	364,475000	1,312	-0,553	64,373	158,74	4
19/3/2007	0	1	153,85032	171,458965	0,617	162,33	158,65	297,500000	318,625000	1,147	-0,530	63,843	158,64	6
19/3/2007	1	1	124,62592	139,238120	0,501	161,68	158,55	256,000000	276,750000	0,996	-0,495	63,348	158,54	6
19/3/2007	2	1	99,49871	112,062315	0,403	161,08	158,45	215,500000	235,750000	0,849	-0,446	62,902	158,45	6
19/3/2007	3	1	77,09467	88,296690	0,318	160,55	158,37	184,850000	200,175000	0,721	-0,403	62,499	158,36	6
19/3/2007	4	1	57,80938	67,452025	0,243	160,07	158,30	160,000000	172,425000	0,621	-0,378	62,121	158,29	6
19/3/2007	5	1	42,76652	50,287950	0,181	159,63	158,23	140,750000	150,375000	0,541	-0,360	61,761	158,22	5
19/3/2007	6	1	31,51699	37,141755	0,134	159,22	158,16	121,500000	131,125000	0,472	-0,338	61,423	158,15	5
19/3/2007	7	1	23,72255	27,619770	0,099	158,84	158,10	105,000000	113,250000	0,408	-0,309	61,114	158,09	4
19/3/2007	8	1	19,11947	21,421010	0,077	158,51	158,04	90,000000	97,500000	0,351	-0,274	60,840	158,03	5
19/3/2007	9	1	17,57591	18,347690	0,066	158,22	157,99	77,500000	83,750000	0,302	-0,236	60,604	157,98	4
19/3/2007	10	1	17,40799	17,491950	0,063	161,98	157,95	67,500000	72,500000	0,261	-0,198	60,406	157,94	7
19/3/2007	11	1	17,24167	17,324830	0,062	161,76	157,91	57,500000	62,500000	0,225	-0,163	60,243	157,90	7
19/3/2007	12	1	17,07694	17,159305	0,062	161,58	157,88	51,000000	54,250000	0,195	-0,133	60,110	157,87	7
19/3/2007	13	1	16,91379	16,995365	0,061	161,43	157,86	47,000000	49,000000	0,176	-0,115	59,995	157,85	6
19/3/2007	14	1	16,75219	16,832990	0,061	161,30	157,83	41,000000	44,000000	0,158				7

Figura 53: Tela de resultados da simulação do Amortecimento da Cheia Afluente no Reservatório.

A Figura 54 abaixo apresenta os gráficos que sintetizam os resultados da propagação das vazões afluentes no reservatório da barragem São Bento.



**Figura 54:** Gráficos dos Hidrogramas Afluentes e Defluentes Simulados e Cotograma dos níveis do reservatório.

## 6.4 SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DA PROPAGAÇÃO DE VAZÕES NO CANAL A JUSANTE

### 6.4.1 Seções topobatimétricas

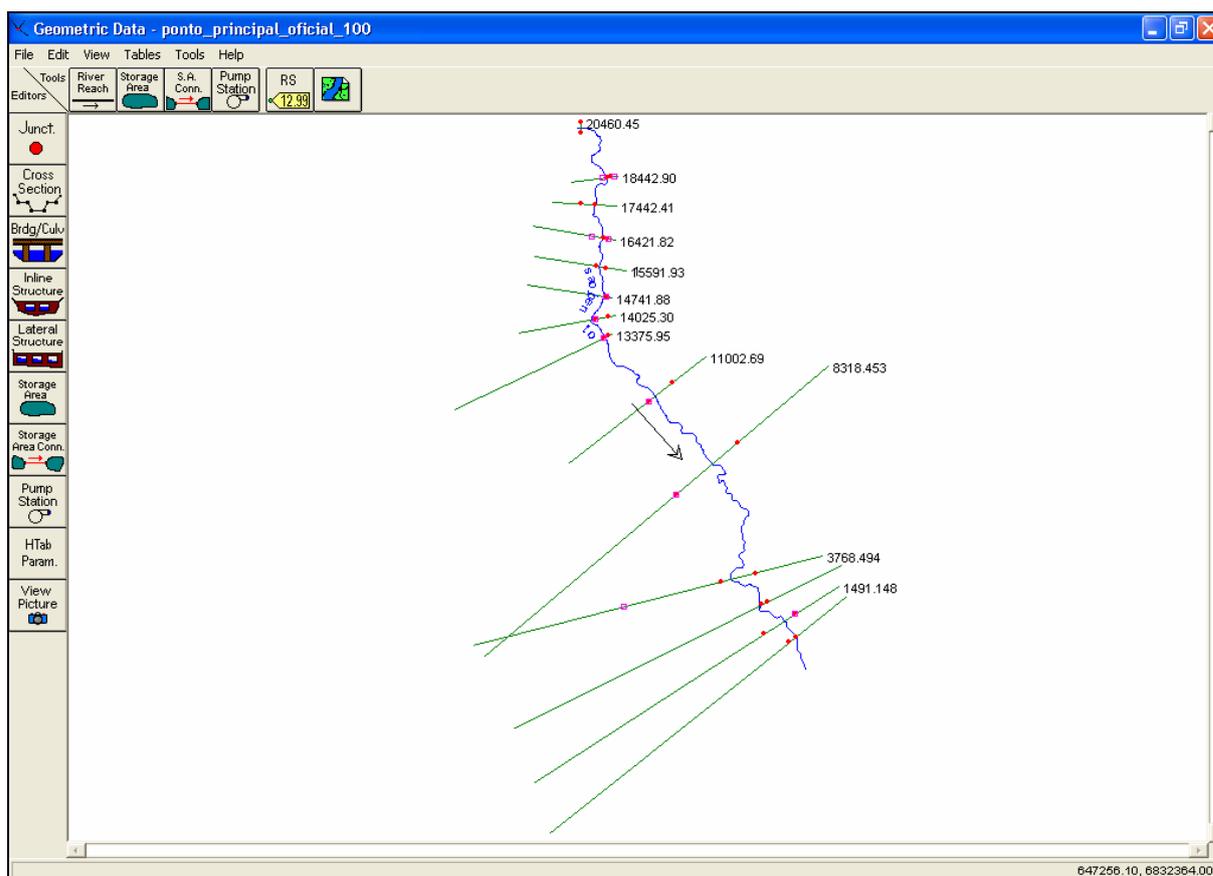
As seções topobatimétricas da calha principal do Rio São Bento foram levantadas pela CASAN, num espaçamento longitudinal de aproximadamente 2000 metros e/ou quando o canal apresentava controles naturais ou artificiais (pontes, estreitamentos, corredeiras, quedas), até a confluência com o Rio Mãe Luzia. Foram levantadas topograficamente 14 seções topobatimétricas.

As seções levantadas possuem uma amarração longitudinal ao longo da calha principal do rio. O erro permitido entre seções não ultrapassa 10 cm. O erro acumulado entre a primeira e a última seção também não ultrapassou 50 cm. A amarração das seções contém dados suficientes para se definir a distância entre seções e a diferença de cotas. As seções transversais têm suas cotas referidas ao mesmo zero.

Estas seções foram levantadas através do método de estação total (precisão classe III), a amarração longitudinal das seções foi feita pelo eixo do rio através de nivelamento geométrico (classe II) com georreferenciamento dos marcos das seções (20 marcos) e definição (posicionamento) planimétrica de aglomerações urbanas ribeirinhas.

A implantação e o rastreamento dos 10 (dez) marcos principais e dos 10 (dez) marcos de azimuth para controle e georreferenciamento das seções transversais foram realizados no modo estático com gravação de dados da portadora L1 a partir da Rede Geodésica Brasileira do IBGE e diferença da Ondulação Geoidal.

As seções foram introduzidas na interface do HEC-RAS, com todos os pontos georreferenciados. A Figura 55 apresenta a planta do trecho de propagação hidrodinâmica em canal, a jusante do barramento, até a confluência com o rio Mãe Luzia, mostrando a localização das seções topobatimétricas levantadas. Esta Figura foi extraída do programa HEC-RAS, disponível no *site* da rede internacional Internet, [www.hec.usace.army.mil](http://www.hec.usace.army.mil).



**Figura 55:** HEC-RAS – Rio São Bento a jusante da barragem.

O modelo de simulação hidrodinâmica HEC-RAS, já apresentado, na seção 5.4, na sua versão 3.1.3, foi a solução computacional utilizada pelo SACC para a fase de propagação de vazões em canais naturais.

#### 6.4.2 Cheias simuladas

O SACC foi aplicado para a cheia de 25/03/2006, onde o evento pluviométrico totalizou 151,4 mm, como registrado no sistema de supervisão da Barragem São Bento. Segundo a interpretação do hidrograma de vazões afluentes, a precipitação ocorrida teve uma duração estimada de 4 horas. Foram simuladas as cheias para a precipitação monitorada, citada acima, assim como para a precipitação prevista pelo sistema ARPS, que totalizou uma chuva prevista de 41,6 mm. A diferença entre os 2 totais pode ser justificada como descrito na seção 6.1, mostrando que podemos estar diante de uma situação de sobre-estimativa da precipitação média medida ou de um sub-dimensionamento da chuva prevista. A vazão afluente registrada ao reservatório, de 168 m<sup>3</sup>/s, indica que a chuva prevista pelo modelo ARPS está mais próxima de uma média pluviométrica mais realista. Da mesma forma, as estações vizinhas de Forquilha e Serrinha também indicaram que o total registrado na barragem foi, em média, maior do que o registrado naquelas estações (22,5 e 147,1, respectivamente).

Para uma análise de cheias mais significativas foram simulados o amortecimento em reservatório pelo SHR e as propagações em canal das cheias defluentes de recorrência, de 100 a 1.000 anos, através da aplicação do programa HEC-RAS.

Finalmente, com os níveis atingidos pelos escoamentos nas seções coincidentes com a localização das comunidades de São Bento Alto e São Bento Baixo, definiram-se os mapas de inundação correspondentes. O SACC obtém estes mapas através de um dos módulos do ARCVIEW, denominado GEO-RAS, que possibilita a interface com o software HEC-RAS, utilizado para se trabalhar com um Sistema de Informações Geográficas e mais especificamente com um mapeamento georreferenciado. Para que esta aplicação possa ser utilizada é necessário se inserir no contexto do HEC-RAS, como dado de entrada, o Modelo Digital de Elevação – MDE da área estudada, em formato compatível com o ARCVIEW. Como disposto na seção 5.5, o MDE foi obtido e calibrado para então ser inserido no HEC-RAS que, através dos resultados da propagação hidrodinâmica realizada, “desenha” o mapa de inundação da bacia, ou seja, o mapa de níveis máximos atingidos em todo o vale do rio onde se propagou a onda de cheia.

Alternativamente, para uma clara interpretação dos resultados atingidos, obtiveram-se as áreas horizontais de inundação, sem a influência do escoamento hidrodinâmico, como se fossem áreas envolvidas em um perímetro que tem uma única cota. Foram gerados estes cortes horizontais de metro em metro, da cota 60 a 80 na região de São Bento Alto, e da cota 26 a 40 para a região de São Bento Baixo. Estes cortes contêm o MDE obtido, assim como superpõe a imagem do arruamento atual da comunidade. Os cortes horizontais servem, pelo menos, para indicar as áreas que devem ser inundadas com a propagação das vazões, quando determinadas cotas são atingidas pela água em determinadas seções de controle. Esta etapa foi desenvolvida apenas com a aplicação do ArcReader, uma vez inserido o MDE desenvolvido segundo o capítulo 5.5, onde os cortes horizontais acima mencionados são denominados de planos de informações.

#### 6.4.3 Contribuição lateral da bacia incremental

O trecho de jusante do barramento do rio São Bento é o local onde se desenvolveram as propagações das vazões defluentes do reservatório. Estas vazões correspondem às contribuições da bacia de drenagem a montante da barragem, como uma área de 113,79 km<sup>2</sup>.

O trecho de jusante, como uma área incremental de 43,61 km<sup>2</sup> é responsável por contribuições laterais significativas para as inundações das comunidades de São Bento Alto e São Bento Baixo. Até a primeira, a área total de contribuição da bacia é de 126,80 km<sup>2</sup> e até a segunda é de 155,21 km<sup>2</sup>.

A contribuição lateral na simulação pelo programa HEC-RAS foi considerada como um valor diretamente proporcional à vazão específica verificada no hidrograma afluente. A cada seção transversal de cálculo hidrodinâmico injetou-se no fluxo uma vazão lateral equivalente à área incremental correspondente multiplicada pela vazão específica da vazão afluente.

$$q_{l_i} = \frac{Q_{i-1}}{A_{mont}} \times A_{inc_i} \quad (54)$$

$$Q_i = Q_{i-1} + q_{l_i} \quad (55)$$

Onde:

- $q_{l_i}$  – vazão incremental entre a seção anterior ( $i - 1$ ) e a seção “i” de cálculo;
- $Q_i$  – vazão afluente na seção de cálculo “i”;
- $A_{\text{mont}}$  – área a montante da barragem;
- $A_{\text{inc}_i}$  - área da bacia incremental entre a seção anterior ( $i - 1$ ) e a seção “i”.

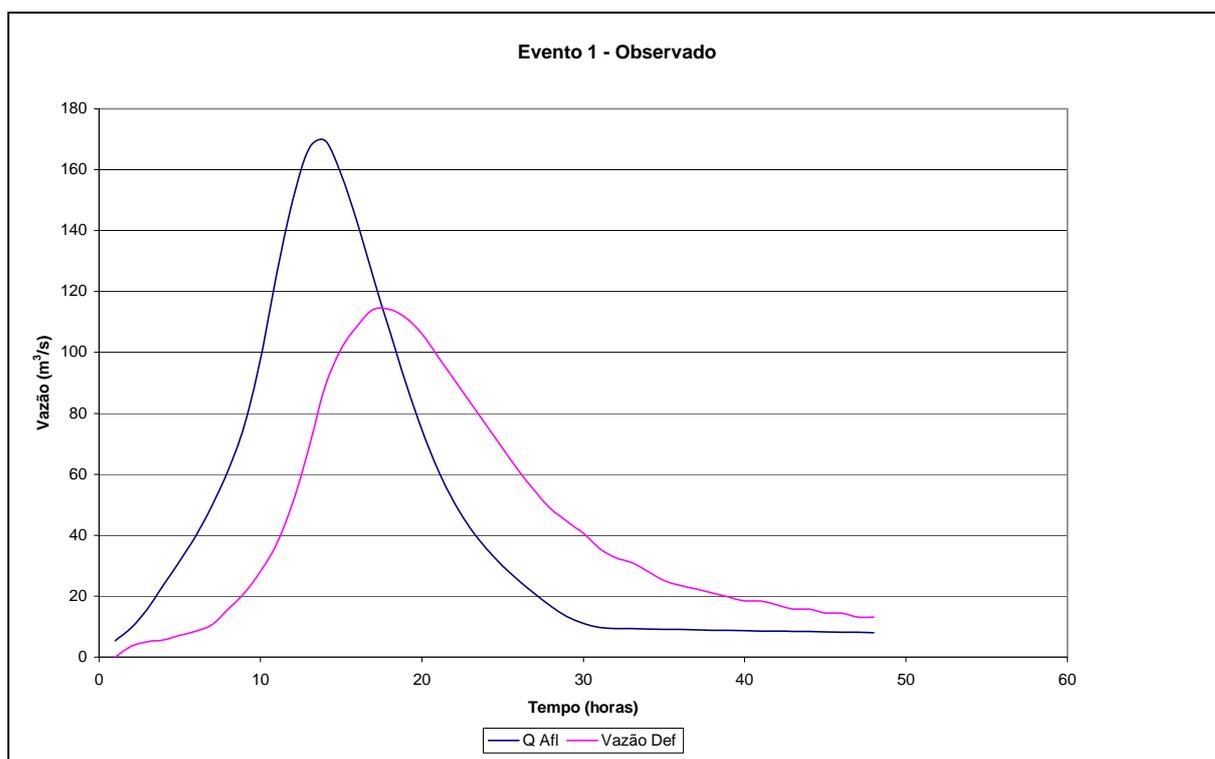
## 7 RESULTADOS

### 7.1 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

O evento pluviométrico de 26/03/2006 na bacia do rio São Bento foi simulado no modelo hidrológico e as principais conclusões estão resumidas abaixo:

- Apesar da imprecisão inerente ao cálculo de vazões afluentes ao reservatório, pelo método de balanço hídrico, a plotagem do hidrograma afluente demonstra a maior ou menor possibilidade de haver desvio significativo no valor final da vazão afluente. Para que o modelo convergisse no valor da vazão afluente registrada (calculada por balanço hídrico) foi adotado um parâmetro de correção que reflete um amplo desvio na altura de chuva considerada ou no coeficiente de escoamento adotado pelo modelo;
- O evento simulado teve duração semelhante ao ocorrido, amortecendo em cerca de 35% o pico da cheia ocorrida com o amortecimento através do vertedouro existente;
- A duração da cheia simulada até o início do regime de recessão foi da ordem de 32 horas, semelhante à duração da cheia ocorrida;

O resultado desta simulação encontra-se apresentado na Figuras 56 e na Tabela 27 abaixo:



**Figura 56:** Simulação de Cheia Observada.

**Tabela 27:** Resultado Simulação Hidrológica e Amortecimento da Cheia Observada

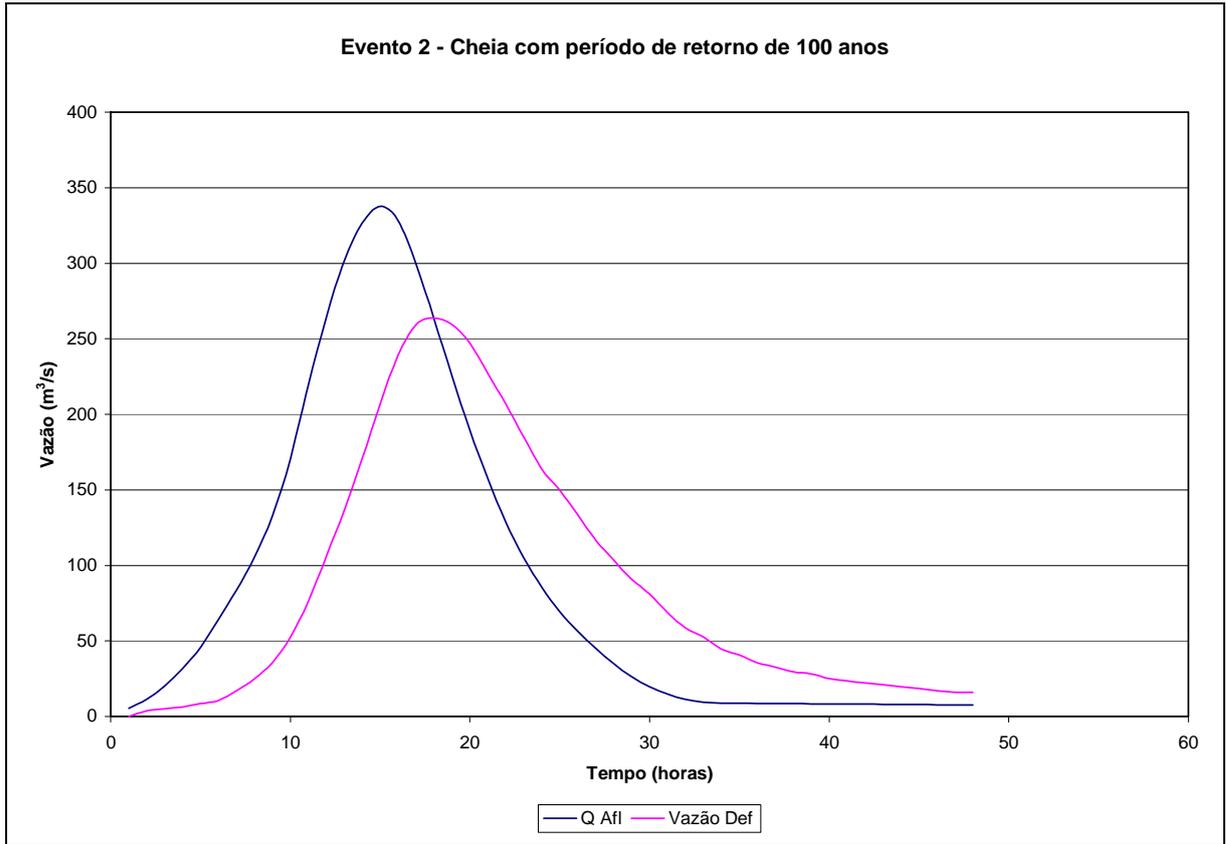
Dia	Hora	Delta T	Q Afl.	Média Afluente	Volume Afluente	Tentativa	NI	Vazão Def	Media Def	Volume Def	Volume Arm. Permi	Volume Arm. Tot.	Elevação	Iterações
1/1/2007	1	1	5,34					0,00				58,44	157,50	
1/1/2007	2	1	9,65	7,49	0,03	159,53	157,51	3,59	1,80	0,01	0,02	58,46	157,50	7
1/1/2007	3	1	15,74	12,69	0,05	159,58	157,52	4,99	4,29	0,02	0,03	58,50	157,51	7
1/1/2007	4	1	23,64	19,69	0,07	159,64	157,53	5,69	5,34	0,02	0,05	58,55	157,52	7
1/1/2007	5	1	31,43	27,53	0,10	159,73	157,55	7,09	6,39	0,02	0,08	58,62	157,54	7
1/1/2007	6	1	39,95	35,69	0,13	159,84	157,57	8,49	7,79	0,03	0,10	58,72	157,56	7
1/1/2007	7	1	49,79	44,87	0,16	159,99	157,60	10,59	9,54	0,03	0,13	58,85	157,59	7
1/1/2007	8	1	61,46	55,63	0,20	160,18	157,64	15,79	13,19	0,05	0,15	59,00	157,63	6
1/1/2007	9	1	76,16	68,81	0,25	160,40	157,68	20,99	18,39	0,07	0,18	59,19	157,67	6
1/1/2007	10	1	97,81	86,99	0,31	160,68	157,73	28,09	24,54	0,09	0,23	59,41	157,72	6
1/1/2007	11	1	125,51	111,66	0,40	161,03	157,79	37,09	32,59	0,12	0,29	59,70	157,78	7
1/1/2007	12	1	149,89	137,70	0,50	161,45	157,86	50,59	43,84	0,16	0,34	60,03	157,85	8
1/1/2007	13	1	166,81	158,35	0,57	161,91	157,94	68,59	59,59	0,22	0,36	60,39	157,93	8
1/1/2007	14	1	169,58	168,19	0,61	158,31	158,02	88,59	78,59	0,28	0,32	60,71	158,01	3
1/1/2007	15	1	158,62	164,10	0,59	158,62	158,07	101,09	94,84	0,34	0,25	60,96	158,06	4
1/1/2007	16	1	142,75	150,68	0,54	158,82	158,10	108,59	104,84	0,38	0,17	61,13	158,09	5
1/1/2007	17	1	124,79	133,77	0,48	158,93	158,12	114,09	111,34	0,40	0,08	61,21	158,11	4
1/1/2007	18	1	106,97	115,88	0,42	158,95	158,12	114,09	114,09	0,41	0,01	61,21	158,11	4
1/1/2007	19	1	89,94	98,46	0,35	158,89	158,11	111,34	112,72	0,41	-0,05	61,16	158,10	4
1/1/2007	20	1	74,54	82,24	0,30	158,78	158,09	106,09	108,72	0,39	-0,10	61,07	158,08	4
1/1/2007	21	1	61,37	67,95	0,25	158,63	158,06	98,59	102,34	0,37	-0,12	60,94	158,05	5
1/1/2007	22	1	50,74	56,05	0,20	158,46	158,03	91,09	94,84	0,34	-0,14	60,81	158,02	5
1/1/2007	23	1	42,38	46,56	0,17	158,29	158,00	83,59	87,34	0,31	-0,15	60,66	157,99	4
2/1/2007	0	1	35,65	39,02	0,14	158,11	157,97	76,09	79,84	0,29	-0,15	60,51	157,96	3
2/1/2007	1	1	30,01	32,83	0,12	161,94	157,94	68,59	72,34	0,26	-0,14	60,37	157,93	7
2/1/2007	2	1	25,10	27,56	0,10	161,76	157,91	61,09	64,84	0,23	-0,13	60,24	157,90	7
2/1/2007	3	1	20,72	22,91	0,08	161,59	157,88	54,59	57,84	0,21	-0,13	60,11	157,87	7
2/1/2007	4	1	16,70	18,71	0,07	161,43	157,85	48,59	51,59	0,19	-0,12	59,99	157,85	8
2/1/2007	5	1	13,32	15,01	0,05	161,29	157,83	44,59	46,59	0,17	-0,11	59,88	157,82	7
2/1/2007	6	1	11,02	12,17	0,04	161,15	157,81	40,59	42,59	0,15	-0,11	59,77	157,80	6
2/1/2007	7	1	9,72	10,37	0,04	161,02	157,78	35,59	38,09	0,14	-0,10	59,67	157,77	7
2/1/2007	8	1	9,38	9,55	0,03	160,90	157,76	32,59	34,09	0,12	-0,09	59,58	157,75	7
2/1/2007	9	1	9,29	9,33	0,03	160,80	157,75	31,09	31,84	0,12	-0,08	59,50	157,74	6
2/1/2007	10	1	9,20	9,24	0,03	160,71	157,73	28,09	29,59	0,11	-0,07	59,42	157,72	7
2/1/2007	11	1	9,11	9,15	0,03	160,63	157,71	25,09	26,59	0,10	-0,06	59,36	157,70	7
2/1/2007	12	1	9,02	9,07	0,03	160,56	157,70	23,59	24,34	0,09	-0,06	59,31	157,69	7
2/1/2007	13	1	8,94	8,98	0,03	160,50	157,69	22,29	22,94	0,08	-0,05	59,26	157,68	7
2/1/2007	14	1	8,85	8,89	0,03	160,44	157,68	20,99	21,64	0,08	-0,05	59,21	157,67	7
2/1/2007	15	1	8,77	8,81	0,03	160,39	157,67	19,69	20,34	0,07	-0,04	59,17	157,66	7
2/1/2007	16	1	8,68	8,73	0,03	160,34	157,66	18,39	19,04	0,07	-0,04	59,13	157,65	7
2/1/2007	17	1	8,60	8,64	0,03	160,30	157,66	18,39	18,39	0,07	-0,04	59,10	157,65	6
2/1/2007	18	1	8,52	8,56	0,03	160,26	157,65	17,09	17,74	0,06	-0,03	59,06	157,64	7
2/1/2007	19	1	8,44	8,48	0,03	160,23	157,64	15,79	16,44	0,06	-0,03	59,03	157,63	7
2/1/2007	20	1	8,36	8,40	0,03	160,19	157,64	15,79	15,79	0,06	-0,03	59,01	157,63	6
2/1/2007	21	1	8,28	8,32	0,03	160,16	157,63	14,49	15,14	0,06	-0,03	58,98	157,62	7

Dia	Hora	Delta T	Q Afl.	Média Afluente	Volume Afluente	Tentativa	N1	Vazão Def	Medía Def	Volume Def	Volume Arm. Perm	Volume Arm. Tot.	Elevação	Iterações
2/1/2007	22	1	8,20	8,24	0,03	160,13	157,63	14,49	14,49	0,05	-0,02	58,96	157,62	6
2/1/2007	23	1	8,12	8,16	0,03	160,11	157,62	13,19	13,84	0,05	-0,02	58,94	157,61	7
3/1/2007	0	1	8,04	8,08	0,03	160,09	157,62	13,19	13,19	0,05	-0,02	58,92	157,61	7
3/1/2007	1	1	7,96	8,00	0,03	160,07	157,61	11,89	12,54	0,05	-0,02	58,91	157,60	7
		1	7,89	7,93	0,03	160,05	157,61	11,89	11,89	0,04	-0,01	58,89	157,60	7

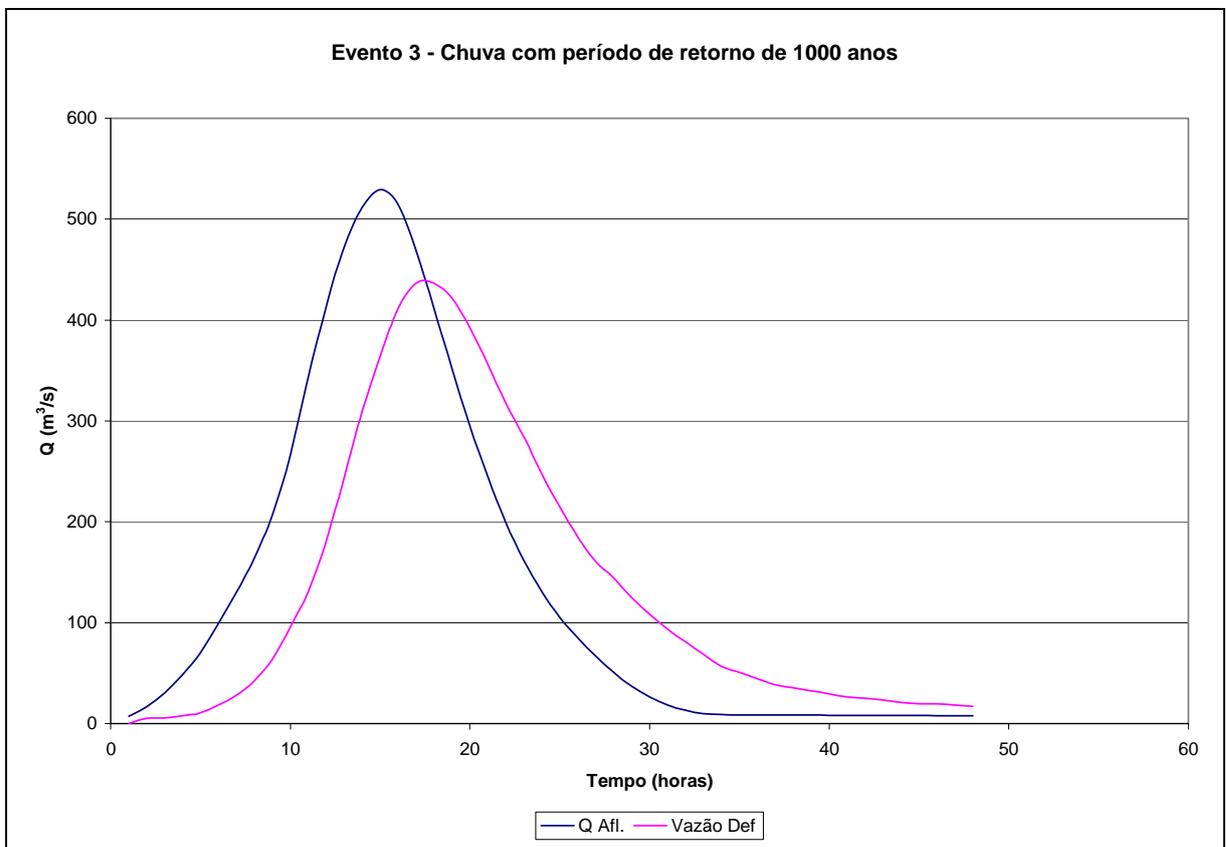
Também foram simuladas as cheias de projeto de tempo de recorrência iguais a 100 e 1.000 anos. As conclusões tiradas foram as seguintes:

- a) Para que o simulador conseguisse convergir para o valor da vazão de projeto, a partir da chuva correspondente, foram adotados fatores de correção significativos, da ordem de 0,058 a 0,13, para coeficientes de escoamento de 0,07 e 0,115 respectivamente, para as cheias de 100 e 1.000 anos;
- b) O abatimento dos picos das cheias foi da ordem de 25% a 28% e a duração das cheias foi da ordem de 35 horas.

Os resultados da simulação hidrológica e amortecimento hidráulico encontram-se nas Figuras 57 e 58 e nas Tabelas 28 e 29.



