

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA - CEPSRM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

**MODELOS PARA PREVISÃO, ESPACIALIZAÇÃO E ANÁLISE DAS ÁREAS
INUNDÁVEIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAÍ, RS.**

GUILHERME GARCIA DE OLIVEIRA

Porto Alegre, RS

2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

**MODELOS PARA PREVISÃO, ESPACIALIZAÇÃO E ANÁLISE DAS ÁREAS
INUNDÁVEIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAÍ, RS.**

Guilherme Garcia de Oliveira

Orientadora: Dra. Dejanira Luderitz Saldanha

Co-orientador: Dr. Laurindo Antonio Guasselli

Banca Examinadora: **Dr. Camilo Daleles Rennó (PGSER – INPE)**
 Dra. Erika Collischonn (Geografia – UFPel)
 Dr. Luís Eduardo de Souza Robaina (Geociências – UFSM)

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia – UFRGS, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Sensoriamento Remoto, área de concentração em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados – Recursos Naturais e Meio Ambiente.

Porto Alegre, RS

Abril, 2010

*Aos meus pais
Carlos Ronaldo e Eloá Tereza*

*À minha noiva
Larissa, pela companhia e apoio incondicional*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM), pelo ensino de qualidade, pelo auxílio financeiro aos trabalhos de campo e pela estrutura disponibilizada, sem a qual não seria possível a realização desta pesquisa.

Aos meus orientadores, Dejanira Luderitz Saldanha e Laurindo Antonio Guasselli, por acreditarem na minha proposta de pesquisa, pelo incentivo em todas as etapas do Mestrado e pela grandiosa dedicação nas orientações.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela oportunidade de bolsa de pós-graduação, auxílio financeiro indispensável para a conclusão deste trabalho.

Ao Programa Nacional de Cooperação Acadêmica (PROCAD), pela possibilidade de intercâmbio com Programa de Pós-graduação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), entre 20 de setembro e 18 de dezembro de 2009.

Ao INPE, pelos enriquecedores momentos que vivi na instituição e pela estrutura disponibilizada para a elaboração deste trabalho. Em especial, agradeço ao Dr. Camilo Daleles Rennó e à Dra. Cláudia Almeida, pela maravilhosa recepção e por toda contribuição que deram na minha breve estada em São José dos Campos/SP.

Ao Secretário-Executivo do Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Caí, Ricardo Litwinski Süffert, pela valiosa contribuição dada a este trabalho, tanto pelos materiais fornecidos, quanto pelas reflexões e sugestões propostas por correio eletrônico.

À Companhia de Recursos Minerais (CPRM), pela disponibilização dos dados históricos hidrológicos e pelo interesse manifestado na proposta deste estudo.

À Prefeitura Municipal de Montenegro, em especial ao André (Geoprocessamento), pelos materiais fornecidos, essenciais para a elaboração dos modelos apresentados neste estudo.

À TANAC S.A. e, especialmente, ao colaborador Edacir Becker, pela prontidão das respostas, pela recepção na cidade de Montenegro, e pelas informações e materiais disponibilizados.

Aos meus familiares, à minha noiva, Larissa, aos amigos Bárbara, Clódis, Gabriel, Fabrício, Denílson, Daniel, Maurício e Diego e a todos que, de alguma forma, vivenciaram esta etapa da minha vida, seja pela colaboração na pesquisa ou simplesmente pelo incentivo e companhia nesses últimos anos.

RESUMO

A presente dissertação tem como objetivo elaborar modelos em diferentes escalas para previsão, espacialização e análise das áreas inundáveis na bacia hidrográfica do rio Caí, RS. Este trabalho está estruturado em três módulos, de acordo com o grau de detalhamento dos modelos. O Módulo I está relacionado aos modelos de escala média (1:100.000) para o mapeamento e a análise das inundações na bacia hidrográfica do rio Caí. O Módulo II compreende um modelo aplicado à previsão, à espacialização e à análise das inundações na área urbana de São Sebastião do Caí, em escala grande (1:10.000). O Módulo III é semelhante ao segundo, no entanto, em escala maior (1:5.000), na área urbana e entornos de Montenegro.

No Módulo I foram utilizados dados de três estações fluviométricas para analisar as características hidrológicas da bacia (tempo de retorno das cheias, distribuição sazonal dos eventos, etc.), e dados SRTM e da DSG para modelar a superfície do terreno e espacializar as áreas inundáveis. No Módulo II foram utilizados dados de duas estações fluviométricas para elaborar um modelo matemático de previsão das inundações. Para a espacialização e a análise das áreas inundáveis, utilizaram-se dados altimétricos de razoável precisão (nivelamento municipal) e uma imagem de satélite de alta resolução espacial. O modelo matemático de previsão de inundações do Módulo III é semelhante ao do Módulo II, alterando apenas as estações utilizadas. A modelagem da superfície foi realizada com curvas de nível com equidistância de 1m e pontos cotados, compatíveis com escala de 1:2.000. O modelo aplicado à espacialização das inundações em Montenegro considerou o desnível existente na lâmina d'água durante os eventos, diferentemente do Módulo II, o que aumentou a precisão e a qualidade da modelagem.

Verificou-se que mais de 75% dos eventos de grande magnitude ocorreram entre os meses de junho e outubro. De modo geral, os dados SRTM e da DSG superestimaram as áreas atingidas, mas representaram satisfatoriamente os locais de maior avanço das águas. Os modelos matemáticos de previsão de inundações, em São Sebastião do Caí e Montenegro, apresentaram, em geral, precisão submétrica para a estimativa de cotas, obtendo resíduo médio de 0,68m e 0,25m, respectivamente. Quanto aos modelos de espacialização das inundações dos Módulos II e III, os erros planimétricos verificados foram de 19m (São Sebastião do Caí) e 9m (Montenegro). O erro altimétrico médio (diferença entre as lâminas d'água medida e modelada), nos pontos avaliados, foi de apenas 0,30m em São Sebastião do Caí e de 0,15m em Montenegro.

Palavras-chave: Inundações; Geoprocessamento; Sensoriamento Remoto; São Sebastião do Caí; Montenegro.

MODELS FOR PREDICTION, SPATIALIZATION AND ANALYSIS OF FLOOD AREAS IN THE CAÍ RIVER BASIN, RS.

ABSTRACT

This dissertation aims to develop models at different scales for prediction, spatialization and analysis of the floods in the Caí River Basin, RS. This work is structured in three modules, according to the level of detail of the models. The Module I is related to models of medium scale (1:100,000) for mapping and analysis of floods in the Caí River Basin. The Module II includes a model applied to prediction, to spatialization and to analysis of floods in the urban area of São Sebastião do Caí, in large scale (1:10,000). The Module III is similar to the second, however, on a larger scale (1:5,000), in the urban area and surroundings of Montenegro.

In Module I we used data from three gauging stations to analyze the hydrological characteristics of the basin (recurrence interval of floods; seasonal distribution of events), and the SRTM and DSG data's to model the terrain surface and spatialize flooded areas. In Module II used data from two gauging stations to develop a mathematical model for flood prediction. For the spatialization and the analysis of the wetlands were used altimetry data of reasonable accuracy (town topography leveling) and a satellite image of high spatial resolution. The mathematical model for flood prediction of the Module III is similar to Module II, changing only the gauged stations used. The modeling of the surface was performed with contour lines in intervals of 1 meters and measured points, consistent with scale of 1:2,000. The model applied to the spatialization of flooding in Montenegro found the gap in water depth during the events, unlike the Module II, which increased the accuracy and quality of modeling.

It was found that over 75% of events of great magnitude occurred between June and October. In general, the SRTM and DSG data's overestimated the affected areas, but accounted satisfactorily the locals of the biggest advance for water. The mathematical models for flood prediction in São Sebastião do Caí and Montenegro, were, in general, sub-meter accuracy for the estimation of quotas, obtaining average residual of 0.68 m and 0.25 m, respectively. As for the models of flood spatialization of Modules II and III, the errors planimetric were 19m (São Sebastião do Caí) and 9m (Montenegro). The average altimetric error (difference between the water depths measured and modeled), in the measured points, was only 0.30 m in São Sebastião do Caí and 0.15 m in Montenegro.

Keywords: Floods; Geoprocessing; Remote Sensing; São Sebastião do Caí, Montenegro.

SUMÁRIO

1. Introdução	12
1.1. Objetivos.....	15
1.1.1. Objetivos Específicos	15
1.2. Justificativa.....	16
1.3. Estrutura da Dissertação	18
2. Fundamentação Teórica.....	19
2.1. Eventos Extremos: conceitos e problemáticas.....	19
2.2. Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Estudo das Inundações	23
2.3. Modelagem da Superfície Terrestre	29
2.4. Características dos Dados SRTM.....	35
2.5. Modelo de Previsão de Inundações	37
3. Materiais e Métodos	40
3.1. Área de Estudo	42
3.1.1. Aspectos Geomorfológicos	45
3.1.2. Aspectos Climáticos	47
3.1.3. Processo de Ocupação e as Inundações do Rio Caí.....	50
3.2. Módulo I – Aplicação na Bacia Hidrográfica do Rio Caí	55
3.2.1. Materiais Utilizados.....	55
3.2.2. Manipulação dos Dados Fluviométricos	55
3.2.3. Modelagem do Terreno com os Dados da DSG.....	57
3.2.4. Espacialização das Áreas Atingidas pela Inundação Ocorrida em 24-25/09/2007	58
3.2.5. Modelagem das Áreas Inundadas por Elevação do Nível dos Cursos d’água	59
3.3. Módulo II – Aplicação na Área Urbana de São Sebastião do Caí.....	63
3.3.1. Materiais Utilizados.....	63
3.3.2. Modelo Matemático de Previsão de Enchentes e Inundações.....	63
3.3.3. Modelo Digital do Terreno de São Sebastião do Caí	64
3.3.4. Simulação e Espacialização das Áreas de Inundação por TR	65
3.4. Módulo III – Aplicação na Área Urbana e Entornos de Montenegro	67

3.4.1.	Materiais Utilizados.....	67
3.4.2.	Modelo Matemático de Previsão de Enchentes e Inundações.....	67
3.4.3.	Digitalização e Vetorização das Plantas Cadastrais	68
3.4.4.	Modelo Digital de Elevação	69
3.4.5.	Espacialização das Áreas de Inundação por Cota e por TR	70
3.4.6.	Simulação da Inundação de 25 de Setembro de 2007 na área urbana e entornos de Montenegro	71
4. Resultados e discussões		72
4.1.	Módulo I – Bacia Hidrográfica do Rio Caí	72
4.1.1.	Cota Média, TR e Sazonalidade das Cheias e Inundações	72
4.1.2.	Mapa da Inundação de 24-25/09/2007 na Bacia do Rio Caí	80
4.1.3.	Espacialização de Inundações com os MDEs SRTM e DSG.....	91
4.2.	Módulo II – Área Urbana de São Sebastião do Caí.....	95
4.2.1.	Modelo Matemático de Previsão de Enchentes e Inundações.....	95
4.2.2.	Simulação e Espacialização das Áreas de Inundação.....	99
4.2.3.	Avaliação do Modelo.....	106
4.3.	Módulo III – Área Urbana e Entornos de Montenegro	110
4.3.1.	Modelo Matemático de Previsão de Enchentes e Inundações.....	110
4.3.2.	Modelo Digital de Elevação	113
4.3.3.	Modelo para Espacialização de Inundações	115
4.3.4.	Simulação do Evento Ocorrido em 25 de Setembro de 2007.....	121
4.3.5.	Avaliação do Modelo de Inundação	135
5. Considerações Finais		139
6. Referências		142

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação dos leitos menor e maior, e da planície de inundação.	20
Figura 2 – Carta de inundação da área urbana de Lajeado, RS.....	28
Figura 3 – Amostragem regular.	30
Figura 4 – Amostragem semi-regular.....	30
Figura 5 – Amostragem irregular.	31
Figura 6 – Exemplo de representação da altitude por curvas de nível.	31
Figura 7 – Modelo Digital de Elevação em malha regular.....	32
Figura 8 – Modelo Digital de Elevação em malha triangular.	32
Figura 9 – Cobertura global dos dados SRTM.....	35
Figura 10 – Organograma da estrutura e do funcionamento do SPAE do Vale do Taquari..	37
Figura 11 – Localização da bacia hidrográfica do rio Caí.	42
Figura 12 – Rede hidrográfica da bacia do rio Caí e a localização das áreas urbanas de São Sebastião do Caí e Montenegro.....	43
Figura 13 – Mapa altimétrico da bacia hidrográfica do rio Caí, RS.....	44
Figura 14 – Mapa de declividade da bacia hidrográfica do rio Caí, RS.....	45
Figura 15 – Geomorfologia da bacia hidrográfica do rio Caí.	46
Figura 16 – Clima da bacia hidrográfica do rio Caí, RS.	47
Figura 17 – Isoietas de precipitação média anual na bacia hidrográfica do rio Caí.....	48
Figura 18 – Normal Climatológica de Porto Alegre..	49
Figura 19 – Porto de São Sebastião do Caí.	51
Figura 20 – Inundação de 1982: vista panorâmica da cidade de São Sebastião do Caí.	51
Figura 21 – Inundação de 2000: área central da cidade de São Sebastião do Caí.....	52
Figura 22 – Inundação de 2007: bairro residencial da cidade de São Sebastião do Caí.	52
Figura 23 – Inundação de 2007: área urbana de Montenegro.	53
Figura 24 – Casa “elevada” em bairro frequentemente atingido por inundações.	53
Figura 25 – Inundação de 2007: água invadindo uma residência.	54
Figura 26 – Localização das estações fluviométricas da bacia hidrográfica do rio Caí.....	56
Figura 27 – Roteiro das atividades de campo.....	59
Figura 28 – Rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Caí hierarquizada.	60
Figura 29 – Estrangulamento do rio à jusante de São Sebastião do Caí, RS.	77
Figura 30 – Cotas máximas anuais na estação Nova Palmira, Caxias do Sul, RS.	78
Figura 31 – Cotas máximas anuais na estação Barca do Caí, São Sebastião do Caí, RS.....	78
Figura 32 – Cotas máximas anuais na estação Passo do Montenegro, Montenegro, RS.	79
Figura 33 – Áreas inundadas em 24-25/09/2007 na bacia hidrográfica do rio Caí, RS.	81
Figura 34 – PT 1: área úmida próxima à foz do rio Caí.....	83
Figura 35 – Rio Caí no PT 1: largura aproximada de 150m.	83
Figura 36 – Rio Caí, em Montenegro: 3m acima do nível (04/09/2009).	84
Figura 37 – Rio Caí, em Montenegro: 6,9m acima do nível (19h15m – 24/09/2007).	84
Figura 38 – PT 2: meandro do rio Caí em Montenegro.	85
Figura 39 – PT 2: meandro do rio Caí em Montenegro, submerso em 24-25/09/2007.....	85
Figura 40 – Várzea do Pareci inundada em evento de proporções medianas (04/09/2009).....	86
Figura 41 – Área submersa na Várzea do Pareci (foto de 04/09/2009).....	86
Figura 42 – Arroio Maratá à montante do PT 3.	87
Figura 43 – Estrada interrompida pelas águas do arroio Maratá (04/09/2009).	87
Figura 44 – Elevação da rodovia RS-124, entre Pareci Novo e São Sebastião do Caí.	88
Figura 45 – Esquema do possível efeito da elevação da RS-124 nas enchentes.	88
Figura 46 – Marcas das inundações de 2000 e 2007 em residência na área urbana de São Sebastião do Caí, RS.	89
Figura 47 – Rio Cadeia, próximo à foz, em São Sebastião do Caí, RS.....	90
Figura 48 – Arroio Forromeco: águas com maior velocidade; inundações rápidas.	90
Figura 49 – Áreas de inundação por elevação do nível dos principais rios (MDE SRTM).	92