**Figura 57:** Simulação de Cheia de Tempo de Recorrência 100 anos.



**Figura 58:** Simulação de Cheia de Tempo de Recorrência 1000 anos.

**Tabela 28:** Resultado da Simulação Hidrológica e Amortecimento da Cheia de 100 Anos

Dia	Hora	Delta T	Q Afl.	Média Afluente	Volume Afluente	Tentativa	NI	Vazão Def	Media Def	Volume Def	Volume Arm. Perm	Volume Arm. Tot.	Elevação	Iterações
1/1/2007	1	1	5,30					0,00				58,44	157,50	
1/1/2007	2	1	11,46	8,38	0,03	159,53	157,51	3,59	1,80	0,01	0,02	58,47	157,51	7
1/1/2007	3	1	20,20	15,83	0,06	159,59	157,52	4,99	4,29	0,02	0,04	58,51	157,51	7
1/1/2007	4	1	31,56	25,88	0,09	159,68	157,54	6,39	5,69	0,02	0,07	58,58	157,53	7
1/1/2007	5	1	45,87	38,71	0,14	159,81	157,57	8,49	7,44	0,03	0,11	58,69	157,56	6
1/1/2007	6	1	64,08	54,98	0,20	160,00	157,60	10,59	9,54	0,03	0,16	58,86	157,59	7
1/1/2007	7	1	83,70	73,89	0,27	160,26	157,65	17,09	13,84	0,05	0,22	59,07	157,64	7
1/1/2007	8	1	105,74	94,72	0,34	160,58	157,71	25,09	21,09	0,08	0,27	59,34	157,70	7
1/1/2007	9	1	132,52	119,13	0,43	160,98	157,78	35,59	30,34	0,11	0,32	59,66	157,77	7
1/1/2007	10	1	170,68	151,60	0,55	161,46	157,87	52,59	44,09	0,16	0,39	60,05	157,86	7
1/1/2007	11	1	219,15	194,91	0,70	158,06	157,97	76,09	64,34	0,23	0,47	60,52	157,96	3
1/1/2007	12	1	264,18	241,67	0,87	158,71	158,09	106,09	91,09	0,33	0,54	61,06	158,08	4
1/1/2007	13	1	301,22	282,70	1,02	159,40	158,20	136,09	121,09	0,44	0,58	61,64	158,19	6
1/1/2007	14	1	326,47	313,85	1,13	160,10	158,32	170,69	153,39	0,55	0,58	62,22	158,31	6
1/1/2007	15	1	337,75	332,11	1,20	160,74	158,42	207,09	188,89	0,68	0,52	62,73	158,41	7
1/1/2007	16	1	328,39	333,07	1,20	161,27	158,50	239,09	223,09	0,80	0,40	63,13	158,49	7
1/1/2007	17	1	299,24	313,81	1,13	161,60	158,55	259,59	249,34	0,90	0,23	63,36	158,54	7
1/1/2007	18	1	263,31	281,28	1,01	161,71	158,56	263,69	261,64	0,94	0,07	63,43	158,55	7
1/1/2007	19	1	225,38	244,35	0,88	161,65	158,55	259,59	261,64	0,94	-0,06	63,37	158,54	7
1/1/2007	20	1	189,68	207,53	0,75	161,45	158,52	247,29	253,44	0,91	-0,17	63,21	158,51	6
1/1/2007	21	1	157,32	173,50	0,63	161,16	158,47	227,09	237,19	0,85	-0,23	62,98	158,46	7
1/1/2007	22	1	128,99	143,16	0,52	160,82	158,42	207,09	217,09	0,78	-0,27	62,71	158,41	6
1/1/2007	23	1	104,98	116,98	0,42	160,46	158,36	184,89	195,99	0,71	-0,29	62,43	158,35	6
2/1/2007	0	1	85,35	95,17	0,34	160,10	158,30	163,59	174,24	0,63	-0,28	62,14	158,29	6
2/1/2007	1	1	69,51	77,43	0,28	159,75	158,25	149,84	156,72	0,56	-0,29	61,86	158,24	5
2/1/2007	2	1	56,39	62,95	0,23	159,41	158,19	133,34	141,59	0,51	-0,28	61,57	158,18	5
2/1/2007	3	1	45,12	50,75	0,18	159,08	158,13	116,84	125,09	0,45	-0,27	61,31	158,12	6
2/1/2007	4	1	35,08	40,10	0,14	158,77	158,08	103,59	110,22	0,40	-0,25	61,05	158,07	5
2/1/2007	5	1	26,45	30,76	0,11	158,48	158,03	91,09	97,34	0,35	-0,24	60,81	158,03	5
2/1/2007	6	1	19,75	23,10	0,08	158,21	157,99	81,09	86,09	0,31	-0,23	60,59	157,98	3
2/1/2007	7	1	14,76	17,26	0,06	161,96	157,94	68,59	74,84	0,27	-0,21	60,38	157,93	7
2/1/2007	8	1	11,34	13,05	0,05	161,71	157,90	58,59	63,59	0,23	-0,18	60,20	157,89	7
2/1/2007	9	1	9,36	10,35	0,04	161,50	157,87	52,59	55,59	0,20	-0,16	60,04	157,86	7
2/1/2007	10	1	8,78	9,07	0,03	161,31	157,83	44,59	48,59	0,18	-0,14	59,89	157,82	8
2/1/2007	11	1	8,69	8,73	0,03	161,15	157,81	40,59	42,59	0,15	-0,12	59,77	157,80	6
2/1/2007	12	1	8,61	8,65	0,03	161,02	157,78	35,59	38,09	0,14	-0,11	59,67	157,77	7
2/1/2007	13	1	8,53	8,57	0,03	160,90	157,76	32,59	34,09	0,12	-0,09	59,57	157,75	7
2/1/2007	14	1	8,44	8,49	0,03	160,79	157,74	29,59	31,09	0,11	-0,08	59,49	157,73	7
2/1/2007	15	1	8,36	8,40	0,03	160,70	157,73	28,09	28,84	0,10	-0,07	59,42	157,72	7
2/1/2007	16	1	8,28	8,32	0,03	160,62	157,71	25,09	26,59	0,10	-0,07	59,35	157,70	7
2/1/2007	17	1	8,20	8,24	0,03	160,55	157,70	23,59	24,34	0,09	-0,06	59,29	157,69	7
2/1/2007	18	1	8,13	8,17	0,03	160,48	157,69	22,29	22,94	0,08	-0,05	59,24	157,68	7
2/1/2007	19	1	8,05	8,09	0,03	160,42	157,68	20,99	21,64	0,08	-0,05	59,19	157,67	7
2/1/2007	20	1	7,97	8,01	0,03	160,37	157,67	19,69	20,34	0,07	-0,04	59,15	157,66	7
2/1/2007	21	1	7,90	7,93	0,03	160,32	157,66	18,39	19,04	0,07	-0,04	59,11	157,65	7
2/1/2007	22	1	7,82	7,86	0,03	160,27	157,65	17,09	17,74	0,06	-0,04	59,07	157,64	7
2/1/2007	23	1	7,75	7,78	0,03	160,23	157,64	15,79	16,44	0,06	-0,03	59,04	157,63	7

Dia	Hora	Delta T	Q Afl.	Média Afluente	Volume Afluente	Tentativa	NI	Vazão Def	Media Def	Volume Def	Volume Arm. Perm	Volume Arm. Tot.	Elevação	Iterações
3/1/2007	0	1	7,67	7,71	0,03	160,20	157,64	15,79	15,79	0,06	-0,03	59,01	157,63	7
3/1/2007	1	1	7,60	7,63	0,03	160,16	157,63	14,49	15,14	0,06	-0,03	58,98	157,62	7
		1	19,49	13,54	0,05	160,16	157,63	14,49	14,49	0,05	0,00	58,98	157,62	7

**Tabela 29:** Resultado da Simulação Hidrológica e Amortecimento da Cheia de 1000 Anos

Dia	Hora	Delta T	Q Afl.	Média Afluente	Volume Afluente	Tentativa	NI	Vazão Def	Media Def	Volume Def	Volume Arm. Perm	Volume Arm. Tot.	Elevação	Iterações
1/1/2007	1	1	7,09					0,00				58,44	157,50	
1/1/2007	2	1	16,67	11,88	0,04	159,55	157,52	4,99	2,50	0,01	0,03	58,48	157,51	7
1/1/2007	3	1	30,33	23,50	0,09	159,63	157,53	5,69	5,34	0,02	0,07	58,54	157,52	7
1/1/2007	4	1	48,12	39,23	0,14	159,77	157,56	7,79	6,74	0,02	0,12	58,66	157,55	7
1/1/2007	5	1	70,55	59,34	0,21	159,98	157,60	10,59	9,19	0,03	0,18	58,84	157,59	7
1/1/2007	6	1	99,15	84,85	0,31	160,28	157,66	18,39	14,49	0,05	0,25	59,09	157,65	6
1/1/2007	7	1	129,95	114,55	0,41	160,69	157,73	28,09	23,24	0,08	0,33	59,42	157,72	7
1/1/2007	8	1	164,56	147,25	0,53	161,18	157,82	42,59	35,34	0,13	0,40	59,83	157,81	7
1/1/2007	9	1	206,65	185,60	0,67	161,79	157,92	63,59	53,09	0,19	0,48	60,30	157,91	8
1/1/2007	10	1	266,66	236,66	0,85	158,47	158,05	96,09	79,84	0,29	0,57	60,87	158,04	4
1/1/2007	11	1	342,93	304,80	1,10	159,29	158,18	130,59	113,34	0,41	0,69	61,56	158,18	6
1/1/2007	12	1	413,78	378,36	1,36	160,25	158,35	181,34	155,97	0,56	0,80	62,36	158,34	6
1/1/2007	13	1	472,04	442,91	1,59	161,29	158,51	243,19	212,27	0,76	0,83	63,19	158,50	7
1/1/2007	14	1	511,71	491,87	1,77	162,30	158,67	309,49	276,34	1,00	0,78	63,96	158,66	7
1/1/2007	15	1	529,36	520,54	1,87	159,18	158,80	364,59	337,04	1,21	0,66	64,62	158,79	4
1/1/2007	16	1	514,50	521,93	1,88	159,85	158,90	411,59	388,09	1,40	0,48	65,11	158,89	5
1/1/2007	17	1	468,45	491,47	1,77	160,23	158,95	436,59	424,09	1,53	0,24	65,35	158,94	6
1/1/2007	18	1	411,72	440,09	1,58	160,28	158,95	436,59	436,59	1,57	0,01	65,36	158,94	6
1/1/2007	19	1	351,83	381,77	1,37	160,08	158,92	421,59	429,09	1,55	-0,17	65,19	158,91	5
1/1/2007	20	1	295,46	323,64	1,17	159,70	158,86	392,79	407,19	1,47	-0,30	64,89	158,85	4
1/1/2007	21	1	244,35	269,91	0,97	159,21	158,78	356,09	374,44	1,35	-0,38	64,51	158,77	4
1/1/2007	22	1	199,59	221,97	0,80	162,65	158,69	317,89	336,99	1,21	-0,41	64,10	158,69	8
1/1/2007	23	1	161,64	180,62	0,65	162,09	158,61	284,29	301,09	1,08	-0,43	63,66	158,60	7
2/1/2007	0	1	130,60	146,12	0,53	161,53	158,52	247,29	265,79	0,96	-0,43	63,23	158,51	7
2/1/2007	1	1	105,52	118,06	0,43	160,99	158,44	215,09	231,19	0,83	-0,41	62,83	158,43	7
2/1/2007	2	1	84,72	95,12	0,34	160,50	158,36	184,89	199,99	0,72	-0,38	62,45	158,35	7
2/1/2007	3	1	66,84	75,78	0,27	160,05	158,29	160,84	172,87	0,62	-0,35	62,10	158,28	6
2/1/2007	4	1	50,91	58,88	0,21	159,64	158,23	144,34	152,59	0,55	-0,34	61,76	158,22	5
2/1/2007	5	1	37,21	44,06	0,16	159,24	158,16	125,09	134,72	0,49	-0,33	61,44	158,15	5
2/1/2007	6	1	26,53	31,87	0,12	158,87	158,10	108,59	116,84	0,42	-0,31	61,13	158,09	5
2/1/2007	7	1	18,55	22,54	0,08	158,53	158,04	93,59	101,09	0,36	-0,28	60,85	158,03	5
2/1/2007	8	1	13,05	15,80	0,06	158,22	157,99	81,09	87,34	0,31	-0,26	60,59	157,98	3
2/1/2007	9	1	9,82	11,43	0,04	161,94	157,94	68,59	74,84	0,27	-0,23	60,36	157,93	7
2/1/2007	10	1	8,78	9,30	0,03	161,68	157,89	56,59	62,59	0,23	-0,19	60,17	157,89	8
2/1/2007	11	1	8,69	8,73	0,03	161,46	157,86	50,59	53,59	0,19	-0,16	60,01	157,85	7

Dia	Hora	Delta T	Q Afl.	Média Afluente	Volume Afluente	Tentativa	NI	Vazão Def	Media Def	Volume Def	Volume Arm. Perm	Volume Arm. Tot.	Elevação	Iterações
2/1/2007	12	1	8,61	8,65	0,03	161,28	157,83	44,59	47,59	0,17	-0,14	59,87	157,82	7
2/1/2007	13	1	8,53	8,57	0,03	161,12	157,80	38,59	41,59	0,15	-0,12	59,75	157,79	7
2/1/2007	14	1	8,44	8,49	0,03	160,99	157,78	35,59	37,09	0,13	-0,10	59,65	157,77	7
2/1/2007	15	1	8,36	8,40	0,03	160,88	157,76	32,59	34,09	0,12	-0,09	59,55	157,75	7
2/1/2007	16	1	8,28	8,32	0,03	160,77	157,74	29,59	31,09	0,11	-0,08	59,47	157,73	7
2/1/2007	17	1	8,20	8,24	0,03	160,68	157,72	26,59	28,09	0,10	-0,07	59,40	157,71	7
2/1/2007	18	1	8,13	8,17	0,03	160,60	157,71	25,09	25,84	0,09	-0,06	59,34	157,70	7
2/1/2007	19	1	8,05	8,09	0,03	160,53	157,70	23,59	24,34	0,09	-0,06	59,28	157,69	6
2/1/2007	20	1	7,97	8,01	0,03	160,46	157,68	20,99	22,29	0,08	-0,05	59,23	157,67	7
2/1/2007	21	1	7,90	7,93	0,03	160,41	157,67	19,69	20,34	0,07	-0,04	59,18	157,66	7
2/1/2007	22	1	7,82	7,86	0,03	160,36	157,67	19,69	19,69	0,07	-0,04	59,14	157,66	6
2/1/2007	23	1	7,75	7,78	0,03	160,31	157,66	18,39	19,04	0,07	-0,04	59,10	157,65	7
3/1/2007	0	1	7,67	7,71	0,03	160,26	157,65	17,09	17,74	0,06	-0,04	59,06	157,64	7
3/1/2007	1	1	7,60	7,63	0,03	160,22	157,64	15,79	16,44	0,06	-0,03	59,03	157,63	7
		1	19,49	13,54	0,05	160,21	157,64	15,79	15,79	0,06	-0,01	59,02	157,63	7

## 7.2 PROPAGAÇÃO DE VAZÕES NO CANAL NATURAL

Todas as cheias foram simuladas pelo modelo hidrológico e depois amortecidas pelo simulador hidráulico para representar o efeito do reservatório sobre as cheias afluentes. Os hidrogramas defluentes dos 3 casos simulados – (a) cheia observada; (b) cheia de projeto com tempo de recorrência de 100 anos; e (c) cheia de projeto com tempo de recorrência de 1.000 anos foram então propagadas rio abaixo através do programa HEC-RAS, definindo os níveis atingidos na região das comunidades de São Bento Alto e de São Bento Baixo.

Os resultados dessas propagações encontram-se nas planilhas apresentadas nas Tabelas 30, 31 e 32, indicando as vazões, os níveis d'água nas diferentes seções transversais, elevação da superfície d'água, elevação da linha de energia, declividade da linha de energia, velocidade média do escoamento, área de escoamento, largura da superfície d'água e o número de Froude.

**Tabela 30:** Resultados Simulação da Propagação Hidrodinâmica da Cheia Observada

Seção	Q Total (m <sup>3</sup> /s)	Elev Mín do Canal (m)	Elev Superf D'água (m)	Superf D'água Crítica (m)	Elev Linha de Energia (m)	Declividade Linha de Energia (m/m)	Veloc Média canal (m/s)	Área Escoamento (m <sup>2</sup> )	Largura da superfície (m)	N. Froude canal
20460.45	114.09	135.00	137.36		137.43	0.004783	1.17	97.68	108.30	0.39
20056.9*	114.07	130.83	133.04		133.13	0.005886	1.32	86.74	94.05	0.44
19653.4*	114.07	126.65	128.89		128.97	0.004404	1.28	89.01	80.61	0.39
19249.9*	114.02	122.48	124.57		124.69	0.006217	1.53	74.59	67.18	0.46
18846.4*	114.03	118.31	120.66		120.75	0.003551	1.32	86.70	64.42	0.36
18442.9	114.03	114.13	115.88		116.01	0.008472	1.64	106.77	180.71	0.53
17942.6*	117.39	107.07	107.73		107.94	0.025993	2.01	58.55	103.46	0.85
17442.41	117.03	100.00	101.11		101.13	0.001200	0.61	191.69	200.83	0.20
16932.1*	120.00	98.42	100.74		100.75	0.000290	0.43	280.29	172.23	0.11
16421.82	122.09	96.84	99.10		99.24	0.005701	1.63	74.99	57.81	0.46
15591.93	123.00	93.10	93.85		93.90	0.006868	0.99	142.35	335.56	0.43
14741.88	126.88	83.93	85.69		85.92	0.011772	2.09	60.74	55.47	0.64
14025.3	123.91	80.00	81.50		81.51	0.000594	0.41	2405.45	1906.24	0.14
13375.95	148.72	75.41	78.99		79.19	0.007759	2.00	74.49	45.85	0.50
12584.8*	151.18	71.05	73.40		73.51	0.006544	1.46	103.24	100.91	0.46
11793.7*	150.89	66.69	68.21		68.29	0.006656	1.23	122.56	161.36	0.45
11002.69	150.59	62.32	62.89		62.93	0.006935	0.83	182.08	450.99	0.42
10107.9*	152.64	57.22	58.02		58.04	0.004008	0.64	237.01	566.30	0.32
9213.19*	153.46	52.13	52.86		52.90	0.007464	0.85	180.34	452.31	0.43
8318.453	152.38	47.03	47.87		47.89	0.003740	0.67	225.92	478.17	0.31
7408.46*	155.83	44.02	44.99		45.00	0.002707	0.58	268.10	556.64	0.27
6498.46*	155.58	41.02	41.95		41.97	0.003982	0.68	229.44	505.00	0.32
5588.47*	154.93	38.01	39.08		39.10	0.002255	0.56	276.56	529.12	0.25
4678.48*	156.96	35.00	35.99		36.02	0.004378	0.77	204.43	400.91	0.34
3768.494	153.62	31.99	33.43		33.44	0.001228	0.41	371.98	724.49	0.18
3118.13*	154.67	30.22	32.81		32.82	0.000702	0.47	338.26	400.30	0.15
2467.776	154.58	28.44	31.50		31.63	0.003083	1.58	101.21	53.97	0.36
1491.148	154.93	28.53	29.98		29.98	0.000151	0.24	657.12	605.36	0.07
954.238	156.00	22.92	25.42	25.12	26.02	0.016299	3.44	45.32	23.77	0.80

\* Seções interpoladas

**Tabela 31:** Resultados Simulação da Propagação Hidrodinâmica da Cheia de 100 anos

Seção	Q Total (m <sup>3</sup> /s)	Elev Mín do Canal (m)	Elev Superf D'água (m)	Superf D'água Crítica (m)	Elev Linha de Energia (m)	Declividade Linha de Energia (m/m)	Veloc Média canal (m/s)	Área Escoamento (m <sup>2</sup> )	Largura da superfície (m)	N. Froude canal
20460.45	263.69	135.00	137.94		138.08	0.004915	1.63	162.04	111.29	0.43
20056.9*	263.53	130.83	133.67		133.83	0.005613	1.79	147.40	97.02	0.46
19653.4*	263.47	126.65	129.63		129.79	0.004431	1.76	150.08	84.95	0.42
19249.9*	263.34	122.48	125.35		125.56	0.006035	2.03	129.43	74.13	0.49
18846.4*	257.01	118.31	122.69		122.75	0.000924	1.07	240.21	88.43	0.21
18442.9	234.31	114.13	116.09		116.48	0.018756	2.76	150.17	216.33	0.81
17942.6*	246.48	107.07	108.10		108.41	0.024391	2.49	98.93	120.33	0.88
17442.41	246.47	100.00	102.04		102.06	0.000620	0.61	402.91	256.43	0.16
16932.1*	249.96	98.42	101.83		101.84	0.000256	0.52	484.88	265.52	0.11
16421.82	250.05	96.84	99.72		99.95	0.007475	2.14	116.64	72.68	0.54
15591.93	253.41	93.10	94.16		94.25	0.006265	1.29	263.15	438.56	0.45

Seção	Q Total (m <sup>3</sup> /s)	Elev Mín do Canal (m)	Elev Superf D'água (m)	Superf D'água Crítica (m)	Elev Linha de Energia (m)	Declividade Linha de Energia (m/m)	Veloc Média canal (m/s)	Área Escoamento (m <sup>2</sup> )	Largura da superfície (m)	N. Froude canal
14741.88	256.88	83.93	86.29		86.64	0.012286	2.63	180.00	136.20	0.69
14025.3	255.60	80.00	82.23		82.24	0.000353	0.46	3801.30	1931.56	0.12
13375.95	258.11	75.41	79.59		79.91	0.008509	2.50	103.15	48.64	0.55
12584.8*	260.64	71.05	73.82		73.98	0.006469	1.78	146.75	106.57	0.48
11793.7*	260.63	66.69	68.51		68.62	0.007105	1.52	171.20	172.16	0.49
11002.69	260.63	62.32	63.06		63.11	0.006894	1.01	257.52	469.13	0.44
10107.9*	263.05	57.22	58.19		58.22	0.004138	0.77	343.59	648.69	0.34
9213.19*	263.04	52.13	53.04		53.09	0.007425	0.96	273.60	569.19	0.44
8318.453	262.97	47.03	48.09		48.12	0.003767	0.76	345.87	615.01	0.32
7408.46*	265.12	44.02	45.19		45.22	0.002684	0.68	392.38	645.90	0.28
6498.46*	265.19	41.02	42.14		42.17	0.004044	0.79	335.10	591.80	0.34
5588.47*	265.05	38.01	39.32		39.34	0.002202	0.64	413.86	636.37	0.25
4678.48*	265.28	35.00	36.21		36.25	0.004601	0.87	304.63	513.41	0.36
3768.494	264.07	31.99	34.03		34.04	0.000305	0.31	898.62	1023.42	0.10
3118.13*	265.47	30.22	33.89		33.90	0.000154	0.31	1074.74	857.88	0.08
2467.776	265.30	28.44	32.62		32.71	0.003861	1.32	271.58	313.63	0.37
1491.148	265.14	28.53	30.77		30.77	0.000080	0.22	1203.18	860.96	0.06
954.238	266.17	22.92	26.21	25.86	27.07	0.016300	4.11	64.84	25.63	0.82

\* Seções interpoladas

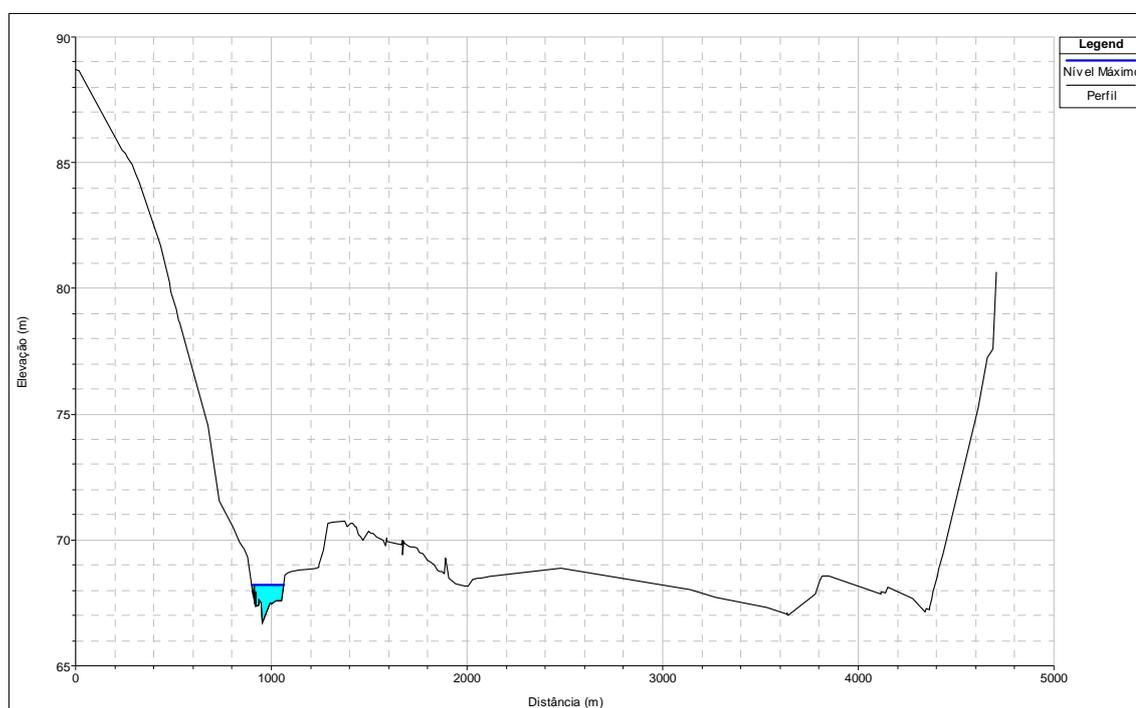
**Tabela 32:** Resultados Simulação da Propagação Hidrodinâmica da Cheia de 1000 anos

Seção	Q Total (m <sup>3</sup> /s)	Elev Mín do Canal (m)	Elev Superf D'água (m)	Superf D'água Crítica (m)	Elev Linha de Energia (m)	Declividade Linha de Energia (m/m)	Veloc Média canal (m/s)	Área Escoamento (m <sup>2</sup> )	Largura da superfície (m)	N. Froude canal
20460.45	436.59	135.00	138.45		138.65	0.005061	1.99	219.17	113.37	0.46
20056.9*	436.57	130.83	134.28		134.51	0.005133	2.10	207.60	99.95	0.47
19653.4*	435.63	126.65	130.24		130.47	0.004737	2.14	203.26	89.56	0.45
19249.9*	436.32	122.48	126.17		126.42	0.005058	2.24	194.39	84.10	0.47
18846.4*	434.42	118.31	123.97		124.05	0.000794	1.20	361.72	99.66	0.20
18442.9	434.64	114.13	116.55		117.12	0.019147	3.44	3621.86	858.47	0.87
17942.6*	447.22	107.07	108.52		108.95	0.022485	2.89	154.52	141.20	0.88
17442.41	447.10	100.00	103.05		103.07	0.000418	0.66	684.86	311.33	0.14
16932.1*	459.23	98.42	102.88		102.90	0.000263	0.66	833.19	390.17	0.12
16421.82	458.04	96.84	100.36		100.76	0.008636	2.78	166.84	106.69	0.61
15591.93	469.83	93.10	94.60		94.73	0.005340	1.57	487.25	583.30	0.44
14741.88	485.07	83.93	87.03		87.59	0.011713	3.31	284.82	154.84	0.71
14025.3	455.53	80.00	83.34		83.35	0.000193	0.48	5972.68	1960.53	0.09
13375.95	463.25	75.41	80.44		80.95	0.009537	3.18	145.77	52.51	0.61
12584.8*	471.19	71.05	74.47		74.71	0.006198	2.15	218.74	115.32	0.50
11793.7*	471.13	66.69	69.07		69.18	0.007792	1.48	318.55	359.33	0.50
11002.69	471.09	62.32	63.30		63.38	0.006895	1.25	375.66	496.21	0.46
10107.9*	478.51	57.22	58.44		58.48	0.004085	0.94	511.15	706.87	0.35
9213.19*	478.57	52.13	53.28		53.34	0.007469	1.13	422.58	690.65	0.46
8318.453	478.38	47.03	48.38		48.42	0.003615	0.88	544.25	754.91	0.33
7408.46*	485.10	44.02	45.48		45.52	0.002792	0.81	599.55	775.80	0.29
6498.46*	484.94	41.02	42.43		42.47	0.003917	0.92	526.06	721.48	0.34
5588.47*	484.81	38.01	39.61		39.65	0.002302	0.79	615.50	717.47	0.27

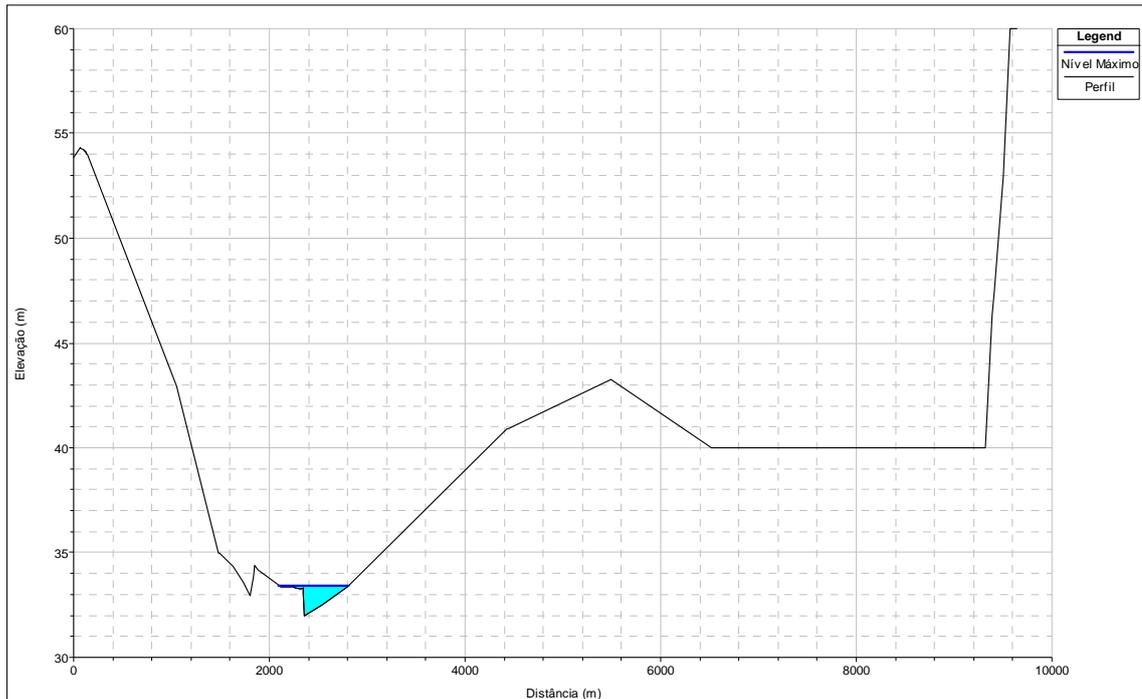
Seção	Q Total (m <sup>3</sup> /s)	Elev Mín do Canal (m)	Elev Superf D'água (m)	Superf D'água Crítica (m)	Elev Linha de Energia (m)	Declividade Linha de Energia (m/m)	Veloc Média canal (m/s)	Área Escoamento (m <sup>2</sup> )	Largura da superfície (m)	N. Froude canal
4678.48*	483.95	35.00	36.52		36.57	0.004439	1.00	481.66	637.54	0.37
3768.494	474.90	31.99	34.52		34.53	0.000266	0.36	1634.84	1458.18	0.10
3118.13*	479.53	30.22	34.37		34.38	0.000214	0.42	1598.44	1254.10	0.10
2467.776	473.85	28.44	33.28		33.40	0.003132	1.51	529.12	468.63	0.36
1491.148	462.81	28.53	31.89		31.90	0.000043	0.22	2644.72	1585.03	0.04
954.238	465.80	22.92	27.33	26.95	28.55	0.016302	4.89	95.19	28.29	0.85

\* Seções interpoladas

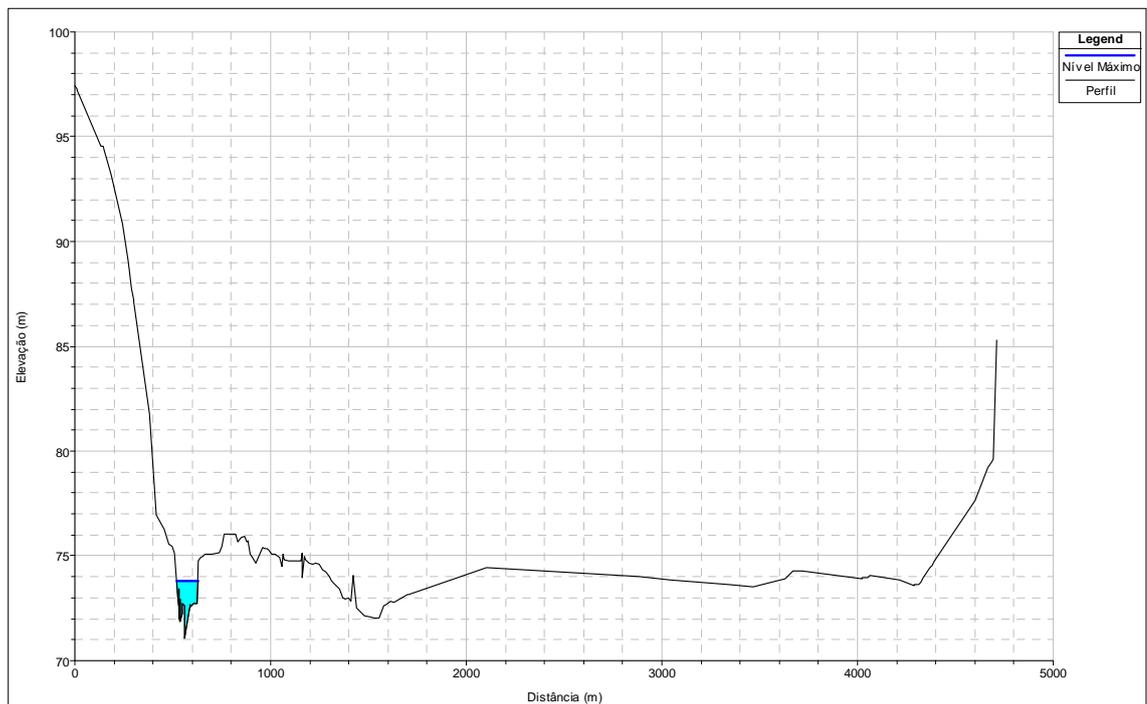
As Figuras 59 a 64 apresentam as seções transversais para as três cheias simuladas, junto às comunidades de São Bento Baixo e São Bento Alto. Mostram também as seções transversais de controle, junto às áreas habitadas, indicando esquematicamente a seção molhada máxima ocorrida durante a cheia. A Figura 65 apresenta o mapa esquemático da localização das seções transversais topobatimétricas utilizadas para o cálculo hidrodinâmico e as Figuras 66 a 69 mostram as áreas inundadas para as três cheias simuladas.



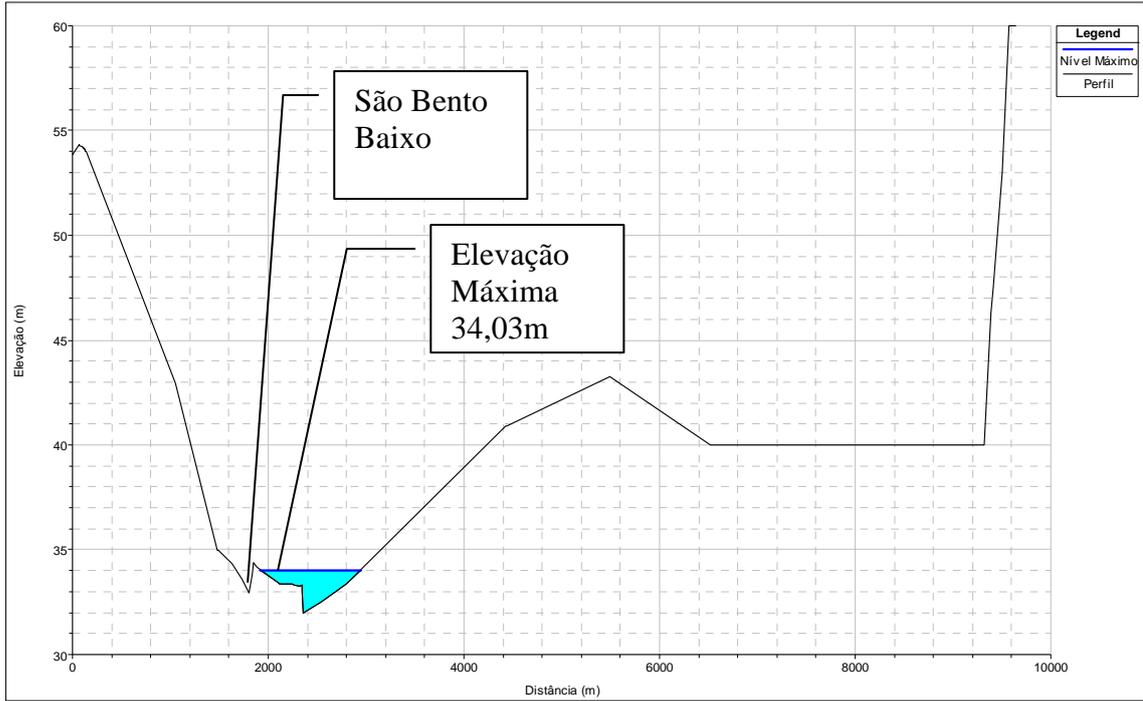
**Figura 59:** Cheia Observada - Seção Transversal junto a São Bento Alto – Seção 11793.7.



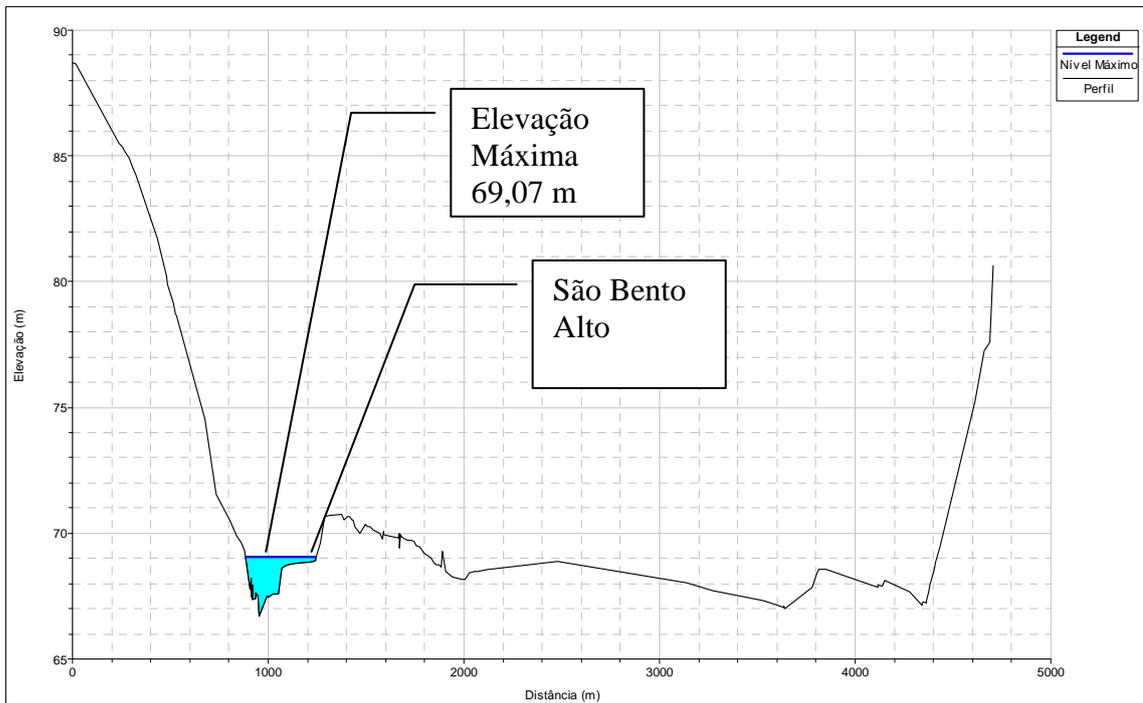
**Figura 60:** Cheia Observada - Seção Transversal junto a São Bento Baixo – Seção 3768.494.