Figura 50 – Áreas de inundação por elevação do nível dos principais rios (MDE DSG).....	93
Figura 51 – Linha de ajuste para a previsão da cota do rio Caí, na estação Barca do Caí, em São Sebastião do Caí.....	95
Figura 52 – Frequência de eventos por intervalos de resíduo.....	98
Figura 53 – Tendências de superestimação e subestimação do modelo de previsão de cotas, na estação Barca do Caí, conforme a magnitude do evento.....	98
Figura 54 – Mapa de inundação da área urbana do município de São Sebastião do Caí.....	100
Figura 55 – Cenário normal (TR de 0 anos) em São Sebastião do Caí.....	100
Figura 56 – Cenário de áreas inundáveis com TR de 2 anos em São Sebastião do Caí.....	101
Figura 57 – Cenário de áreas inundáveis com TR de 5 anos em São Sebastião do Caí.....	101
Figura 58 – Cenário de áreas inundáveis com TR de 10 anos em São Sebastião do Caí.....	102
Figura 59 – Cenário de áreas inundáveis com TR de 30 anos em São Sebastião do Caí.....	102
Figura 60 – Inundação de 24 de setembro de 2007: imediações do Centro (São Sebastião do Caí)...	104
Figura 61 – Reportagem sobre a inundação de 1982.....	104
Figura 62 – Reportagem sobre a inundação de 2000.....	105
Figura 63 – Disposição dos pontos coletados em campo para avaliação do modelo de inundações na área urbana de São Sebastião do Caí.....	106
Figura 64 – Ilustração do Ponto 1: erro planimétrico de 22m na modelagem.....	107
Figura 65 – Ilustração do Ponto 2: erro planimétrico de 14m na modelagem.....	107
Figura 66 – Ilustração do Ponto 3: erro altimétrico de 0,10m na modelagem.....	108
Figura 67 – Ilustração do Ponto 4: erro altimétrico de 0,15m na modelagem.....	108
Figura 68 – Inundação de 24/09/2007 no Ponto 4.....	109
Figura 69 – Linha de ajuste dos dados para previsão de cota do rio Caí em Montenegro.....	110
Figura 70 – Tendências do modelo matemático conforme a magnitude.....	113
Figura 71 – MDE da área urbana e entornos de Montenegro/RS.....	114
Figura 72 – Mapa das áreas inundáveis na área urbana e entornos de Montenegro/RS.....	116
Figura 73 – Espacialização das áreas inundáveis por TR na área urbana e entornos de Montenegro/RS.....	117
Figura 74 – Uso e ocupação do solo das áreas atingidas por inundações na área urbana e entornos de Montenegro/RS.....	119
Figura 75 – Uso urbano e rural inundados por cota em Montenegro.....	121
Figura 76 – 22/09/2007, às 8h: cota 3,96m.....	
Figura 77 – 22/09/2007, às 12h: cota 4,08m.....	122
Figura 78 – 22/09/2007, às 16h: cota 4,18m.....	
Figura 79 – 22/09/2007, às 20h: cota 4,40m.....	122
Figura 80 – 23/09/2007, à 0h: cota 4,75m.....	
Figura 81 – 23/09/2007, às 4h: cota 5,08m.....	123
Figura 82 – 23/09/2007, às 8h: cota 5,40m.....	
Figura 83 – 23/09/2007, às 12h: cota 5,77m.....	123
Figura 84 – 23/09/2007, às 16h: cota 6,07m.....	
Figura 85 – 23/09/2007, às 20h: cota 6,35m.....	124
Figura 86 – 24/09/2007, à 0h: cota 6,65m.....	
Figura 87 – 24/09/2007, às 4h: cota 6,98m.....	124
Figura 88 – 24/09/2007, às 8h: cota 7,37m.....	
Figura 89 – 24/09/2007, às 12h: cota 8,02m.....	125
Figura 90 – 24/09/2007, às 16h: cota 8,42m.....	
Figura 91 – 24/09/2007, às 20h: cota 8,60m.....	126
Figura 92 – 25/09/2007, à 0h: cota 8,68m.....	
Figura 93 – 25/09/2007, às 4h: cota 8,68m.....	126
Figura 94 – 25/09/2007, às 8h: cota 8,63m.....	
Figura 95 – 25/09/2007, às 12h: cota 8,53m.....	127
Figura 96 – 25/09/2007, às 16h: cota 8,42m.....	
Figura 97 – 25/09/2007, às 20h: cota 8,30m.....	127
Figura 98 – 26/09/2007, à 0h: cota 8,16m.....	
Figura 99 – 26/09/2007, às 4h: cota 8,00m.....	128

Figura 100 – 26/09/2007, às 8h (7,85m).	
Figura 101 – 26/09/2007, às 12h (7,73m).....	128
Figura 102 – 26/09/2007, às 16h (7,55m).	
Figura 103 – 26/09/2007, às 20h (7,41m).....	129
Figura 104 – 27/09/2007, à 0h (7,30m).	
Figura 105 – 27/09/2007, às 4h (7,16m).....	129
Figura 106 – 27/09/2007, às 8h (7,00m).	
Figura 107 – 27/09/2007, às 12h (6,86m).....	130
Figura 108 – 27/09/2007, às 16h (6,73m).	
Figura 109 – 27/09/2007, às 20h (6,60m).....	130
Figura 110 – 28/09/2007, à 0h (6,51m).	
Figura 111 – 28/09/2007, às 4h (6,39m).....	131
Figura 112 – 28/09/2007, às 8h (6,25m).	
Figura 113 – 28/09/2007, às 12h (6,11m).....	131
Figura 114 – 28/09/2007, às 16h (5,96m).	
Figura 115 – 28/09/2007, às 20h (5,82m).....	132
Figura 116 – Variação do rio Caí na estação Passo do Montenegro (22–28/09/2007).....	132
Figura 117 – Tempo sob inundação das áreas atingidas pelo evento ocorrido entre 22 e 28 de setembro de 2007, na área urbana e entornos de Montenegro/RS.....	134
Figura 118 – Pontos de avaliação do modelo de inundação de Montenegro/RS.	136
Figura 119 – Pontos de avaliação n� 1, 2 e 3: erro planimétrico de 8m, 24m e 3m na modelagem da inundação de 25/09/2007.....	137
Figura 120 – Ponto de avaliação n� 16: erro altimétrico de 0,10m na modelagem da inundação de 25/09/2007.....	137
Figura 121 – Ponto de avaliação n� 15: erro altimétrico de 0,05m na modelagem da inundação de 25/09/2007.....	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tempo de retorno das cheias na estação Nova Palmira, em Caxias do Sul, RS.....	73
Tabela 2. Tempo de retorno das cheias na estação Barca do Caí, em São Sebastião do Caí, RS.	74
Tabela 3. Tempo de retorno das cheias na estação Passo do Montenegro, em Montenegro, RS.....	75
Tabela 4. Cota atingida e aumento no nível do rio por TR.	76
Tabela 5. Sazonalidade das cheias na bacia hidrográfica do rio Caí, RS.....	80
Tabela 6. Área inundada na bacia do rio Caí, a partir dos modelos SRTM e DSG.	94
Tabela 7. Síntese das características para avaliação da confiabilidade do modelo.	96
Tabela 8. Cotas registradas, previsão de cota e resíduo (São Sebastião do Caí).....	97
Tabela 9. Área urbana atingida e o número de bairros afetados por TR, na área urbana de São Sebastião do Caí.	103
Tabela 10. Síntese de características relacionadas à confiabilidade do modelo.....	111
Tabela 11. Cotas registradas e previstas na estação Passo do Montenegro, e o resíduo por amostra.....	112
Tabela 12. Uso e ocupação do solo inundado por cota na área urbana e entornos de Montenegro/RS.....	120

1. INTRODUÇÃO

Ao longo da história, a humanidade se estabeleceu nas proximidades dos corpos hídricos, principalmente em virtude da necessidade do uso da água, tanto para o consumo direto quanto para atividades como a agricultura, a pecuária e a indústria. Além disso, os rios são importantes vias de transporte, beneficiando as atividades comerciais e interligando as comunidades ribeirinhas.

Geralmente, ao ocupar as áreas junto às margens dos rios (nas várzeas, planícies ou terraços fluviais), o homem enfrenta sérios problemas com o regime natural dos recursos hídricos. Em períodos de cheias nos rios, é comum a ocorrência de eventos como enchentes, enxurradas e inundações. Estas últimas – as inundações –, tema central desta dissertação, são caracterizadas pelo extravasamento das águas do leito menor de um rio para sua respectiva planície de inundação.

Estes eventos são os mais frequentes, dentre os desastres naturais observados no Brasil (Tucci & Bertoni, 2003). Os municípios ribeirinhos muitas vezes sofrem uma série de impactos negativos nos períodos de cheias, destacando-se as danificações em equipamentos públicos, a paralisação de diversas atividades, a contaminação por doenças de veiculação hídrica, as perdas materiais e, em casos extremos, até humanas.

Em países subdesenvolvidos ou em vias de desenvolvimento, os problemas ocasionados pelas enchentes e inundações são agravados também pelo planejamento deficiente da ocupação dessas áreas. No Brasil, por exemplo, a maior parte dos municípios afetados por esses eventos não possuem diretrizes e/ou projetos que visem amenizar ou eliminar os efeitos dos mesmos. Observam-se também poucos investimentos em pesquisas relacionadas ao entendimento do regime fluvial para a previsão e espacialização das inundações.

Na área de estudo da presente dissertação, a bacia hidrográfica do rio Caí/RS, as enchentes e as inundações ocorrem periodicamente, deixando graves consequências em todos os âmbitos da sociedade. Os maiores prejuízos se dão aos moradores rurais que ocupam as várzeas, onde predominam os cultivos de hortaliças, de arroz e de frutas cítricas, e aos habitantes das áreas urbanas localizadas às margens do rio Caí, como os municípios de Montenegro, São Sebastião do Caí, Pareci Novo e Feliz.

De acordo com Tucci (1997), o controle das inundações ribeirinhas pode ser realizado de duas maneiras: a) através de medidas estruturais (obras hidráulicas para reter, confinar ou escoar mais rapidamente a água das chuvas), como a construção de diques, de bacias de contenção de água e a canalização do escoamento superficial; b) através de medidas não-estruturais (modelagens, mapeamentos, previsão e planejamento).

As medidas estruturais apresentam, normalmente, grande área de influência e envolvem a aplicação maciça de capitais. Essas obras têm como objetivo minimizar o transbordamento dos cursos d'água para que as atividades humanas estabelecidas não sejam comprometidas. Na maioria das vezes, não eliminam a possibilidade de ocorrência de inundações, apenas diminuem a magnitude dos episódios. Além disso, na adoção desse tipo de medida, modifica-se a dinâmica fluvial da bacia hidrográfica, podendo ocorrer sérias consequências a jusante, como, por exemplo, a intensificação de inundações em outros segmentos do rio (Ostrowsky & Zmitrowicz, 1991).

As medidas não-estruturais caracterizam-se geralmente por ações que abrangem a bacia como um todo, e são destinadas à redução dos efeitos das inundações ou à adaptação dos habitantes das áreas atingidas para uma melhor convivência com a ocorrência periódica desses fenômenos. Essas medidas têm caráter predominantemente preventivo, e dispensam a alocação de enormes quantias de recursos para a execução das ações estruturais.

O aperfeiçoamento dos sistemas de previsão de inundações e o mapeamento das áreas atingidas por esses eventos destacam-se como medidas não-estruturais essenciais para o planejamento de municípios que se desenvolvem junto aos rios. Essas medidas auxiliam substancialmente na amenização dos danos decorrentes das inundações. Além disso, os mapas de inundação subsidiam a reorganização do espaço urbano, uma vez que podem ser úteis para o estabelecimento de novas diretrizes de ocupação em uma cidade.

A maior dificuldade para a implementação de ações não-estruturais está relacionada à escassez e/ou à precariedade dos equipamentos e materiais necessários para essas medidas (estações fluviométricas e pluviométricas, dados topográficos, etc.). Em muitas bacias hidrográficas do Brasil, a disponibilidade de dados hidrológicos é insuficiente para a elaboração de estudos e pesquisas que subsidiem as medidas preventivas.

Por outro lado, alguns materiais estão cada vez mais disponíveis e acessíveis para a utilização em trabalhos relacionados às inundações, compensando parcialmente a escassez dos dados mencionados no parágrafo anterior. Como exemplo, pode-se citar os dados obtidos por sensoriamento remoto, os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) e as ferramentas de geoprocessamento.

A observação por meio de satélites é uma das maneiras mais efetivas e econômicas de estudar alguns fenômenos da natureza, e permite coletar dados para modelar alterações tanto no meio natural quanto no construído (Jensen, 2000). Na aplicação de dados obtidos por sensores remotos para a modelagem e/ou espacialização das áreas inundáveis, comumente se observa a utilização de imagens orbitais multiespectrais e de radar, e de fotografias aéreas para elaboração dos modelos do terreno. A seleção dos materiais e dos métodos para a elaboração desses estudos está intrinsecamente associada à escala de análise, à precisão e confiabilidade desejada e à disponibilidade dos dados.

Aliados ao sensoriamento remoto, as técnicas de geoprocessamento e os Sistemas de Informações Geográficas surgem como recursos dinâmicos que ampliam a capacidade de mapeamento e de análise, principalmente em virtude dos avanços computacionais, que permitem armazenar e analisar uma quantidade cada vez maior de informações geográficas. A combinação desses recursos com os dados de sensoriamento remoto permite monitorar e simular os eventos decorrentes das cheias – as enchentes e inundações –, contribuindo com a leitura e compreensão desses fenômenos (Mendes & Cirilo, 2001).

1.1. Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é gerar modelos para previsão, espacialização e análise das áreas inundáveis na bacia hidrográfica do rio Caí, RS, em diferentes escalas de detalhamento, a partir de dados hidrológicos, topográficos e de sensoriamento remoto, e da aplicação de ferramentas de geoprocessamento.