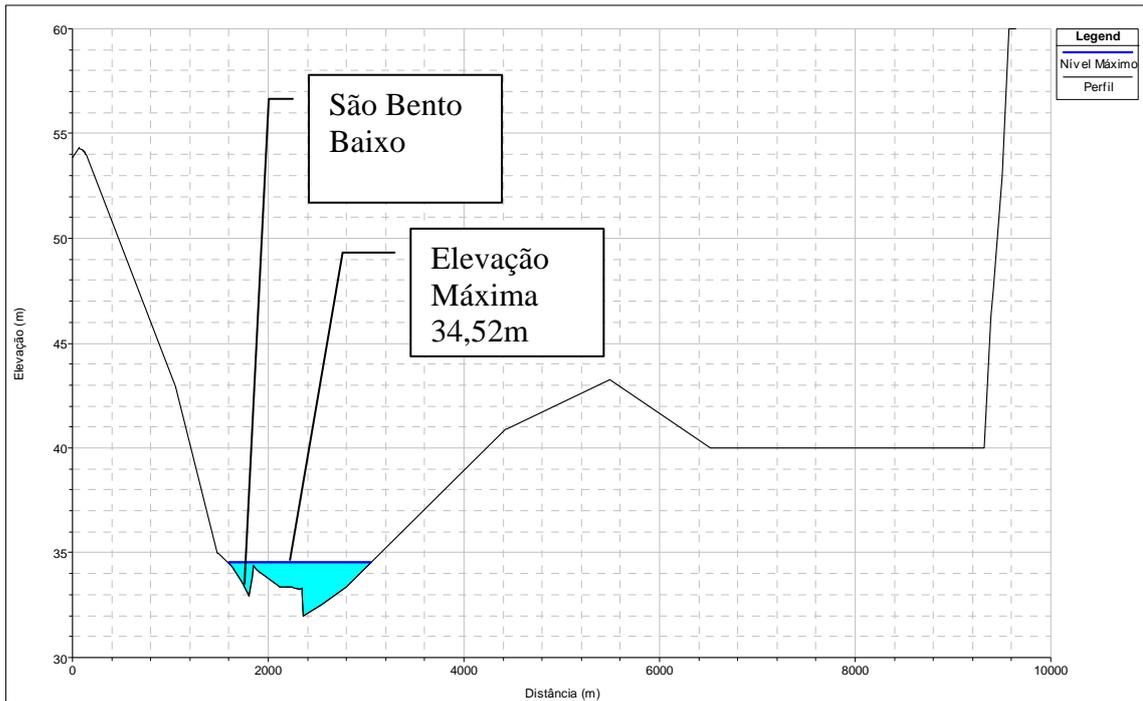
**Figura 61:** Cheia 100 anos – Seção Transversal junto a São Bento Alto – Seção 11793.7.



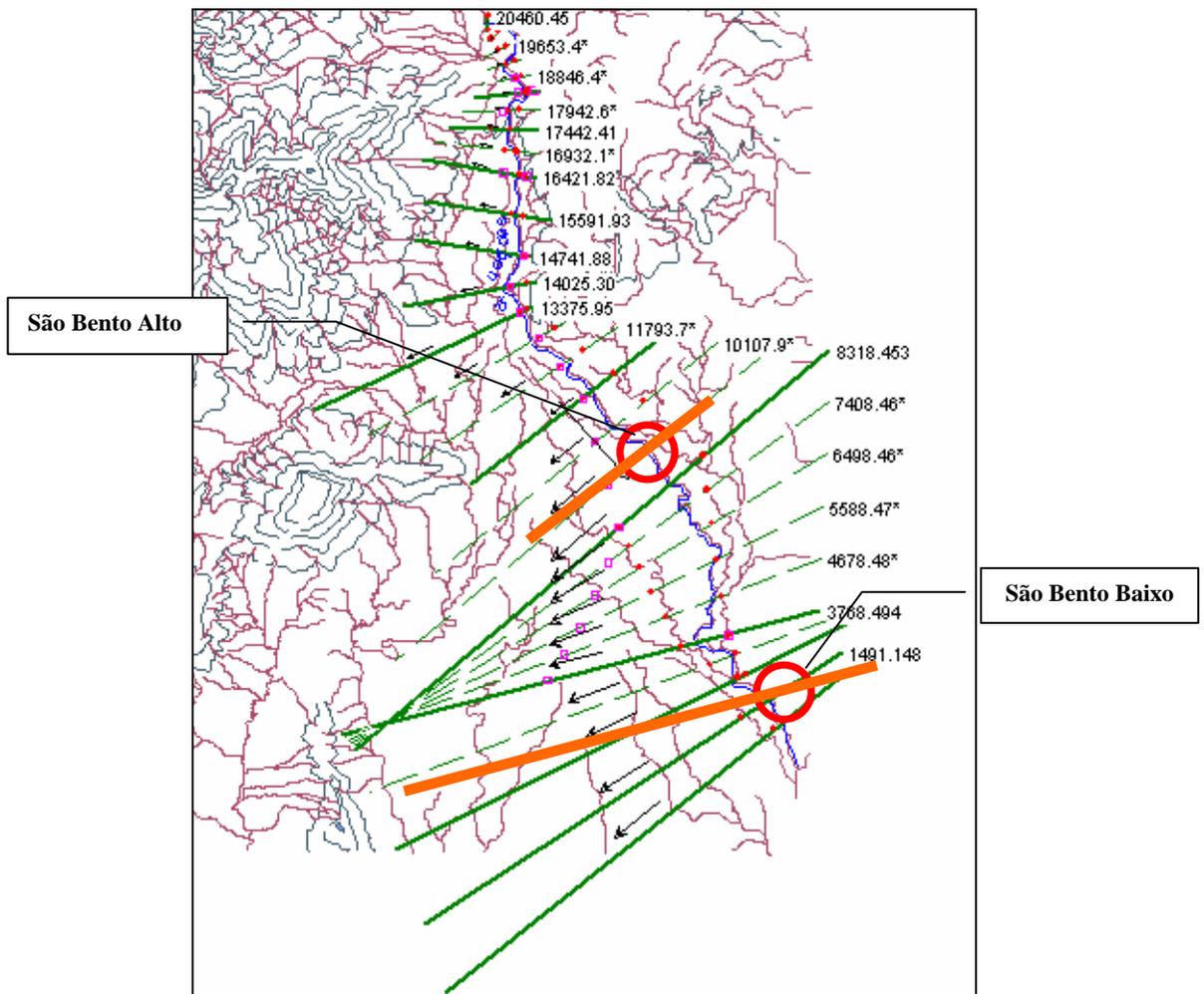
**Figura 62:** Cheia 100 anos - Seção Transversal junto a São Bento Baixo – Seção 3768.494.



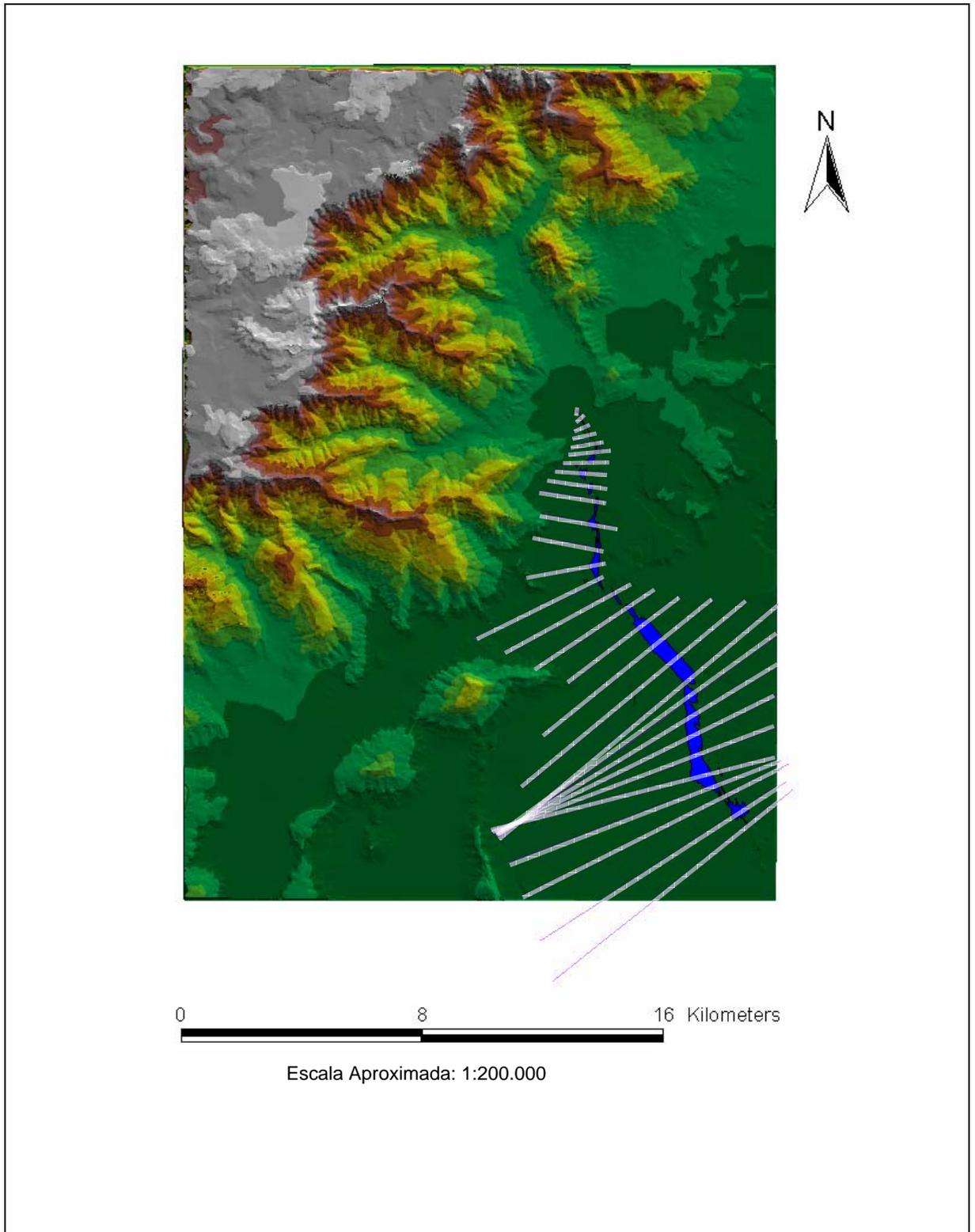
**Figura 63:** Cheia 1000 anos - Seção Transversal junto a São Bento Alto – Seção 11793.7.



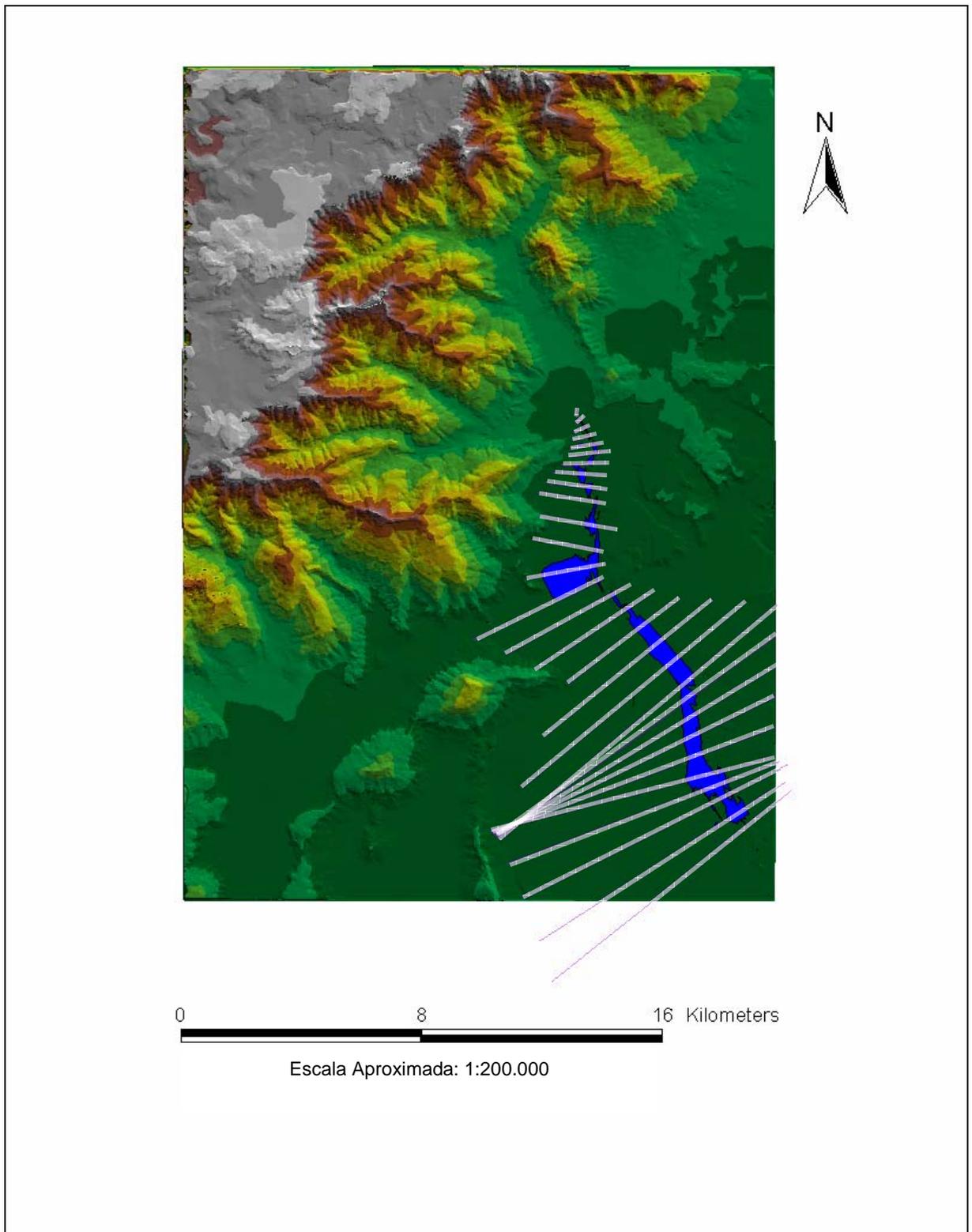
**Figura 64:** Cheia de 1000 anos - Seção Transversal junto a São Bento Baixo – Seção 3768.494.



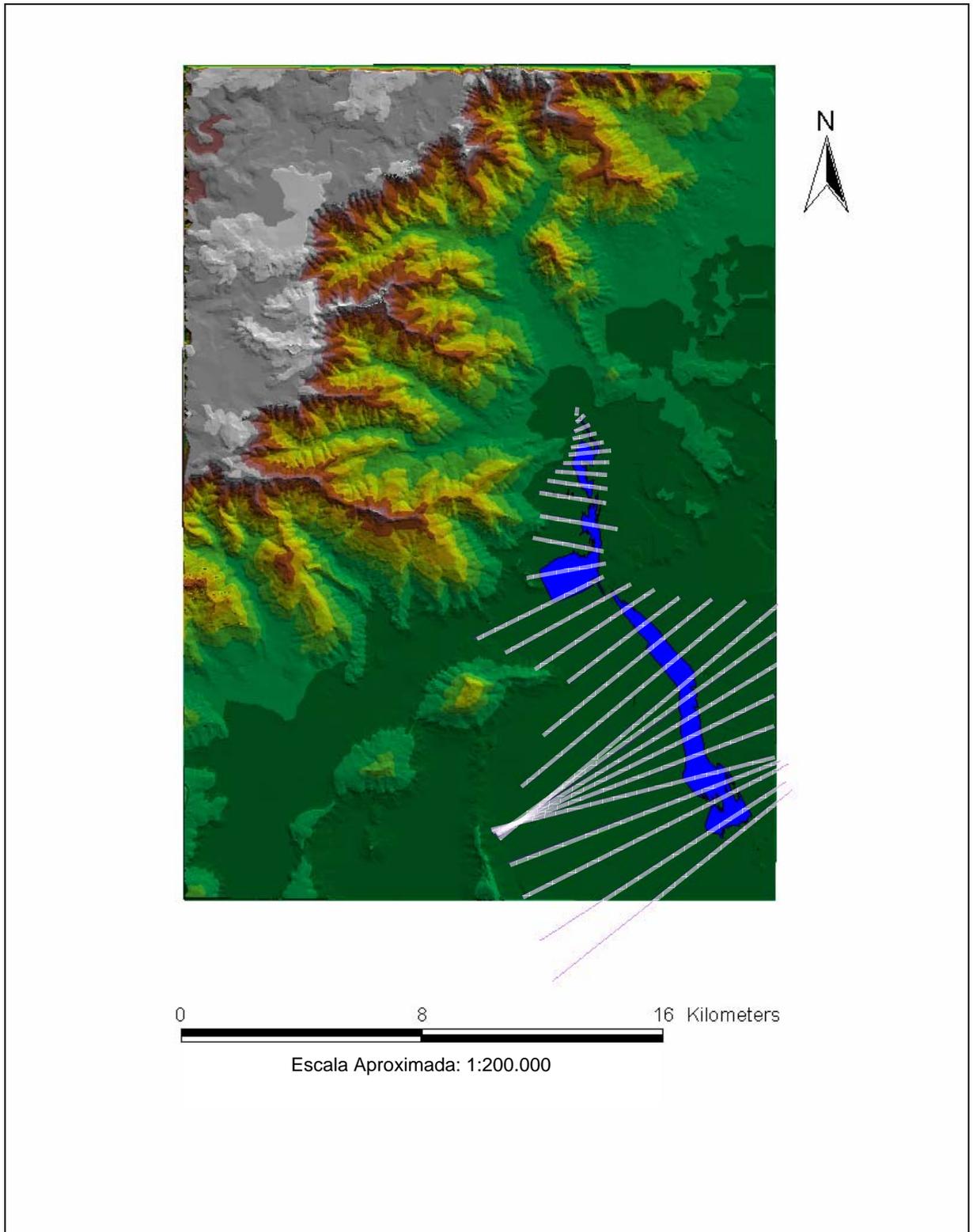
**Figura 65:** Seções utilizadas no HEC-RAS.  
 (linhas contínuas são seções levantadas, linhas tracejadas são seções interpoladas)



**Figura 66:** Mapa de Área Inundação – Simulação da Cheia Observada.



**Figura 67:** Mapa de Área Inundação – Simulação da Cheia de 100 Anos.



**Figura 68:** Mapa de Área Inundação – Simulação da Cheia de 1000 Anos.

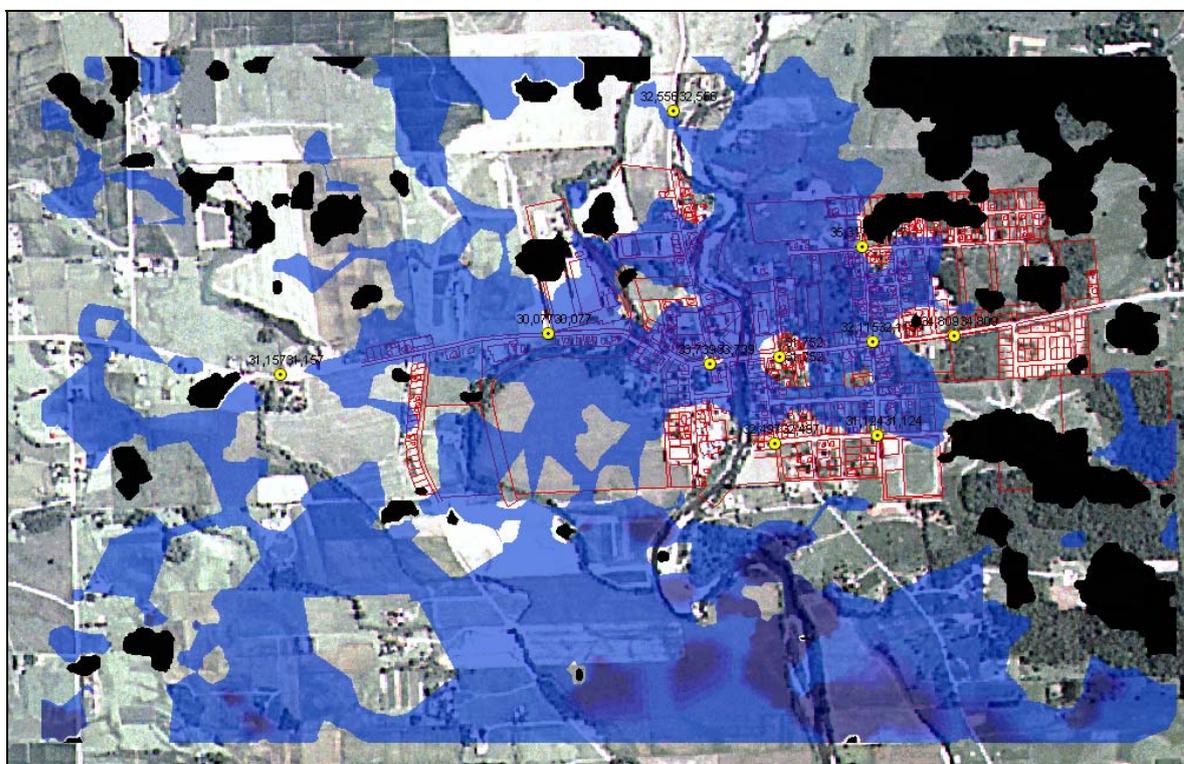
É importante ressaltar que os mapas das áreas inundadas determinadas pelo HEC-RAS, no seu módulo GEORAS, definem uma área atingida pelos pontos de máximos níveis atingidos em todo o vale do rio São Bento. Portanto, estas áreas não são áreas horizontais e já agregam o resultado de um efeito hidrodinâmico do escoamento. O GEORAS utiliza o Modelo Digital de Elevação, segundo a metodologia do software ArcGIS. Definidos os níveis máximos do escoamento do rio, os mapas de inundação são gerados a partir do módulo GEORAS.

### 7.3 MAPAS DE INUNDAÇÕES GERADOS PELO ARCGIS

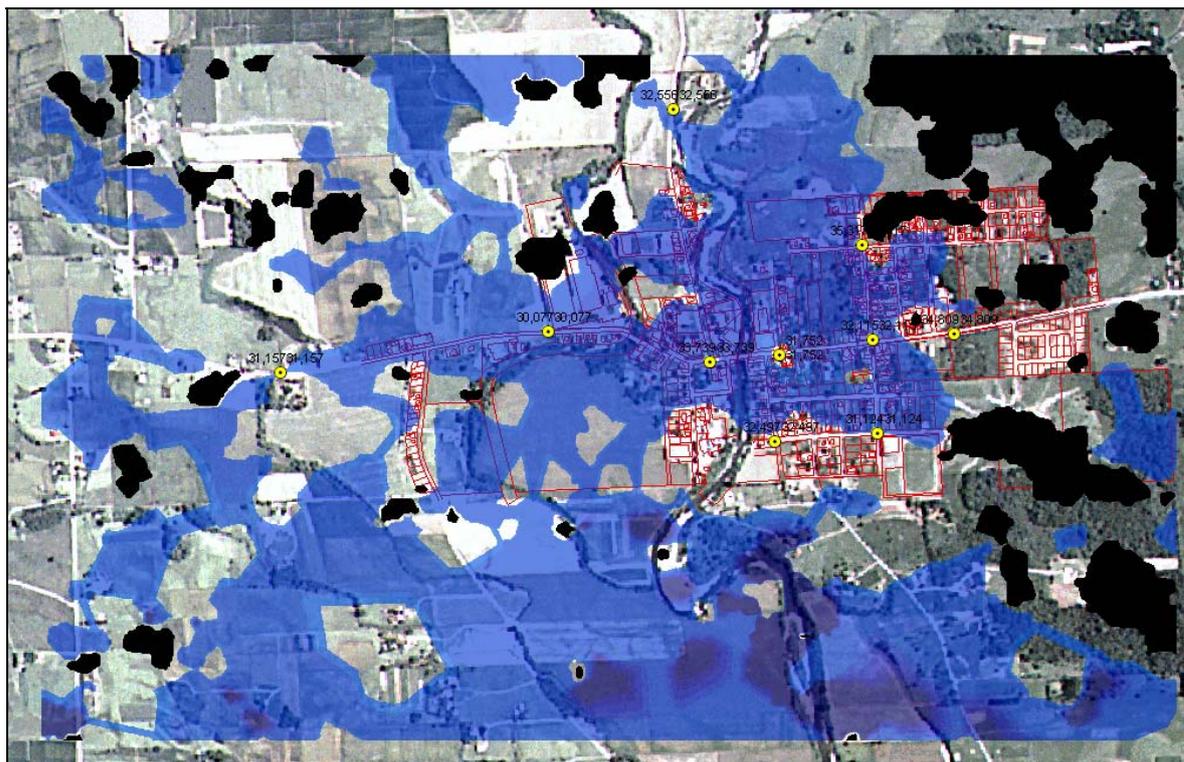
As Figuras 69 e 70 apresentam cortes horizontais da bacia demonstrando as áreas atingidas caso os níveis de água alcancem estas cotas.

As regiões preenchidas em cor preta representam áreas acima da cota mencionada.

O Anexo 2 apresenta os cortes horizontais realizados para elevações de 2 em 2 metros, todos realizados para demonstrar possíveis situações de inundação para cada cota.



**Figura 69:** São Bento Baixo - Planície de Inundação na El. 30 m.



**Figura 70:** São Bento Baixo - Planície de Inundação na El. 31 m.

No Anexo 2 apresentam-se os mapas 1 a 8 elaborados para mostrar o impacto de inundações até certas cotas, porém sem agregar a variação dos níveis, como os mapas apresentados pelo GEORAS, para a região de São Bento Baixo. Os mapas 9 a 19 foram gerados para a região de São Bento Alto. A comparação desses mapas com os mapas gerados pelo GEORAS pode ser uma importante ferramenta para a verificação da precisão dos estudos realizados.

O estudo de propagação hidrodinâmica utilizou seções topobatimétricas de boa precisão segundo relatado no capítulo 6 (Aplicação do SACC à Bacia Hidrográfica do Rio São Bento). Por outro lado, o Modelo Digital de Elevação foi definido a partir de uma metodologia que gera resultados com uma resolução de 15 m, o que pode gerar um erro significativo de mapeamento. Para contornar este problema foram utilizados diversos pontos de controle no campo, melhorando a calibragem do modelo de reconstituição da superfície do terreno.

Como exemplo da diferença de precisão dos resultados pode-se observar que a Figura 60 gerada pelo GEORAS para a cheia de 100 anos mostra um a área de inundação muito diferente dos mapas de cortes horizontais elaborados pelo ArcGIS.

Analisando-se a seção transversal localizada junto a localidade de São Bento Baixo (seção 3768.494) e os níveis atingidos por esta cheia depreende-se que a planície

inundada não seria de grande proporção como mostra, o mapa gerado pelo GEORAS. Antagonicamente, os cortes horizontais que utilizam o Modelo Digital de Elevação desenvolvido com as imagens ASTER, retratam uma inundação significativa, com grande área atingida. Em suma, existe uma indicação nítida de que o MDE gerado a partir das imagens ASTER está “mais baixo” do que as seções topobatimétricas utilizadas para os cálculos hidrodinâmicos.

Pode-se concluir, portanto, que a qualidade dos resultados da aplicação de um modelo computacional de boa qualidade, como é o caso do programa HEC-RAS, depende do investimento realizado para a definição de um Modelo Digital de Elevação - MDE, com o intuito de definir mapas de inundação. A imprecisão do MDE pode invalidar esses mapas, causando prejuízo maior para o sistema de suporte a decisão.

## 8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

a) A principal meta deste trabalho foi o de definir e experimentar um sistema de suporte à decisão completo, como ferramenta auxiliar à equipe de operação da Barragem São Bento, e como suporte aos órgãos municipais de Defesa Civil para a prevenção de inundações e auxílio às ações preventivas e de mitigação de danos causados por inundação. O sistema mostrou ser simples e ágil, contando com técnicas simplificadas, porém robustas, para a caracterização de cheias afluentes possíveis, a partir da previsão quantitativa de chuvas de modelos disponíveis em centro de previsão meteorológica.

b) Foi realizada uma modelagem hidrológica simplificada, desenvolvida com dados típicos da região e com eventos amostrados recentemente, que permitiram atingir resultados aparentemente satisfatórios. A qualidade dos resultados atingidos está presumida pelas informações qualitativas de níveis de cheias dos últimos anos, observadas por moradores locais. Recomenda-se que o modelo receba melhorias no seu algoritmo de cálculo do coeficiente de escoamento, estabelecendo uma “memória” da situação de capacidade de infiltração do terreno para eventos seqüenciais de precipitação. Deve-se ressaltar que o modelo desenvolvido objetiva a reconstituição ou simulação de eventos de alta pluviosidade e que mantém alguns parâmetros de controle de fácil operação, dando a oportunidade de refazer a simulação logo que se tenha informações da evolução do campo sobre um evento de cheia. O modelo criado não tem como objetivo constituir uma ferramenta para a reconstituição de séries contínuas de vazão.

c) A modelagem da propagação de vazões através do HEC-RAS mostrou que o mesmo se configura como uma ferramenta poderosa e de grande capacidade para estudar inclusive mananciais de maior complexidade. O rio São Bento, no trecho utilizado para a realização da propagação de descargas, tem características de regiões de várzea. Apresenta seções transversais planas e extensas e com acidentes geográficos de pequena variação altimétrica dando oportunidade de ocorrer transposição de sub-bacias vizinhas mesmo para cheias de baixa recorrência (cerca de 50 anos). Isto ocorre, tal como na região do rio Palmital, estudada por Enomoto (2004). O modelo se mostrou eficaz com coeficientes de Manning com a mesma faixa de valores daquele estudo. A análise bibliográfica do HEC-RAS confirma que o modelo de simulação está preparado para solucionar problemas deste tipo.

d) O modelo HEC-RAS mostrou-ser eficiente para a obtenção dos mapas de inundação através de seu link com o “software” ArcView. Certamente, as respostas obtidas estão diretamente relacionadas à qualidade da informação inserida nos dados básicos.

e) A determinação detalhada do modelo de elevação do terreno das regiões mais afetadas pelas inundações (São Bento Alto e São Bento Baixo) serviu para a definição das curvas de nível de 1 em 1 metro. Desta forma conseguiu-se definir com detalhes as áreas atingidas pelas águas de inundação. Alguns pontos da bacia foram identificados como pontos de controle para a calibragem do modelo numérico de determinação do Modelo Digital Elevação (MDE). Provavelmente, a utilização de um maior número de pontos de controle poderia melhorar a precisão do MDE determinado.

f) Apesar dos bons resultados alcançados com o programa HEC-RAS para a obtenção dos mapas de inundação percebeu-se que os resultados obtidos das simulações hidrodinâmicas, demarcando níveis de inundação nas seções transversais de controle não geraram mapas de inundação similares aos indicados pelos cortes horizontais realizados com o Modelo Digital de Elevação (MDE) do software ArcView. Analisando com maior detalhe concluiu-se que o MDE indica uma topografia defasada com relação às seções topográficas utilizadas pelo programa HEC-RAS. Este defasamento todavia é compatível com a resolução e precisão proposta pelo trabalho realizado na extração do MDE, mesmo com a pequena concentração dos pontos de controle utilizados nas regiões de maior interesse. Enfim, a precisão adotada para a definição do Modelo Digital de Elevação não estava compatível com a precisão das seções transversais utilizadas para a simulação hidrodinâmica. Conclui-se que se o objetivo é gerar mapas de inundação utilizando-se de uma estrutura georreferenciada de um MDE, deve-se aumentar o investimento na busca de imagens de satélite mais precisas e de maior resolução. Por outro lado, certamente deve-se aumentar a discretização do levantamento de seções transversais do rio estudado para que se obtenha uma simulação com o melhor grau de precisão possível, sob pena de chegar a um mapeamento de inundação com imprecisões inaceitáveis. No caso estudado utilizou-se uma distância de cerca de 2000 metros entre seções. Recomenda-se fazer um levantamento a cada 500 metros ou definir a posição das seções a serem levantadas com uma minuciosa inspeção de campo da área a ser simulada.

g) Com os resultados alcançados pode-se concluir que um sistema de suporte como o elaborado neste trabalho pode ser desenvolvido com um grau de precisão aceitável e

associado a um investimento financeiro mínimo, utilizando programas gratuitos existentes no mercado ou mesmo com sistemas desenvolvidos com tecnologias de desenvolvimento de softwares acessíveis, desde que seja comprovada sua aplicabilidade à bacia estudada. Cada bacia deve ter sua solução desenvolvida por especialistas que conheçam a região de aplicação e a partir de uma amostra razoável de informações hidrometeorológicas e geográficas que permitam uma caracterização da bacia assim como de eventos de precipitação para a calibração do sistema adotado. Isto dará maior confiabilidade ao sistema desenvolvido.

h) O investimento financeiro realizado neste trabalho foi limitado. Certamente a aplicação de maiores recursos deve aumentar significativamente a qualidade do sistema. Os recursos, em geral, podem ser aplicados em:

- instalação de estações fluviométricas e pluviométricas de controle
- levantamentos topobatimétricos georreferenciados
- medições de descarga
- medições de perfis de linha d'água simultâneos durante o evento de cheias
- aumento dos pontos de controle para o georreferenciamento das imagens de satélite ou pares estereoscópicos
- consistência de dados pluvio e fluviométricos
- aquisição de imagens de satélites de maior precisão
- desenvolvimento de sistemas computacionais para a modelagem e gerenciamento de dados

i) Sistemas de suporte à decisão tal como o aqui abordado podem ser de grande utilidade para os órgãos gestores responsáveis pelo suporte à população em geral, como ferramenta de prevenção de danos e até como suporte às ações de mitigação de danos durante o evento de inundações.

j) No caso específico da aplicação, a bacia do rio São Bento, ressalta-se a necessidade imediata da recuperação das Estações Fluviométricas de “Serrinha 200 m Jusante Barragem” e de “São Bento Jusante”, a primeira instalada em 1995 e a segunda instalada em 2004, pela CASAN. A primeira tem sido operada, porém não tem medições de descarga mais recentes e a segunda encontra-se desativada, com um rol de medições executadas apenas para

eventos de descargas baixas. Recomenda-se a sua ativação, a medição de descargas regulares, principalmente para eventos de cheias, habilitando estas seções de controle para a calibração da modelagem realizada ou mesmo para futuras modelagens.

k) É importante a instalação de estações fluviométricas junto às comunidades de São Bento Alto e São Bento Baixo, identificando completamente as cotas que concretizam danos. Nestas estações devem ser realizadas também medições de descarga para a consolidação de curvas de descarga ou de correlações de comportamento hidráulico e hidrológico com as estações fluviométricas de São Bento e de São Bento Jusante. São o que podemos denominar de seções de controle, junto aos locais de danos. Estas seções servem tanto de orientação daqueles que venham a trabalhar com o sistema de suporte à decisão como para a população em geral, na sensibilização do seu entendimento do comportamento do rio São Bento.

l) Deve-se consolidar uma parceria com órgãos públicos ligados à previsão quantitativa de precipitações, que tenham autonomia e competência par fornecer diariamente e paulatinamente as previsões meteorológicas quantitativas para a bacia específica. O Modelo ARPS é uma ferramenta de alcance gratuito exigindo uma massa crítica de conhecimento e potencial de “hardware” – infraestrutura de informática, para ser utilizado. Atualmente, além de outros modelos de previsão gratuitos existentes, a Universidade Federal de Santa Catarina detém o conhecimento e estrutura para disponibilizar tal ferramenta. As dificuldades são de operacionalização em regime contínuo da ferramenta em um ambiente acadêmico. Todavia certamente deve haver uma forma para que as necessidades e soluções aqui apontadas possam ser debatidas entre as instituições e gerências governamentais estaduais e municipais envolvidas, possibilitando a imediata utilização desta ferramenta.

m) Finalmente, deve-se salientar a possibilidade de se contactar o órgão gestor do reservatório da Barragem São Bento para a inclusão desta ferramenta junto ao seu sistema de operação e controle do reservatório. Para tal deve-se prever também um treinamento obrigatório dos operadores que operam o sistema. Esta medida vislumbra a possibilidade da estrutura de operação da Barragem São Bento também ser utilizada como um serviço de suporte à decisão, que certamente também deverá ser conectada aos escritórios da Defesa Civil dos municípios atingidos e Secretarias Municipais relacionadas à segurança e saúde das populações das comunidades atingidas.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **A ANA na gestão das águas**. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso em: 01 nov. 2006.