1.1.1. Objetivos Específicos

- a) Calcular o tempo de retorno (TR) das cotas de cheia em três pontos do rio Caí, de acordo com a disponibilidade de dados fluviométricos;
- b) Analisar a distribuição sazonal das cheias na bacia hidrográfica;
- c) Desenvolver um modelo matemático para a previsão de inundações em São Sebastião do Caí e Montenegro;
- d) Elaborar um mapa da inundação de 24-25 de setembro de 2007;
- e) Modelar as áreas de inundação na bacia, por elevação do nível dos rios, a partir dos dados *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e da Diretoria de Serviço Geográfico (DSG);
- f) Elaborar modelos digitais do terreno para espacializar as áreas inundáveis, em escala detalhada, em São Sebastião do Caí e Montenegro;
- g) Identificar os tipos de uso e ocupação do solo mais afetados pelas inundações em São Sebastião do Caí e Montenegro;
- h) Analisar qualitativa e quantitativamente os resultados obtidos.

1.2. Justificativa

O Brasil ocupa uma posição de destaque entre os países mais atingidos por enchentes e inundações. De acordo com Collins (2004), mais de 29 milhões de brasileiros residem em áreas suscetíveis às inundações e, em média, 100 pessoas são vitimadas anualmente no Brasil em virtude destes desastres naturais. Essa posição de destaque se deve à falta de conhecimento do regime fluvial e ao processo de urbanização repentino, que causou um crescimento desordenado das cidades brasileiras.

Mesmo assim, diante de tantos prejuízos oriundos das enchentes e inundações, observam-se poucos trabalhos visando a previsão, a espacialização e a análise desses eventos no Brasil. Possivelmente, essa carência se deve pela falta de informação e ausência de dados que possibilitem a execução dos mesmos. Na área de estudo deste trabalho – a bacia do rio Caí – não há nenhum trabalho científico com a finalidade proposta por esta dissertação. Esse aspecto, de certa forma, já justifica a realização do presente trabalho, o qual poderá estimular mais investimentos em pesquisas relacionadas com a temática.

Além disso, no Brasil, são raros os trabalhos que utilizam de maneira integrada os modelos de terreno com os dados hidrológicos de cota para espacializar as inundações. Também são poucos os trabalhos que utilizam a relação cota-cota para a previsão de inundações. A utilização desses métodos, ainda pouco utilizados e testados, faz com que a presente dissertação não tenha somente uma importância social, mas também científica.

Outro aspecto essencial, que contribui na justificativa deste estudo, é a relativa simplicidade e a excelente aplicabilidade dos modelos propostos. A simplicidade diz respeito à utilização de materiais que necessitam de pouco investimento em capital, e a aplicabilidade, à adoção de métodos de fácil implementação, tornando o sistema de previsão e alerta de enchentes e inundações mais operacional.

O presente trabalho também se justifica pela possibilidade de contribuição ao projeto de alerta de enchentes e inundações na bacia hidrográfica do rio Caí. Esse projeto é coordenado pela Companhia de Recursos Minerais (CPRM) e visa, entre outros, a aquisição e a instalação de novos equipamentos para a realização de medidas mais precisas de vazão, de cota e de pluviosidade na bacia do rio Caí. Além disso, serão instaladas novas estações em pontos estratégicos dos principais cursos d'água para auxiliar nas previsões.

Nas estações fluviométricas da bacia hidrográfica do rio Caí que são operadas pela CPRM as leituras ainda são realizadas manualmente. Na estação Barca do Caí, localizada em

São Sebastião do Caí, por exemplo, a leitura é realizada por um morador que reside nas proximidades da estação, onde estão localizadas as réguas. Esse método de leitura, embora seja utilizado na maioria das estações instaladas no território brasileiro, implica em falhas na série histórica. Além disso, são realizadas apenas duas leituras diárias, uma pela manhã e a outra pela tarde.

Com a aquisição dos novos equipamentos, serão realizadas leituras de hora em hora, permitindo assim a implantação de um sistema integrado de previsão e alerta de inundações nos municípios de Montenegro e São Sebastião do Caí. O trabalho aqui apresentado fornecerá dados para auxiliar nesse sistema, uma vez que propõe um modelo matemático de previsão de cota para esses dois municípios e apresenta modelos para espacializar as áreas atingidas pelas águas de acordo com o nível previsto do rio.

Deste modo, entende-se que a elaboração desta pesquisa e a execução deste trabalho deverão contribuir significativamente não só para o entendimento das inundações, mas também para subsidiar ações que amenizem os prejuízos inerentes às enchentes e às inundações.

1.3. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está subdividida em seis capítulos. Neste primeiro capítulo foi realizada uma breve introdução à temática do trabalho, compreendendo uma explanação inicial do assunto, os objetivos e as justificativas para a realização do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão teórica dos temas abordados e das técnicas utilizadas, constituindo-se no embasamento científico deste trabalho. São revisados temas como, os eventos extremos (cheias, enchentes, inundações, etc.) e as aplicações dos dados de sensoriamento remoto e geoprocessamento nos estudos de áreas de inundação. Dentre as técnicas, destaque para os procedimentos de interpolação de dados para modelagem da superfície e de geração do modelo de previsão de inundações.

O Capítulo 3 caracteriza brevemente a área de estudo e descreve os equipamentos e materiais utilizados e as técnicas e métodos adotados no trabalho. A metodologia é apresentada em três módulos, definidos de acordo com a escala de abrangência e do detalhamento do modelo. O primeiro módulo abrange a bacia hidrográfica como um todo, o segundo modela as áreas de inundação em São Sebastião do Caí, e o terceiro diz respeito à modelagem das inundações em Montenegro.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados, incluindo as tabelas, os gráficos e os mapas, gerados nas modelagens. Além disso, são realizadas análises e discussões sobre os resultados dos modelos de previsão e das espacializações de áreas atingidas. Este item foi organizado de acordo com os módulos propostos no Capítulo 3.

Por fim, os últimos dois capítulos compreendem as considerações finais (Capítulo 5), contendo as conclusões do trabalho e as sugestões para futuras pesquisas, e a lista de referências bibliográficas citadas ao longo do corpo textual desta dissertação (Capítulo 6).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Eventos Extremos: conceitos e problemáticas

No regime fluvial, os eventos caracterizados como extremos são aqueles que possuem baixa frequência de ocorrência e alta magnitude, geralmente com elevado poder de destruição e que acarreta sérios prejuízos para a sociedade. Estão sempre associados aos períodos de alta pluviosidade, quando os cursos d'água drenam uma quantidade muito elevada de água (período de cheias).

Em locais com estação chuvosa bem definida, como na Amazônia, as cheias apresentam um comportamento cíclico. Na área de estudo desta dissertação, mesmo com a concentração das chuvas nos meses mais frios, as cheias podem ocorrer durante todo o ano, dificultando as previsões e, conseqüentemente, as ações de alerta para esses eventos.

Os termos mais utilizados para denominar os eventos extremos relacionados ao regime fluvial são enchentes, inundações e enxurradas. Segundo Castro (1998), as enchentes consistem na elevação do nível de água de um rio, acima de sua capacidade natural de escoamento, podendo causar inundações. Comumente é utilizado como sinônimo de inundação, embora o termo esteja mais relacionado à elevação do nível do rio.

O conceito de inundação está associado ao extravasamento das águas do leito menor de um corpo hídrico para a planície de inundação (leito maior), em virtude do excesso de volume de água não drenado pela falta de capacidade fluvial (Figura 1). Dessa forma, a inundação é uma consequência das enchentes e se constitui em um estágio mais avançado da cheia.

As enxurradas, de acordo com Castro (1998), constituem-se no volume de água que escoar na superfície do terreno, com grande velocidade, em virtude de chuvas intensas. Tomando como referência essa denominação, pode-se afirmar que as enxurradas ocorrem concomitantemente com as inundações, diferenciando-se pela força da correnteza da água, capaz de transportar grandes quantidades de sedimentos, fragmentos vegetais e equipamentos de uso antrópico.

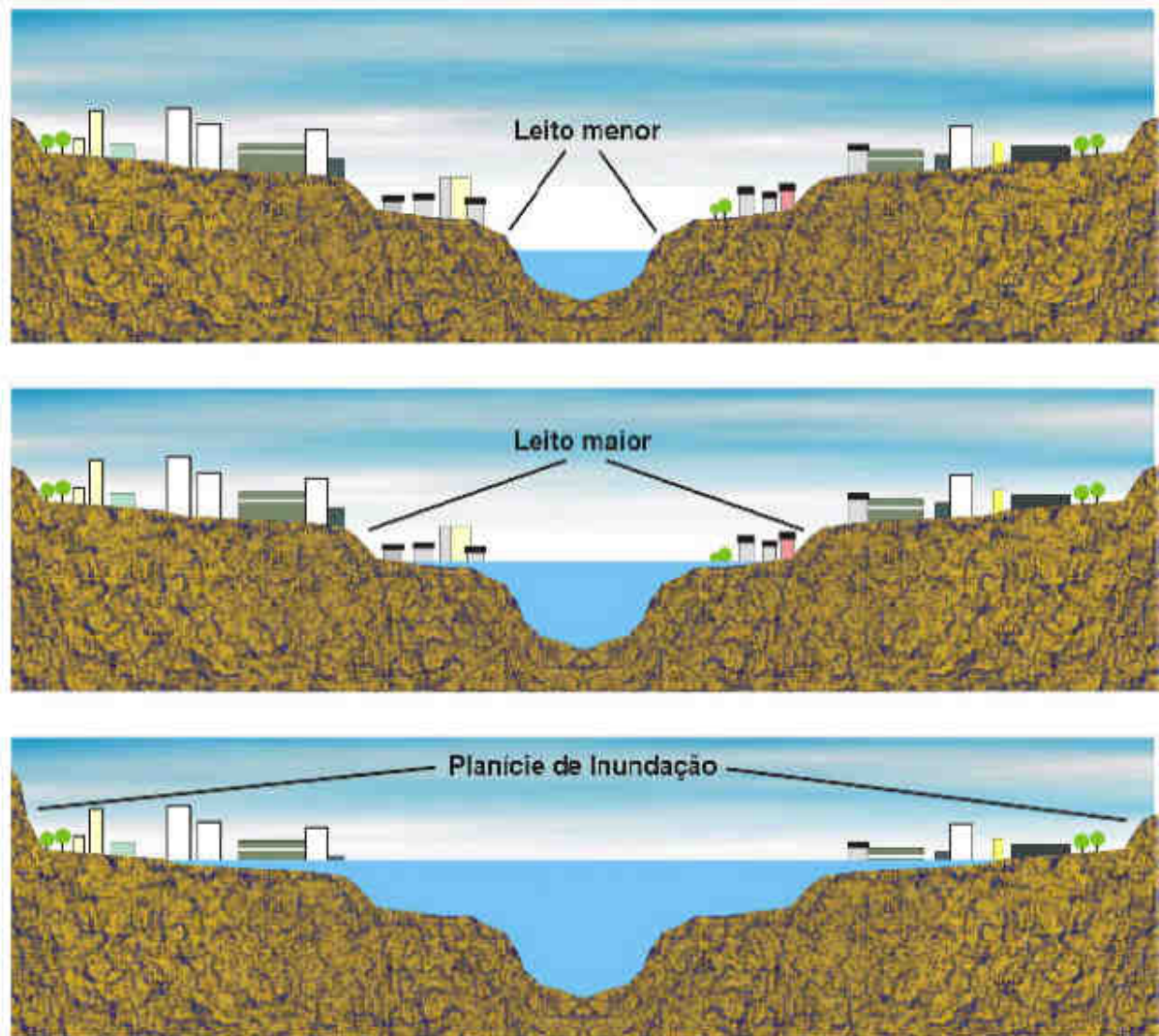


Figura 1 – Representação dos leitos menor e maior, e da planície de inundação
(Fonte: Eckhardt, 2008).

Além desses três termos, outro bastante utilizado é o alagamento, definido por Castro (1998) como a água acumulada no leito das ruas e no perímetro urbano em virtude de fortes precipitações, principalmente em cidades com sistemas de drenagem deficientes. Este último termo é usado especificamente para áreas urbanas, quando as galerias da drenagem pluvial não conseguem dar vazão à água da chuva.

De acordo com Tucci *et al.* (1995), nos períodos com chuvas abundantes, os rios podem sair do seu leito menor e ocupar o leito maior com frequência média de dois anos. Segundo Christofolletti (1981) esse processo pode ocorrer anualmente, definindo dessa forma o leito maior normal do rio. Eventos extremos com tempo de retorno (TR) superior a dois anos são estudados para definir o leito maior excepcional.

Enchentes e inundações são eventos que ocorrem naturalmente em todos ambientes fluviais, sendo importantes na manutenção da dinâmica hidrológica e dos processos geomorfológicos. Tratam-se de fenômenos de alta complexidade, pois envolvem toda a rede de drenagem contribuinte, que é composta de diversos cursos d'água com características muito distintas (profundidade, largura, declividades, etc.).

No entanto, mesmo que tenham suas origens em processos naturais, as enchentes e inundações podem ser potencializadas pelas atividades humanas. Tanto no meio rural, quanto no meio urbano, o homem produz uma série de alterações na superfície terrestre, através do desflorestamento, da impermeabilização do solo, da canalização dos rios, entre outras (Tucci & Bertoni, 2003; Enomoto, 2004; Eckhardt, 2008).

O aumento da impermeabilização do terreno se destaca como a modificação gerada pela ocupação humana que promove as mais importantes alterações no ciclo hidrológico (Cavalheiro, 1995; Porto *et al.*, 2001; Botelho & Rossato, 2002; Costa, 2002; Vitte & Guerra, 2004). Nas áreas urbanas, essa impermeabilização é materializada pelas edificações e pavimentações inerentes ao crescimento das cidades, enquanto que, nas áreas rurais, pela substituição da vegetação natural por cultivos que, na maioria das vezes, diminuem a infiltração de água na superfície.

A parcela de água das chuvas que é impedida de infiltrar-se no solo, escoar sobre a nova superfície e alimenta os canais fluviais mais rapidamente, podendo causar inundações de grandes magnitudes. Geralmente, em um sistema mais preservado, a água tem maior percentual de infiltração e interceptação pela cobertura vegetal, levando um tempo maior para atingir os canais fluviais, diminuindo assim os picos de cheia e os riscos de uma inundação mais repentina (Vitte & Guerra, 2004).

Outra problemática envolvendo a relação das atividades humanas e o regime fluvial diz respeito à ocupação das áreas de risco de inundações. A ocupação humana no leito maior dos rios (normal e excepcional) ocorre em virtude das inundações terem uma distribuição irregular ao longo dos anos (via expansão irregular das áreas urbanas e especulação imobiliária). O tempo transcorre, a memória se dissipa, e a população habita as áreas inundáveis desconsiderando os riscos inerentes a esse tipo de ocupação. Com isso, muitas vezes, nas cidades e comunidades ribeirinhas, as águas atingem as moradias, as vias públicas (ruas, rodovias e passeios), as áreas de lazer, o comércio e a indústria, entre outros (Tucci & Bertoni, 2003).