AHMAD, Sajjad; SIMONOVIC, S. P. An intelligent decision support system for management of floods. **Water Resources Management**, [S. l.], v. 20, p. 391-410, 2006.

ANDREOLLI, Ivanilto et al. Previsão de vazão afluente a um reservatório utilizando previsão quantitativa de chuva. **Revista Brasileira e Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.11, n. 3, p. 55-69, jul./set. 2006.

ANSELMO, V. et al. Flood risk assessment using an integrated hydrological hydraulic modelling approach: a case study. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 175, p. 533-554, fev. 1996.

ARNOLD, J.G. et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. **Journal of the American Water Resources Association**, [S. l.], v. 34, n. 1, p. 73-89, fev. 1998.

BARKAU, R.L. Simulation of the July 1981 flood along salt river. In: **Special problems in Hydraulics**. Department of Civil Engineering Colorado State University. Fort Collins, CO, 1982. Relatório Técnico.

BERGMAN, M. J.; GREEN, W.; DONNANGELO, L. J. Calibration of storm loads in the south prong watershed, Florida, using basins/HSPF. **Journal of the American Water Resources Association**, E.U.A., v. 38, n. 5, p. 1423-1436, out. 2002.

CALKINS, H.W.; TOMLISON, R.F. Geographic information systems: methods and equipment for land use planning. In: INTERNATIONAL GEOGRAPHIC UNION COMMISSION ON GEOGRAPHICAL DATA SENSING AND PROCESSING, 1977, Reston, E.U.A. **Anais...** Reston, E. U.A: [s. n.], 1977.

CÂMARA, Gilberto et al. **Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica**. São José dos Campos: SBC, 1996. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/anatomia.pdf>>. Acesso em: 05 out. 2006.

CÂMARA, Gilberto; DAVIS, Clodoveu. Capítulo 1 – Introdução. In: CÂMARA, Gilberto; MONTEIRO, Antônio M.; MEDEIROS, José S. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2004.

CAMPANA, Néstor A., TUCCI, Carlos E.M. Predicting floods from urban development scenarios: case study of dilúvio basin, Porto Alegre, Brazil. **Urban Water Exeter**, Reino Unido, v. 3, p. 113-124, 2001.

CHEN, Y.H. **Mathematical modeling of water and sediment routing in natural channels**. 1973. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Colorado State University, Fort Collins, CO, 1973.

CHOW, Ven T. **Handbook of Applied Hydrology**. New York: Ed. McGraw-Hill, 1964. 1.418 p.

CHRISTOFOLETTI, Antonio. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1999.

COLLISCHONN, Walter. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

COMITÊ DO ITAJAÍ: agência de água. Disponível em:  
<<http://www.comiteitajai.org.br/hp/index.php>>. Acesso em: dez. 2005.

COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO (CASAN). Manual de operação do reservatório: barragem São Bento. Santa Catarina, 2003. Relatório Técnico.

COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO (CASAN). Programa de gerenciamento de risco da barragem São Bento. Santa Catarina, 2004. Relatório Técnico.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). [200?]. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br>>. Acesso em: dez. 2005.

CORREIA, Francisco N. et al. Coupling GIS with hydrologic and hydraulic flood modelling. **Water Resources Management**, Holanda, v. 12, p. 229–249, 1998.

DI LUZIO, Mauro; SRINIVASAN, Raghavan, ARNOLD, Jeffrey G. Integration of watershed tools and swat model into basins. **Journal of the American Water Resources Association**, [S. l.], v. 38, n. 4, p.1127-1141, ago. 2002.

ENOMOTO, Carolina F. **Método para elaboração de mapas de inundação estudo de caso na bacia do rio Palmital, Paraná.** 2004. 122 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). GIS and mapping software. Disponível em: <<http://www.esri.com>>. Acesso em: 23 nov. 2006.

FEDERAL INTERAGENCY COORDINATING COMMITTEE (FICCDC). A process for evaluating geographic information systems. Reston, VA, 1988. Relatório Técnico. Disponível em: <<http://www.usgs.gov>>. Acesso em: 12 nov. 2006.

FREAD, D.L. **Theoretical development of an implicit dynamic routing model.** Dynamic routing seminar United States department of commerce, Washington, E.U.A., 1976. Notas de aula.

HAAS, R.; AMBRIZZI, T.; PEREIRA FILHO, A. J. Comparação de desempenho entre um cluster PC-LINUX e um SP2 em simulações com o modelo ARPS. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MODELAGEM ATMOSFÉRICA, 1. ; CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, out. 2000.

HAAS, R.; DECKER, I. C.; DOTTA, D. Validação de um sistema de previsão quantitativa de chuva para o sul do Brasil. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 2., 2003, Salvador. **Anais...** Salvador: ANEEL, 2003.

HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (HEC). Disponível em: <<http://www.hec.usace.army.mil/>>. Acesso em: 01 dez. 2006.

LIBOS, Michely I. P. C. **Modelagem da poluição não pontual na bacia do rio Cuiabá baseada em geoprocessamento.** 2002. 269 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

LINSLEY, Ray K. Flood estimates: how good are they? **Water Resources Research**, [S. l.], v. 22, n. 9, p. 159-164, ago. 1986.

MARTIN, Paul H. et al. Interfacing GIS with water resource models: a state-of-the-art review. **Journal of the American Water Resources Association**, [S. l.], v. 41, n. 6, p. 1471–1487, dez. 2005.

MOSQUERA-MACHADO, S.; AHMAD, S. Flood hazard assessment of atrato river in Colombia. **Water resources Management**, [S. l.], v. 21, n. 3, p. 591-609, 2007.

MÜLLER, Mauricio; FILL, Heinz D. Redes neurais aplicadas na propagação de vazões. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15., Curitiba, 2003. **Anais...** Curitiba: ABRH, 2003.

NASCIMENTO, Carlos E. S. Hidrologia. In: **Apostila da Disciplina ENS 5102**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000. Notas de aula.

OLIVERA, Francisco et al. ARCGIS-SWAT: a geodata model and gis interface for swat1. **Journal of the American Water Resources Association**, [S. l.], v. 42, n. 2, p. 295-309, abr. 2006.

PEDRAZZI, José A. **Hidrologia Aplicada**. 2004. Disponível em: <<http://www.facens.br/alunos/material/Pedrazzi0038/>>. Acesso em: 10 set. 2004. Notas de aula.

PINTO, Nelson L. et al. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1976.

PULS, L. G. Flood regulation of the Tennessee River. In: CONGRESS (SENATE AND HOUSE), 70., Washington, D.C. **Anais...** Washington, D.C.: [s.n.], 1928. (1<sup>st</sup> Session, H.D. 185, Part 2, Appendix B).

RÖHM, Sergio A. O que é sistema de informações geográficas? In: **Módulo I**. Curso de Especialização em Geoprocessamento da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

SANTHI, C. et al. A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in a watershed in Texas. **Environmental Modelling & Software**, [S. l.], v. 21, p. 1141–1157, 2006.

SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO URBANO E MEIO AMBIENTE (SEDUMA). Bacias hidrográficas de Santa Catarina: diagnóstico geral. Florianópolis, 1997. 163 p.

SIMÕES, Joana M. A.; HIPÓLITO, João N. A. R. Modcheias: um modelo hidrológico para definição de zonas inundáveis. In: CONGRESSO IBÉRICO GESTÃO E PLANEAMENTO DA ÁGUA, 3., Sevilha, 2002. **Anais...** Sevilha: [s. n.], 2002.

SISTEMA DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS DE MINAS GERAIS (SIMGE). Disponível em: <<http://www.simge.mg.gov.br/simge/index.html>>. Acesso em: 12 jan. 2007.

SMITH, R.H. **Development of a flood routing model for small meandering rivers**. 1978. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - University of Missouri. Rolla, MO, 1978.

TODINI, Ezio. An operational decision support system for flood risk mapping, forecasting and management. **Urban Water**, Reino Unido, v. 1, n. 2, p. 131-143, jun. 1999.

TUCCI, Carlos E.M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 1993. 944 p.

TUCCI, Carlos E.M. (Org.). **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 1998.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). HEC-RAS: river analysis system – version 3.0. **Hydraulic Reference Manual**, E.U.A., 2001.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S. EPA). Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources, E.U.A., 2001. User's Manual.

WENDLAND, Edson. **Modelos matemáticos e métodos numéricos em águas subterrâneas**. São Paulo: SBMAC, 2003. 95 p.

XUE, M.; DROEGEMEIER, K.K.; WONG, V. The advanced regional prediction system (ARPS): a multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction model, part I: model dynamics and verification. **Meteorology And Atmospheric Physics**, [S. l.], v. 75, p. 161-193, 2000.

XUE, M. et al. **ARPS Version 4.0. User's Guide**. Center for analysis and prediction of storms, Oklahoma, maio 1995. Disponível em:  
<<http://www.caps.ou.edu/ARPS/ARPS4.guide.html>>. Acesso em: 01 dez. 2005.

XUE, M. et al. The advanced regional prediction system (ARPS) - A multiscale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part II: model physics and applications. **Meteorology And Atmospheric Physics**, [S. l.], v. 76, p. 134-165, 2001.

**ANEXO 1 - DADOS DA BARRAGEM SÃO BENTO**

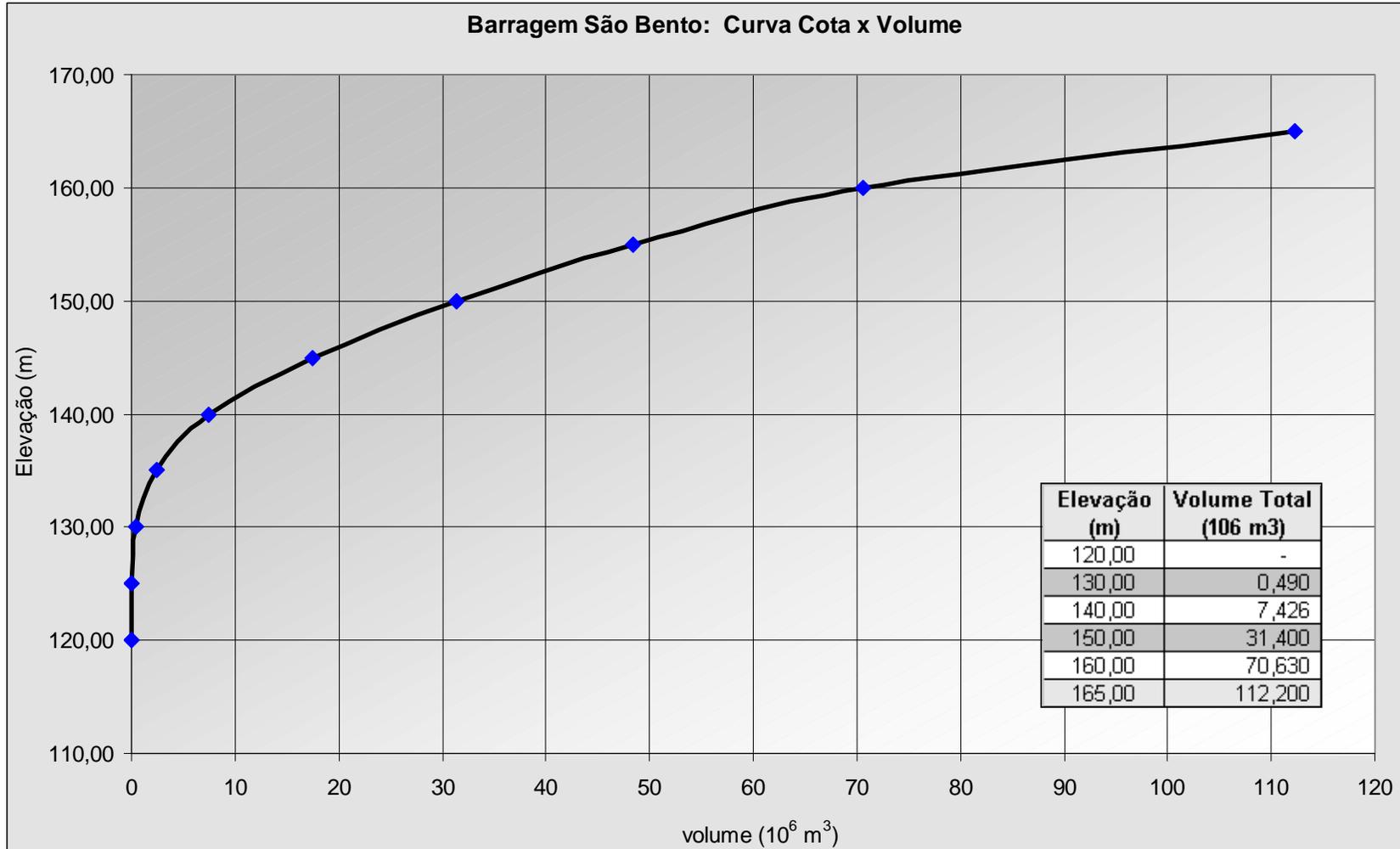
Dados de Precipitação e Vazões da Barragem São Bento

CHEIAS OCORRIDAS NO PERÍODO 2004/2006				
N. ORDEM CRONOLÓG	PERÍODO	DURACAO (DIAS)	PICO (m3/s)	PRECIPITAÇÃO (mm)
1	11/9 a 17/09/04	7	78,99	111,7
2	21/9 a 25/9/04	5	43,87	64,9
3	26/9 a 01/10/04	6	26,40	34,7
4	7/12 a 13/12/04	7	189,31	160,7
5	20/12 a 23/12/04	4	41,97	38,0
<b>6*</b>	<b>22/3 a 25/03/05</b>	<b>4</b>	<b>98,98</b>	<b>109,1</b>
7	17/05 a 20/05/05	4	50,36	55,2
8	8/8 a 12/08/05	5	130,06	110,4
9	29/08 a 02/09/05	4	123,85	193,8
<b>10*</b>	<b>03/09 a 05/09/05</b>	<b>3</b>	<b>33,92</b>	<b>112,3</b>
11	17/09 a 22/09/05	6	37,12	57,1
<b>12*</b>	<b>08/10 a 09/10/05</b>	<b>2</b>	<b>32,83</b>	<b>24,6</b>
13	15/10 a 19/10/05	5	179,31	135,4
<b>14*</b>	<b>27/10 a 30/10/05</b>	<b>4</b>	<b>44,60</b>	<b>53,0</b>
15	06/11 a 14/11/05	9	38,29	85,6
16	17/11 a 18/11/05	2	21,23	29,0
17	23/01 a 30/01/06	8	79,90	152,2
<b>18*</b>	<b>31/01 a 01/02/06</b>	<b>2</b>	<b>61,11</b>	<b>47,3</b>
19	01/02 a 05/02/06	5	82,03	18,6
<b>20*</b>	<b>25/03 a 28/03/06</b>	<b>4</b>	<b>168,65</b>	<b>151,4</b>
<b>21*</b>	<b>10/05 a 12/05/06</b>	<b>3</b>	<b>60,78</b>	<b>81,0</b>
<b>22*</b>	<b>16/08 a 18/08/06</b>	<b>2</b>	<b>60,29</b>	<b>73,7</b>

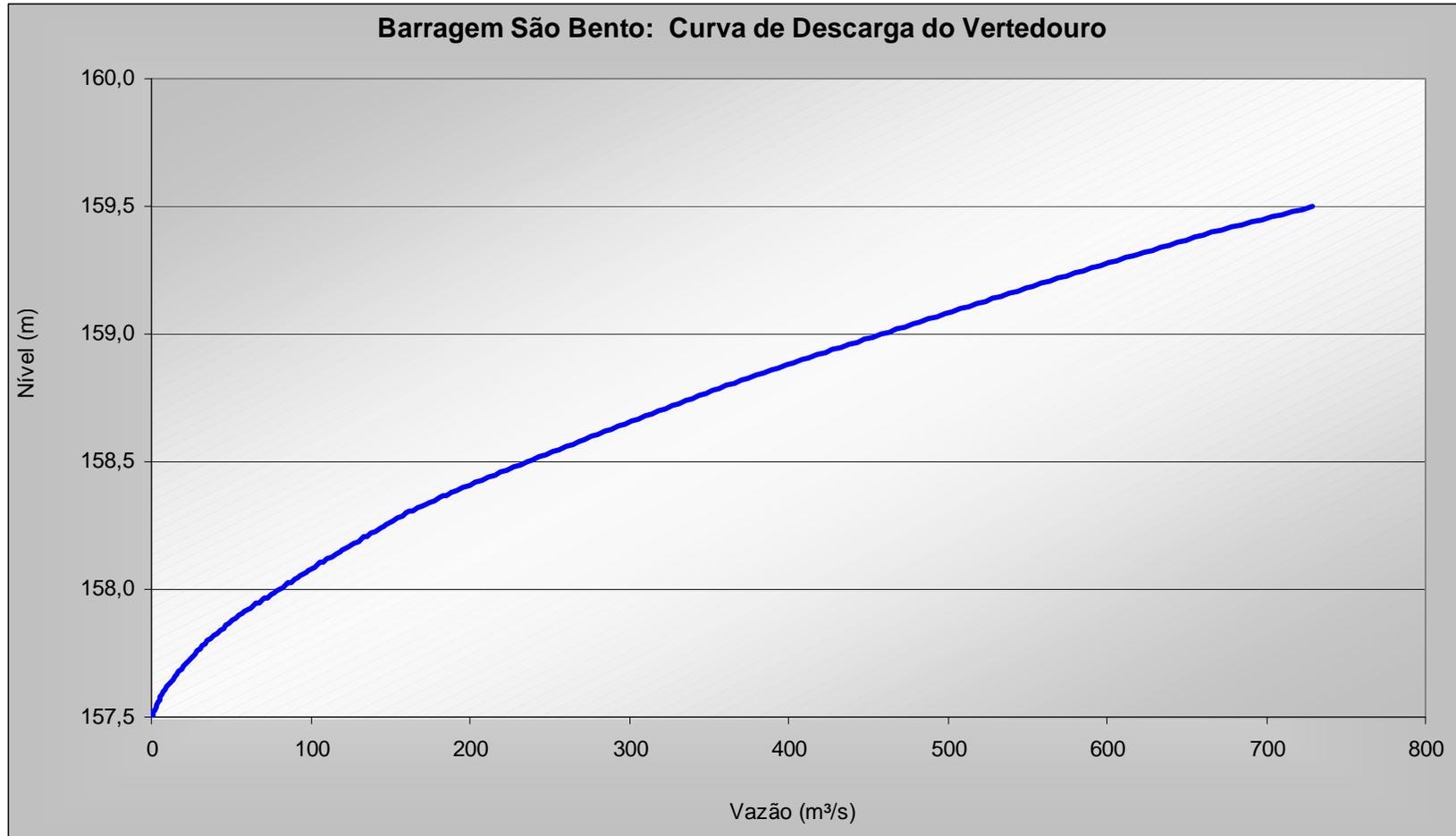
\*Eventos selecionados

FONTE: CASAN

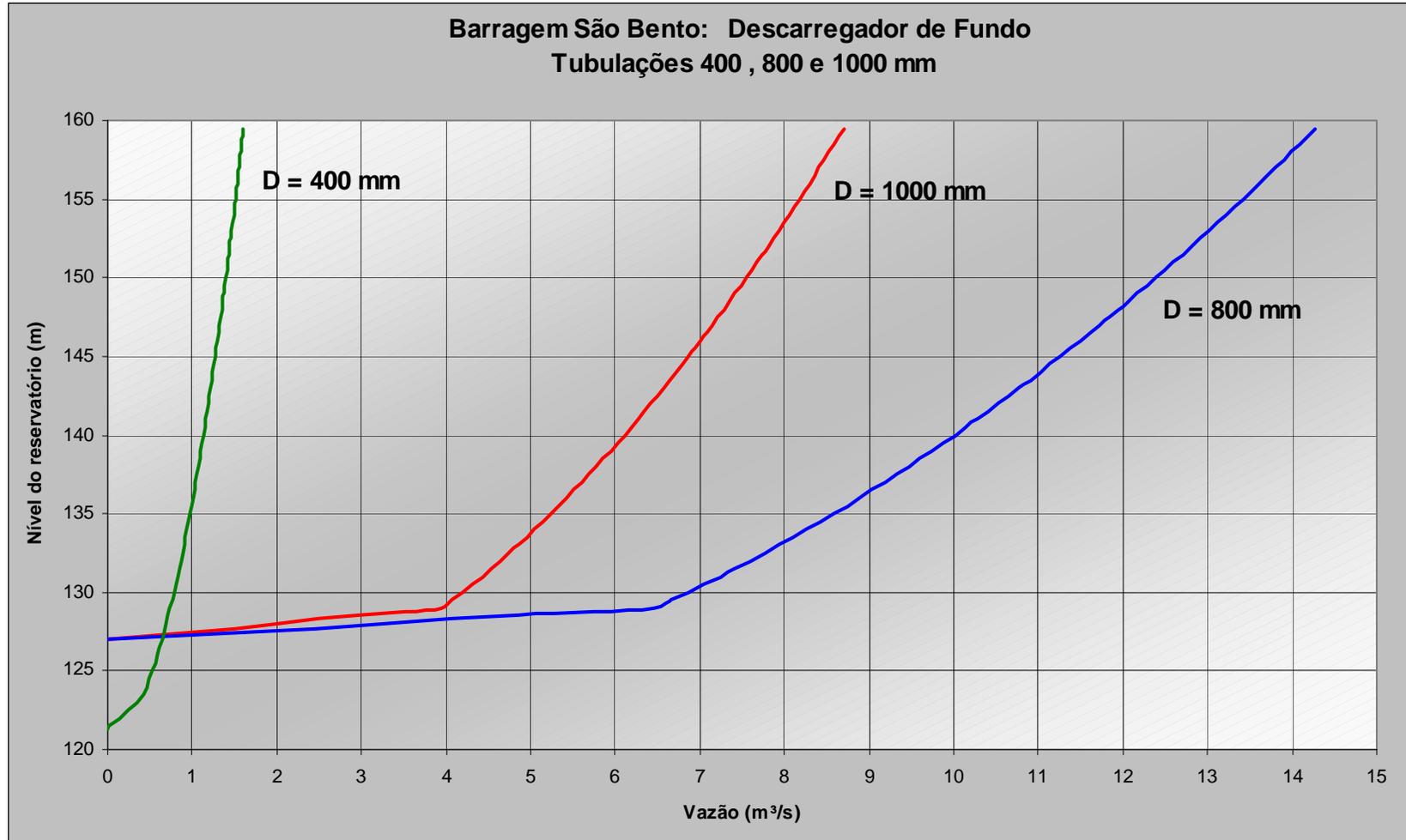
Curva Cota x Volume Barragem São Bento



Curva Descarga do Vertedouro



Curva Descarregador de Fundo



Curva da Válvula Dispersora

Barragem São Bento: Curvas de Descarga da Válvula Dispersora DN 600 mm

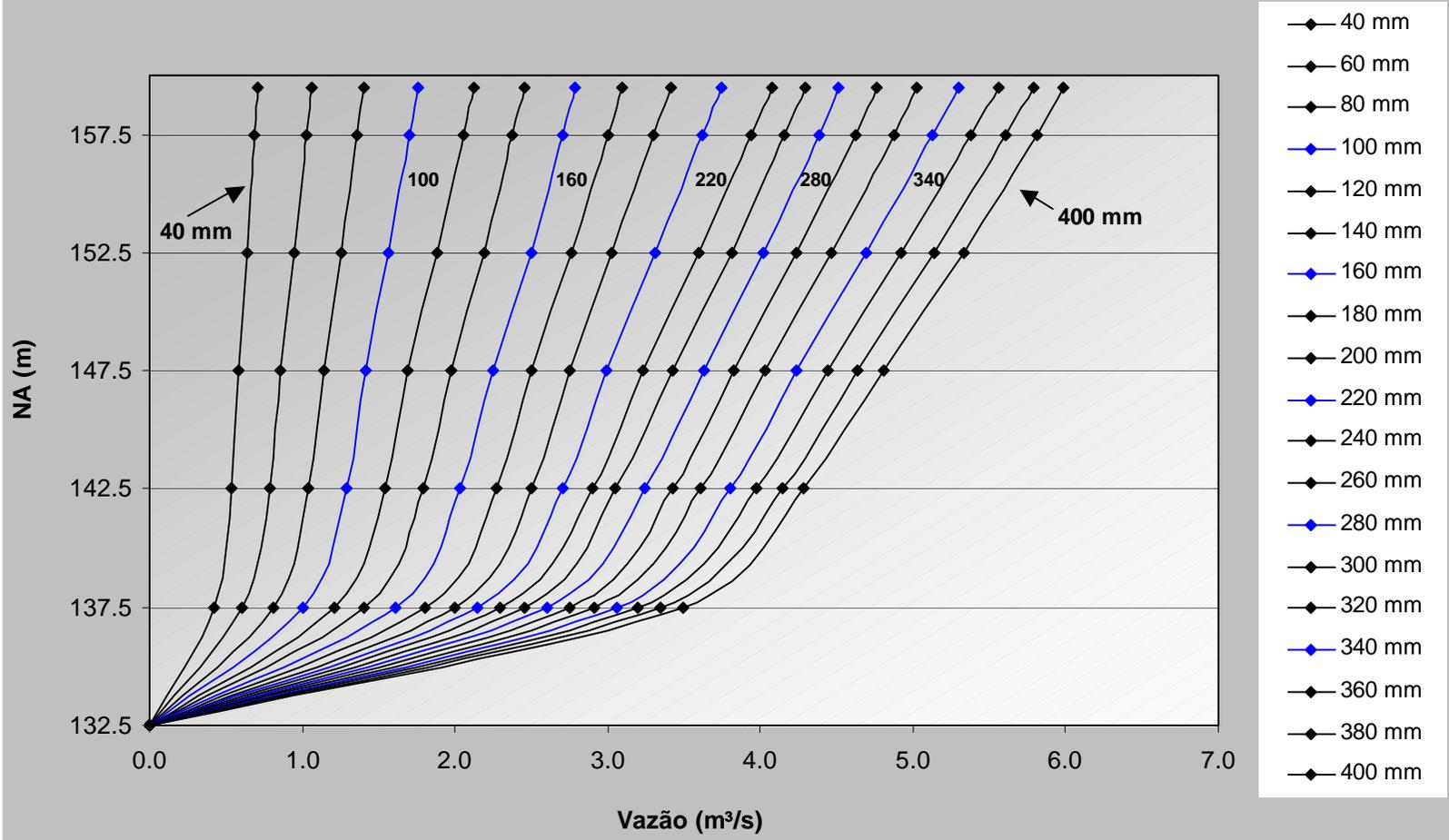


Tabela dos Dados Operativo da Barragem São Bento

<b>Data</b>	<b>Leitura Inicial</b>	<b>Hora</b>	<b>Vazão Defluente</b>	<b>Vazão Afluente</b>	<b>Precipitação</b>
	<b>(m)</b>	<b>(h)</b>	<b>m³/s</b>	<b>m³/s</b>	<b>(mm)</b>
22/3/05	155,89	8	3,14	3,14	
22/3/05	155,89	12	3,14	5,92	
22/3/05	155,90	16	3,14	19,81	
22/3/05	155,96	20	3,14	23,01	
23/3/05	156,03	0	3,15	41,06	
23/3/05	156,16	4	3,16	41,07	59,1
23/3/05	156,29	8	3,16	26,49	
23/3/05	156,37	12	3,16	43,99	
23/3/05	156,44	14	3,17	73,17	
23/3/05	156,50	15	3,17	84,84	
23/3/05	156,57	16	5,64	87,30	
23/3/05	156,64	17	5,64	98,98	
23/3/05	156,72	18	5,65	75,65	
23/3/05	156,78	19	5,65	63,98	
23/3/05	156,83	20	5,65	52,32	
23/3/05	156,87	21	5,66	52,32	
23/3/05	156,91	22	7,37	54,04	
23/3/05	156,95	23	7,38	54,04	
24/3/05	156,99	0	7,39	54,06	
24/3/05	157,03	1	7,39	54,06	
24/3/05	157,07	2	7,40	54,06	
24/3/05	157,11	3	7,40	54,07	
24/3/05	157,15	4	7,41	54,07	
24/3/05	157,19	5	7,41	42,41	
24/3/05	157,22	6	7,41	30,75	50
24/3/05	157,24	7	7,41	30,75	
24/3/05	157,26	8	7,42	30,75	
24/3/05	157,28	9	7,42	42,42	
24/3/05	157,31	10	11,42	58,09	
24/3/05	157,35	11	11,43	34,76	
24/3/05	157,37	12	11,43	23,10	
24/3/05	157,38	13	11,43	34,77	
24/3/05	157,40	14	11,43	23,10	
24/3/05	157,41	15	7,20	30,53	
24/3/05	157,43	16	7,21	18,88	
24/3/05	157,44	17	7,21	18,88	
24/3/05	157,45	18	7,21	30,55	
24/3/05	157,47	19	7,56	19,23	
24/3/05	157,48	20	7,91	19,58	
24/3/05	157,49	21	8,22	19,88	
24/3/05	157,50	22	8,92	22,80	
24/3/05	157,51	23	9,62	23,50	
25/3/05	157,52	0	10,32	24,20	
25/3/05	157,53	1	11,02	24,90	
25/3/05	157,54	2	11,72	25,60	
25/3/05	157,55	3	12,42	26,30	
25/3/05	157,56	4	13,12	27,00	
25/3/05	157,57	5	13,12	13,12	
25/3/05	157,57	6	13,12	13,12	
25/3/05	157,57	7	13,12	13,12	1,9

<b>Data</b>	<b>Leitura Inicial</b>	<b>Hora</b>	<b>Vazão Defluente</b>	<b>Vazão Afluente</b>	<b>Precipitação</b>
	<b>(m)</b>	<b>(h)</b>	<b>m³/s</b>	<b>m³/s</b>	<b>(mm)</b>
25/3/05	157,57	8	13,12	13,12	
3/9/05	157,47	21	10,09	4,26	-
3/9/05	157,46	22	10,09	10,09	-
3/9/05	157,46	23	10,09	10,09	-
4/9/05	157,46	0	10,09	4,26	-
4/9/05	157,46	1	10,09	10,09	-
4/9/05	157,46	2	10,09	15,92	-
4/9/05	157,46	3	10,09	10,09	-
4/9/05	157,46	4	10,09	15,92	-
4/9/05	157,47	5	10,09	15,92	-
4/9/05	157,47	6	10,19	16,02	-
4/9/05	157,48	7	10,29	16,12	-
4/9/05	157,48	8	10,59	33,92	26,8
4/9/05	157,50	9	10,79	24,68	-
4/9/05	157,51	10	11,14	18,09	-
4/9/05	157,52	11	11,49	18,44	-
4/9/05	157,52	12	11,84	18,79	-
4/9/05	157,53	13	12,19	19,14	-
4/9/05	157,53	14	12,54	19,49	-
4/9/05	157,54	15	12,89	19,84	-
4/9/05	157,54	16	13,24	20,19	-
4/9/05	157,55	17	13,59	20,54	-
4/9/05	157,55	18	13,59	13,59	-
4/9/05	157,55	19	13,59	13,59	-
4/9/05	157,55	20	13,59	13,59	-
4/9/05	157,55	21	13,59	13,59	-
4/9/05	157,55	22	13,59	13,59	-
4/9/05	157,55	23	13,59	13,59	-
5/9/05	157,55	0	13,59	13,59	-
5/9/05	157,55	1	13,24	6,30	-
5/9/05	157,55	2	13,24	13,24	-
5/9/05	157,55	3	12,89	5,95	-
5/9/05	157,54	4	12,89	12,89	-
5/9/05	157,54	5	12,89	12,89	-
5/9/05	157,54	6	12,54	5,60	-
5/9/05	157,54	7	12,29	12,29	-
5/9/05	157,54	8	12,19	5,25	2,9
5/9/05	157,53	9	12,19	12,19	-
5/9/05	157,53	10	11,49	4,55	-
5/9/05	157,53	11	11,49	4,55	-
5/9/05	157,52	12	11,49	11,49	-
5/9/05	157,52	13	10,79	3,85	-
5/9/05	157,52	14	10,79	10,79	-
5/9/05	157,52	15	10,79	3,85	-
8/10/05	157,05	0	9,49	8,03	-
8/10/05	157,04	4	9,49	8,03	-
8/10/05	157,04	8	9,49	13,87	0,3
8/10/05	157,05	12	9,50	21,16	-
8/10/05	157,07	14	9,50	32,83	-

<b>Data</b>	<b>Leitura Inicial</b>	<b>Hora</b>	<b>Vazão Defluente</b>	<b>Vazão Afluente</b>	<b>Precipitação</b>
	<b>(m)</b>	<b>(h)</b>	<b>m³/s</b>	<b>m³/s</b>	<b>(mm)</b>
8/10/05	157,09	15	9,50	21,17	-
8/10/05	157,10	16	9,50	21,17	-
8/10/05	157,12	18	9,50	18,25	-
8/10/05	157,14	20	9,50	15,34	-
8/10/05	157,15	22	9,51	12,42	-
9/10/05	157,15	0	9,51	15,34	-
9/10/05	157,16	2	9,51	15,34	-
9/10/05	157,17	4	9,51	15,34	-
9/10/05	157,18	6	9,51	9,51	-
9/10/05	157,18	8	9,51	15,34	24,3
9/10/05	157,19	10	9,51	15,34	-
9/10/05	157,20	12	9,51	9,51	-
9/10/05	157,20	14	9,51	9,51	-
9/10/05	157,20	16	9,51	9,51	-
9/10/05	157,20	18	9,51	9,51	-
9/10/05	157,20	20	9,51	9,51	-
27/10/05	157,28	12	4,39	4,39	-
27/10/05	157,28	16	9,59	9,59	-
27/10/05	157,28	20	9,59	21,26	-
27/10/05	157,30	22	9,59	32,93	-
27/10/05	157,32	23	9,60	44,60	-
28/10/05	157,35	0	9,60	44,60	-
28/10/05	157,38	1	9,60	32,94	-
28/10/05	157,40	2	9,60	32,94	-
28/10/05	157,42	3	9,61	32,94	-
28/10/05	157,44	4	9,61	32,94	-
28/10/05	157,46	5	9,81	33,14	-
28/10/05	157,48	6	10,11	33,45	-
28/10/05	157,50	7	10,59	24,48	-
28/10/05	157,51	8	11,69	25,58	43,1
28/10/05	157,53	10	12,39	26,28	-
28/10/05	157,54	11	13,09	26,98	-
28/10/05	157,55	12	14,49	28,38	-
28/10/05	157,57	14	14,49	14,49	-
28/10/05	157,57	16	15,19	29,08	-
28/10/05	157,58	17	15,19	15,19	-
28/10/05	157,58	18	15,19	15,19	-
28/10/05	157,58	19	15,19	15,19	-
28/10/05	157,58	20	15,90	29,78	-
28/10/05	157,59	21	15,90	15,90	-
28/10/05	157,59	22	16,60	30,49	-
28/10/05	157,60	23	16,60	16,60	-
29/10/05	157,60	0	16,60	16,60	-
29/10/05	157,60	1	17,90	31,79	-
29/10/05	157,61	2	17,90	17,90	-
29/10/05	157,61	3	19,20	33,09	-
29/10/05	157,62	4	19,20	19,20	-
29/10/05	157,62	5	19,20	19,20	-
29/10/05	157,62	6	17,88	3,99	-
29/10/05	157,61	7	17,88	17,88	-