Nas áreas urbanas, as principais consequências são danos materiais, problemas sanitários (contágio de doenças transmissíveis pela água) e, em casos extremos, perdas de

vida. Em ambiente rural, a planície de inundação é ocupada geralmente por usos antrópicos relacionados à agropecuária, com presença de poucas moradias, fazendo com que os impactos diretos sejam menores do que em meio urbano (Tucci *et al.*, 1995).

Se as planícies de inundação fossem preservadas ou conservadas, de modo a garantir a permanência da água nesses locais, os episódios de inundações não teriam desfechos alarmantes e catastróficos como observados cotidianamente. Para minimizar os efeitos das inundações seria necessário aumentar a retenção de água nas bacias, através do aumento da infiltração, e da preservação e recuperação das áreas naturais de inundação, localizadas no leito maior. De acordo com Vitte & Guerra (2004), essas medidas contribuem para conservar a capacidade de vazão dos canais fluviais e reduzem os picos de cheias.

Outra medida que permite a minimização dos danos causados pelos eventos extremos é o aperfeiçoamento dos sistemas de previsão e de alerta à população (Tucci & Bertoni, 2003; Vitte & Guerra, 2004; Eckhardt, 2008). No entanto, é importante mencionar que a previsão do nível ou da vazão dos rios depende, inicialmente, da previsão das condições meteorológicas. Como essas condições só podem ser previstas, com maior confiabilidade, com algumas horas de antecedência, a previsão de inundações fica comprometida a este intervalo de tempo curto. De acordo com Tucci (2001 *apud* Vitte & Guerra, 2004, p.183), “o maior tempo possível de previsão da inundação, a partir do início das chuvas, é limitado pelo tempo médio de deslocamento da água na bacia até a seção de interesse”, o qual depende das características da precipitação (duração, intensidade e localização espacial), da bacia hidrográfica e de características físicas, como a densidade de drenagem, o relevo, a cobertura vegetal e o solo.

Existe também outro aspecto que complica a previsão de inundações: a dificuldade de se obter uma previsão meteorológica que permita uma mensuração eficaz do volume de água que será drenado pelos rios. De modo geral, para uma previsão de inundação mais eficiente, em curto prazo ou em tempo real, é necessária a instalação de redes telemétricas “que coletem e transmitam dados de precipitação e de nível e vazão dos rios, durante o evento” (Vitte & Guerra, 2004). Com esses dados, é possível realizar modelagens que permitam, entre outros, prever a cota e os locais a serem atingidos pelas águas durante a cheia.

Mesmo com todas as dificuldades apresentadas, o planejamento adequado das áreas de risco de inundação (regulando a construção de empreendimentos, removendo gradualmente a ocupação e recuperando as áreas desocupadas) e a melhoria dos sistemas de previsão e alerta são as medidas que mais contribuem para a melhor convivência do homem com eventos extremos, uma vez que estes não podem ser controlados. Essas medidas reduziriam substancialmente os prejuízos e danos causados pelas cheias à sociedade.

2.2. Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Estudo das Inundações

O sensoriamento remoto tem-se revelado muito útil para estudos hidrológicos e geomorfológicos em todo mundo (Smith, 1997). Muitas metodologias já foram testadas para se estimar a vazão e o transporte de sedimentos, para compreender a evolução dos padrões de drenagem e para delimitar as áreas mais suscetíveis às inundações.

Para a elaboração de modelos e/ou mapas de inundação comumente se observa a aplicação de dados obtidos por sensoriamento remoto, manipulados por técnicas de geoprocessamento disponíveis nos SIGs. Nesses casos, os materiais mais utilizados são imagens orbitais multiespectrais e de radar, modelos digitais de elevação (MDE), dados hidrológicos (chuva, vazão e cota) e informações físicas da bacia, como hidrografia, declividades, solos e vegetação nativa, entre outras.

Na ausência de dados hidrológicos que identifiquem a cota atingida pelas águas ou de modelos digitais de elevação mais detalhados, os mapas de risco e de suscetibilidade às inundações podem ser elaborados de forma empírica, como os realizados por Dias *et al.* (2004), Oliveira (2007) e Oliveira & Guasselli (2008).

Dias *et al.* (2004) realizaram o mapeamento de áreas de riscos de enchentes em Volta Redonda/RJ. O mapa foi gerado com base no cruzamento, por álgebra de mapas, das bases digitais de geomorfologia, declividade, solos e uso e ocupação do solo. Os critérios e pesos utilizados no cruzamento foram estipulados empiricamente de acordo com a influência de cada parâmetro na ocorrência das enchentes.

De forma semelhante, Oliveira (2007) e Oliveira & Guasselli (2008) compararam métodos para o cruzamento de bases digitais e realizaram um mapeamento da suscetibilidade a inundações na Sub-bacia do Arroio da Areia, na Bacia do Rio Gravataí, em Porto Alegre/RS. Nestes trabalhos, além da utilização de imagens de satélite e de radar (fonte de informações altimétricas), fez-se uso de um modelo matemático para estimar a taxa de ocupação e impermeabilização do solo.

Este tipo de mapeamento, embora seja útil no sentido de identificar as áreas com maior probabilidade de ocorrência de inundações, não apresenta a mesma aplicabilidade dos mapas gerados com base em dados mais exatos (imagens de satélite e de radar obtidas em datas próximas ao pico do evento, dados de elevação precisos conjugados com dados hidrológicos, entre outros).

A utilização de imagens de satélite multiespectrais na elaboração de mapas de inundação foi verificada em diversas obras científicas, como em Townsend & Walsh (1998), Florenzano *et al.* (1988), Saldanha *et al.* (1996) e Trentin *et al.* (2008). Na maioria dos trabalhos pesquisados, observou-se a utilização de imagens do sensor *Thematic Mapper* (TM) do Landsat 5, e do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). Esses materiais, geralmente, são integrados com outros dados para conferir maior precisão nos mapeamentos (imagens de radar, modelos digitais de elevação, dados hidrológicos, etc.).

Townsend & Walsh (1998), por exemplo, apresentaram a integração entre imagens de satélite Landsat e de radar *Japanese Earth Resource Satellite* (JERS 1) para delimitar a extensão máxima de inundações na várzea fluvial do rio Roanoke, em Carolina do Norte, Estados Unidos. O estudo conclui que o uso desses materiais é eficaz para o mapeamento das áreas com potencial de ocorrência de inundações.

O mapeamento de áreas inundáveis de Florenzano *et al.* (1988) é realizado a partir de imagens Landsat. Neste estudo, a interpretação considerou a banda localizada na faixa espectral do infravermelho próximo (canal TM4), que destaca as áreas com grande percentual de água no solo das demais feições. A delimitação das áreas inundáveis se deu através da comparação de duas imagens, uma em situação hidrológica normal e a outra após uma grande inundação. Os resultados do trabalho indicam que, a partir da interpretação dessas imagens, pode-se identificar toda a área de extravasamento das águas do rio Parnaíba.

Outro trabalho que utilizou imagens de satélite Landsat foi o de Saldanha *et al.* (1996). Estes realizaram uma avaliação dos aspectos fisiográficos da planície de inundação do rio dos Sinos, RS, sob condições hídricas distintas, através do uso das imagens. Neste estudo, foi espacializado um fenômeno de cheia (1984), um de estiagem (1986) e um de vazão intermediária (1988).

Trentin *et al.* (2008) mapearam as áreas de inundação na área de abrangência do rio Jacuí, RS, a partir de imagens MODIS. Neste trabalho, foi verificada também a relação entre as áreas inundáveis e aspectos morfométricos como a altimetria e a declividade, ambos obtidos através de dados SRTM. Em virtude da extensa área de estudo e da baixa resolução dos dados utilizados, os resultados não apresentaram grande precisão ou detalhamento, porém reproduziram de forma consistente o padrão da dinâmica de inundação na região.

De acordo com Eckhardt (2008), o mapeamento das áreas inundáveis através de imagens de satélite, pode ser inviabilizado em virtude da curta duração do pico dos eventos e da alta nebulosidade associada ao período de inundação. Além disso, a baixa resolução

temporal da maior parte das plataformas orbitais dificulta ainda mais a delimitação precisa do limite do extravasamento das águas.

A questão da nebulosidade pode ser minimizada utilizando imagens de radar para o mapeamento das áreas de inundação. Bons exemplos da aplicação desse tipo de material são observados em Bates & De Roo (2000), Alsdorf *et al.* (2000), Brivio *et al.* (2002) e Rosenqvist & Birkett (2002).

No estudo de Bates & De Roo (2000), a modelagem das áreas de inundação na planície do rio Meuse, na Holanda, foi desenvolvida a partir de modelos digitais de elevação. Os dados de radar foram utilizados para a validação do mapa de inundação. No trabalho, foram usadas imagens *Sinthetic Aperture Radar* (SAR) do pico de uma inundação de grande magnitude. Os resultados obtidos foram satisfatórios, apresentando 82% de concordância com o observado na realidade.

Outro trabalho que utilizou os dados interferométricos SAR para verificar a variação das águas em áreas de várzea foi o de Alsdorf *et al.* (2000). O estudo teve como área de abrangência a porção central da planície amazônica. A análise visual dos resultados indicou bons resultados através da utilização dos dados SAR, permitindo a compreensão da dinâmica de inundação na planície.

No trabalho apresentado em Brivio *et al.* (2002), foram mapeadas as áreas de inundação na bacia do rio Tanara, na Itália, através de imagens de radar *European Remote Sensing Satellite* (ERS 1), uma anterior à inundação, e a outra três dias após o pico do evento. O avanço espacial da água teve de ser ponderado em função da distância e da elevação do terreno, em virtude da falta de informação referente ao pico da cheia. A estimativa das áreas inundáveis atingiu 96,7% de acurácia em relação ao cenário observado.

De forma semelhante, Rosenqvist & Birkett (2002) realizaram um trabalho para estimar a extensão máxima de uma inundação na bacia do rio Congo. Neste estudo, foram selecionadas imagens de radar JERS 1, de acordo com os dados de cota máxima atingida pelas águas do rio. Os resultados demonstraram que as imagens eram eficazes para o objetivo do estudo, mas não para o monitoramento dinâmico do avanço das águas sobre as áreas de inundação da bacia.

O uso de imagens de radar, embora apresente bons resultados do ponto de vista do mapeamento estático de um determinado evento (como nos exemplos mencionados), não permite o monitoramento dinâmico do regime fluvial, aspecto muito importante para a elaboração de medidas vinculadas à previsão de inundações e de áreas afetadas. De acordo com Eckhardt (2008), as imagens de radar permitem a identificação da área inundada de um

determinado evento se a imagem for adquirida no período de pico da inundação, mas não possibilitam o conhecimento da área de inundação caso o evento tenha outra magnitude.

Desse modo, para se obter bons resultados a respeito da dinâmica das inundações, reforça-se a concepção do uso de modelos digitais de elevação, os quais permitem identificar as áreas inundadas a cada nível de elevação das águas de um determinado curso d'água. Eckhardt (2008) sugere a utilização de imagens de satélite apenas para a avaliação das características da ocupação do solo das áreas atingidas pelas inundações.

A utilização de dados de elevação como fonte primária para o mapeamento de áreas inundáveis é observada em diversos trabalhos. Nesta revisão, foram destacados alguns estudos recentes: Kafle *et al.* (2006), Silva & Barbosa (2007), Costa *et al.* (2009), Haile & Rienties (2005), Pértile (2008), Schult & Pinheiro (2003) e Eckhardt (2008).

Em Kafle *et al.* (2006) é realizado um estudo no rio Bagmati, na região de Terai, Nepal, no qual integram imagens de sensoriamento remoto e um modelo de simulação de inundações composto por dados topográficos, hidrológicos e socioeconômicos. Neste trabalho, a combinação entre os modelos hidrológicos e o modelo de elevação digital identificou as áreas de inundação e a extensão do extravasamento do rio onde é difícil se obter imagens do pico de cheia.

Já no cenário nacional, Silva & Barbosa (2007) elaboraram um mapa de inundação para vários TR em Itajubá, MG, Brasil, a partir do histórico das cheias, do levantamento altimétrico e do sistema de drenagem. O SIG utilizado foi o SPRING, com a ferramenta “mancha de inundação”, que necessita de pontos com cotas de inundação e de um modelo digital de elevação, como requisito básico para a modelagem.

No trabalho apresentado por Costa *et al.* (2009), os cenários de inundação para o município de Caratinga, MG, foram obtidos através do MDE proveniente do sistema *laser scanner* LIDAR, que possibilitou a geração de curvas de nível com equidistância de 2 metros. Com base nesses dados, o trabalho identificou as áreas de inundação em diferentes cenários de inundação (de 2 em 2 metros) e procurou identificar uma relação entre as áreas atingidas e os aspectos socioeconômicos do município. De acordo com Rivas & Brito (2003), os dados LIDAR apresentaram resultados promissores na tarefa de construção de mapas topográficos com alta confiabilidade e precisão.

Os dados LIDAR são bastante apropriados também para o estudo e a modelagem de inundações urbanas. Haile & Rienties (2005) utilizaram esses dados para modelar o avanço das águas das cheias na cidade de Tegucigalpa, em Honduras, elaborando MDEs que

variavam de 1,5m a 15m. Os resultados revelaram que os dados LIDAR permitem modelar com boa precisão o escoamento da água em áreas urbanas.

Pértile (2008) apresenta a espacialização das áreas inundáveis através da aplicação de um modelo hidrológico alimentado basicamente por dados hidrológicos e por um modelo de elevação de média resolução espacial. Como resultados da simulação foram obtidos uma série de mapas de áreas saturadas por TR na bacia hidrográfica do alto e médio curso do rio Cubatão do Norte, em Santa Catarina. O modelo hidrológico utilizado foi o TOPMODEL, apresentado por Beven *et al.* (1995).

No estudo de Schult & Pinheiro (2003), foram elaboradas cartas de inundação para o município de Blumenau, em Santa Catarina. As cartas foram elaboradas a partir de um mapa plani-altimétrico na escala 1:2.000, com equidistância das curvas de nível de 1 metro. Neste trabalho, foram levantadas as cotas de inundação das marcas observadas na enchente ocorrida em agosto de 1984, totalizando 879 pontos ao longo da cidade. O traçado da inundação não seguiu uma cota única (definindo uma linha plana), mas sim as diferentes cotas atingidas pela água nos pontos visitados em campo, formando um plano inclinado, igual ao da linha da água na inundação. Este tipo de mapeamento é bastante complexo (exige pontos amostrais de campo), e representa com maior fidelidade o avanço da água sobre a área urbana.

A metodologia de mapeamento apresentada em Schult & Pinheiro (2003) é utilizada também em Eckhardt (2008), no rio Taquari, RS. No entanto, neste último, em virtude do represamento do rio por uma barragem à jusante do posto fluviométrico utilizado, foi considerada uma cota única de inundação para todo município (a água avança de forma plana sobre a cidade).