<b>Data</b>	<b>Leitura Inicial</b>	<b>Hora</b>	<b>Vazão Defluente</b>	<b>Vazão Afluente</b>	<b>Precipitação</b>
	<b>(m)</b>	<b>(h)</b>	<b>m³/s</b>	<b>m³/s</b>	<b>(mm)</b>
29/10/05	157,61	8	17,88	17,88	9,9
29/10/05	157,61	9	17,88	17,88	-
29/10/05	157,61	10	17,88	17,88	-
29/10/05	157,61	11	17,88	17,88	-
29/10/05	157,61	12	16,58	2,69	-
29/10/05	157,60	13	16,58	16,58	-
29/10/05	157,60	14	16,58	16,58	-
29/10/05	157,60	15	16,58	16,58	-
29/10/05	157,60	16	16,58	16,58	-
29/10/05	157,60	17	16,58	16,58	-
29/10/05	157,60	18	16,58	16,58	-
29/10/05	157,60	19	16,58	16,58	-
29/10/05	157,60	20	15,88	1,99	-
29/10/05	157,59	21	16,58	30,47	-
29/10/05	157,60	22	16,58	16,58	-
29/10/05	157,60	23	16,58	16,58	-
30/10/05	157,60	0	16,58	16,58	-
30/10/05	157,60	1	16,58	16,58	-
30/10/05	157,60	2	15,88	1,99	-
30/10/05	157,59	3	15,88	15,88	-
30/10/05	157,59	4	15,88	15,88	-
30/10/05	157,59	5	15,88	15,88	-
30/10/05	157,59	6	15,38	1,49	-
30/10/05	157,58	7	15,38	15,38	-
30/10/05	157,58	8	15,18	1,29	1,2
30/10/05	157,58	9	14,48	14,48	-
31/1/06	157,42	9	6,54	6,54	-
31/1/06	157,42	10	6,54	6,54	-
31/1/06	157,42	12	6,49	0,66	-
31/1/06	157,41	14	8,61	61,11	-
31/1/06	157,50	16	9,31	37,09	-
31/1/06	157,54	18	10,01	23,90	-
31/1/06	157,55	19	10,71	24,60	-
31/1/06	157,56	20	11,41	25,30	-
31/1/06	157,57	21	11,41	11,41	-
31/1/06	157,57	22	12,11	26,00	-
31/1/06	157,58	23	12,11	12,11	-
1/2/06	157,58	0	12,11	12,11	-
1/2/06	157,58	1	12,11	12,11	-
1/2/06	157,58	2	12,11	12,11	-
1/2/06	157,58	3	12,81	26,70	-
1/2/06	157,59	4	12,81	12,81	-
1/2/06	157,59	5	12,81	12,81	-
1/2/06	157,59	6	13,51	27,40	-
1/2/06	157,60	7	13,51	13,51	-
1/2/06	157,60	8	13,51	13,51	47,3
1/2/06	157,60	9	13,44	13,44	-
1/2/06	157,60	10	13,44	13,44	-
1/2/06	157,60	11	13,44	13,44	-
1/2/06	157,60	12	13,44	13,44	-

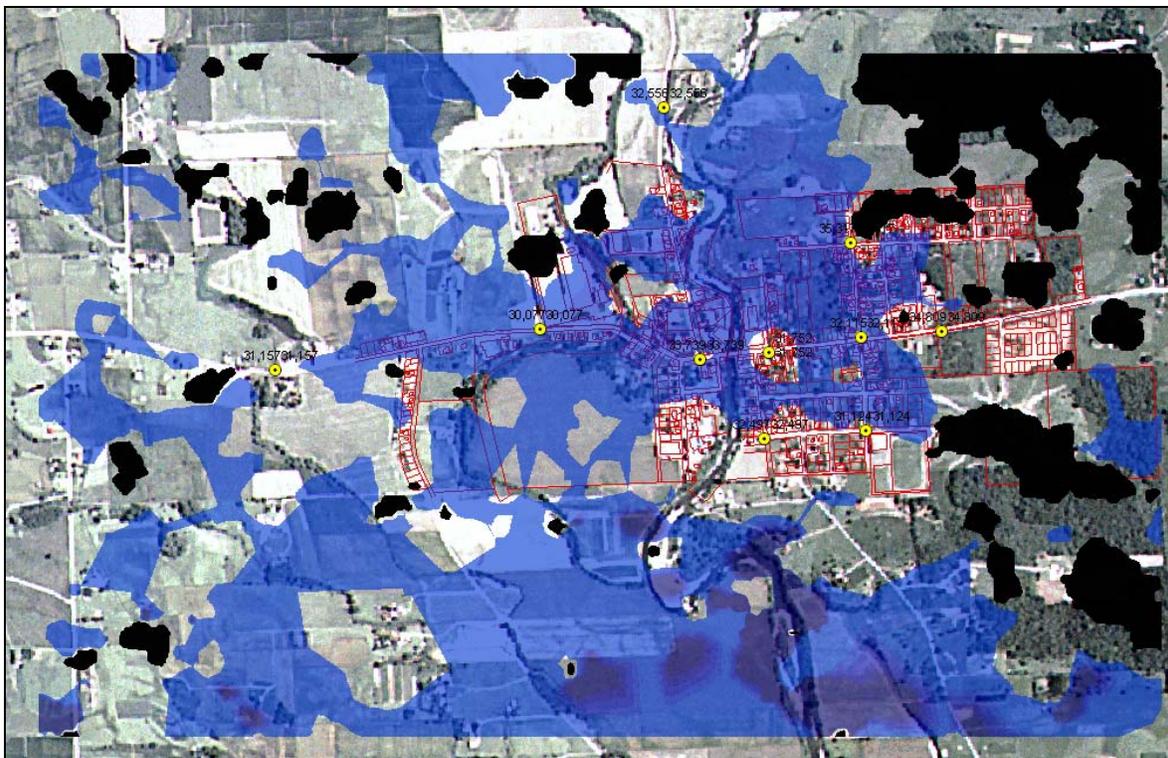
<b>Data</b>	<b>Leitura Inicial</b>	<b>Hora</b>	<b>Vazão Defluente</b>	<b>Vazão Afluente</b>	<b>Precipitação</b>
	<b>(m)</b>	<b>(h)</b>	<b>m³/s</b>	<b>m³/s</b>	<b>(mm)</b>
1/2/06	157,60	13	13,44	13,44	-
25/3/06	157,01	8	2,45	2,45	0
25/3/06	157,01	12	2,50	2,50	-
25/3/06	157,01	16	6,70	146,70	-
25/3/06	157,13	17	6,72	146,72	-
25/3/06	157,25	18	6,73	158,40	-
25/3/06	157,38	19	9,74	149,74	-
25/3/06	157,50	20	16,75	155,64	-
25/3/06	157,60	21	29,76	168,65	-
25/3/06	157,70	22	35,77	146,88	-
25/3/06	157,74	22:30	38,77	94,32	-
25/3/06	157,76	23	43,27	126,61	-
25/3/06	157,79	23:30	48,78	132,11	-
26/3/06	157,82	00:00	54,78	138,11	-
26/3/06	157,85	00:30	58,78	114,34	-
26/3/06	157,87	1	64,78	106,45	-
26/3/06	157,90	2	72,29	113,95	-
26/3/06	157,93	3	79,79	121,46	-
26/3/06	157,96	4	79,79	79,79	-
26/3/06	157,96	5	79,79	79,79	-
26/3/06	157,96	6	77,25	63,37	-
26/3/06	157,95	7	74,75	60,86	-
26/3/06	157,94	8	72,25	58,36	151,4
26/3/06	157,93	9	69,75	55,86	-
26/3/06	157,92	10	67,25	53,36	-
26/3/06	157,91	11	60,75	19,09	-
26/3/06	157,88	12	58,75	44,86	-
26/3/06	157,87	13	54,75	26,97	-
26/3/06	157,85	14	50,75	22,97	-
26/3/06	157,83	15	46,74	18,97	-
26/3/06	157,81	16	44,74	30,85	-
26/3/06	157,80	17	43,24	29,35	-
26/3/06	157,79	18	41,74	27,85	-
26/3/06	157,78	19	40,24	26,35	-
26/3/06	157,77	20	38,73	24,85	-
26/3/06	157,76	21	35,73	7,95	-
26/3/06	157,74	22	34,21	20,32	-
26/3/06	157,73	23	32,73	18,84	-
27/3/06	157,72	0	31,23	17,34	-
27/3/06	157,71	1	29,73	15,84	-
27/3/06	157,70	2	28,43	14,54	-
27/3/06	157,69	3	27,13	13,24	-
27/3/06	157,68	4	25,83	11,94	-
27/3/06	157,67	5	24,52	10,64	-
27/3/06	157,66	6	23,22	9,33	-
27/3/06	157,65	7	21,92	8,03	-
27/3/06	157,64	8	21,92	21,92	0
27/3/06	157,64	9	21,92	21,92	-
27/3/06	157,64	10	21,92	21,92	-
27/3/06	157,64	11	20,62	6,73	-

<b>Data</b>	<b>Leitura Inicial</b>	<b>Hora</b>	<b>Vazão Defluente</b>	<b>Vazão Afluente</b>	<b>Precipitação</b>
	<b>(m)</b>	<b>(h)</b>	<b>m³/s</b>	<b>m³/s</b>	<b>(mm)</b>
27/3/06	157,63	12	20,62	20,62	-
27/3/06	157,63	13	19,31	5,43	-
27/3/06	157,62	14	19,31	19,31	-
27/3/06	157,62	15	19,31	19,31	-
27/3/06	157,62	16	19,31	19,31	-
27/3/06	157,62	17	18,01	4,12	-
27/3/06	157,61	18	16,01	-11,77	-
27/3/06	157,59	19	15,40	1,51	-
27/3/06	157,58	20	15,31	15,31	-
27/3/06	157,58	21	14,61	0,72	-
27/3/06	157,57	22	14,61	14,61	-
28/3/06	157,57	23	13,91	0,02	-
28/3/06	157,56	0	13,91	13,91	-
28/3/06	157,56	1	13,21	-0,68	-
28/3/06	157,55	2	13,21	13,21	-
28/3/06	157,55	3	12,51	-1,38	-
28/3/06	157,54	4	12,51	12,51	-
28/3/06	157,54	5	11,81	-2,08	-
28/3/06	157,53	6	11,81	11,81	-
28/3/06	157,53	7	11,81	11,81	0
28/3/06	157,53	8	11,81	11,81	-
28/3/06	157,53	9	11,81	11,81	-
28/3/06	157,53	10	6,58	6,58	-
28/3/06	157,53	11	11,85	11,85	-
28/3/06	157,53	12	11,85	11,85	-
28/3/06	157,53	13	11,85	11,85	-
28/3/06	157,53	14	12,55	26,44	-
28/3/06	157,54	15	12,52	12,52	-
28/3/06	157,54	16	12,52	12,52	-
28/3/06	157,54	17	12,52	12,52	-
28/3/06	157,54	18	12,52	12,52	-
28/3/06	157,54	19	12,52	12,52	-
28/3/06	157,54	20	12,52	12,52	-
28/3/06	157,54	21	12,52	12,52	-
28/3/06	157,54	22	12,52	12,52	-
29/3/06	157,54	23	11,82	-2,07	-
29/3/06	157,53	0	11,82	11,82	-
10/5/06	156,68	0	2,44	2,44	-
10/5/06	156,68	4	2,44	2,44	-
10/5/06	156,68	8	2,44	19,94	32,1
10/5/06	156,74	12	2,44	14,11	-
10/5/06	156,76	14	2,44	14,11	-
10/5/06	156,78	16	2,44	60,78	-
10/5/06	156,88	18	2,44	43,28	-
10/5/06	156,95	20	2,45	60,78	-
10/5/06	157,05	22	6,66	53,33	-
11/5/06	157,13	0	6,66	59,16	-
11/5/06	157,22	2	6,67	59,17	-
11/5/06	157,31	4	6,68	59,18	-
11/5/06	157,40	6	6,69	41,69	-

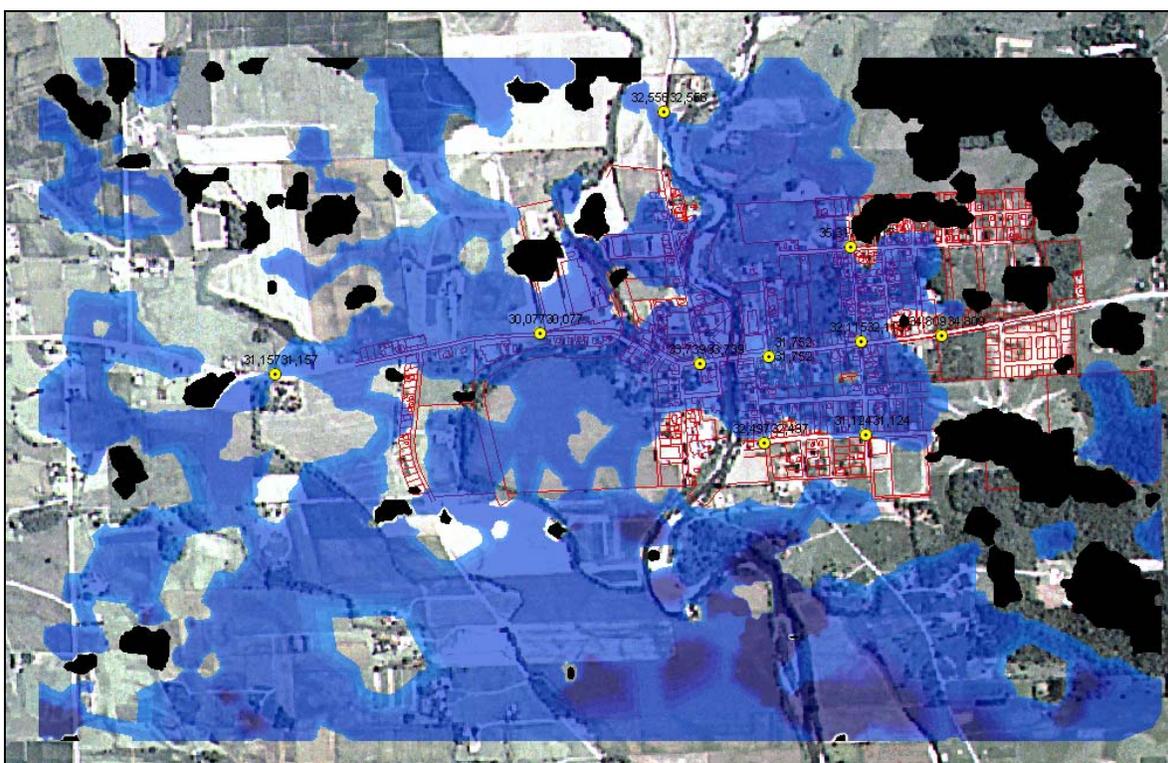
<b>Data</b>	<b>Leitura Inicial</b>	<b>Hora</b>	<b>Vazão Defluente</b>	<b>Vazão Afluente</b>	<b>Precipitação</b>
	<b>(m)</b>	<b>(h)</b>	<b>m³/s</b>	<b>m³/s</b>	<b>(mm)</b>
11/5/06	157,43	7	6,69	41,69	-
11/5/06	157,46	8	6,69	41,69	48,9
11/5/06	157,49	9	7,39	20,17	-
11/5/06	157,51	11	9,50	51,16	-
11/5/06	157,54	12	10,90	38,68	-
11/5/06	157,56	13	11,60	25,49	-
11/5/06	157,57	14	12,30	26,19	-
11/5/06	157,58	15	12,30	12,30	-
11/5/06	157,58	16	9,03	22,92	-
11/5/06	157,59	17	9,03	9,03	-
11/5/06	157,59	18	9,73	23,62	-
16/8/06	156,53	0	1,95	1,95	-
16/8/06	156,53	2	1,95	1,95	-
16/8/06	156,53	4	1,95	7,79	-
16/8/06	156,54	6	1,95	1,95	-
16/8/06	156,54	8	1,95	13,62	41,3
16/8/06	156,56	10	1,95	36,95	-
16/8/06	156,62	12	1,95	60,29	-
16/8/06	156,67	13	3,96	38,96	-
16/8/06	156,70	14	3,96	27,30	-
16/8/06	156,72	15	3,96	27,30	-
16/8/06	156,74	16	3,96	38,96	-
16/8/06	156,77	17	3,97	15,63	-
16/8/06	156,78	18	6,64	18,31	-
16/8/06	156,79	19	6,64	18,31	-
16/8/06	156,80	20	6,64	18,31	-
16/8/06	156,81	21	6,64	18,31	-
16/8/06	156,82	22	6,64	18,31	-
16/8/05	156,83	23	6,64	6,64	-
17/8/06	156,83	24	6,64	6,14	-
17/8/06	156,84	1	6,64	6,64	-
17/8/06	156,84	2	6,65	18,31	-
17/8/06	156,85	3	6,65	6,65	-

**ANEXO 2 – MAPAS DAS MANCHAS DE INUNDAÇÃO**

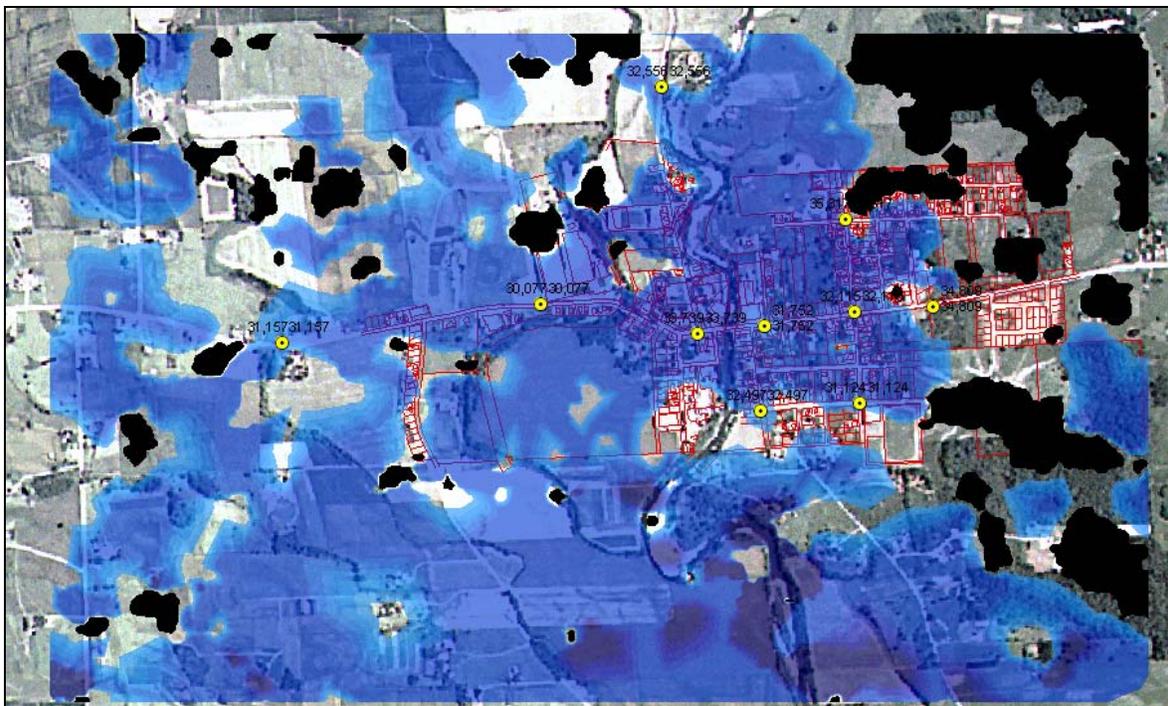




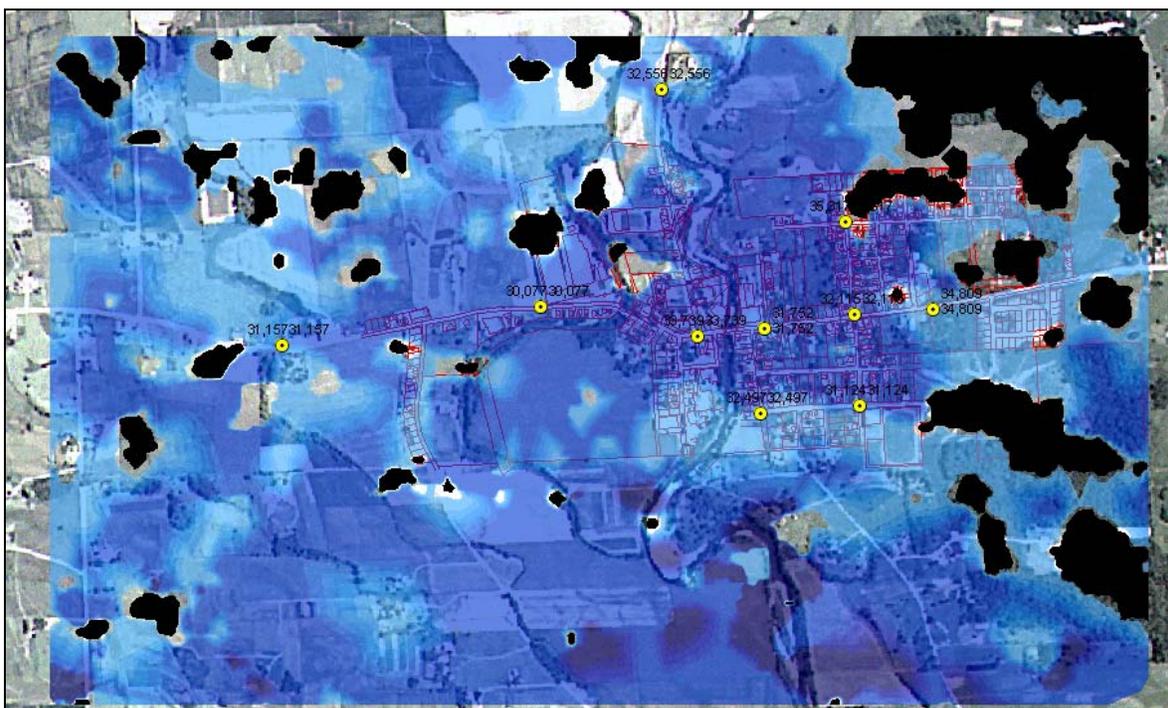
Mapa 03: São Bento Baixo. Manchas de Inundação na El. 30 m.



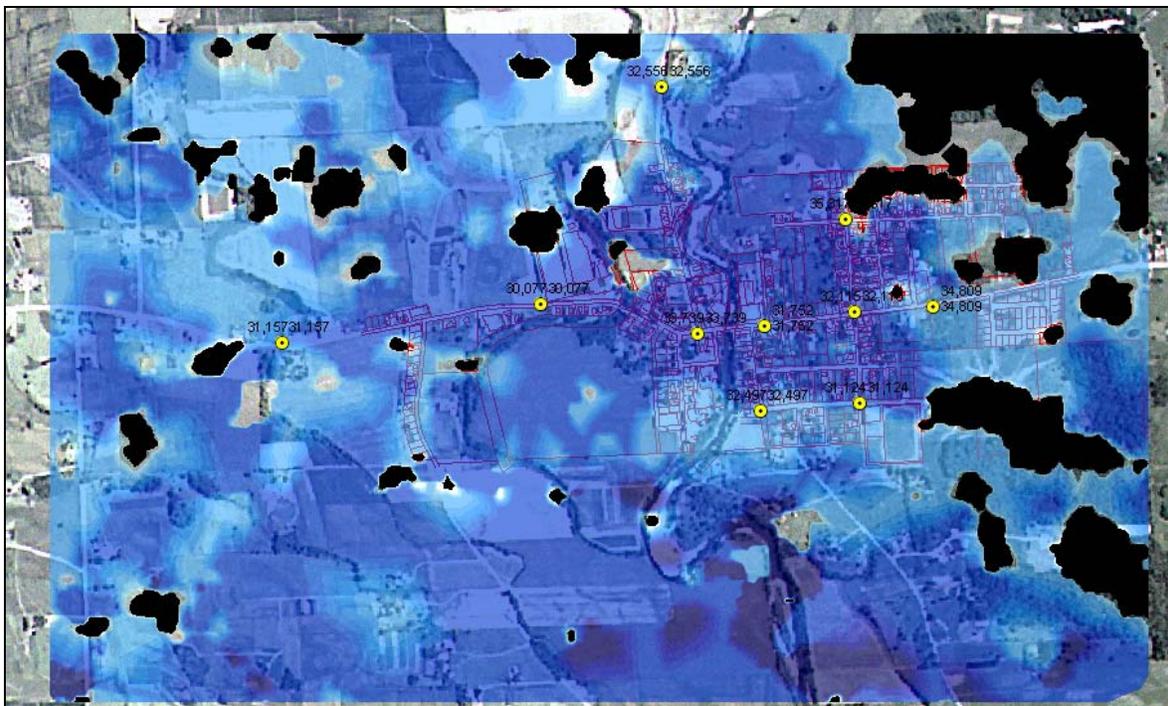
Mapa 04: São Bento Baixo. Manchas de Inundação na El. 32 m.



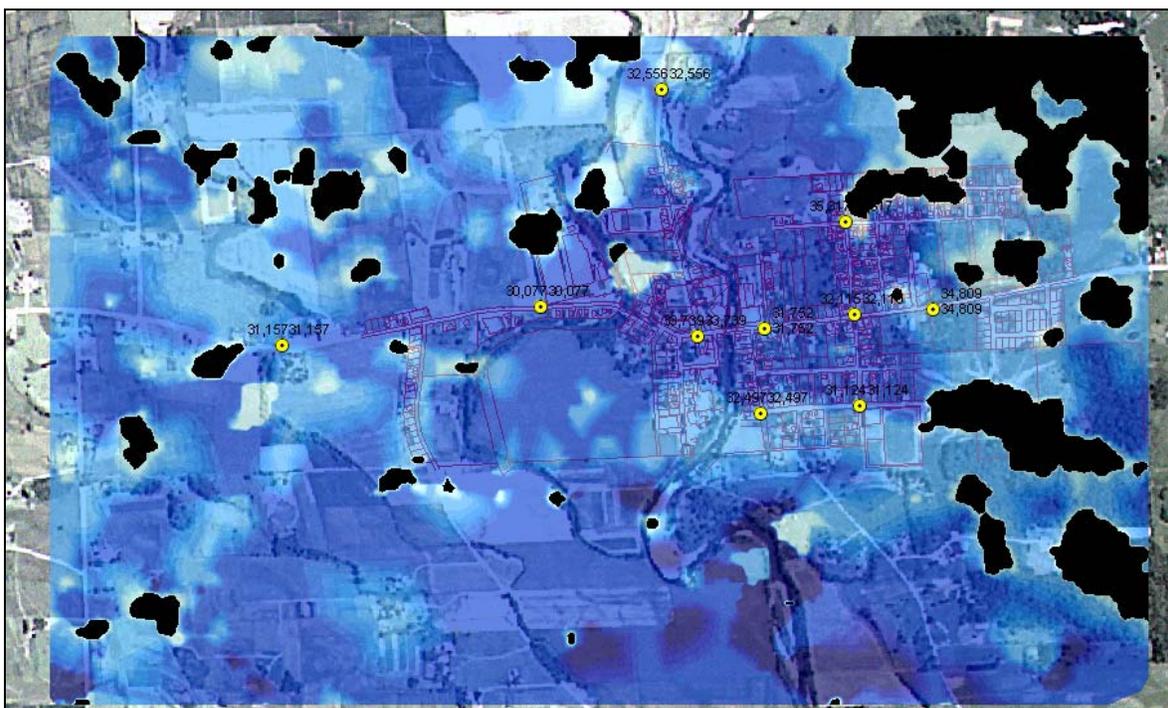
Mapa 05: São Bento Baixo. Manchas de Inundação na El. 34 m.



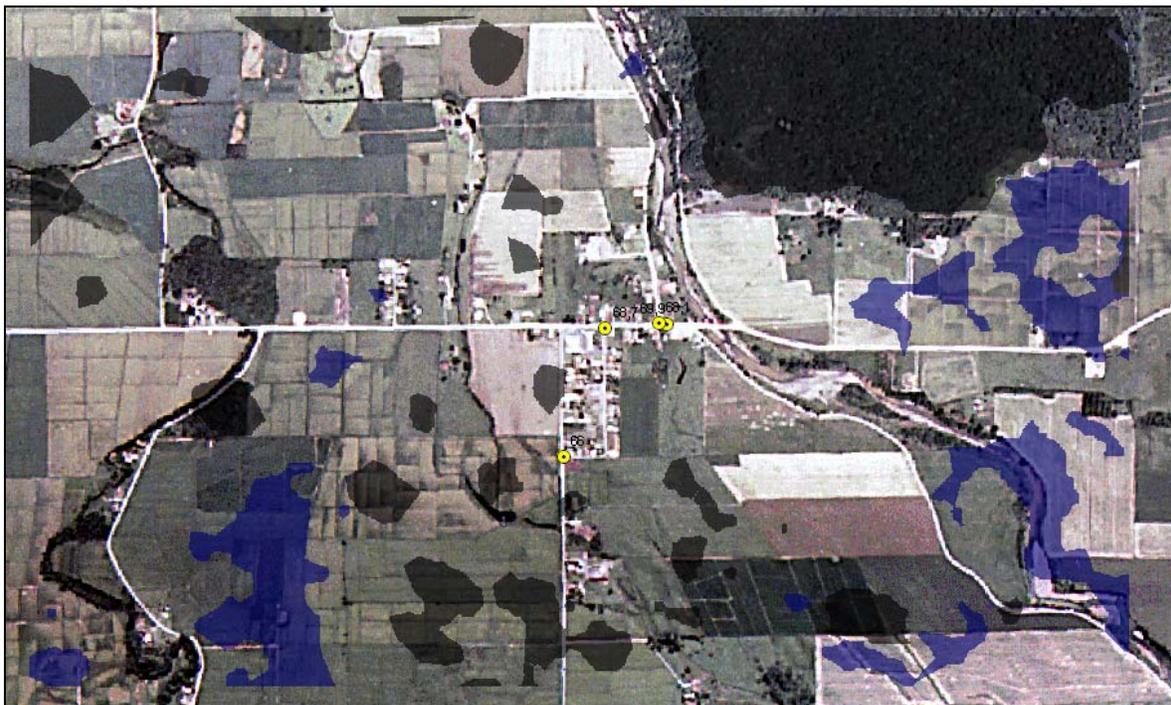
Mapa 06: São Bento Baixo. Manchas de Inundação na El. 36 m.



Mapa 07: São Bento Baixo. Manchas de Inundação na El. 38 m.



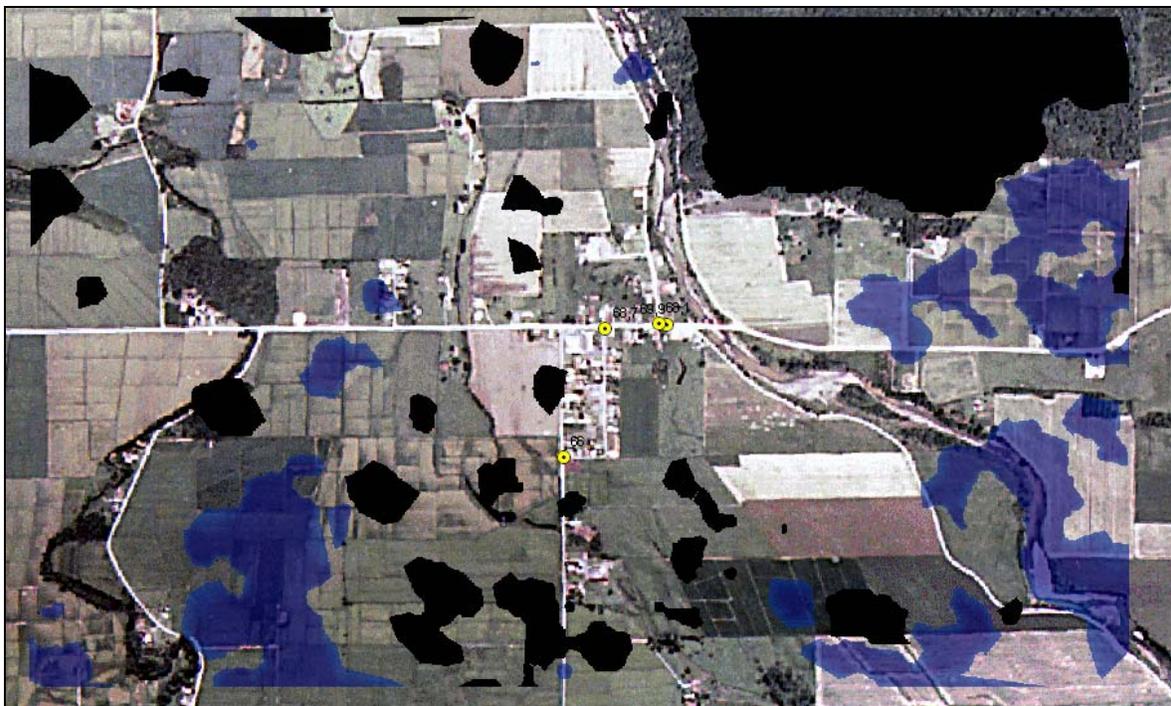
Mapa 08: São Bento Baixo. Manchas de Inundação na El. 40 m.

**São Bento Alto**

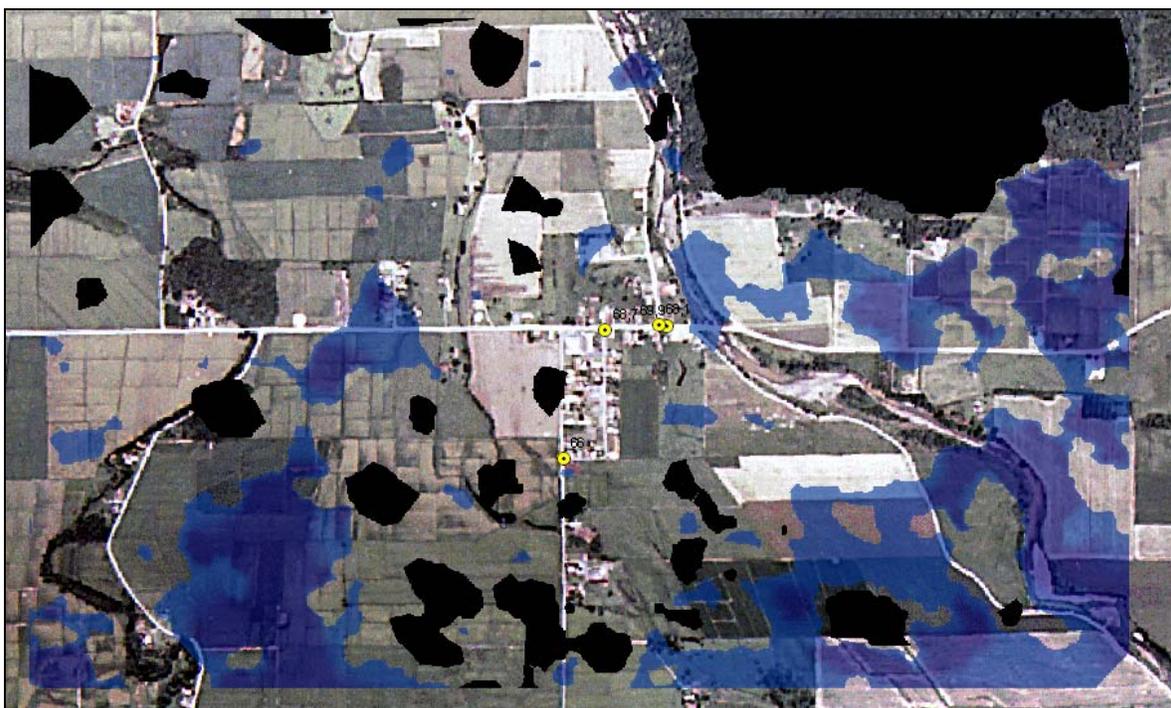
Mapa 09: São Bento Alto. Manchas de Inundação na El. 60 m.



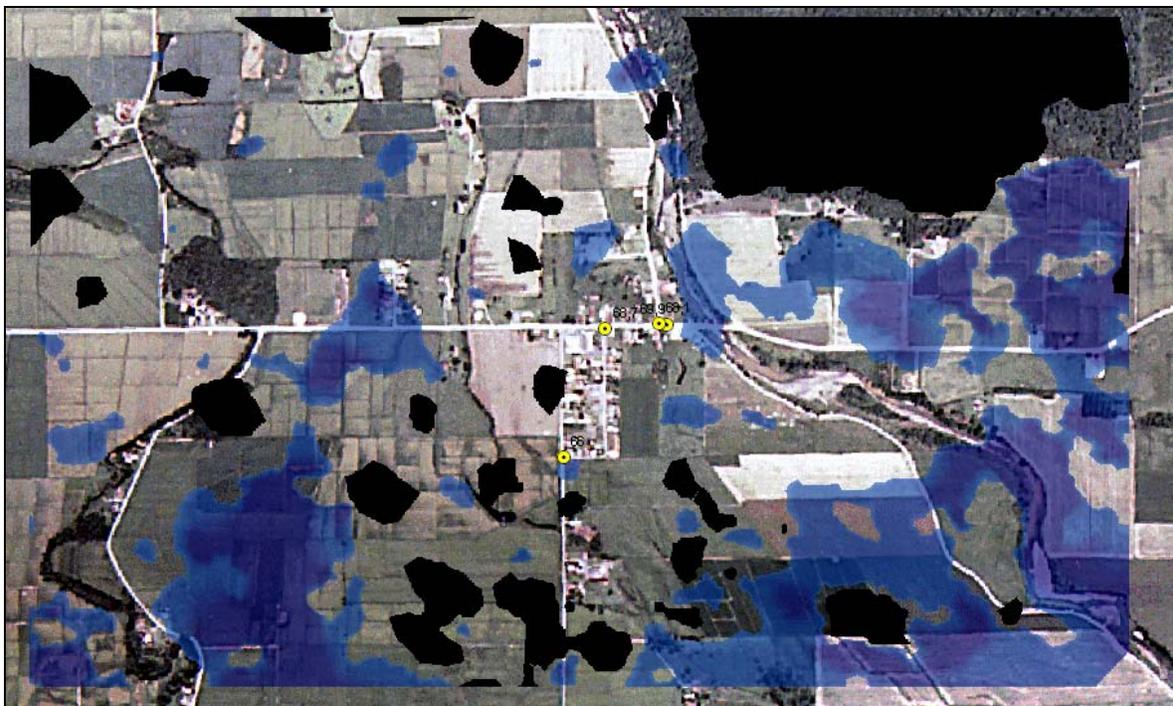
Mapa 10: São Bento Alto. Manchas de Inundação na El. 62 m.



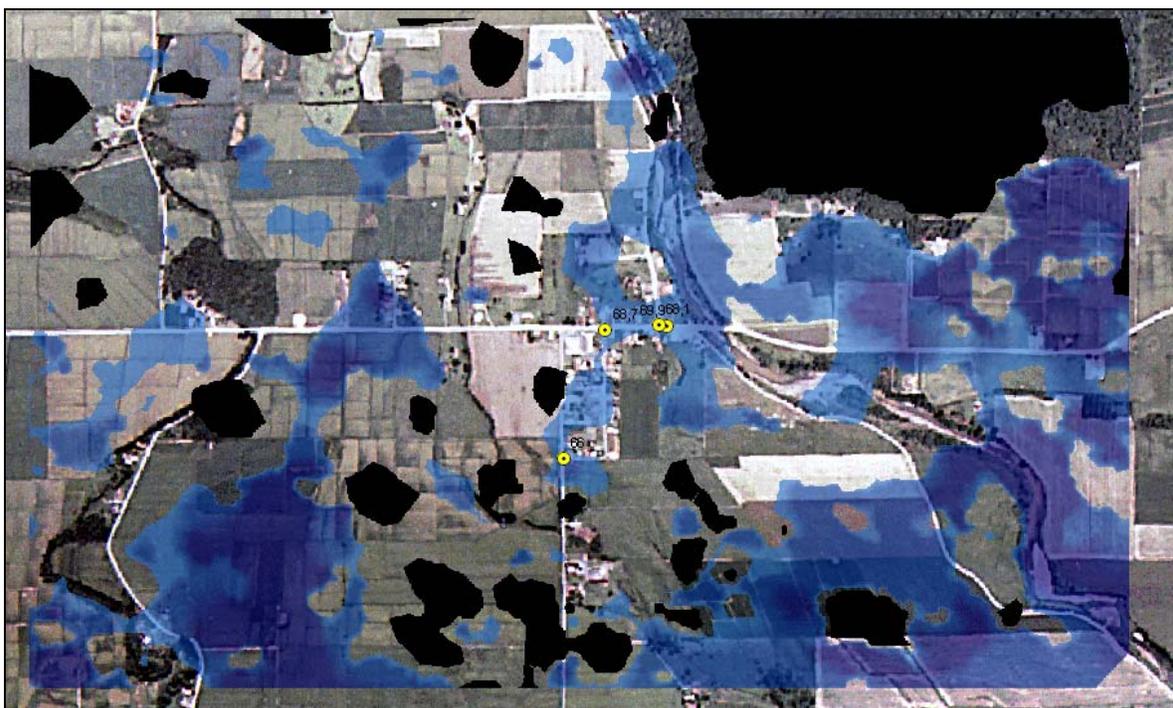
Mapa 11: São Bento Alto. Manchas de Inundação na El. 64 m.



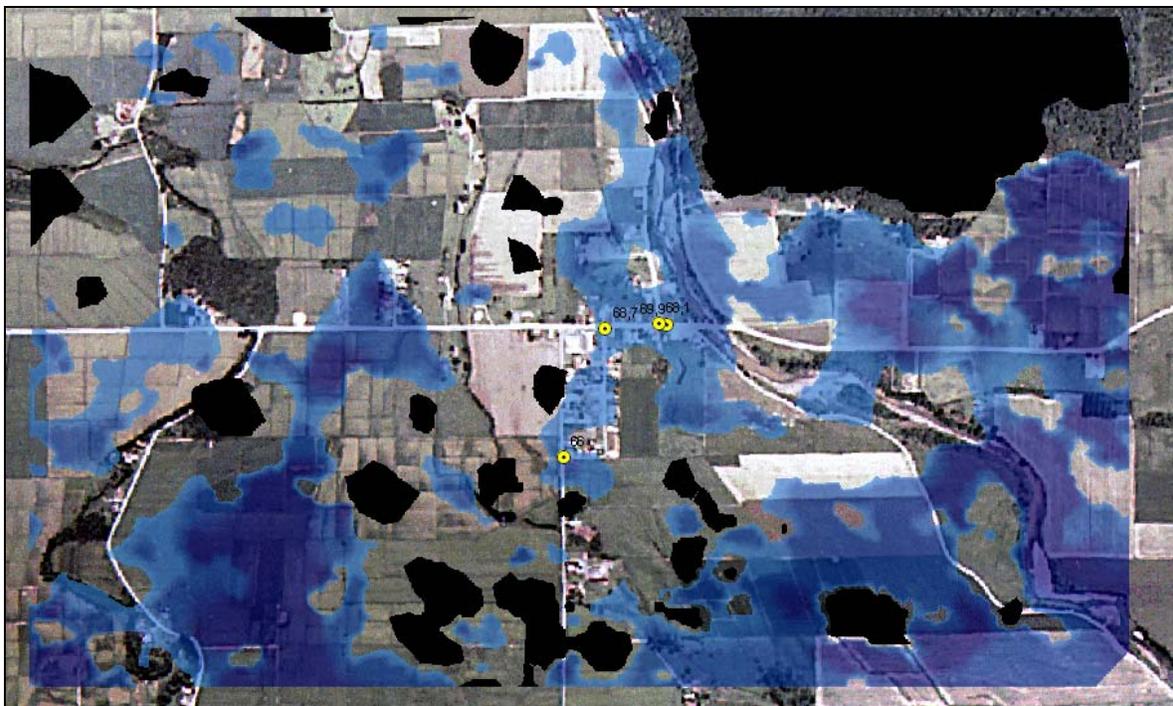
Mapa 12: São Bento Alto. Manchas de Inundação na El. 66 m.



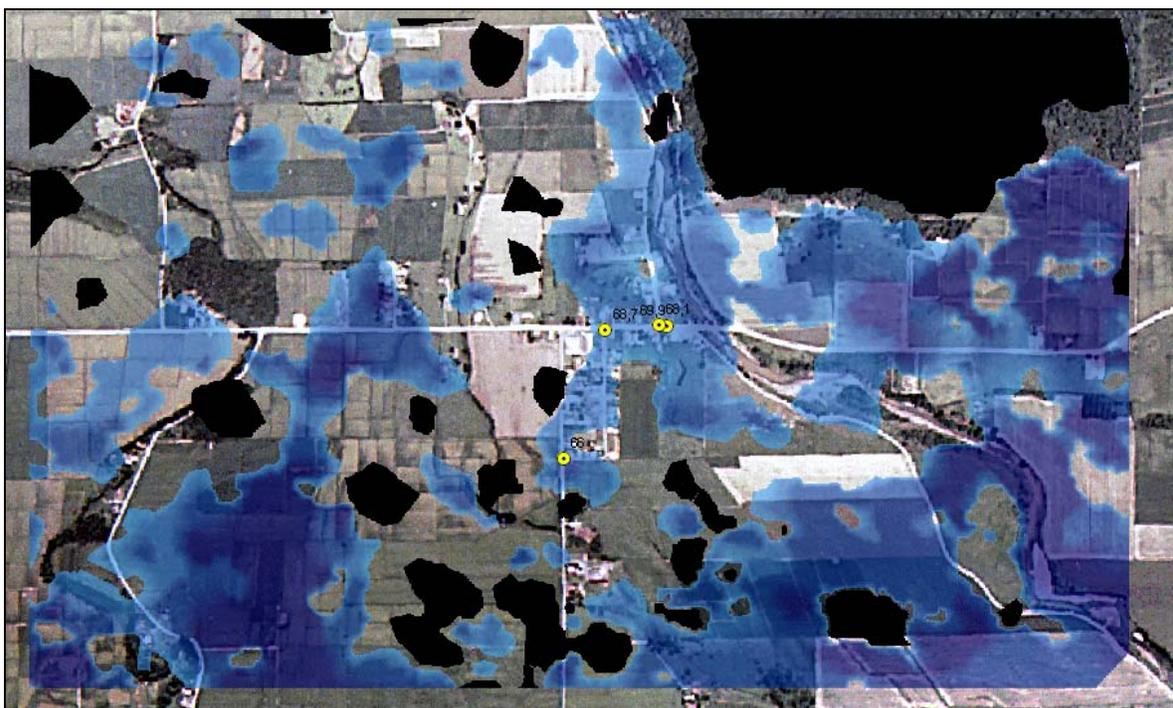
Mapa 13: São Bento Alto. Manchas de Inundação na El. 68 m.



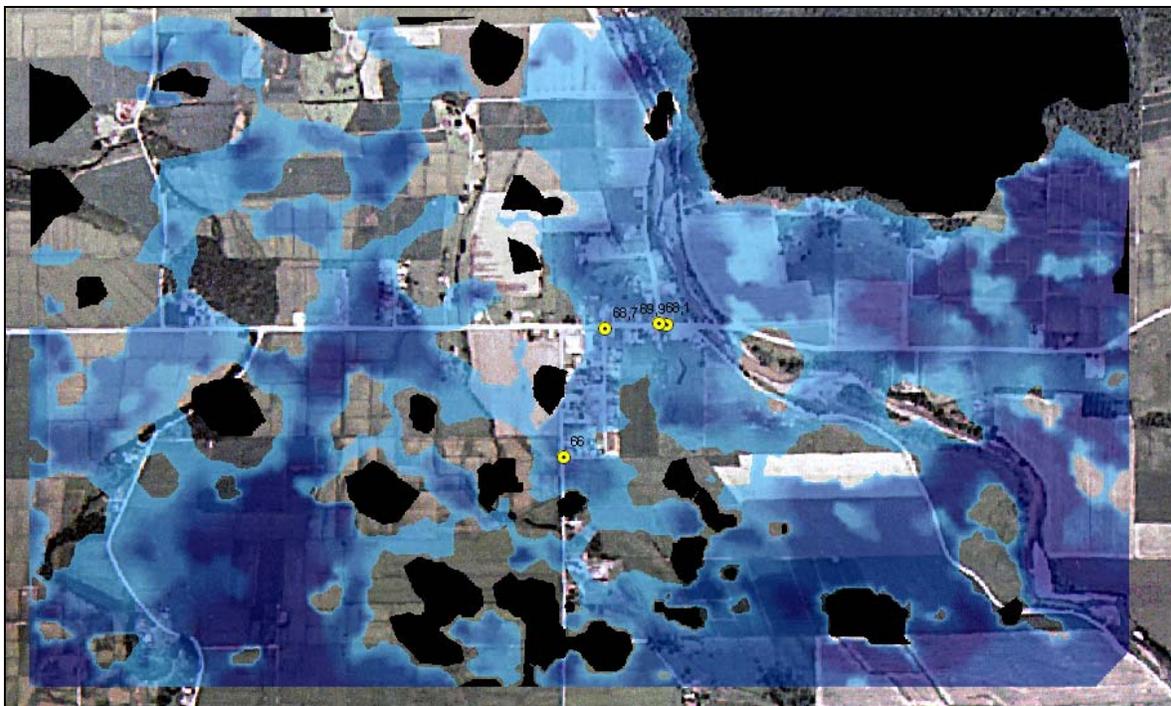
Mapa 14: São Bento Alto. Manchas de Inundação na El. 70 m.



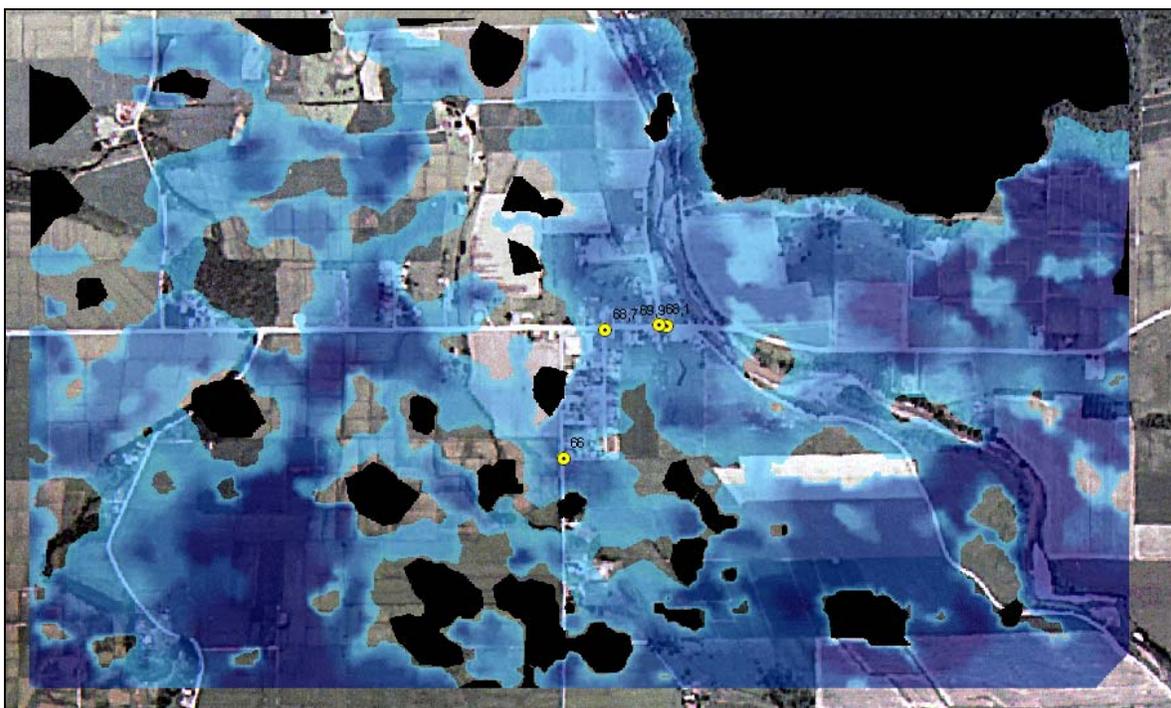
Mapa 15: São Bento Alto. Manchas de Inundação na El. 72 m.



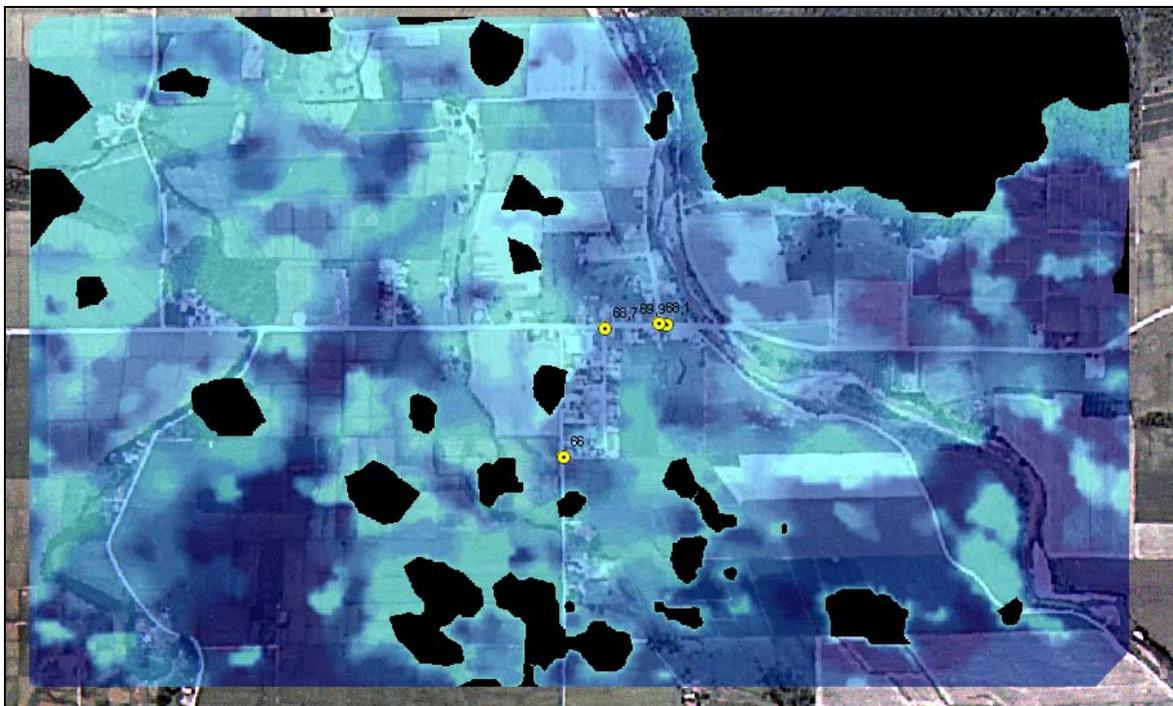
Mapa 16: São Bento Alto. Manchas de Inundação na El. 74 m.



Mapa 17: São Bento Alto. Manchas de Inundação na El. 76 m.

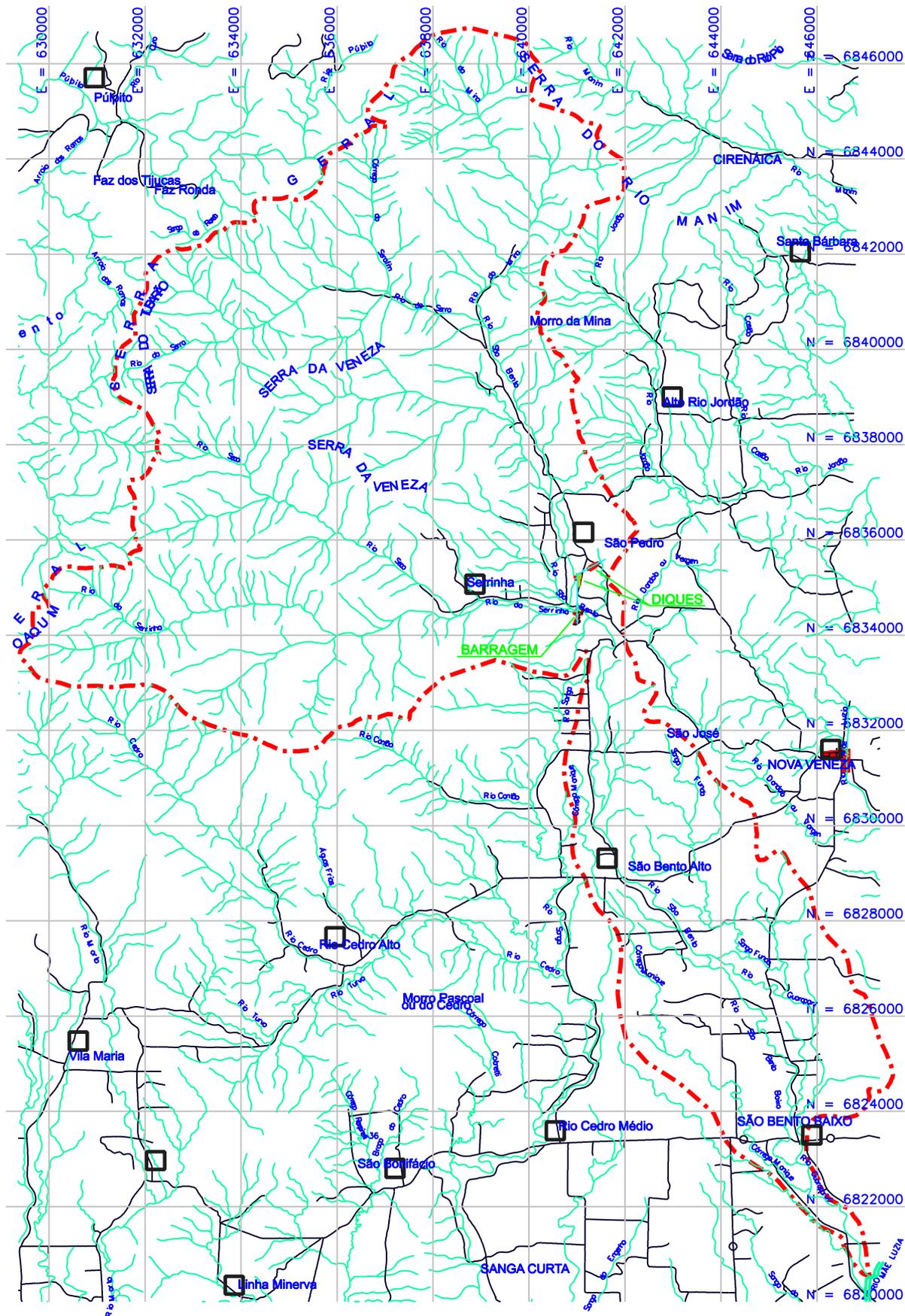


Mapa 18: São Bento Alto. Manchas de Inundação na El. 78 m.



Mapa 19: São Bento Alto. Manchas de Inundação na El. 80 m.

**ANEXO 3 – MAPAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO BENTO**



- LEGENDA:**
- Rio
  - - - Limite da Bacia Hidrográfica
  - Ruas / Rodovias
  - Localidade



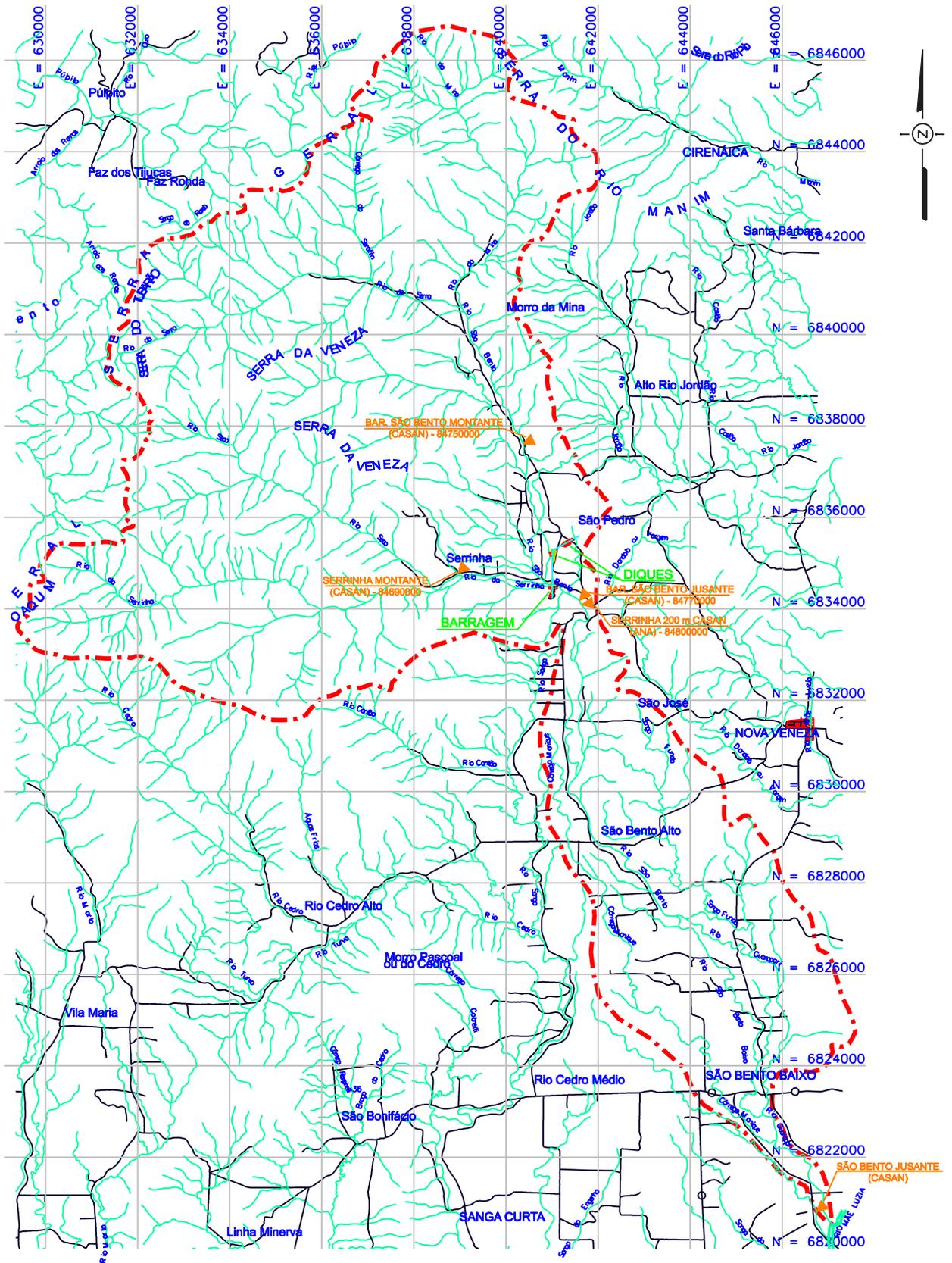
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
 PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
 EM ENGENHARIA AMBIENTAL



**MAPA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO BENTO**

AUTOR: Liu Ming  
 DESENHO: Karine Xavier

DATA: Fev./2007  
 ESC.: 1:125.000



**LEGENDA:**

- Rio
- - - Limite da Bacia Hidrográfica
- Ruas / Rodovias
- ▲ Postos Fluviométricos



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA AMBIENTAL



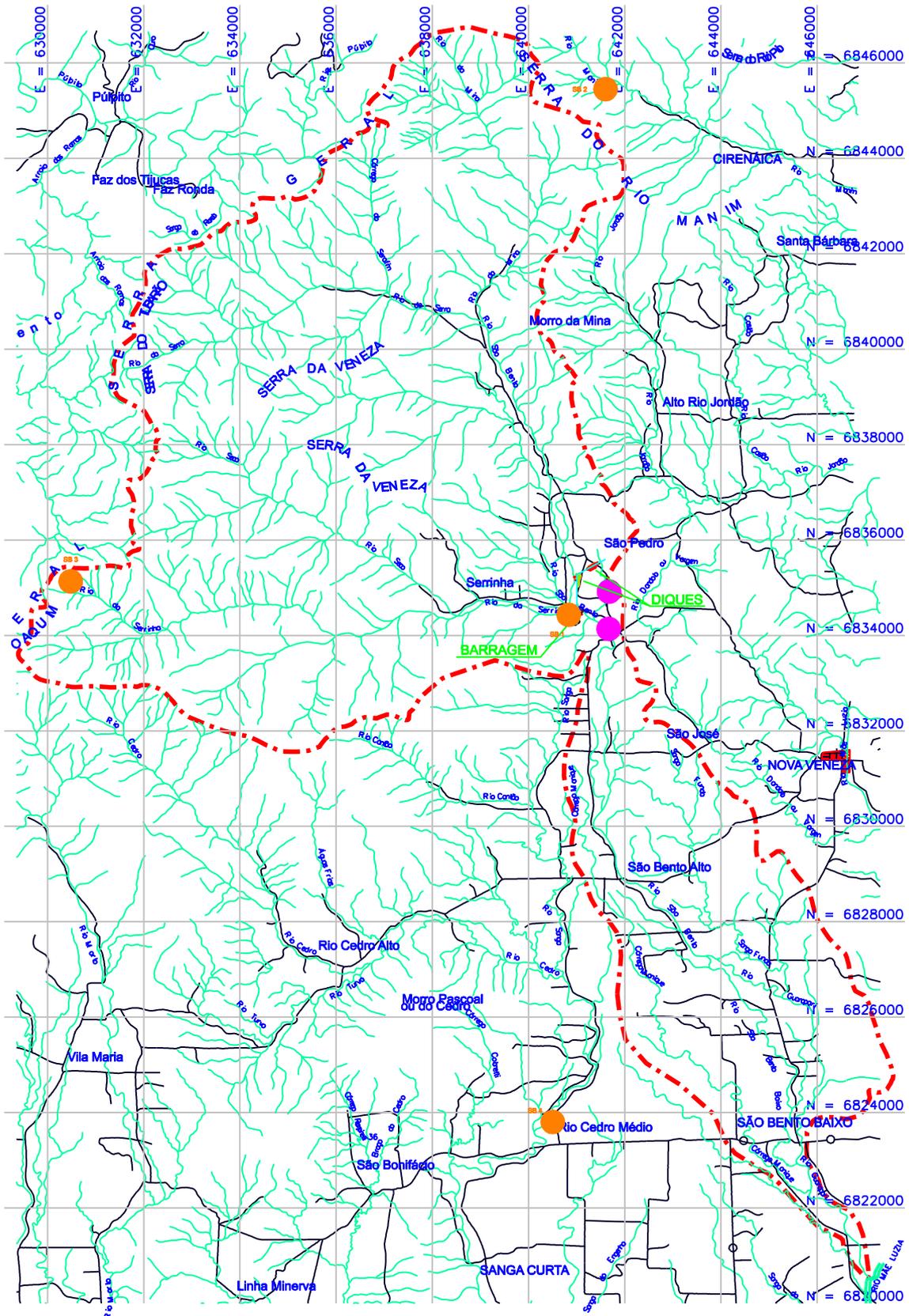
**POSTOS FLUVIOMÉTRICOS RIO SÃO BENTO**

AUTOR: Liu Ming

DESENHO: Karine Xavier

DATA: Fev./2007

ESC.: 1:125.000



**LEGENDA:**

- Rio
- - - Limite da Bacia Hidrográfica
- Ruas / Rodovias
- Pontos de Previsão de Chuva
- Postos Pluviométricos



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

**EM ENGENHARIA AMBIENTAL**



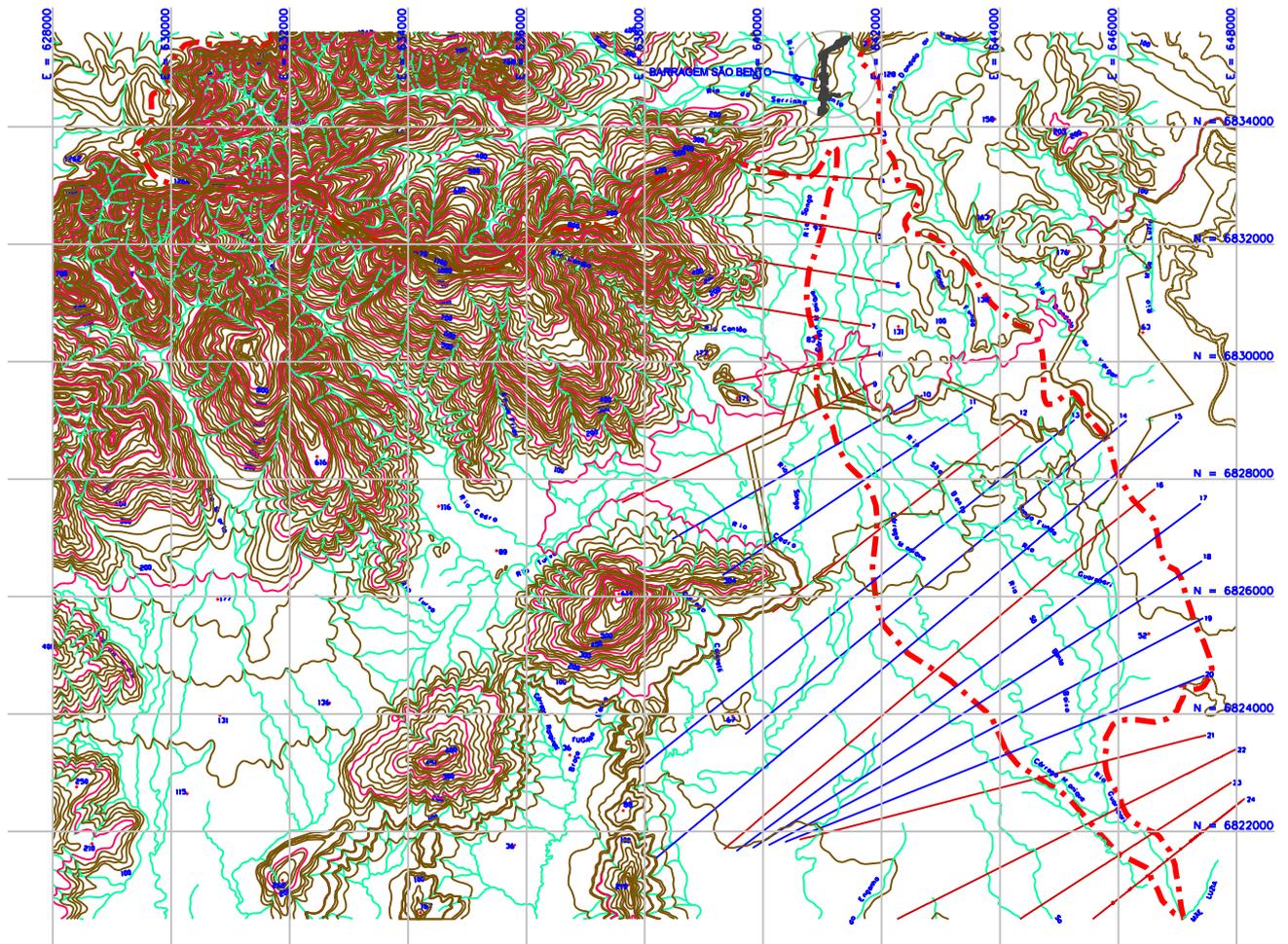
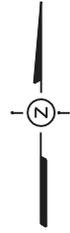
**MODELO ARPS - PONTOS DE PREVISÃO DE CHUVA  
E POSTOS PLUVIOMÉTRICOS RIO SÃO BENTO**