Assim como no estudo anterior, Eckhardt (2008) utiliza um MDE de alta resolução para modelar as áreas atingidas pelas inundações (Figura 2). Os dados altimétricos foram conjugados com dados fluviométricos para a geração de um modelo cartográfico aplicado ao mapeamento dessas áreas no município de Lajeado. Os resultados obtidos no trabalho foram amplamente satisfatórios, com precisão planimétrica de mapeamento avaliada em poucos metros.

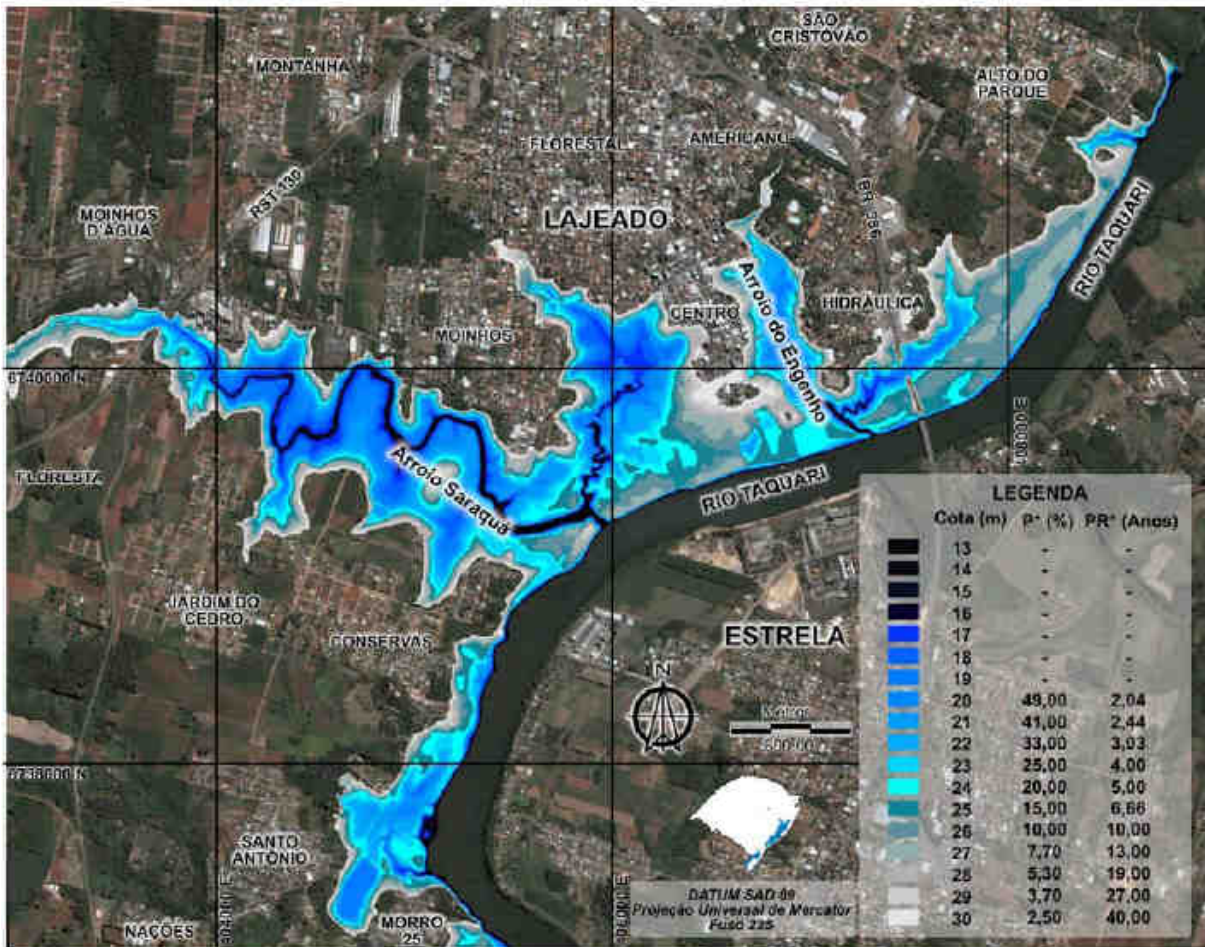


Figura 2 – Carta de inundação da área urbana de Lajeado, RS. Fonte: Eckhardt, 2008.

2.3. Modelagem da Superfície Terrestre

De acordo com Ribeiro *et al.* (2002), a caracterização da superfície terrestre por meio de seus parâmetros fisiográficos tornou-se um aspecto importante na modelagem de processos hidrológicos. A topografia é um dos fatores que mais influenciam nos processos e fenômenos naturais observados na superfície, principalmente, no que se refere à dinâmica fluvial e hidrológica das bacias hidrográficas (Moore *et al.*, 1991). Influencia diretamente no escoamento superficial e subterrâneo de água e, conseqüentemente, no potencial de erosão e na umidade do solo (Hutchinson, 1996).

Os modelos numéricos do terreno (MNT) constituem-se em representações matemáticas computacionais da distribuição de um determinado fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre (Câmara & Medeiros, 1998). São exemplos típicos de fenômenos representados por MNTs: a altimetria e a batimetria; informações meteorológicas (precipitação, temperatura, pressão atmosférica, etc.); dados geofísicos e geoquímicos.

Os modelos numéricos do terreno que representam valores relativos à altimetria, quando elaborados em ambiente computacional, são também conhecidos como modelos digitais de elevação (MDEs). Os MDEs permitem a extração de inúmeras variáveis morfométricas do relevo, como a declividade, as curvas de nível, os perfis transversais, a curvatura vertical e horizontal, as direções de fluxo de drenagem, entre outras. Desse modo, são essenciais em estudos relacionados à geomorfologia (principalmente em processos fluviais e de encostas – erosão, escorregamentos, etc.), à hidrografia (delimitação de bacias, ordenamentos dos cursos, densidade de drenagem, etc.) e aos modelos hidrológicos.

Os MDEs apresentam uma estrutura matricial (*raster*) ou vetorial (isolinhas). No caso da representação em formato *raster*, a superfície é modelada de forma contínua, onde cada célula (pixel) do MDE armazena, basicamente, três informações: coordenadas X e Y; valor referente à altitude, Z (Rosim *et al.*, 1993; Câmara & Medeiros, 1998).

Conforme Felgueiras & Câmara (2004), a geração de um MNT e, especificamente, de um MDE pressupõe duas etapas básicas: a) aquisição das amostras (amostragem de pontos cotados e/ou de curvas de nível); b) interpolação dos dados (geração do modelo propriamente dito).

A amostragem compreende a aquisição de um conjunto de amostras representativas das altitudes do relevo. Geralmente essas amostras são compostas por curvas de nível

(isolinhas) e por pontos cotados (tridimensionais – X, Y e Z). As fontes mais comuns de dados amostrais para a modelagem da superfície terrestre são: a) bases topográficas; b) informações digitalizadas a partir de levantamentos em campo; c) pontos coletados com auxílio do *Global Positioning System* (GPS); d) pares estéreos de fotografias aéreas ou de imagens de satélite; e) interferometria SAR; f) laser scanner.

Para avaliar a representatividade da amostragem, deve-se considerar a qualidade, a quantidade e o posicionamento das amostras em relação ao comportamento do fenômeno (Felgueiras & Câmara, 2004). Em áreas planas, por exemplo, uma quantidade grande de pontos pode significar redundância de informação, enquanto que em regiões de relevo acidentado a mesma quantidade de pontos pode não ser suficiente para representar com eficiência o relevo (escassez de informações).

Quanto à distribuição espacial do conjunto de amostras, consideram-se três tipos de amostragens: a) regular; b) semi-regular; c) irregular. A amostragem regular é aquela cuja posição (x e y) das amostras mantém uma regularidade, as semi-regulares são as que preservam a regularidade em uma das direções (x ou y) e as irregulares são as que o posicionamento das amostras não apresentam nenhum tipo de regularidade (Figuras 3, 4 e 5, respectivamente).

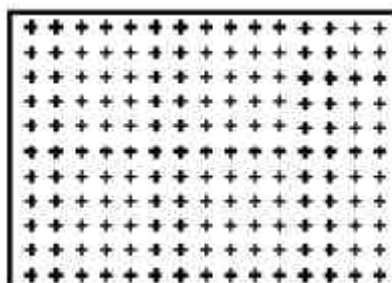


Figura 3 – Amostragem regular (Fonte: Felgueiras & Câmara, 2004).

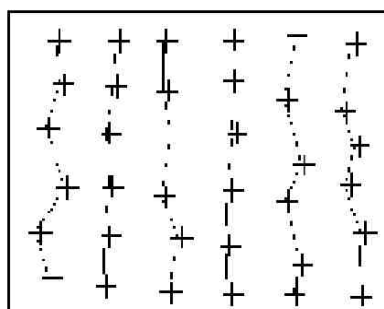


Figura 4 – Amostragem semi-regular (Fonte: Felgueiras & Câmara, 2004).

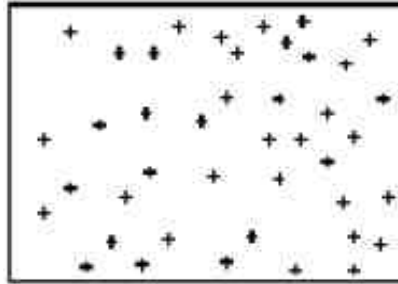


Figura 5 – Amostragem irregular (Fonte: Felgueiras & Câmara, 2004).

De acordo com Felgueiras & Câmara (2004), a seleção dos pontos e a quantidade de dados amostrais estão intrinsecamente relacionados com a qualidade do produto final de uma aplicação sobre o MDE. Quando a aplicação exige maior realismo, a quantidade de pontos amostrais e o cuidado na seleção dessas amostras tornam-se decisivos. Nesses casos, a maior quantidade de pontos exigirá um grande esforço computacional para o armazenamento, a recuperação e o processamento da modelagem.

Além da amostragem por pontos cotados, existe a amostragem por isolinhas, que quando representam a altitude, são curvas de mesmo nível (Figura 6). Esses dados são comumente interpolados juntamente com os pontos cotados para a geração de modelos de elevação matriciais. No Brasil, a principal fonte desse tipo de dado é encontrada nas cartas da DSG, nas quais se observam pontos e curvas de nível com equidistâncias variáveis (cartas 1:50.000, equidistância de 20m; cartas 1:250.000, equidistância de 100m, etc.).



Figura 6 – Exemplo de representação da altitude por curvas de nível.

Os modelos digitais de elevação matriciais apresentam geralmente dois tipos de estruturas de dados: os modelos de grade regular e os modelos de malha triangular (Rosim *et al.*, 1993). As grades regulares (Figura 7) aproximam superfícies através de um poliedro de

faces retangulares, enquanto que as grades triangulares (*Triangular Irregular Network – TIN*) são constituídos por um conjunto de poliedros cujas faces são triângulos, sendo os vértices dos triângulos os pontos amostrados da superfície (Figura 8).

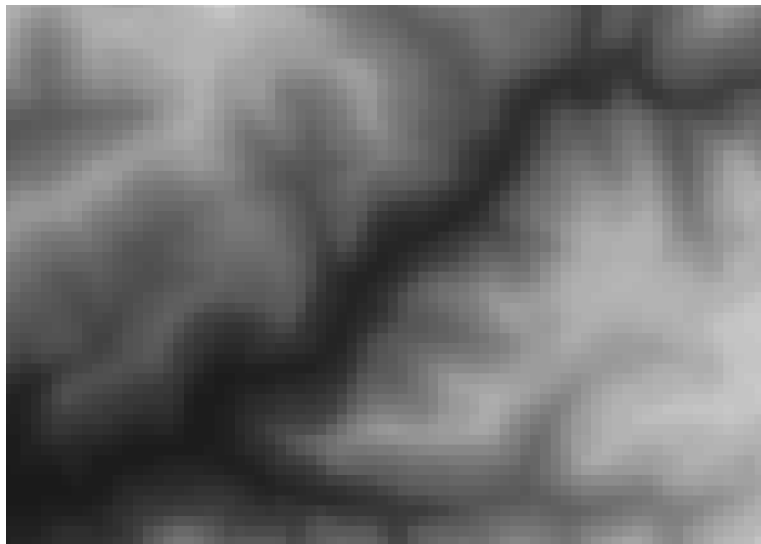


Figura 7 – Modelo Digital de Elevação em malha regular.

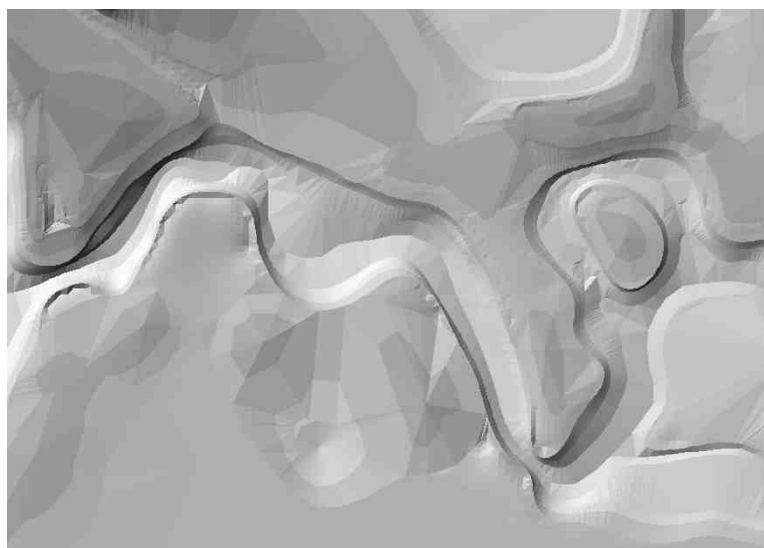


Figura 8 – Modelo Digital de Elevação em malha triangular.

Quanto à resolução de modelos em grade regular, entende-se que o ideal é que a mesma seja inferior ou igual à menor distância entre duas amostras com cotas diferentes (Felgueiras & Câmara, 2004). Ao gerar uma grade muito densa (com resolução superior à distância entre as amostras) o usuário incorpora ao MDE uma grande proporção de valores estimados pela interpolação que podem não ser compatíveis com a verdadeira superfície, além de que o tempo de processamento aumenta demasiadamente. Ao contrário, se o usuário gerar uma grade muito grosseira, haverá perda de informação.

Após a seleção de amostras e definido o tipo de estrutura de dados a ser utilizado, inicia-se o processo de interpolação (geração do modelo digital de elevação). De acordo com Gomes (1990), a interpolação é uma técnica utilizada para se estimar o valor de uma determinada grandeza a partir de um conjunto de amostras. Esse processo é necessário quando se deseja inferir valores em localidades particulares entre os pontos amostrados, para representar de forma contínua a realidade.

Como regra geral, num processo de interpolação, considera-se que a correlação entre dois pontos diminui à medida que aumenta a distância entre eles. Assim, é comum a utilização de uma ponderação em função da distância (Mendes & Cirilo, 2001). Destacam-se os métodos de interpolação pelo inverso do quadrado da distância, por krigagem, spline e por triangulação. Cada método apresenta uma série de vantagens e desvantagens de acordo com a disposição geográfica dos pontos e da utilização de critérios estatísticos (Silva, 1999).