AUTOR: Liu Ming

DESENHO: Karine Xavier

DATA: Fev./2007

ESC.: 1:125.000



**LEGENDA:**

-  Rio
-  Limite da Bacia Hidrográfica
-  Seções Levantadas
-  Seções Interpoladas pelo HAC-RAS



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA AMBIENTAL



**SEÇÕES TOPOBATIMÉTRICAS RIO SÃO BENTO**

AUTOR: Liu Ming

DESENHO: Karine Xavier

DATA: Fev./2007

ESC.: 1:125.000

**ANEXO 4 – CÓDIGO FONTE DO MODELO HIDROLÓGICO SACC**

```

unit USHU;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls, Buttons, Grids, ExtCtrls, Mask, ComCtrls, Inifiles, Variants;

type
  TFPrincipal = class(TForm)
    GroupBox5: TGroupBox;
    Label13: TLabel;
    Label14: TLabel;
    Label15: TLabel;
    MediaApuae: TEdit;
    HoraApuae: TEdit;
    CoefApuae: TEdit;
    GroupBox6: TGroupBox;
    Label16: TLabel;
    Label17: TLabel;
    Label18: TLabel;
    MediaIncrem: TEdit;
    HoraIncrem: TEdit;
    CoefIncrem: TEdit;
    Label19: TLabel;
    Label21: TLabel;
    EdVazao: TEdit;
    Panel1: TPanel;
    SpeedButton1: TSpeedButton;
    btnGravar: TSpeedButton;
    btnLer: TSpeedButton;
    SpeedButton4: TSpeedButton;
    Label22: TLabel;
    EdDias: TEdit;
    SaveDialog1: TSaveDialog;
    OpenDialog1: TOpenDialog;
    EdData: TMaskEdit;
    PageControl1: TPageControl;
    TabSheet1: TTabSheet;
    GridSaoBento: TStringGrid;
    Label24: TLabel;
    DPSaoBento: TEdit;
    SpeedButton5: TSpeedButton;
    Label44: TLabel;
    edFatorArea: TEdit;
    Label1: TLabel;
    edK1: TEdit;
    Label2: TLabel;
    edK2: TEdit;
    Label3: TLabel;
    Label4: TLabel;
    edK3: TEdit;
    edK4: TEdit;
    Memo1: TMemo;
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure SpeedButton1Click(Sender: TObject);
    procedure SpeedButton4Click(Sender: TObject);
    procedure btnGravarClick(Sender: TObject);
    procedure btnLerClick(Sender: TObject);
    procedure EdDiasExit(Sender: TObject);
    procedure SpeedButton5Click(Sender: TObject);
    procedure FormActivate(Sender: TObject);
  private

    QSaoBento : Variant;

    procedure LeArquivo(var Vetor : Variant; Arquivo : String);
    procedure CalculaHU(Vetor : Variant; GrideChuvas, GrideDados : TStringGrid;
      DuracaoPadrao, Coluna, Linha, TempoResposta : Integer);
    procedure CalculaQParcial(Vetor : Variant; GrideChuvas, GrideDados : TStringGrid;
      Coef : Real; DuracaoPadrao, Coluna, Linha, TempoResposta : Integer);
    procedure CalculaQTotal(Gride : TStringGrid);
    function ProcuraValorRegressao(QInicial, SubBacia : Integer) : Integer;
    procedure CalculaCurvaRecessao(QInicial : Integer; Gride : TStringGrid; SubBacia :
      Integer);
    procedure CalculaSoma(Gride : TStringGrid);
    procedure LarguraColuna;
  end;

```

```

    procedure MontaGrde(Grde : TStringGrid; NumeroDias : Integer; DuracaoPadrao :
String);
    procedure MontaDias;
    procedure ZeraGrde;
    procedure CalculaQBase(QInicial: Integer; Grde: TStringGrid);
    function converteFloat(Valor: String): Real;
        { Private declarations }
    public
        { Public declarations }
    end;

var
    FPrincipal: TFPrincipal;

implementation

uses UDados;

{$R *.DFM}

function TFPrincipal.converteFloat(Valor : String) : Real;
begin
    Valor := stringReplace(Valor, '.', ThousandSeparator, []);
    Valor := stringReplace(Valor, ',', DecimalSeparator, []);
    converteFloat := StrToFloat(Valor);
end;

procedure TFPrincipal.LeArquivo(var Vetor : Variant; Arquivo : String);
var
    Arq : TextFile;
    Indice : Integer;
    Linha : String;
begin
    Indice := 0;
    AssignFile(Arq, Arquivo);
    Reset(Arq);
    While not SeekEof(Arq) do
    begin
        ReadLn(Arq, Linha);
        Inc(Indice);
    end;
    Reset(Arq);
    Vetor := VarArrayCreate([0, Indice], varDouble);
    Indice := 0;
    While not SeekEof(Arq) do
    begin
        ReadLn(Arq, Linha);
        // Vetor[Indice] := StrToFloat(Linha);
        Vetor[Indice] := converteFloat(Linha);
        Inc(Indice);
    end;
    CloseFile(Arq);
end;

procedure TFPrincipal.FormCreate(Sender: TObject);
begin
    LeArquivo(QSaoBento, 'QSaoBento.Txt');
end;

procedure TFPrincipal.CalculaQParcial(Vetor : Variant; GrdeChuvras, GrdeDados :
TStringGrid; Coef : Real; DuracaoPadrao, Coluna, Linha, TempoResposta : Integer);
var
    Atraso, HoraInicial, HoraParada, Dia2, Horas, ContaLinha, NumChuvras, DuracaoChuvas,
LinhaInicial, HI, J, I, K : Integer;
    AcrescVetor, Media : Real;
    Teste, Teste2 : String;
    Dia, Mes, Ano : Word;
    Posicao, M : Integer;
begin
    With GrdeDados do
    begin
        HI := 0;
        try
            Media := converteFloat(GrdeChuvras.Cells[3, Linha]);
        // Media := StrToFloat(GrdeChuvras.Cells[3, Linha]);
        except
            on EConvertError do

```

```

begin
  Media := 0;
end;
end;
LinhaInicial := 1;
ContaLinha := 0;
HoraInicial := StrToInt(GrideChuvas.Cells[2, Linha]);
Atraso := 0;
if Linha > 1 then
  Atraso := ((Linha - 1) * 24);
  HoraInicial := HoraInicial + Atraso + TempoResposta;
  NumChuvas := StrToInt(GrideChuvas.Cells[1, 1]) Div DuracaoPadrao;
  if NumChuvas = 0 then
    NumChuvas := 1;
  HoraParada := HoraInicial;
  For I := 1 to GrideChuvas.RowCount - 1 do
    begin
      For K := 1 to NumChuvas do {Começa a soma dos valores contidos no vetor de
recessão}
        begin
          For J := 1 to DuracaoPadrao - 1 do
            begin
              AcrescVetor := 0;
              Posicao := ContaLinha;
              For M := 1 to K do
                begin
                  AcrescVetor := AcrescVetor + Vetor[Posicao];
                  Posicao := ContaLinha - ((M) * (DuracaoPadrao - 1));
                end;
              AcrescVetor := AcrescVetor / NumChuvas;
              try
                // Cells[Coluna, ContaLinha + HoraInicial] :=
FloatToStrF(StrToFloat(Cells[Coluna, ContaLinha + HoraInicial]) + (AcrescVetor * Coef *
Media), ffFixed, 20, 5);
                Cells[Coluna, ContaLinha + HoraInicial] :=
FloatToStrF(convertFloat(Cells[Coluna, ContaLinha + HoraInicial]) + (AcrescVetor * Coef
* Media), ffFixed, 20, 5);
              except
                on EConvertError do
                  Cells[Coluna, ContaLinha + HoraInicial] := FloatToStrF(AcrescVetor * Coef *
Media, ffFixed, 20, 5);
                end;
                Cells[Coluna - 1, ContaLinha + HoraInicial] := FloatToStrF(AcrescVetor,
ffFixed, 20, 5);
                Teste := Cells[Coluna, ContaLinha + HoraInicial];
                Teste2 := Cells[Coluna - 1, ContaLinha + HoraInicial];
                Inc(ContaLinha);
                Inc(HoraParada);
              end;
            end;
          end;
        end;
      For i := ContaLinha to VarArrayHighBound(Vetor, 1) - ContaLinha - 1 do
        begin
          AcrescVetor := 0;
          Posicao := ContaLinha;
          For M := 1 to NumChuvas do
            begin
              AcrescVetor := AcrescVetor + Vetor[Posicao];
              Posicao := ContaLinha - ((M) * (DuracaoPadrao - 1));
            end;
          AcrescVetor := AcrescVetor / NumChuvas;
          try
            // Cells[Coluna, ContaLinha + HoraInicial] :=
FloatToStrF(StrToFloat(Cells[Coluna, ContaLinha + HoraInicial]) + (AcrescVetor * Coef *
Media), ffFixed, 20, 5);
            Cells[Coluna, ContaLinha + HoraInicial] :=
FloatToStrF(convertFloat(Cells[Coluna, ContaLinha + HoraInicial]) + (AcrescVetor * Coef
* Media), ffFixed, 20, 5);
          except
            on EConvertError do
              Cells[Coluna, ContaLinha + HoraInicial] := FloatToStrF(AcrescVetor * Coef *
Media, ffFixed, 20, 5);
            end;
            Cells[Coluna - 1, ContaLinha + HoraInicial] := FloatToStrF(AcrescVetor, ffFixed,
20, 5);
            Inc(ContaLinha);
            Inc(HoraParada);
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

        end;
    end;
end;

procedure TFPrincipal.CalculaQTotal(Gride : TStringGrid);
var
    i : Integer;
    ValorAcumulado, ValorSaoBento : Real;
begin
    With Gride do
        begin
            For i := 1 to RowCount do
                begin
                    if Cells[3, i] <> '' then
                        //      ValorSaoBento := StrToFloat(Cells[3,i])
                        ValorSaoBento := converteFloat(Cells[3,i])
                    else
                        ValorSaoBento := 0;
                        ValorAcumulado := ValorSaoBento;
                        Cells[4, i] := FloatToStrf(ValorAcumulado, ffFixed, 20, 5);
                    end;
                end;
            end;
        end;
end;

function TFPrincipal.ProcuraValorRegressao(QInicial, SubBacia : Integer) : Integer;
begin
    Case QInicial of
        0 : ProcuraValorRegressao := 0;
        1..500 : ProcuraValorRegressao := 1;
        501..800 : ProcuraValorRegressao := 3;
        801..1000 : ProcuraValorRegressao := 6;
        1001..1500 : ProcuraValorRegressao := 10;
        1501..2000 : ProcuraValorRegressao := 15;
        2001..2500 : ProcuraValorRegressao := 20;
        2501..3000 : ProcuraValorRegressao := 40;
        3001..4000 : ProcuraValorRegressao := 60;
        4001..5000 : ProcuraValorRegressao := 80;
        5001..6000 : ProcuraValorRegressao := 100;
        6001..7000 : ProcuraValorRegressao := 125;
        7001..9000 : ProcuraValorRegressao := 150;
        9001..11000 : ProcuraValorRegressao := 175;
        11001..15000 : ProcuraValorRegressao := 200;
        15001..18000 : ProcuraValorRegressao := 300;
        18001..50000 : ProcuraValorRegressao := 450;
    end;
end;

procedure TFPrincipal.CalculaQBase(QInicial : Integer; Gride : TStringGrid);
var
    Diminuicao, i : Integer;
    QBase : Real;
begin
    With Gride do
        begin
            For i := 1 to RowCount do
                begin
                    //      QBase := QInicial + (0.19927 * i);

                    QBase := QInicial + (StrToFloat(edK3.Text) * i);
                    Cells[4, i] := FloatToStrf(QBase, ffFixed, 20, 5);
                    try
                        //      if (StrToFloat(Cells[3,i]) = 0) then
                        //          if (converteFloat(Cells[3,i]) = 0) then
                        //              break;
                        //          except
                        //              end;
                    end;
                end;
            end;
        end;
    end;
    {
    procedure TFPrincipal.CalculaCurvaRecessao(QInicial : Integer; Gride : TStringGrid;
    SubBacia : Integer);
    var
        Diminuicao, i : Integer;
    begin
        With Gride do
            begin

```

```

Cells[6, 1] := IntToStr(QInicial);
Diminuicao := ProcuraValorRegressao(QInicial, SubBacia);
For i := 2 to RowCount do
begin
  Diminuicao := ProcuraValorRegressao(StrToInt(Cells[6, i - 1]), SubBacia);
  Cells[6, i] := IntToStr(StrToInt(Cells[6, i - 1]) - Diminuicao);
end;
end;
end;
}
procedure TFPrincipal.CalculaCurvaRecessao(QInicial : Integer; Gride : TStringGrid;
SubBacia : Integer);
var
  Diminuicao, i, ultimaLinha : Integer;
  Entrou : Boolean;
  QRecessao, QBase : Real;
begin
  With Gride do
  begin
  // Cells[6, 1] := IntToStr(QInicial);
  Diminuicao := ProcuraValorRegressao(QInicial, SubBacia);
  Entrou := False;
  For i := 2 to RowCount do
  begin
    if ((Cells[4, i] = '0') or (Cells[4, i] = '')) and (not Entrou) then
    begin
      try
        QBase := converteFloat(Cells[4, i - 1]);
      // QBase := StrToFloat(Cells[4, i - 1]);
      except
        QBase := 0;
      end;
      Entrou := True;
      ultimaLinha := i - 1;
    end;
    if (Entrou) then
    begin
      // Diminuicao := ProcuraValorRegressao(StrToInt(Cells[6, i - 1]), SubBacia);
      // QRecessao := QBase * Exp(-0.0096 * (i - ultimaLinha));
      QRecessao := QBase * Exp((-1*converteFloat(edK4.Text)) * (i - ultimaLinha));
      Cells[5, i] := FloatToStrf(QRecessao, ffFixed, 20, 6);
    end;
  end;
end;
end;

procedure TFPrincipal.CalculaSoma(Gride : TStringGrid);
var
  Diminuicao, i : Integer;
  Valor1, Valor2, Valor3 : Real;
begin
  With Gride do
  begin
    For i := 1 to RowCount do
    begin
      if Cells[3, i] <> '' then
        Valor1 := converteFloat(Cells[3, i])
      // Valor1 := StrToFloat(Cells[3, i])
      else
        Valor1 := 0;
      if Cells[4, i] <> '' then
      // Valor2 := StrToFloat(Cells[4, i])
        Valor2 := converteFloat(Cells[4, i])
      else
        Valor2 := 0;
      if Cells[5, i] <> '' then
        Valor3 := converteFloat(Cells[5, i])
      // Valor3 := StrToFloat(Cells[5, i])
      else
        Valor3 := 0;
      Cells[6, i] := FloatToStrf(Valor1 + Valor2 + Valor3, ffFixed, 20, 5);
    end;
  end;
end;

procedure TFPrincipal.LarguraColuna;
begin

```

```

With Fdados.GrideDados do
begin
  Cells[0, 0] := 'Ordem';
  ColWidths[0] := 50;
  Cells[1, 0] := 'Dia/Hora';
  ColWidths[1] := 70;
  Cells[2, 0] := 'QHU1';
  ColWidths[2] := 35;
  Cells[3, 0] := 'QPacial1';
  ColWidths[3] := 45;
  Cells[4, 0] := 'QHU Total';
  ColWidths[4] := 55;
  Cells[4, 0] := 'QBase';
  ColWidths[4] := 55;
  Cells[5, 0] := 'QRec';
  ColWidths[5] := 35;
  Cells[6, 0] := 'QHU Final';
  ColWidths[6] := 55;
  Cells[8, 0] := 'Coef. Esc.';
  ColWidths[8] := 65;
end;
end;

procedure TFPrincipal.ZeraGride;
var
  i , j : Integer;
begin
  For i := 1 to FDados.GrideDados.RowCount - 1 do
    For j := 0 to FDados.GrideDados.ColCount - 1 do
      FDados.GrideDados.Cells[j, i] := '';
    end;
  end;
end;

procedure TFPrincipal.SpeedButton1Click(Sender: TObject);
var
  Valor_Maximo, TR, HoraInicial, i : Integer;
  DiaInicial : TDateTime;
  OcorreuErro : Boolean;
begin
  OcorreuErro := False;
  For i := 1 to GridSaoBento.RowCount - 1 do
    begin
      try
        // if (StrToFloat(GridSaoBento.Cells[4, i]) < 0.1) and
        // (StrToFloat(GridSaoBento.Cells[4, i]) > 1) and
        // (StrToFloat(GridSaoBento.Cells[3, i]) > 0) then
        if (converteFloat(GridSaoBento.Cells[4, i]) < 0.1) and
          (converteFloat(GridSaoBento.Cells[4, i]) > 1) and
          (converteFloat(GridSaoBento.Cells[3, i]) > 0) then
          begin
            ShowMessage('Valor Inválido para Fator de Correção.' + chr(13) + chr(10) +
              'Valor deve estar no Intervalo de 0,1 - 1');
            OcorreuErro := true;
            break;
          end;
        except
          ShowMessage('Valor Inválido para Fator de Correção.' + chr(13) + chr(10) +
            'Valor deve estar no Intervalo de 0,1 - 1');
          OcorreuErro := true;
        end;
      end;
    end;
  if (not OcorreuErro) then
    begin
      With FDados.GrideDados do
      begin
        try
          Valor_Maximo := StrToInt(EdDias.Text) * 24;
        except
          on EConvertError do
            Valor_Maximo := 222;
          end;
        RowCount := Valor_Maximo + 2;
        LarguraColuna;
        FDados.Caption := 'Cálculos para São Bento';
        FDados.SubBacia := 'SBN';
        ZeraGride;
        TR := 0;
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

    CalculaHU(QSaoBento, GridSaoBento, FDados.GrideDados, StrToInt(DPSaoBento.Text),
3, i, TR);
    // CalculaQTotal(FDados.GrideDados);
    CalculaQBase(StrToInt(EdVazao.Text), FDados.GrideDados);
    CalculaCurvaRecessao(StrToInt(EdVazao.Text), FDados.GrideDados, 1);
    CalculaSoma(FDados.GrideDados);
    HoraInicial := 1;
    DiaInicial := StrToDate(EdData.Text);
    For i := 0 to Valor_Maximo do
    begin
        Cells[0, i + 1] := IntToStr(i + 1);
        Cells[1, i + 1] := DateToStr(DiaInicial) + ' - ' + IntToStr(HoraInicial);
        Inc(HoraInicial);
        if HoraInicial > 23 then
        begin
            HoraInicial := 0;
            DiaInicial := DiaInicial + 1;
        end;
    end;
    end;
    FDados.ShowModal;
end;

procedure TFPrincipal.SpeedButton4Click(Sender: TObject);
begin
    Close;
end;

procedure TFPrincipal.btnGravarClick(Sender: TObject);
var
    Arquivo : TIniFile;
    i : Integer;

procedure Grava_Chuva(Reservatorio : String; Dados : TStrings; Posicao : String);
begin
    Arquivo.WriteString('Chuva_' + Posicao, Reservatorio + '_Dia', Dados[0]);
    Arquivo.WriteString('Chuva_' + Posicao, Reservatorio + '_Duracao', Dados[1]);
    Arquivo.WriteString('Chuva_' + Posicao, Reservatorio + '_Inicio', Dados[2]);
    Arquivo.WriteString('Chuva_' + Posicao, Reservatorio + '_Chuva', Dados[3]);
    Arquivo.WriteString('Chuva_' + Posicao, Reservatorio + '_CoefEsc', Dados[4]);
end;

begin
    if SaveDialog1.Execute then
    begin
        Arquivo := TIniFile.Create(SaveDialog1.FileName);
        //grava dados gerais do shu
        Arquivo.WriteString('Dados_Gerais', 'Data_Inicial', EdData.Text);
        Arquivo.WriteString('Dados_Gerais', 'Vazao_Inicial', EdVazao.Text);
        Arquivo.WriteString('Dados_Gerais', 'Numero_Dias', EdDias.Text);
        Arquivo.WriteString('Dados_Gerais', 'Fator_Area', EdFatorArea.Text);
        Arquivo.WriteString('Dados_Gerais', 'K1', EdK1.Text);
        Arquivo.WriteString('Dados_Gerais', 'K2', EdK2.Text);
        Arquivo.WriteString('Dados_Gerais', 'K3', EdK3.Text);
        Arquivo.WriteString('Dados_Gerais', 'K4', EdK4.Text);
        //grava dados gerais de canoas
        Arquivo.WriteString('SaoBento', 'Duracao_Padrao', DPSaoBento.Text);
        // Arquivo.WriteString('SaoBento', 'TR', TRSaoBento.Text);
        //grava dados de chuvas
        For i := 1 to StrToInt(EdDias.Text) do
        begin
            Grava_Chuva('SaoBento', GridSaoBento.Rows[i], IntToStr(i));
        end;
        Arquivo.Free;
    end;
end;

procedure TFPrincipal.btnLerClick(Sender: TObject);
var
    Arquivo : TIniFile;
    i : Integer;

procedure Le_Chuva(Reservatorio : String; Dados : TStrings; Posicao : String);
begin
    Dados[0] := Arquivo.ReadString('Chuva_' + Posicao, Reservatorio + '_Dia', '');
    Dados[1] := Arquivo.ReadString('Chuva_' + Posicao, Reservatorio + '_Duracao', '');

```

```

    Dados[2] := Arquivo.ReadString('Chuva_' + Posicao, Reservatorio + '_Inicio', '');
    Dados[3] := Arquivo.ReadString('Chuva_' + Posicao, Reservatorio + '_Chuva', '');
    Dados[4] := Arquivo.ReadString('Chuva_' + Posicao, Reservatorio + '_CoefEsc', '0,20');
end;

begin
    if OpenFileDialog1.Execute then
    begin
        Arquivo := TIniFile.Create(OpenDialog1.FileName);
        //grava dados gerais do shu
        EdData.Text := Arquivo.ReadString('Dados_Gerais', 'Data_Inicial', '');
        EdVazao.Text := Arquivo.ReadString('Dados_Gerais', 'Vazao_Inicial', '');
        EdDias.Text := Arquivo.ReadString('Dados_Gerais', 'Numero_Dias', '');
        EdFatorArea.Text := Arquivo.ReadString('Dados_Gerais', 'Fator_Area', '');
        EdK1.Text := Arquivo.ReadString('Dados_Gerais', 'K1', '');
        EdK2.Text := Arquivo.ReadString('Dados_Gerais', 'K2', '');
        EdK3.Text := Arquivo.ReadString('Dados_Gerais', 'K3', '');
        EdK4.Text := Arquivo.ReadString('Dados_Gerais', 'K4', '');
        MontaNosDias;
        //grava dados gerais de canoas
        DPSaoBento.Text := Arquivo.ReadString('SaoBento', 'Duracao_Padrao', '');
        // TRSaoBento.Text := Arquivo.ReadString('SaoBento', 'TR', '');
        //grava dados de chuvas
        For i := 1 to StrToInt(EdDias.Text) + 1 do
        begin
            Le_Chuva('SaoBento', GridSaoBento.Rows[i], IntToStr(i));
        end;
        Arquivo.Free;
    end;
end;

procedure TFPrincipal.MontaGride(Gride : TStringGrid; NumeroDias : Integer;
DuracaoPadrao : String);
{ Esta Função zera os grides para o preenchimento de P.Media
  Acrescenta os labels referentes ao P.Media e aos Dias
}
var
    i, j : Integer;
begin
    With Gride do
    begin
        Cells[0, 0] := 'Dia';
        Cells[1, 0] := 'Duração';
        Cells[2, 0] := 'Hora Início';
        Cells[3, 0] := 'Chuva (mm)';
        Cells[4, 0] := 'Fator Correção';
        // Cells[4, 0] := 'Coef. Escoamento';
        RowCount := NumeroDias + 1;
        For i := 0 to RowCount - 2 do
        begin
            Cells[0, i + 1] := DateToStr(StrToDate(EdData.Text) + i);
            Cells[1, i + 1] := DuracaoPadrao;
            Cells[2, i + 1] := '1';
            Cells[3, i + 1] := '0';
            Cells[4, i + 1] := '0,20';
        end;
    end;
end;

procedure TFPrincipal.EdDiasExit(Sender: TObject);
begin
    MontaNosDias;
end;

procedure TFPrincipal.MontaNosDias;
{ Monta os Grides com o Numero de Dias Digitados
  NumeroDias : Número de Dias no tipo Inteiro
}
var
    NumeroDias : Integer;
begin
    try
        NumeroDias := StrToInt(EdDias.Text);
    except
        on EConvertError do
            NumeroDias := 1;
    end;
end;

```

```

    MontaGrde(GridSaoBento, NumeroDias, DPSaoBento.Text);
end;

procedure TFPrincipal.SpeedButton5Click(Sender: TObject);
var
    i : Integer;
begin
    EdData.Clear;
    EdVazao.Clear;
    EdDias.Clear;
    DPSaoBento.Text := '1';
    // TRSaoBento.Text := '28';
    GridSaoBento.RowCount := 2;
    For i := 0 to GridSaoBento.ColCount - 1 do
        GridSaoBento.Cells[i, 1] := '';
    EdData.SetFocus;
end;

procedure TFPrincipal.FormActivate(Sender: TObject);
begin
    SpeedButton5Click(FPrincipal);
end;
{
procedure TFPrincipal.CalculaHU(Vetor : Variant; GrdeChuvas, GrdeDados : TStringGrid;
DuracaoPadrao, Coluna, Linha, TempoResposta : Integer);
var
    Delay, LinhaInicio, i, j, k, HoraInicio : Integer;
    NumeroChuvas : Real;
begin
    With GrdeChuvas do
        begin
            For k := 1 to RowCount - 1 do
                begin
                    if StrToFloat(Cells[1, k]) > 0 then
                        begin
                            try
                                NumeroChuvas := StrToInt(Cells[1, k])/DuracaoPadrao; //Valor da Chuva dividido
pela Duracao Padrao
                                except on EDivByZero do
                                    NumeroChuvas := 1;
                                end;
                                HoraInicio := StrToInt(Cells[2, k]);
                                Delay := 0;
                                if K > 1 then
                                    begin
                                        Delay := 24 * (k - 1);
                                    end;
                                LinhaInicio := TempoResposta + HoraInicio + Delay;
                                For j := 1 to Trunc(NumeroChuvas) do
                                    begin
                                        For i := 1 to VarArrayHighBound(Vetor, 1) do
                                            begin
                                                try
                                                    GrdeDados.Cells[6, LinhaInicio] :=
FloatToStr(StrToFloat(GrdeDados.Cells[6, LinhaInicio]) + Vetor[i]);
                                                except on EConvertError do
                                                    GrdeDados.Cells[6, LinhaInicio] := FloatToStr(Vetor[i]);
                                                end;
                                                Inc(LinhaInicio);
                                            end;
                                        LinhaInicio := TempoResposta + HoraInicio + Delay + DuracaoPadrao * (J);
                                    end;
                                // GrdeDados.RowCount := VarArrayHighBound(Vetor, 1) + LinhaInicio;
                                For i := 1 to GrdeDados.RowCount - 1 do
                                    begin
                                        try
                                            try
                                                GrdeDados.Cells[6, i] := FloatToStrf(StrToFloat(GrdeDados.Cells[6, i]) /
NumeroChuvas, fFixed, 8, 2);
                                                GrdeDados.Cells[7, i] := FloatToStrf(StrToFloat(GrdeDados.Cells[6, i]) *
(StrToFloat(Cells[3, k])/10) * StrToFloat(Cells[4, k]), fFixed, 8, 2); //Dividido por
10 para poder digitar em milímetros
                                            except on EDivByZero do
                                                begin
                                                    GrdeDados.Cells[6, i] := '0';
                                                    GrdeDados.Cells[7, i] := '0';
                                                end;
                                            end;
                                        end;
                                    end;
                                end;
                            end;
                        end;
                    end;
                end;
            end;
        end;
    end;
}

```

```

        end;
        end;
        except on EConvertError do
        begin
        end;
        end;
        end;
        For i := 1 to GrideDados.RowCount - 1 do
        begin
        if GrideDados.Cells[6, i] <> '' then
        begin
        try
        GrideDados.Cells[coluna - 1, i] :=
FloatToStr(StrToFloat(GrideDados.Cells[coluna - 1, i]) + StrToFloat(GrideDados.Cells[6,
i]));
        except on EConvertError do
        GrideDados.Cells[coluna - 1, i] := GrideDados.Cells[6, i];
        end;
        GrideDados.Cells[6, i] := '';
        end;
        if GrideDados.Cells[7, i] <> '' then
        begin
        try
        GrideDados.Cells[coluna, i] := FloatToStr(StrToFloat(GrideDados.Cells[7,
i]) + StrToFloat(GrideDados.Cells[coluna, i]));
        except on EConvertError do
        GrideDados.Cells[coluna, i] := GrideDados.Cells[7, i];
        end;
        GrideDados.Cells[7, i] := '';
        end;
        end;
        end;
        end;
        end;
        end;
        end;
        }

procedure TFPrincipal.CalculaHU(Vetor : Variant; GrideChuvas, GrideDados : TStringGrid;
DuracaoPadrao, Coluna, Linha, TempoResposta : Integer);
var
    Delay, LinhaInicio, i, j, k, HoraInicio : Integer;
    NumeroChuvas : Real;
    CoeficienteEscoamento, CoeficienteEscoamentoVisualizado : Real;
    K1 : String;
begin
    With GrideChuvas do
    begin
        For k := 1 to RowCount - 1 do
        begin
        // if StrToFloat(Cells[3, k]) > 0 then
        if converteFloat(Cells[3, k]) > 0 then
        begin
        try
        NumeroChuvas := StrToInt(Cells[1, k])/DuracaoPadrao; //Valor da Chuva dividido
pela Duracao Padrao
        except on EDivByZero do
        NumeroChuvas := 1;
        end;
        HoraInicio := StrToInt(Cells[2, k]);
        Delay := 0;
        if K > 1 then
        begin
        Delay := 24 * (k - 1);
        end;
        LinhaInicio := TempoResposta + HoraInicio + Delay;
        For j := 1 to Trunc(NumeroChuvas) do
        begin
        if (StrToInt(Cells[1, k]) > 0) then
        begin
        CoeficienteEscoamento := converteFloat(edK1.Text)*Ln( converteFloat(Cells[3,
k]) / StrToInt(Cells[1, k]) * converteFloat(Cells[4,k]) ) - converteFloat(edK2.Text);
        // CoeficienteEscoamento := StrToFloat(edK1.Text)*Ln( StrToFloat(Cells[3, k])
/ StrToInt(Cells[1, k]) * StrToFloat(Cells[4,k]) ) - StrToFloat(edK2.Text);
        // CoeficienteEscoamento := 0.0027*StrToFloat(Cells[3, k])/StrToInt(Cells[1,
k])*j + 0.1902;
        // CoeficienteEscoamento := StrToFloat(Cells[4,k]);
        if (CoeficienteEscoamento > 0.7) then

```

```

        CoeficienteEscoamento := 0.7;
    end
    else
    begin
        CoeficienteEscoamento := 0.1902;
    end;
    For i := 1 to VarArrayHighBound(Vetor, 1) do
    begin
        try
            GrideDados.Cells[6, LinhaInicio] :=
FloatToStr(convertFloat(GrideDados.Cells[6, LinhaInicio]) +
Vetor[i]*CoeficienteEscoamento);
//            GrideDados.Cells[6, LinhaInicio] :=
FloatToStr(StrToFloat(GrideDados.Cells[6, LinhaInicio]) +
Vetor[i]*CoeficienteEscoamento);
            except on EConvertError do
                GrideDados.Cells[6, LinhaInicio] :=
FloatToStr(Vetor[i]*CoeficienteEscoamento);
            end;
            GrideDados.Cells[8, LinhaInicio] := FloatToStrF(CoeficienteEscoamento,
ffFixed, 8, 6);
            Inc(LinhaInicio);
        end;
        LinhaInicio := TempoResposta + HoraInicio + Delay + DuracaoPadrao * (J);
    end;
//    GrideDados.RowCount := VarArrayHighBound(Vetor, 1) + LinhaInicio;
    For i := 1 to GrideDados.RowCount - 1 do
    begin
        try
            try
                GrideDados.Cells[6, i] := FloatToStrf(convertFloat(GrideDados.Cells[6,
i]) / NumeroChuvas, ffFixed, 20, 5);
                GrideDados.Cells[7, i] := FloatToStrf(convertFloat(GrideDados.Cells[6,
i]) * (convertFloat(Cells[3, k])), ffFixed, 20, 5); //Dividido por 10 para poder
digitar em milímetros
//                GrideDados.Cells[6, i] := FloatToStrf(StrToFloat(GrideDados.Cells[6, i])
/ NumeroChuvas, ffFixed, 20, 5);
//                GrideDados.Cells[7, i] := FloatToStrf(StrToFloat(GrideDados.Cells[6, i])
* (StrToFloat(Cells[3, k])), ffFixed, 20, 5); //Dividido por 10 para poder digitar em
milímetros
//                GrideDados.Cells[7, i] := FloatToStrf(StrToFloat(GrideDados.Cells[6, i])
* (StrToFloat(Cells[3, k])) * StrToFloat(Cells[4, k]), ffFixed, 20, 5); //Dividido por
10 para poder digitar em milímetros
            except on EDivByZero do
                begin
                    GrideDados.Cells[6, i] := '0';
                    GrideDados.Cells[7, i] := '0';
                end;
            end;
        except on EConvertError do
            begin
            end;
        end;
    end;
    For i := 1 to GrideDados.RowCount - 1 do
    begin
        if GrideDados.Cells[6, i] <> '' then
        begin
            try
                GrideDados.Cells[coluna - 1, i] :=
FloatToStr(convertFloat(GrideDados.Cells[coluna - 1, i]) +
convertFloat(GrideDados.Cells[6, i]));
//                GrideDados.Cells[coluna - 1, i] :=
FloatToStr(StrToFloat(GrideDados.Cells[coluna - 1, i]) + StrToFloat(GrideDados.Cells[6,
i]));
            except on EConvertError do
                GrideDados.Cells[coluna - 1, i] := GrideDados.Cells[6, i];
            end;
            GrideDados.Cells[6, i] := '';
        end;
        if GrideDados.Cells[7, i] <> '' then
        begin
            try
                GrideDados.Cells[coluna, i] :=
FloatToStr(convertFloat(GrideDados.Cells[7, i]) +
convertFloat(GrideDados.Cells[coluna, i]));

```

```
//           GrideDados.Cells[coluna, i] :=
FloatToStr(StrToFloat(GrideDados.Cells[7, i]) + StrToFloat(GrideDados.Cells[coluna,
i]));
           except on EConvertError do
               GrideDados.Cells[coluna, i] := GrideDados.Cells[7, i];
           end;
           GrideDados.Cells[7, i] := '';
       end;
   end;
end;
end;
end;
end;
end.
```

**ANEXO 5 – CÓDIGO FONTE DO MODELO DE PROPAGAÇÃO DE DESCARGAS  
EM RESERVATÓRIOS**

```

        unit UResultado;

interface

uses
    Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
    Buttons, ExtCtrls, Grids, Menus, StdCtrls, Imprime, Printers, TeEngine;

type
    TFResultado = class(TForm)
        GridResultado: TStringGrid;
        Panell: TPanel;
        Memol: TMemo;
        PopupMenu: TPopupMenu;
        Copiar1: TMenuItem;
        PrintDialog1: TPrintDialog;
        btnRelatorio: TBitBtn;
        btnResumido: TBitBtn;
        btnGrafico: TBitBtn;
        btnVoltar: TBitBtn;
        procedure Copiar1Click(Sender: TObject);
        procedure ImprimeRelatorio;
        procedure ToolbarButton973Click(Sender: TObject);
        procedure ImprimeRelatorioM;
        procedure ImprimeRelatorioResumidoM;
        procedure ImprimeRelatorioResumido;
        procedure btnRelatorioClick(Sender: TObject);
        procedure btnResumidoClick(Sender: TObject);
        procedure btnGraficoClick(Sender: TObject);
        procedure btnVoltarClick(Sender: TObject);
    private
        { Private declarations }
    public
        procedure GeraGraficoSimulador(Inicio, Fim : Integer; Gride : TStringGrid);
        procedure GeraEscalaGraficoSimulador;
        { Public declarations }
    end;

var
    FResultado: TFResultado;

implementation

uses UDadosInicial, UGrafico;

{$R *.DFM}

procedure TFResultado.Copiar1Click(Sender: TObject);
var
    Selec : TGridRect;
    j, i : Integer;
    Linha : String;
    Dados : TStringList;
begin
    Selec := GridResultado.Selection;
    Linha := '';
    Memol.Clear;
    For i := Selec.Top to Selec.Bottom do
    begin
        Linha := '';
        For j := Selec.Left to Selec.Right do
        begin
            if j = Selec.Right then
                Linha := Linha + GridResultado.Cells[j,i]
            else
                Linha := Linha + GridResultado.Cells[j,i] + Chr(9);
            end;
        Memol.Lines.Add(Linha);
        end;
    Memol.SelectAll;
    Memol.CopyToClipboard;
    end;

procedure TFResultado.ImprimeRelatorio;
var
    ContDia, NumeroHoras, i, MargemEsq, MargemTop, NovoY : Integer;
    AuxAfl, AuxDef, AuxNivel : Real;

```

```

FonteCab, FonteRot, FonteTexto, FonteLegenda : TFonte;
Data, Dia, HoraDef, HoraNivel, TipoDoc, NumDias, Unid : String;
ValorTotal : Real;
begin
{ if PrintDialog1.Execute then
begin
Printer.Title := 'Simulador de Cálculos de Reservas';
Printer.BeginDoc;
TipoDoc := '';
NumDias := '';
ValorTotal := 0;
AuxAfl := 0;
AuxDef := 0;
AuxNivel := 0;
NumeroHoras := 0;
MargemEsq := PosX(10);
MargemTop := PosY(10);
DefineFonte(0, 'Arial', 11, [fsBold, fsItalic], @fonteCab);
DefineFonte(0, 'Arial', 11, [fsItalic], @FonteRot);
DefineFonte(0, 'Arial', 8, [], @FonteTexto);
DefineFonte(0, 'Arial', 8, [fsbold], @FonteLegenda);
ContDia := 0;
NovoY := Cabecalho(MargemEsq, MargemTop, 'Simulador de Cálculo para Armazenamento de
Reservatórios', False, False, FonteCab);
NovoY := NovoY + PosY(1);
NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Dados da Sub-Bacia
ITÁ', FonteRot);
NovoY := NovoY + PosY(5);
With FEntradaDados do
begin
NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Nível : ' +
EdNivel.Text, FonteTexto);
NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Delta T : '
+ EdDeltaT.Text, FonteTexto);
NovoY := NovoY + PosY(1);
NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Data Inicial : ' +
EdData.Text, FonteTexto);
NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(70), NovoY, 'Hora Inicial : ' +
EdHoras.Text, FonteTexto);
NovoY := NovoY + PosY(1);
NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Número de Dias : ' +
EdNumDias.Text, FonteTexto);
NovoY := NovoY + PosY(1);
Printer.Canvas.Pen.Width := 4;
Printer.Canvas.MoveTo(MargemEsq, NovoY);
Printer.Canvas.LineTo(Printer.PageWidth, NovoY);
Printer.Canvas.Pen.Width := 1;
End;
NovoY := NovoY + PosY(2);
NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Data', FonteLegenda);
NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(25), NovoY, 'Hora', FonteLegenda);
NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(40), NovoY, 'Q Afluente', FonteLegenda);
NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(80), NovoY, 'Q Defluente', FonteLegenda);
NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(120), NovoY, 'Nível
Calculado', FonteLegenda);
For i := 1 to GridResultado.RowCount - 1 do
begin
With GridResultado do
begin
NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(5), NovoY, Cells[0, i], FonteTexto);
NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(25), NovoY, Cells[1, i], FonteTexto);
NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(40), NovoY, Cells[3, i], FonteTexto);
NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(80), NovoY, Cells[8, i], FonteTexto);
NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(120), NovoY, Cells[13, i], FonteTexto);
if GridResultado.Cells[3, i] <> '' then
begin
Inc(NumeroHoras);
AuxAfl := AuxAfl + StrToFloat(Cells[3, i]);
end;
end;
if Cells[8, i] <> '' then
if AuxDef < StrToFloat(Cells[8, i]) then
begin
HoraDef := Cells[1, i];
AuxDef := StrToFloat(Cells[8, i]);
end;
end;
if Cells[13, i] <> '' then
if AuxNivel < StrToFloat(Cells[13, i]) then

```

```

begin
  HoraNivel := Cells[1, i];
  AuxNivel := StrToFloat(Cells[13, i]);
end;
if (Cells[1, i + 1] = '0') or (i = RowCount - 1) then
begin
  NovoY := NovoY + PosY(2);
  Printer.Canvas.Pen.Width := 2;
  Printer.Canvas.MoveTo(MargemEsq, NovoY);
  Printer.Canvas.LineTo(Printer.PageWidth, NovoY);
  Printer.Canvas.Pen.Width := 1;
  NovoY := NovoY + PosY(1);
  NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Dados
Diários',FonteRot);
  NovoY := NovoY + PosY(1);
  NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Média Afluente : '
+ FloatToStrF(AuxAfl/NumeroHoras, ffFixed, 8, 2), FonteTexto);
  NovoY := NovoY + PosY(1);
  NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Defluência Máxima (Hora)
: '
+ '(' + HoraDef + ') ' + FloatToStrF(AuxDef, ffFixed, 8, 2),
FonteTexto);
  NovoY := NovoY + PosY(1);
  NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Nível Calculado Máximo
(Hora) : ' +
 '(' + HoraNivel + ') ' + FloatToStrF(AuxNivel, ffFixed, 8,
2),FonteTexto);
  NovoY := NovoY + PosY(1);
  AuxAfl := 0;
  AuxDef := 0;
  AuxNivel := 0;
  NumeroHoras := 0;
  Printer.Canvas.Pen.Width := 2;
  Printer.Canvas.MoveTo(MargemEsq, NovoY);
  Printer.Canvas.LineTo(Printer.PageWidth, NovoY);
  Printer.Canvas.Pen.Width := 1;
  NovoY := NovoY + PosY(2);
  Inc(ContDia);
  if (ContDia Mod 2) = 0 then
  begin
    if ContDia < StrToInt(FEntradaDados.EdNumDias.Text) then
    begin
      RodapeImpresso;
      Printer.NewPage;
    end;
    MargemEsq := PosX(10);
    MargemTop := PosY(10);
    NovoY := Cabecalho(MargemEsq, MargemTop, 'Simulador de Cálculo para
Armazenamento de Reservatórios', False, False, FonteCab);
    NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(5), NovoY + PosY(3),
'Data',FonteLegenda);
    NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(25), NovoY+ PosY(3),
'Hora',FonteLegenda);
    NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(40), NovoY+ PosY(3), 'Q
Afluente',FonteLegenda);
    NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(80), NovoY+ PosY(3), 'Q
Defluente',FonteLegenda);
    NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(120), NovoY+ PosY(3), 'Nível
Calculado',FonteLegenda);
    end;
  end;
end;
end;
RodapeImpresso;
Printer.EndDoc;
end;}
end;

procedure TFResultado.ImprimeRelatorioM;
var
  m, Acum, HoraInicial, ContDia, k, j, NumeroHoras2, NumeroHoras, i, MargemEsq,
MargemTop, NovoY : Integer;
  AuxAfl2, AuxAfl, AuxDef2, AuxDef, AuxNivel2, AuxNivel : Real;
  FonteCab, FonteRot, FonteTexto, FonteLegenda : TFonte;
  Data, Dia, HoraDef2, HoraDef, HoraNivel2, HoraNivel, TipoDoc, NumDias, Unid : String;
  ValorTotal : Real;
  Impar : Boolean;

```

```

begin
{ if PrintDialog1.Execute then
begin
Printer.Title := 'Simulador de Cálculos de Reservas';
Printer.BeginDoc;
TipoDoc := '';
NumDias := '';
ValorTotal := 0;
AuxAfl := 0;
AuxDef := 0;
AuxNivel := 0;
AuxAfl2 := 0;
AuxDef2 := 0;
AuxNivel2 := 0;
NumeroHoras := 0;
NumeroHoras2 := 0;
MargemEsq := PosX(10);
MargemTop := PosY(10);
DefineFonte(0, 'Arial', 11, [fsBold, fsItalic], @fonteCab);
DefineFonte(0, 'Arial', 11, [fsItalic], @FonteRot);
DefineFonte(0, 'Arial', 8, [], @FonteTexto);
DefineFonte(0, 'Arial', 8, [fsbold], @FonteLegenda);
NovoY := Cabecalho(MargemEsq, MargemTop, 'Simulador de Cálculo para Armazenamento de
Reservatórios', False, False, FonteCab);
NovoY := NovoY + PosY(1);
NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Dados da Sub-Bacia
MACHADINHO', FonteRot);
NovoY := NovoY + PosY(5);
With FEntradaDados do
begin
NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Nível : ' +
EdNivel.Text, FonteTexto);
NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Delta T : '
+ EdDeltaT.Text, FonteTexto);
NovoY := NovoY + PosY(1);
NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Data Inicial : ' +
EdData.Text, FonteTexto);
NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(70), NovoY, 'Hora Inicial : ' +
EdHoras.Text, FonteTexto);
HoraInicial := StrToInt(EdHoras.Text);
NovoY := NovoY + PosY(1);
NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Número de Dias : ' +
EdNumDias.Text, FonteTexto);
NovoY := NovoY + PosY(1);
Printer.Canvas.Pen.Width := 4;
Printer.Canvas.MoveTo(MargemEsq, NovoY);
Printer.Canvas.LineTo(Printer.PageWidth, NovoY);
Printer.Canvas.Pen.Width := 1;
End;
NovoY := NovoY + PosY(2);
NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Data', FonteLegenda);
NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(20), NovoY, 'Hora', FonteLegenda);
NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(35), NovoY, 'Q Afluente', FonteLegenda);
NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(60), NovoY, 'Nível
Calculado', FonteLegenda);

// 2. coluna
NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(85), NovoY, 'Data', FonteLegenda);
NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(100), NovoY, 'Hora', FonteLegenda);
NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(115), NovoY, 'Q Afluente', FonteLegenda);
NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(140), NovoY, 'Nível
Calculado', FonteLegenda);

// Dia := GridResultado.Cells[0, 1];
// Data := GridResultado.Cells[0, 1];
j := StrToInt(FEntradaDados.EdNumDias.Text) - 1;
j := Trunc(j / 2) + 1;
j := j * 24;
i := 0;
ContDia := 1;
Acum := 24;

With GridResultado do
begin
begin
if HoraInicial <> 0 then
begin
For m := 0 to HoraInicial - 1 do

```

```

begin
    NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(5), NovoY,
FEntradaDados.EdData.Text,FonteTexto);
    NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(20), NovoY,
IntToStr(m),FonteTexto);
    NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(35), NovoY, '--',FonteTexto);
    NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(60), NovoY, '--',FonteTexto);

    // 2. coluna
    NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(85), NovoY, Cells[0, i +
Acum],FonteTexto);
    NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(100), NovoY, Cells[1, i +
Acum],FonteTexto);
    NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(115), NovoY, Cells[2, i +
Acum],FonteTexto);
    NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(140), NovoY, Cells[3, i +
Acum],FonteTexto);

end;
//      Acum := 24 - HoraInicial;
end;
end;

For k := 1 to j - 1 do
begin
    Inc(i);
    With GridResultado do
begin
    // 1. coluna
    if (HoraInicial = 0) or (i > 1) then
        NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(5), NovoY, Cells[0, i],FonteTexto);
    NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(20), NovoY, Cells[1, i],FonteTexto);
    NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(35), NovoY, Cells[2, i],FonteTexto);
    NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(60), NovoY, Cells[3, i],FonteTexto);

    // 2. coluna
    NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(85), NovoY, Cells[0, i +
Acum],FonteTexto);
    NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(100), NovoY, Cells[1, i +
Acum],FonteTexto);
    NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(115), NovoY, Cells[2, i +
Acum],FonteTexto);
    NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(140), NovoY, Cells[3, i +
Acum],FonteTexto);

//      Data := GridResultado.Cells[0, i];

    if GridResultado.Cells[2, i] <> '' then
begin
        Inc(NumeroHoras);
        AuxAfl := AuxAfl + StrToFloat(Cells[2, i]);
end;

    if (GridResultado.Cells[2, i + Acum] <> '') and (i + Acum < RowCount) then
begin
        Inc(NumeroHoras2);
        AuxAfl2 := AuxAfl2 + StrToFloat(Cells[2, i + Acum]);
end;

    if Cells[3, i] <> '' then
begin
        if AuxNivel < StrTofloat(Cells[3, i]) then
begin
            HoraNivel := Cells[1, i];
            AuxNivel := StrTofloat(Cells[3, i]);
        end;
end;

    if (Cells[3, i + Acum] <> '') and (i + Acum < RowCount) then
begin
        if AuxNivel2 < StrTofloat(Cells[3, i + Acum]) then
begin
            HoraNivel2 := Cells[1, i + Acum];
            AuxNivel2 := StrTofloat(Cells[3, i + Acum]);
        end;
end;
end;

```

```

if (Cells[1, i + 1] = '0') or (i = RowCount - 1) then
//   if (Cells[1, i + 1] = '0') or (i = j) then
begin
  i := 48 - HoraInicial;
  Acum := 24;
  NovoY := NovoY + PosY(2);
  Printer.Canvas.Pen.Width := 2;
  Printer.Canvas.MoveTo(MargemEsq, NovoY);
  Printer.Canvas.LineTo(Printer.PageWidth, NovoY);
  Printer.Canvas.Pen.Width := 1;
  NovoY := NovoY + PosY(1);
  // 1. Coluna
  NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Dados
Diários',FonteRot);
  NovoY := NovoY + PosY(1);
  try
  NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Média Afluente : '
+ FloatToStrF(AuxAfl/NumeroHoras, ffFixed, 8, 2), FonteTexto);
except on EConvertError do
  NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Média Afluente : 0,00'
, FonteTexto);
end;
try
  NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(85), NovoY, 'Média Afluente : '
+ FloatToStrF(AuxAfl2/NumeroHoras2, ffFixed, 8, 2), FonteTexto);
except on EConvertError do
  NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(85), NovoY, 'Média Afluente : 0,00'
, FonteTexto);
end;
  NovoY := NovoY + PosY(1);
  NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Nível Calculado Máximo
(Hora) : ' +
(' + HoraNivel + ') ' + FloatToStrF(AuxNivel, ffFixed, 8,
2),FonteTexto);
  NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(85), NovoY, 'Nível Calculado Máximo
(Hora) : ' +
(' + HoraNivel2 + ') ' + FloatToStrF(AuxNivel2, ffFixed, 8,
2),FonteTexto);
  NovoY := NovoY + PosY(1);
  AuxAfl := 0;
  AuxDef := 0;
  AuxNivel := 0;
  AuxAfl2 := 0;
  AuxDef2 := 0;
  AuxNivel2 := 0;
  NumeroHoras2 := 0;
  NumeroHoras := 0;
  Printer.Canvas.Pen.Width := 2;
  Printer.Canvas.MoveTo(MargemEsq, NovoY);
  Printer.Canvas.LineTo(Printer.PageWidth, NovoY);
  Printer.Canvas.Pen.Width := 1;
  NovoY := NovoY + PosY(2);
//   Dia := Cells[1, i + 1];
//   if TamanhoPagina(NovoY) then
//
//     Data := Dia;
//     if (ContDia Mod 4) = 0 then
//     begin
//       RodapeImpresso;
//       Printer.NewPage;
//       MargemEsq := PosX(10);
//       MargemTop := PosY(10);
//       NovoY := Cabecalho(MargemEsq, MargemTop, 'Simulador de Cálculo para
Armazenamento de Reservatórios', False, False, FonteCab);
//       //1. coluna
//       NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Data',FonteLegenda);
//       NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(20), NovoY, 'Hora',FonteLegenda);
//       NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(35), NovoY, 'Q
Afluente',FonteLegenda);
//       NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(60), NovoY, 'Nível
Calculado',FonteLegenda);
//
//       // 2. coluna
//       NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(85), NovoY, 'Data',FonteLegenda);
//       NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(100), NovoY, 'Hora',FonteLegenda);
//       NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(115), NovoY, 'Q
Afluente',FonteLegenda);

```

```

        NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(140), NovoY, 'Nível
Calculado',FonteLegenda);
        end;

        if (ContDia Mod 2) <> 0 then
//      if (i + 23) < RowCount - 1 then
begin
        //1. coluna
        NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Data',FonteLegenda);
        NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(20), NovoY, 'Hora',FonteLegenda);
        NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(35), NovoY, 'Q
Afluente',FonteLegenda);
        NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(60), NovoY, 'Nível
Calculado',FonteLegenda);

        // 2. coluna
        NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(85), NovoY, 'Data',FonteLegenda);
        NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(100), NovoY, 'Hora',FonteLegenda);
        NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(115), NovoY, 'Q
Afluente',FonteLegenda);
        NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(140), NovoY, 'Nível
Calculado',FonteLegenda);
        end;
        Inc(ContDia);
        end;
        end;
        end;
        RodapeImpresso;
        Printer.EndDoc;
    end;}
end;

procedure TFResultado.ImprimeRelatorioResumido;
var
    ContDia, NumeroHoras, i, MargemEsq, MargemTop, NovoY : Integer;
    AuxAfl, AuxDef, AuxNivel : Real;
    FonteCab, FonteRot, FonteTexto, FonteLegenda : TFonte;
    Data, Dia, HoraDef, HoraNivel, TipoDoc, NumDias, Unid : String;
    ValorTotal : Real;

begin
    { if PrintDialog1.Execute then
    begin
        Printer.Title := 'Simulador de Cálculos de Reservas';
        Printer.BeginDoc;
        TipoDoc := '';
        NumDias := '';
        ValorTotal := 0;
        AuxAfl := 0;
        AuxDef := 0;
        AuxNivel := 0;
        NumeroHoras := 0;
        MargemEsq := PosX(10);
        MargemTop := PosY(10);
        DefineFonte(0, 'Arial', 11, [fsBold, fsItalic], @fonteCab);
        DefineFonte(0, 'Arial', 11, [fsItalic], @FonteRot);
        DefineFonte(0, 'Arial', 8, [], @FonteTexto);
        DefineFonte(0, 'Arial', 8, [fsbold], @FonteLegenda);
        ContDia := 0;
        NovoY := Cabecalho(MargemEsq, MargemTop, 'Simulador de Cálculo para Armazenamento de
Reservatórios', False, False, FonteCab);
        NovoY := NovoY + PosY(1);
        NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Dados da Sub-Bacia
ITÁ',FonteRot);
        NovoY := NovoY + PosY(5);
        With FEntradaDados do
            begin
                NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Nível : ' +
EdNivel.Text,FonteTexto);
                NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Delta T : '
+ EdDeltaT.Text, FonteTexto);
                NovoY := NovoY + PosY(1);
                NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Data Inicial : ' +
EdData.Text, FonteTexto);
            end;
        end;
    end;
}

```

```

    NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(70), NovoY, 'Hora Inicial : ' +
EdHoras.Text,FonteTexto);
    NovoY := NovoY + PosY(1);
    NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Número de Dias : ' +
EdNumDias.Text,FonteTexto);
    NovoY := NovoY + PosY(1);
    Printer.Canvas.Pen.Width := 4;
    Printer.Canvas.MoveTo(MargemEsq, NovoY);
    Printer.Canvas.LineTo(Printer.PageWidth, NovoY);
    Printer.Canvas.Pen.Width := 1;
End;
NovoY := NovoY + PosY(2);
For i := 1 to GridResultado.RowCount - 1 do
begin
    With GridResultado do
    begin
        if Cells[0, i] <> '' then
            Dia := GridResultado.Cells[0, i];
        if GridResultado.Cells[3, i] <> '' then
            begin
                Inc(NumeroHoras);
                AuxAfl := AuxAfl + StrToFloat(Cells[3, i]);
            end;
        if Cells[8, i] <> '' then
            if AuxDef < StrToFloat(Cells[8, i]) then
                begin
                    HoraDef := Cells[1, i];
                    AuxDef := StrToFloat(Cells[8, i]);
                end;
        if Cells[13, i] <> '' then
            if AuxNivel < StrToFloat(Cells[13, i]) then
                begin
                    HoraNivel := Cells[1, i];
                    AuxNivel := StrToFloat(Cells[13, i]);
                end;
        if (Cells[1, i + 1] = '0') or (i = RowCount - 1) then
            begin
                NovoY := NovoY + PosY(2);
                Printer.Canvas.Pen.Width := 2;
                Printer.Canvas.MoveTo(MargemEsq, NovoY);
                Printer.Canvas.LineTo(Printer.PageWidth, NovoY);
                Printer.Canvas.Pen.Width := 1;
                NovoY := NovoY + PosY(1);
                NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Dados
Diários',FonteRot);
                NovoY := NovoY + PosY(1);
                NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Dia : ' + Dia,FonteRot);
                NovoY := NovoY + PosY(1);
                NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Média Afluente : '
                    + FloatToStrF(AuxAfl/NumeroHoras, ffFixed, 8, 2), FonteTexto);
                NovoY := NovoY + PosY(1);
                NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Defluência Máxima (Hora)
: '
                    + '(' + HoraDef + ') ' + FloatToStrF(AuxDef, ffFixed, 8, 2),
FonteTexto);
                NovoY := NovoY + PosY(1);
                NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Nível Calculado Máximo
(Hora) : ' +
                    '(' + HoraNivel + ') ' + FloatToStrF(AuxNivel, ffFixed, 8,
2),FonteTexto);
                NovoY := NovoY + PosY(1);
                AuxAfl := 0;
                AuxDef := 0;
                AuxNivel := 0;
                NumeroHoras := 0;
                Printer.Canvas.Pen.Width := 2;
                Printer.Canvas.MoveTo(MargemEsq, NovoY);
                Printer.Canvas.LineTo(Printer.PageWidth, NovoY);
                Printer.Canvas.Pen.Width := 1;
                NovoY := NovoY + PosY(2);
                Inc(ContDia);
                if ContDia = 5 then
                    begin
                        ContDia := 0;
                        Printer.NewPage;
                        NovoY := Cabecalho(MargemEsq, MargemTop, 'Simulador de Cálculo para
Armazenamento de Reservatórios', False, False, FonteCab);

```

```

        NovoY := NovoY + PosY(1);
        NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Dados da Sub-Bacia
ITÁ',FonteRot);
        NovoY := NovoY + PosY(5);
    end;
    end;
    end;
    end;
    RodapeImpresso;
    Printer.EndDoc;
end;}
end;

procedure TFResultado.ImprimeRelatorioResumidoM;
var
    CD, m, Acum, HoraInicial, ContDia, k, j, NumeroHoras2, NumeroHoras, i, MargemEsq,
MargemTop, NovoY : Integer;
    AuxAfl2, AuxAfl, AuxDef2, AuxDef, AuxNivel2, AuxNivel : Real;
    FonteCab, FonteRot, FonteTexto, FonteLegenda : TFonte;
    Dia2, Data, Dia, HoraDef2, HoraDef, HoraNivel2, HoraNivel, TipoDoc, NumDias, Unid :
String;
    ValorTotal : Real;
    Impar : Boolean;
begin
    { if PrintDialog1.Execute then
    begin
        Printer.Title := 'Simulador de Cálculos de Reservas';
        Printer.BeginDoc;
        TipoDoc := '';
        NumDias := '';
        ValorTotal := 0;
        AuxAfl := 0;
        AuxDef := 0;
        AuxNivel := 0;
        AuxAfl2 := 0;
        AuxDef2 := 0;
        AuxNivel2 := 0;
        NumeroHoras := 0;
        NumeroHoras2 := 0;
        CD := 0;
        MargemEsq := PosX(10);
        MargemTop := PosY(10);
        DefineFonte(0, 'Arial', 11, [fsBold, fsItalic], @fonteCab);
        DefineFonte(0, 'Arial', 11, [fsItalic], @FonteRot);
        DefineFonte(0, 'Arial', 8, [], @FonteTexto);
        DefineFonte(0, 'Arial', 8, [fsbold], @FonteLegenda);
        NovoY := Cabecalho(MargemEsq, MargemTop, 'Simulador de Cálculo para Armazenamento de
Reservatórios', False, False, FonteCab);
        NovoY := NovoY + PosY(1);
        NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Dados da Sub-Bacia
MACHADINHO',FonteRot);
        NovoY := NovoY + PosY(5);
        With FEntradaDados do
            begin
                NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Nível : ' +
EdNivel.Text,FonteTexto);
                NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Delta T : '
+ EdDeltaT.Text, FonteTexto);
                NovoY := NovoY + PosY(1);
                NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Data Inicial : ' +
EdData.Text, FonteTexto);
                NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(70), NovoY, 'Hora Inicial : ' +
EdHoras.Text,FonteTexto);
                HoraInicial := StrToInt(EdHoras.Text);
                NovoY := NovoY + PosY(1);
                NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Número de Dias : ' +
EdNumDias.Text,FonteTexto);
                NovoY := NovoY + PosY(1);
                Printer.Canvas.Pen.Width := 4;
                Printer.Canvas.MoveTo(MargemEsq, NovoY);
                Printer.Canvas.LineTo(Printer.PageWidth, NovoY);
                Printer.Canvas.Pen.Width := 1;
            End;
            NovoY := NovoY + PosY(2);

            j := StrToInt(FEntradaDados.EdNumDias.Text) - 1;
            j := Trunc(j / 2) + 1;
    }
end;

```

```

j := j * 24;
i := 0;
ContDia := 1;
Acum := 24;

For k := 1 to j - 1 do
begin
  Inc(i);
  With GridResultado do
  begin
    // 1. coluna
    if Cells[0, i] <> '' then
    begin
      Dia := Cells[0, i];
      if ContDia = 1 then
        Dia2 := Cells[0, i + Acum - 1]
      else
        Dia2 := Cells[0, i + Acum];
    end;

    if GridResultado.Cells[2, i] <> '' then
    begin
      Inc(NumeroHoras);
      AuxAfl := AuxAfl + StrToFloat(Cells[2, i]);
    end;

    if (GridResultado.Cells[2, i + Acum] <> '') and (i + Acum < RowCount) then
    begin
      Inc(NumeroHoras2);
      AuxAfl2 := AuxAfl2 + StrToFloat(Cells[2, i + Acum]);
    end;

    if Cells[3, i] <> '' then
    begin
      if AuxNivel < StrToFloat(Cells[3, i]) then
      begin
        HoraNivel := Cells[1, i];
        AuxNivel := StrToFloat(Cells[3, i]);
      end;
    end;

    if (Cells[3, i + Acum] <> '') and (i + Acum < RowCount) then
    begin
      if AuxNivel2 < StrToFloat(Cells[3, i + Acum]) then
      begin
        HoraNivel2 := Cells[1, i + Acum];
        AuxNivel2 := StrToFloat(Cells[3, i + Acum]);
      end;
    end;

    if (Cells[1, i + 1] = '0') or (i = RowCount - 1) then
    begin
      i := 48 - HoraInicial;
      Acum := 24;
      Inc(ContDia);
      NovoY := NovoY + PosY(2);
      Printer.Canvas.Pen.Width := 2;
      Printer.Canvas.MoveTo(MargemEsq, NovoY);
      Printer.Canvas.LineTo(Printer.PageWidth, NovoY);
      Printer.Canvas.Pen.Width := 1;
      NovoY := NovoY + PosY(1);
      // 1. Coluna
      NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Dados
Diários',FonteRot);
      NovoY := NovoY + PosY(1);
      NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Dia : ' + Dia,FonteRot);
      NovoY := NovoY + PosY(1);
      NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(85), NovoY, 'Dia : ' +
Dia2,FonteRot);
      NovoY := NovoY + PosY(1);
      try
        NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Média Afluente : '
+ FloatToStrF(AuxAfl/NumeroHoras, ffFixed, 8, 2), FonteTexto);
      except on EConvertError do
        NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Média Afluente : 0,00'
, FonteTexto);
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

try
NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(85), NovoY, 'Média Afluente : '
+ FloatToStrF(AuxAfl2/NumeroHoras2, ffFixed, 8, 2), FonteTexto);
except on EConvertError do
NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(85), NovoY, 'Média Afluente : 0,00'
, FonteTexto);
end;
NovoY := NovoY + PosY(1);
NovoY := ImprimeLinhaSem(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Nível Calculado Máximo
(Hora) : ' +
(' + HoraNivel + ') ' + FloatToStrF(AuxNivel, ffFixed, 8,
2),FonteTexto);
NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(85), NovoY, 'Nível Calculado Máximo
(Hora) : ' +
(' + HoraNivel2 + ') ' + FloatToStrF(AuxNivel2, ffFixed, 8,
2),FonteTexto);
NovoY := NovoY + PosY(1);
AuxAfl := 0;
AuxDef := 0;
AuxNivel := 0;
AuxAfl2 := 0;
AuxDef2 := 0;
AuxNivel2 := 0;
NumeroHoras2 := 0;
NumeroHoras := 0;
Printer.Canvas.Pen.Width := 2;
Printer.Canvas.MoveTo(MargemEsq, NovoY);
Printer.Canvas.LineTo(Printer.PageWidth, NovoY);
Printer.Canvas.Pen.Width := 1;
NovoY := NovoY + PosY(2);
Inc(CD);
if CD = 5 then
begin
CD := 0;
Printer.NewPage;
NovoY := Cabecalho(MargemEsq, MargemTop, 'Simulador de Cálculo para
Armazenamento de Reservatórios', False, False, FonteCab);
NovoY := NovoY + PosY(1);
NovoY := ImprimeLinhaCom(MargemEsq + PosX(5), NovoY, 'Dados da Sub-Bacia
MACHADINHO',FonteRot);
NovoY := NovoY + PosY(5);
end;
end;
end;
RodapeImpresso;
Printer.EndDoc;
end;}
end;

procedure TFResultado.GeraGraficoSimulador(Inicio, Fim : Integer; Gride : TStringGrid);
var
LinhaMaxima, i : Integer;
DiaFinal, SubBacia, DiaInicio, Dia, TextoLegenda : String;
begin
TextoLegenda := '';
With Gride do
begin
FGrafico.Grafico.MaxPointsPerPage := RowCount;
FGrafico.Series1.Clear;
FGrafico.Series2.Clear;
FGrafico.Series4.Clear;
DiaInicio := Cells[0, Inicio];
// SubBacia := FEntradaDados.Label14.Caption;
Delete(SubBacia, 1, 11);
DiaFinal := '';
For i := Inicio to Fim do
begin
if Cells[0, i] <> '' then
begin
Dia := Cells[0,i];
DiaFinal := Cells[0,i];
end;
try
FGrafico.Series1.AddY(StrToFloat(Cells[13, i]), Dia + ' - ' + Cells[1, i] +
'hs', clTeeColor);

```

```

        FGráfico.Series2.AddY(StrToFloat(Cells[3, i]), Dia + ' - ' + Cells[1, i] + 'hs',
clTeeColor);
        FGráfico.Series4.AddY(StrToFloat(Cells[8, i]), Dia + ' - ' + Cells[1, i] + 'hs',
clTeeColor);
    except
        on EConvertError do
            end;
    end;
end;
With FGráfico do
begin
    Gráfico.Title.Text.Clear;
    Gráfico.Title.Text.Add('SIMULADOR DE PROPAGAÇÃO DE VAZÕES NO RESERVATÓRIO - ' +
DiaInicio + ' Até ' + DiaFinal);
    // Gráfico.Title.Text.Add('Cálculos de ' + SubBacia);
end;

end;

procedure TFResultado.GeraEscalaGráficoSimulador;
var
    MaxD, MinD, MaxE, MinE : Real;
    i : Integer;
begin
    MaxD := 0;
    MinD := 100000;
    MaxE := 0;
    MinE := 100000;
    With FGráfico do
    begin
        Gráfico.LeftAxis.Minimum := 0;
        Gráfico.LeftAxis.Maximum := 0;
        Gráfico.RightAxis.Minimum := 0;
        Gráfico.RightAxis.Maximum := 0;
    end;

    With GridResultado do
    begin
        For i:= 1 to RowCount do
            begin
                try
                    if StrToFloat(Cells[13, i]) > MaxD then
                        MaxD := StrToFloat(Cells[13, i]);
                    if StrToFloat(Cells[13, i]) < MinD then
                        MinD := StrToFloat(Cells[13, i]);

                    if StrToFloat(Cells[3, i]) > MaxE then
                        MaxE := StrToFloat(Cells[3, i]);
                    if StrToFloat(Cells[3, i]) < MinE then
                        MinE := StrToFloat(Cells[3, i]);

                    if StrToFloat(Cells[8, i]) > MaxE then
                        MaxE := StrToFloat(Cells[8, i]);
                    if StrToFloat(Cells[8, i]) < MinE then
                        MinE := StrToFloat(Cells[8, i]);
                except
                    on EConvertError do
                        end;
                end;
            end;
        end;
    end;
    With FGráfico do
    begin
        Gráfico.LeftAxis.Automatic := False ;
        Gráfico.LeftAxis.Maximum := MaxE + 50;
        Gráfico.LeftAxis.Minimum := MinE - 50;
        Gráfico.RightAxis.Automatic := False ;
        Gráfico.RightAxis.Maximum := MaxD + 1;
        Gráfico.RightAxis.Minimum := MinD - 1;
    end;
end;

procedure TFResultado.ToolBarButton973Click(Sender: TObject);
var
    LinhaMaxima : Integer;
begin
    if (GridResultado.RowCount Div 241) > 0 then

```

```

        LinhaMaxima := 240
    else
        LinhaMaxima := GridResultado.RowCount;
    GeraEscalaGraficoSimulador();
    GeraGraficoSimulador(1, LinhaMaxima, GridResultado);
    FGrafico.ShowModal;
end;

procedure TFResultado.btnRelatorioClick(Sender: TObject);
var
    SubBacia : String;
begin
    // SubBacia := FEntradaDados.Label14.Caption;
    Delete(SubBacia, 1, 11);
    if SubBacia = 'ITA' then
        ImprimeRelatorio
    else
        ImprimeRelatorioM;
end;

procedure TFResultado.btnResumidoClick(Sender: TObject);
var
    SubBacia : String;
begin
    // SubBacia := FEntradaDados.Label14.Caption;
    Delete(SubBacia, 1, 11);
    if SubBacia = 'ITA' then
        ImprimeRelatorioResumido
    else
        ImprimeRelatorioResumidoM;
end;

procedure TFResultado.btnGraficoClick(Sender: TObject);
var
    LinhaMaxima : Integer;
begin
    if (GridResultado.RowCount Div 241) > 0 then
        LinhaMaxima := 240
    else
        LinhaMaxima := GridResultado.RowCount;
    GeraEscalaGraficoSimulador();
    GeraGraficoSimulador(1, LinhaMaxima, GridResultado);
    FGrafico.ShowModal;
end;

procedure TFResultado.btnVoltarClick(Sender: TObject);
begin
    Close;
end;

end.

```