O inverso do quadrado da distância foi um dos interpoladores utilizados neste trabalho. Trata-se de um interpolador de médias ponderadas, muito eficiente do ponto de vista computacional, isto é, de rápido processamento. Ao calcular o valor de um pixel numa grade, são atribuídos pesos para os pontos amostrais, inversamente proporcionais à distância ao quadrado. A soma total dos pesos é um. Quanto mais próxima uma amostra estiver da célula da grade calculada, maior será o seu peso no valor interpolado da mesma.

Neste trabalho foi utilizado também a implementação *Topo to Raster*, um método projetado especificamente para a criação de modelos digitais de elevação (MDE) hidrologicamente coerentes, originado no programa ANUDEM da *The Australian National University*, e também disponibilizado no software ArcGIS 9.2. O programa foi desenvolvido no final da década de 1980, e o resultado, apresentado em Hutchinson (1989).

O *Topo to Raster* mescla a eficiência computacional dos métodos de interpolação locais (como o inverso do quadrado da distância) com a continuidade da superfície de métodos de interpolação globais, como a krigagem e o spline. Essencialmente, trata-se de uma técnica spline discretizada que permite ao MDE representar as mudanças abruptas do terreno, como os rios e os cumes (Wahba, 1990; Hutchinson, 1993). Comumente, ao utilizar essa implementação, inserem-se como dados de entrada: os pontos cotados, as curvas de nível e as linhas de drenagem.

Nesta dissertação foi utilizado também o método de interpolação conhecido como TIN, uma adaptação desenvolvida por Peucker *et al.* (1979) da triangulação de Delaunay. Trata-se de um interpolador exato em que o algoritmo cria triângulos através da ligação dos

pontos amostrais, sendo muito eficiente para representar relevos acentuados. Nessa rede irregular de triângulos são armazenados três conjuntos de registros no banco de dados: a lista de nós, a lista de apontadores e a lista de triângulos (Silva, 1999). De acordo com Felgueiras & Câmara (2004), este tipo de estrutura (mais complexa) garante que feições lineares do relevo (os cumes e os talwegues) sejam consideradas no processo de geração do MDE. Essas feições são inseridas na modelagem por meio de linhas de quebra, que devem ser obrigatoriamente arestas dos triângulos gerados.

2.4. Características dos Dados SRTM

Os dados SRTM consistem em um MDE que apresenta resolução espacial (horizontal) de três segundos de arco, aproximadamente 90m, e resolução vertical de um metro. Esses dados são disponibilizados no formato “*raster*”, como uma imagem, em que cada pixel possui um determinado valor altimétrico.

O sobrevôo para aquisição dos dados ocorreu de 11 a 22 de fevereiro de 2000. Aproximadamente 80% da superfície terrestre foi coberta pela missão, entre as latitudes 60°N e 56°S (Figura 9). A *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) coloca que durante o sobrevôo foram percorridas 16 órbitas diariamente, totalizando, ao final da missão, 176 órbitas. Os dados foram processados para a formação dos MDE's por continente.

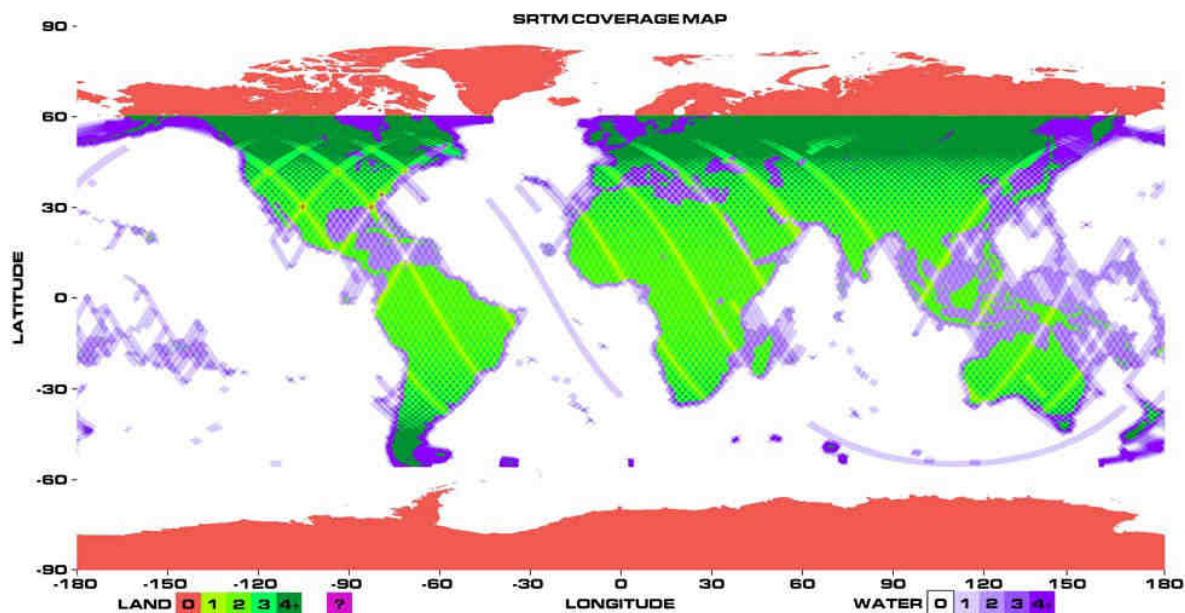


Figura 9 – Cobertura global dos dados SRTM (Fonte: NASA, 2005).

De acordo com a NASA, a missão utilizou as bandas C e X do SAR, a bordo da nave espacial *Endeavour*. Tudo foi projetado para coletar medidas tridimensionais da Terra através de interferometria. As antenas para as bandas C e X foram instaladas na extremidade de um mastro de 60m conectado à nave.

Segundo Valeriano (2008), toda a aquisição do SRTM foi planejada para oferecer suporte a mapeamentos em escalas entre 1:100.000 e 1:250.000. Santos *et al.* (2006) e Souza (2006), respectivamente, avaliaram a precisão vertical e a qualidade cartográfica do MDE SRTM e apresentaram bons resultados quanto à utilização dos dados SRTM para trabalhos nestas escalas.

Cabe, no entanto, ressaltar que dados topográficos advindos de sensores remotos podem expressar a presença de objetos não topográficos, como árvores, edificações e antenas. Logo, esses dados são sensíveis a estes efeitos, os quais podem afetar eventualmente a sua utilização (Valeriano, 2004; Valeriano, 2008).

A expressão “efeito dossel” é frequentemente utilizada para definir a influência da vegetação nos MDE obtidos por sensores. O trabalho de Valeriano *et al.* (2006) contextualiza esse problema na Amazônia, onde as áreas desmatadas possuem valores de elevação bastante inferiores às áreas de mata, prejudicando a obtenção de variáveis morfométricas da região, como a declividade e a orientação do relevo.

Embora os dados possuam uma resolução vertical nominal de um metro, a resolução espacial (90m) e o efeito dossel influenciam substancialmente nas estimativas de acurácia vertical do MDE, que, segundo a *United States Geological Survey* (USGS), é de dezesseis metros (USGS, 2009). Valeriano (2008) ressalta que as restrições ao uso destes dados são tanto maiores quanto menores forem as declividades.

De acordo com JPL (2002 *apud* Souza, 2006) embora tenham sido aplicadas operações de pós-processamento, os dados de elevação contêm numerosos vazios e outros pontos espúrios, como valores extremamente altos (picos) ou extremamente baixos (vórtices). Corpos d’água geralmente não estão bem definidos, assim como as linhas de costa, pois as superfícies de água produzem baixo espalhamento.

Mesmo com algumas limitações, os dados SRTM constituem-se num conjunto de informações altimétricas de considerável importância, tendo em vista sua ampla utilização no ambiente científico e sua fácil e rápida manipulação. No Brasil, onde se verifica uma grande carência de dados altimétricos, os dados SRTM tornaram-se um dos materiais de informações altimétricas mais utilizados no país, juntamente com as cartas da DSG.

2.5. Modelo de Previsão de Inundações

A criação e/ou o aperfeiçoamento dos sistemas de previsão de inundações constituem-se em uma das medidas não-estruturais mais importantes para a suavização dos prejuízos e perdas oriundas das inundações. Ainda que não solucione o conflito existente entre a ocupação humana de áreas inundáveis e o regime fluvial (no qual as inundações ocorrem naturalmente), a previsão desses eventos reduz drasticamente as perdas de vida e os danos materiais (Ferraz *et al.*, 1998; Paz *et al.*, 2002; Tucci & Bertoni, 2003; Eckhardt, 2008).

Um bom exemplo de sistema de previsão de enchentes, ainda em fase de implantação, é o da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, no Vale do Taquari, RS, gerenciado pelo Centro Universitário UNIVATES e pela Administração das Hidrovias do Sul (AHSUL). De acordo com Eckhardt (2008) e Ferreira *et al.* (2007), o Sistema de Previsão e Alerta de Enchentes (SPAEE), de modo geral, avalia o volume de precipitação na bacia hidrográfica e o nível da água no rio Taquari (monitoramento pluviométrico e hidrológico), projeta o alcance de uma determinada enchente ou inundação (previsão hidrológica), simula as áreas com maior potencial de serem atingidas (mapeamento das áreas de inundação no cenário previsto) e aciona os Conselhos Municipais de Defesa Civil (Figura 10).



Figura 10 – Organograma da estrutura e do funcionamento do SPAE do Vale do Taquari. Fonte: Eckhardt (2008).

A bacia hidrográfica do rio Caí ainda não possui um modelo de previsão de inundações para os municípios mais afetados, tão pouco um sistema de alerta de enchentes. Atualmente, nos municípios de São Sebastião do Caí e de Montenegro a previsão é realizada empiricamente, com base em informações disponibilizadas por moradores de municípios localizados à montante. Os órgãos competentes das prefeituras são informados dos locais inundados à montante e estabelecem uma relação com a possível área de inundação nos seus municípios.

Esse tipo de estimativa do alcance das águas pode ser eficiente em alguns episódios e deve ser incorporado em sistemas de previsão e alerta, com a finalidade de complementar os modelos matemáticos, pois se baseia em eventos anteriores nos quais foi possível estabelecer algumas relações de nível. No entanto, o método não deve ser utilizado como a principal fonte de previsão em virtude das limitações inerentes ao modelo empírico, que estão associadas à baixa confiabilidade das informações obtidas (baseadas em relatos pessoais), à restrita dimensão espacial da previsão (realizada pontualmente, onde já se tem uma relação confiável com o nível observado à montante) e à ausência de fundamentação matemática e estatística, o que impossibilita estabelecer um nível de confiança e obter margens de erro.

A previsão matemática ou estatística de enchentes e inundações pode ser realizada, basicamente, a partir de dados hidrológicos, como a precipitação na bacia hidrográfica, a vazão e a cota dos rios. No local de interesse da previsão é necessário um conhecimento prévio da dinâmica hidrológica (série histórica de vazão ou de cotas; tempos de retorno, etc.).

Os dados referentes à precipitação são fundamentais para alimentar os sistemas de previsão que se baseiam na relação entre a intensidade e duração das chuvas e o seu reflexo na vazão do rio, como nos modelos hidrológicos chuva-vazão apresentados em Vörösmarty *et al.* (1991), Burnash (1995), Collischonn (2001) e Pértile (2008). Nesses modelos, além dos dados de chuva, são utilizados geralmente dados físicos da bacia (modelo digital de elevação, tipos de solos, uso e ocupação do solo, entre outros) e dados hidrológicos de vazão para a calibração e execução do modelo.

Além dos modelos que convertem matematicamente a chuva em vazão, existem outros métodos de previsão hidrológica de enchentes e inundações, os quais podem ou não ser combinados com os modelos distribuídos chuva-vazão. O método mais conhecido é o de propagação de vazões, no qual a previsão de vazão é realizada com base em informações de vazão e/ou de nível à montante da seção de interesse (Paz *et al.*, 2002). Outro método é o da relação cota-cota, em que a previsão de inundação leva em consideração a cota atingida numa

seção à montante do rio (Eckhardt, 2008). Este último, foi o método adotado na presente dissertação, tendo em vista sua fácil implementação e sua alta operacionalidade.

Nos dois primeiros métodos (modelos chuva-vazão e de propagações de vazões) é necessário estabelecer uma confiável relação entre os valores de vazão e o nível atingido no rio, sendo este último, um parâmetro muito importante para a previsão da área a ser atingida. Os valores de vazão isolados, isto é, sem relação com a cota a ser atingida pelas águas, não permitem identificar as áreas que serão atingidas pelas águas.

Já nos modelos matemáticos de previsão de inundações baseados na relação cota-cota, o aspecto mencionado no parágrafo anterior é evitado, reduzindo, de certa forma, o percentual de erros associados às estimativas. Bons resultados da aplicação deste tipo de modelagem são apresentados em Eckhardt (2008) para a previsão de inundações no município de Lajeado/RS.

O estudo de Eckhardt (2008) propõe um modelo matemático baseado nas séries históricas de duas estações fluviométricas, uma em Lajeado e a outra, à montante, no município de Encantado/RS. A cota estimada à jusante é obtida por uma regressão, na qual se identifica a função de melhor ajuste dos dados através do Qui-Quadrado Reduzido.

O tempo de antecedência nesse tipo de previsão é proporcional à distância entre as estações, ou seja, quanto maior a distância, maior a antecedência. No entanto, a precisão do modelo decresce consideravelmente à medida que aumenta a distância entre as mesmas. Logo, necessita-se conciliar os dois aspectos (antecedência e qualidade), de modo a viabilizar o uso do modelo nos planos de remoção e evacuação (pessoal e material) durante os eventos de grande magnitude.

Quanto aos equipamentos e materiais necessários para a aplicação deste método de previsão de inundações em sistemas de alerta, destacam-se as estações hidrológicas de monitoramento contínuo da precipitação, da vazão e da cota – estações telemétricas –, que permitem o acompanhamento da enchente em tempo real; e as séries históricas de vazão ou de cotas (para determinação do tempo de retorno e para alimentar o modelo de previsão). As séries históricas são fundamentais para a elaboração do modelo matemático, e as estações telemétricas, para o monitoramento dinâmico do nível do rio.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentadas as características da área de estudo e descritos os materiais e equipamentos utilizados, bem como as técnicas e métodos adotados na elaboração e execução dos modelos para a previsão, a espacialização e a análise das inundações na bacia do rio Caí. Visando a melhor compreensão dos procedimentos metodológicos adotados nesta dissertação, optou-se por uma estruturação em três módulos de trabalho, de acordo com o nível de detalhamento das modelagens e seus respectivos objetivos.

O Módulo I corresponde a um modelo de escala média (1:100.000) para o mapeamento e a análise das inundações na bacia hidrográfica do rio Caí. Este é o módulo que trabalha a bacia numa escala mais regional, portanto com menor detalhamento espacial das áreas de inundação.

O Módulo I visa identificar e caracterizar as principais áreas de inundação no interior da bacia e avaliar os modelos digitais de elevação utilizados. Compreende os seguintes objetivos específicos (subitem 1.1.1 desta dissertação): a) calcular o TR das cotas de cheia em três pontos do rio Caí; b) analisar a distribuição sazonal das cheias na bacia hidrográfica; c) elaborar um mapa da inundação de 24 e 25 de setembro de 2007; d) modelar as áreas de inundação por elevação do nível dos rios, a partir de dados SRTM e da DSG; e) analisar qualitativa e quantitativamente os resultados.

O Módulo II compreende um modelo em escala mais detalhada (1:10.000) para previsão, espacialização e análise das inundações na área urbana de São Sebastião do Caí. É importante destacar que este módulo fornecerá um conjunto de dados mais precisos (modelos de previsão e de espacialização; mapa de inundação por TR) para subsidiar futuros sistemas de previsão e alerta de enchentes e inundações, como o proposto pela CPRM.

Estão inseridos neste módulo os seguintes objetivos específicos (conforme subitem 1.1.1): a) desenvolver um modelo matemático para a previsão de inundações na área urbana de São Sebastião do Caí; b) elaborar um MDE para espacializar as áreas inundáveis por TR na área urbana; c) identificar os tipos de uso e ocupação do solo mais afetados pelas inundações; d) promover uma análise qualitativa e quantitativa dos resultados.

O Módulo III corresponde à modelagem, em escala grande (1:5.000), para previsão, mapeamento e análise das inundações na área urbana e entornos de Montenegro. Assim como no módulo anterior, este também poderá contribuir para a implantação do sistema de alerta de enchentes e inundações planejado pela CPRM.

Este módulo compreende os seguintes objetivos específicos: a) desenvolver um modelo matemático para a previsão de inundações na área de estudo de Montenegro; b) elaborar um MDE para espacializar as áreas inundáveis por cota e por TR na área urbana e entornos de Montenegro; c) identificar os tipos de uso e ocupação do solo mais afetados pelas inundações; d) analisar qualitativa e quantitativamente dos resultados.

3.1. Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Caí está situada na porção nordeste do estado do Rio Grande do Sul (Figura 11), entre as coordenadas geográficas 29°06' e 30°S, 50°24' e 51°40'W, e possui 4.981km². A população estimada é de 537.658 habitantes, o que corresponde a 5% da população total do RS, dos quais 82,5% estão domiciliados em áreas urbanas (COMITECAÍ, 2007a).

A bacia do rio Caí está inserida na região hidrográfica do Guaíba, composta por outras oito bacias hidrográficas: Lago Guaíba, Gravataí, Sinos, Taquari-Antas, Baixo Jacuí, Pardo, Vacacaí-Vacacaí Mirim e Alto Jacuí (FEPAM, 2008). De acordo com METROPLAN (1999), esta região possui aproximadamente 85.000km² (30% da área geográfica do RS) e compreende cerca de 70% da população do estado do RS, caracterizando uma considerável concentração populacional.

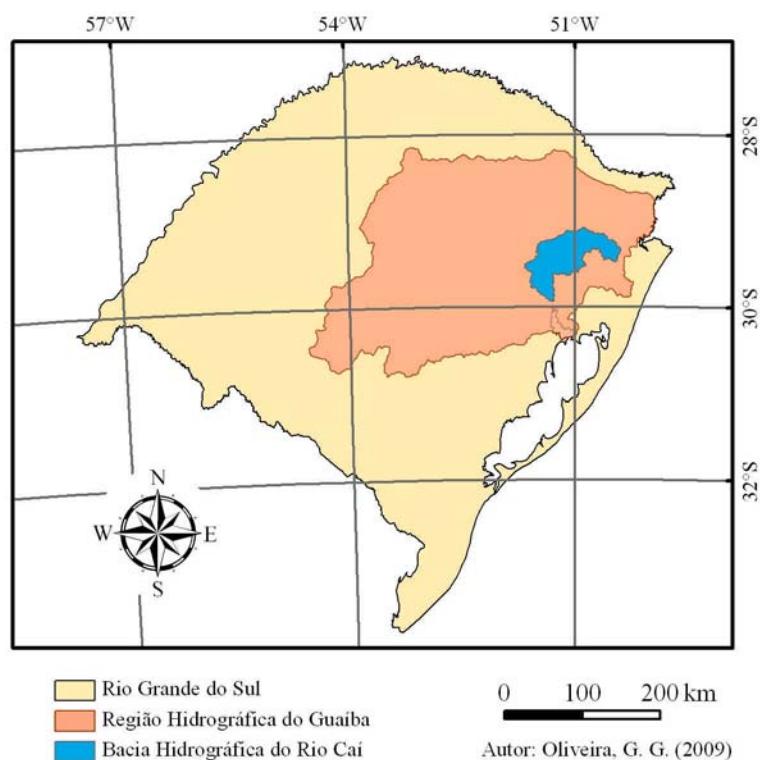


Figura 11 – Localização da bacia hidrográfica do rio Caí.

O município de São Sebastião do Caí está situado nas coordenadas geográficas 29°35'S e 51°23'W, às margens do rio Caí, no limite entre o médio e o baixo curso do rio. A área do município é de 111,45km² e a população residente é de 20.359 habitantes, dos quais, aproximadamente, 81% estão domiciliados na área urbana (IBGE, 2007).

Em direção à jusante, o município de Montenegro localiza-se nas coordenadas 29°41'S e 51°28'W, já no baixo curso do rio Caí. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), sua área é de 420km² e a população residente em 2007 era de 56.790 habitantes. Destes, cerca de 90% residiam na área urbana do município.

A Figura 12 apresenta a rede hidrográfica básica (de terceira ordem ou superior) e a localização dos dois núcleos urbanos no interior da bacia hidrográfica do rio Caí.

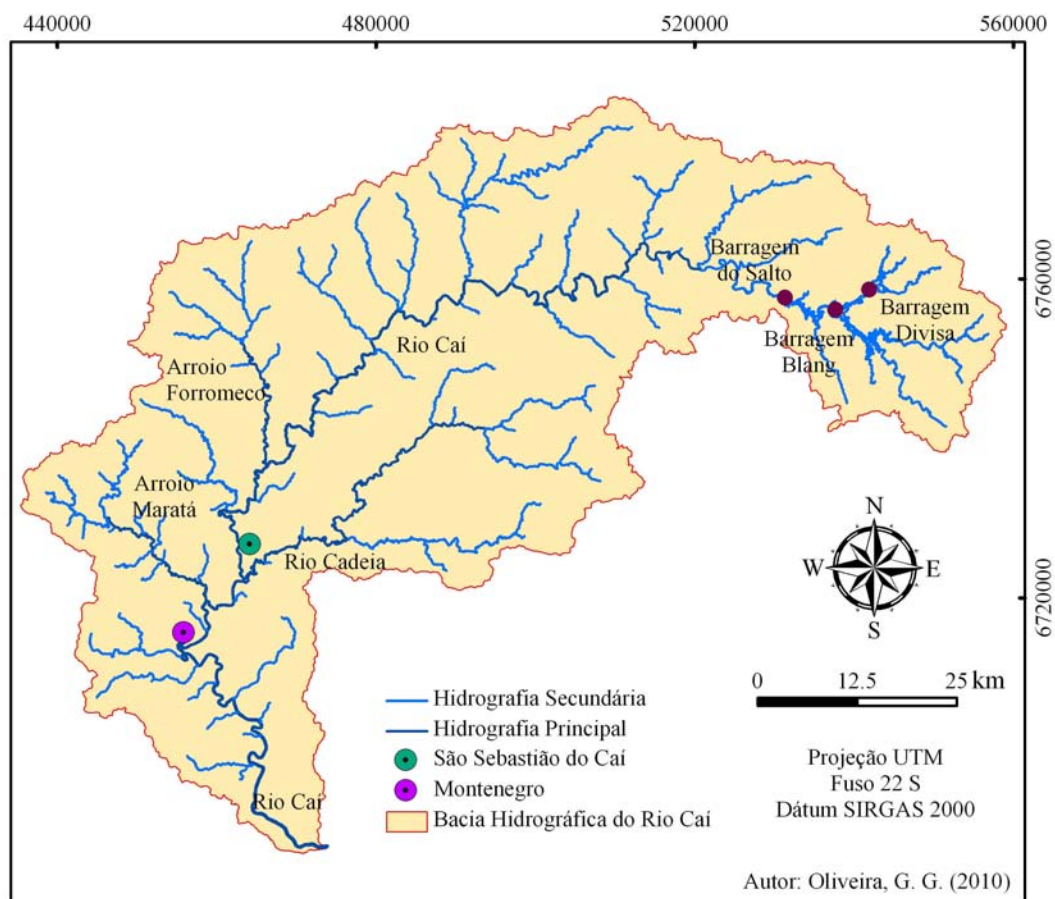


Figura 12 – Rede hidrográfica da bacia do rio Caí e a localização das áreas urbanas de São Sebastião do Caí e Montenegro.

Conforme a cartografia da DSG, os principais cursos d'água da bacia hidrográfica são: a) rio Caí (rio principal, de sexta ordem, de acordo com o método de ordenamento proposto por Strahler (1952)); b) rio Cadeia e arroios Forromeco e Maratá (todos de quinta ordem). A bacia possui ainda extensas áreas de banhado nas áreas mais próximas à foz do rio Caí, na confluência com o rio Jacuí (principal rio da região hidrográfica do Guaíba). O rio Caí possui três barragens que regulam em certo grau o regime fluvial. São elas: Barragem do Salto, Blang e Divisa.

O rio Caí possui uma considerável sinuosidade. Seu comprimento é de 208,45km e a distância entre os pontos extremos é de 89,11km, o que confere um índice de sinuosidade de 2,34. A densidade de drenagem na bacia é de 1,1km por km², indicando que há bastante infiltração de água no solo. O índice de circularidade da bacia é baixo, apenas 0,21, concordando com a visível forma alongada que a bacia possui.

A bacia hidrográfica do rio Caí apresenta uma elevada amplitude altimétrica. A altitude média é de 457m e a máxima é registrada no Planalto da bacia do Paraná, com pico de 1.027m. As áreas mais elevadas estão localizadas na porção nordeste da bacia, enquanto as mais baixas estão a sudoeste, indicando também a direção preferencial dos rios (nordeste-sudoeste).

A área de estudo possui declividades elevadas nas escarpas do planalto, superando os 150% em pontos isolados, sendo que a declividade média é de 15,6%. Uma das sub-bacias mais declivosas é a do arroio Forromeco, com aproximadamente 23,2%, o que garante maior velocidade ao escoamento da água das chuvas. De modo geral, os vales da bacia hidrográfica do rio Caí apresentam de médio à forte entalhamento, principalmente no curso médio do rio principal e nos afluentes que deságuam nesse trecho do rio Caí.

As Figuras 13 e 14 correspondem aos mapas de altimetria e de declividades da bacia hidrográfica do rio Caí estimadas pelos dados SRTM.

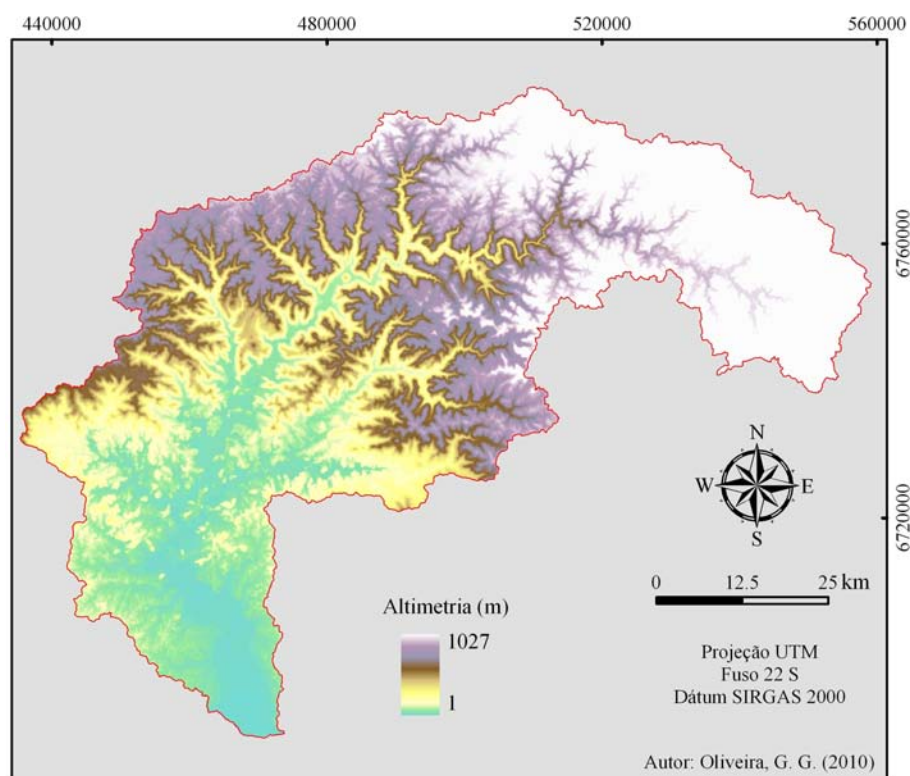


Figura 13 – Mapa altimétrico da bacia hidrográfica do rio Caí, RS, com dados SRTM.

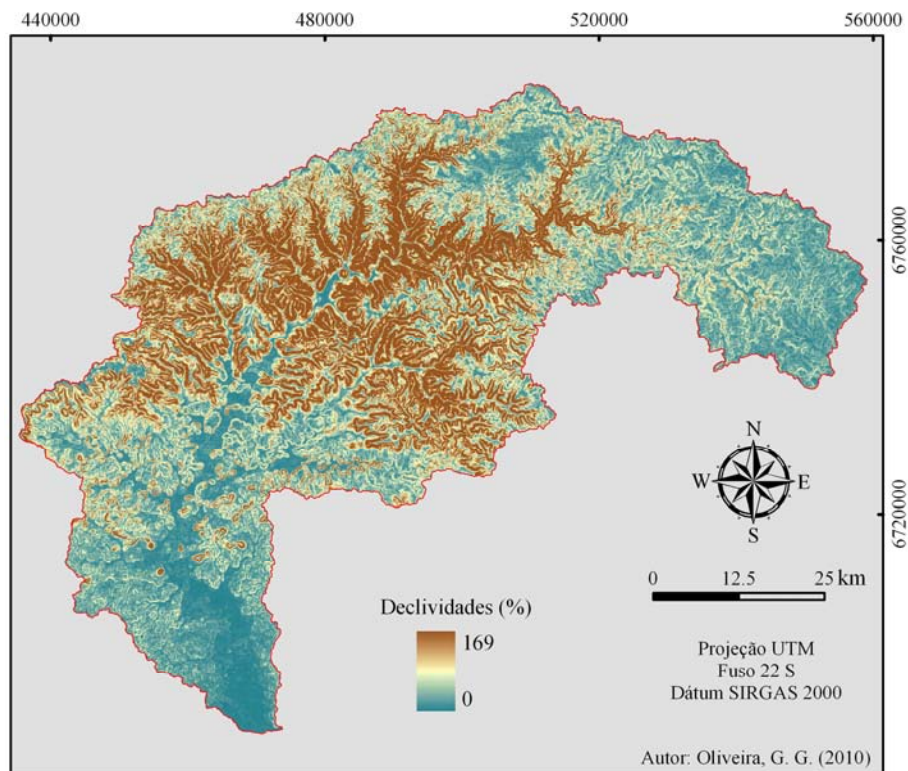


Figura 14 – Mapa de declividade da bacia hidrográfica do rio Caí, RS, estimada a partir de dados SRTM.

3.1.1. Aspectos Geomorfológicos

Quanto à geomorfologia, a bacia hidrográfica do rio Caí compreende diferentes unidades e padrões de formas, de acordo com o detalhamento dos mapeamentos e o método de classificação. Neste item, será apresentada a classificação geomorfológica do IBGE (2009), baseada no projeto RADAM BRASIL.

De acordo com o mapeamento proposto pelo IBGE (2009), que caracteriza a geomorfologia da área de estudo mais detalhadamente, em escala de 1:250.000, a bacia hidrográfica do rio Caí apresenta cinco unidades geomorfológicas (Figura 15). São elas: a) Planície Alúvio-coluvionar do rio Caí; b) Depressão do rio Jacuí; c) Patamares da Serra Geral; d) Serra Geral; e) Planalto dos Campos Gerais. As duas primeiras unidades relativas à Depressão Periférica (Central) e as restantes relativas ao Planalto Meridional (Planalto e chapadas da bacia do Paraná).

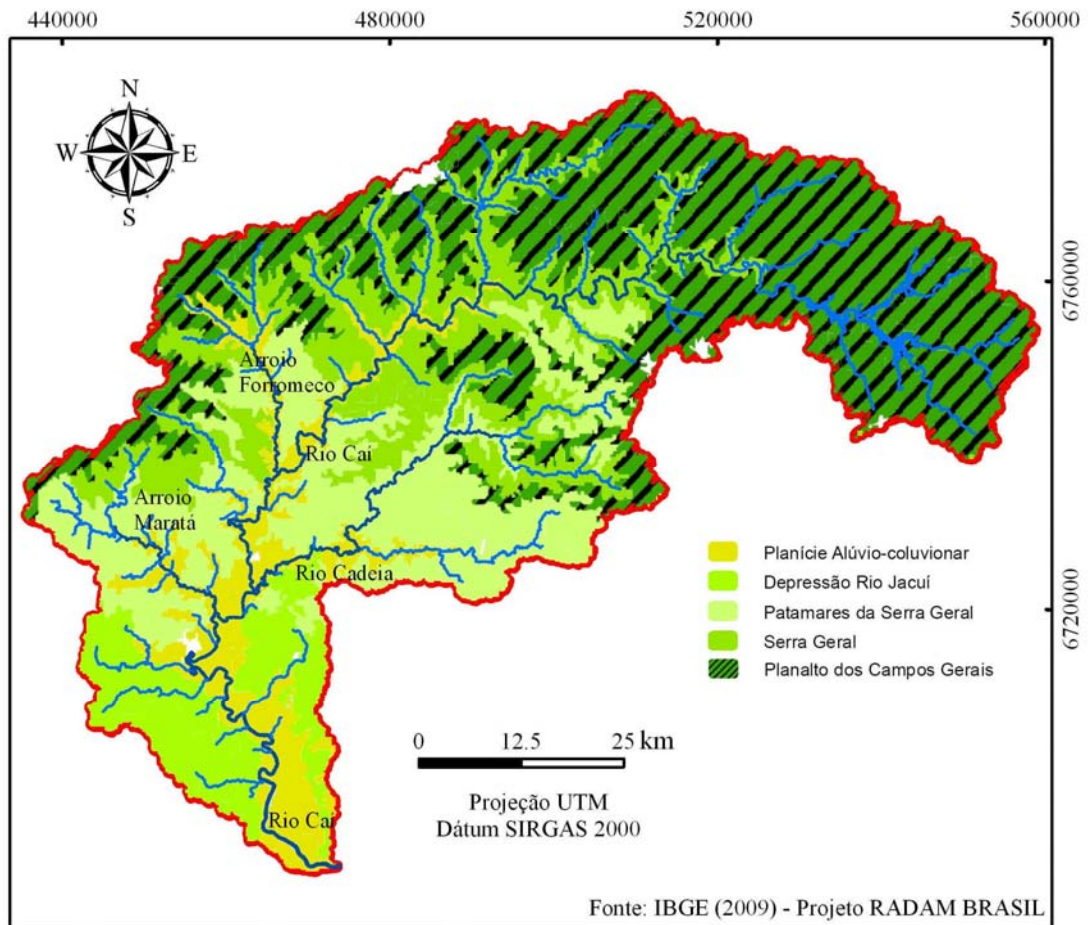


Figura 15 – Geomorfologia da bacia hidrográfica do rio Caí, de acordo com IBGE (2009).

Segundo Ross (2006), os Planaltos e Chapadas da bacia do Paraná, também conhecidos como Planalto Meridional, englobam terrenos sedimentares e vulcânicos da bacia sedimentar do Paraná. O contato dessa unidade com a depressão adjacente é realizado através de escarpas (Serra Geral) que se identificam como frentes de cuesta única, ou desdobradas em duas ou mais frentes.

Na porção do planalto de patamares mais baixos (entre 400 e 700m de altitude) observam-se colinas amplas com topos convexos de litologia arenítica (Patamares da Serra Geral). Nas áreas mais elevadas do planalto, as principais formas de relevo são os patamares e escarpas estruturais associadas a morros e colinas de topos convexos (Planalto dos Campos Gerais). A litologia é composta por basaltos, diabásios e riolitos (Ross, 2006).

A Depressão Periférica sul-rio-grandense está esculpida principalmente em sedimentos na borda da bacia sedimentar do Paraná. Trata-se de uma área onde prevalecem relevos esculpidos sobre rochas areníticas. As áreas mais baixas da bacia, as várzeas dos principais

cursos d'água, estão inseridas nesse compartimento (Depressão do Rio Jacuí e Planícies Alúvio-coluvionares).

3.1.2. Aspectos Climáticos

De acordo com Araújo (1930 *apud* Fortes, 1959, p.205), a bacia hidrográfica do rio Caí está localizada em duas grandes regiões climáticas do RS: na Depressão Central e na Serra do Nordeste (Figura 16).

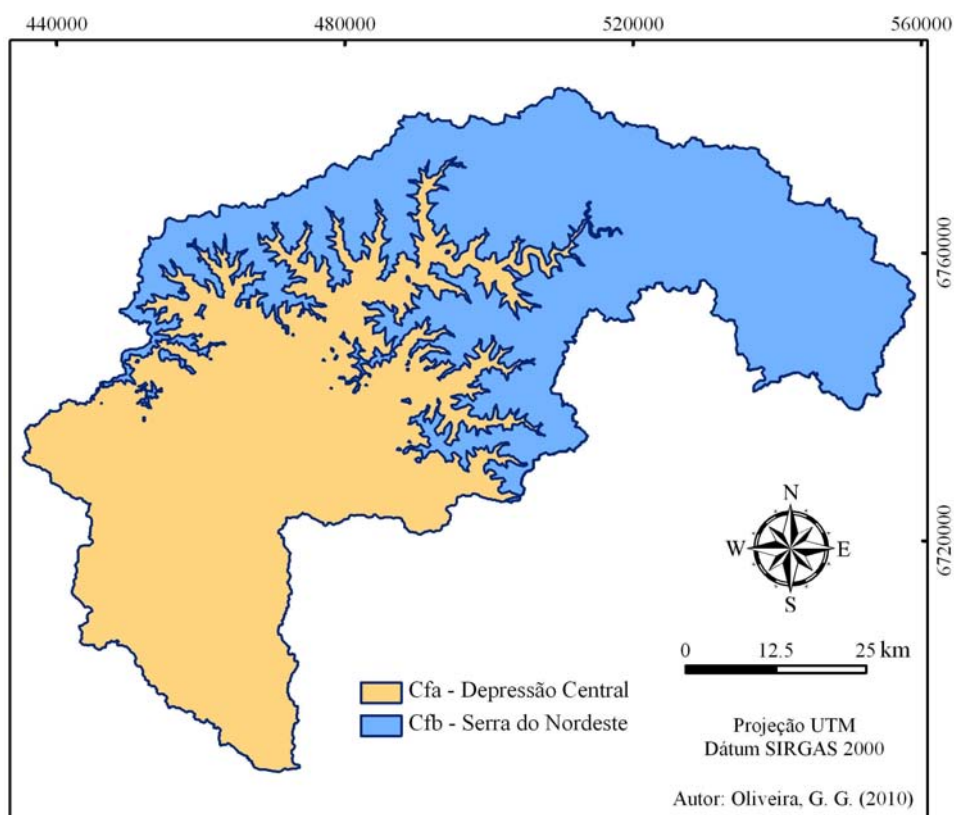


Figura 16 – Clima da bacia hidrográfica do rio Caí, RS.

Na porção da bacia inserida na Depressão Central verifica-se uma temperatura média anual de 19,4°C. Apenas em cinco meses a temperatura média mensal ultrapassa os 20°C (de novembro a março). A precipitação média anual oscila entre 1.250 e 1.750mm, de acordo com os microclimas locais (Figura 17). Tomando como referência a classificação de Köppen, o clima desta porção da bacia é o subtropical úmido com verão quente (Cfa).

A porção da bacia caracterizada por altitudes mais elevadas (na Serra do Nordeste) possui temperaturas mais amenas e maior volume de chuva. A temperatura média anual é de 16°C, sendo que apenas dois meses registram temperatura média superior a 20°C. Nestas

áreas, a precipitação média anual varia entre 1.500 e 1.850mm (Figura 17). O clima dessas áreas da bacia é o subtropical úmido com verão temperado (Cfb), em virtude da temperatura média do mês mais quente ser inferior a 22°C.

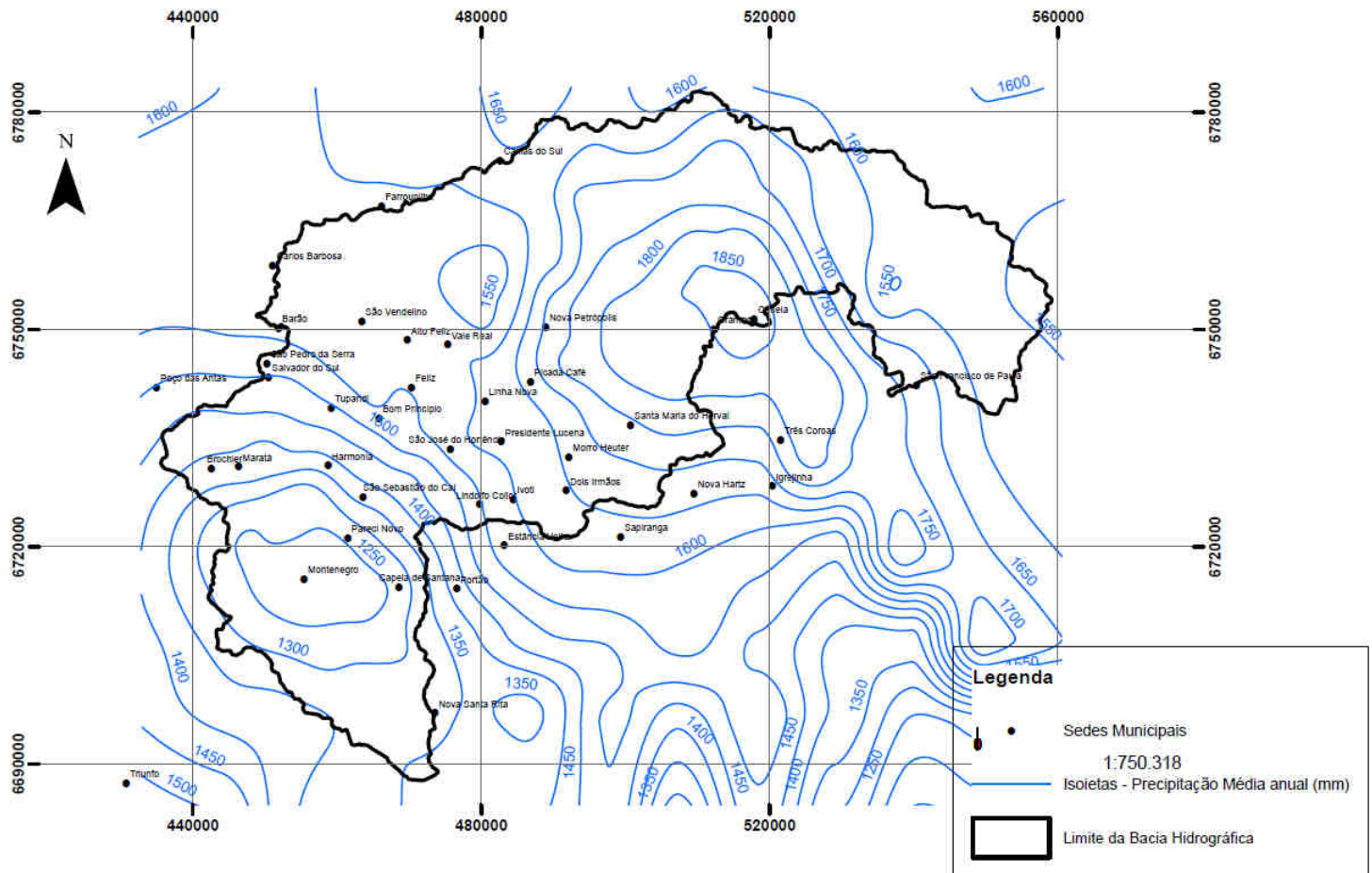


Figura 17 – Isoietas de precipitação média anual na bacia hidrográfica do rio Caí
(Fonte: COMITECAI, 2007b)

De acordo com os dados do Instituto Nacional de Meteorologia, o intervalo entre junho e setembro (estação mais fria) corresponde aos meses com maior precipitação do ano nas proximidades da bacia hidrográfica do rio Caí, como mostra a Figura 18. A média de precipitação nesses meses oscila entre 120 e 140mm. Os meses menos chuvosos são abril e maio, com média em torno de 90mm (INMET, 2009).

A gênese das precipitações no estado do RS está ligada predominantemente às correntes perturbadoras de Sul, também conhecidas como frentes polares. Estas produzem a maior parcela do volume total de chuvas, caracterizando-se por precipitações de longa duração, e intensidade predominantemente baixa ou mediana. As correntes de Oeste (instabilidades tropicais) correspondem à segunda origem das chuvas no RS (Wollmann,

2008; Sartori, 1979 e 2003), caracterizando-se por precipitações de menor duração e volume, porém mais intensas do que nas frentes frias.

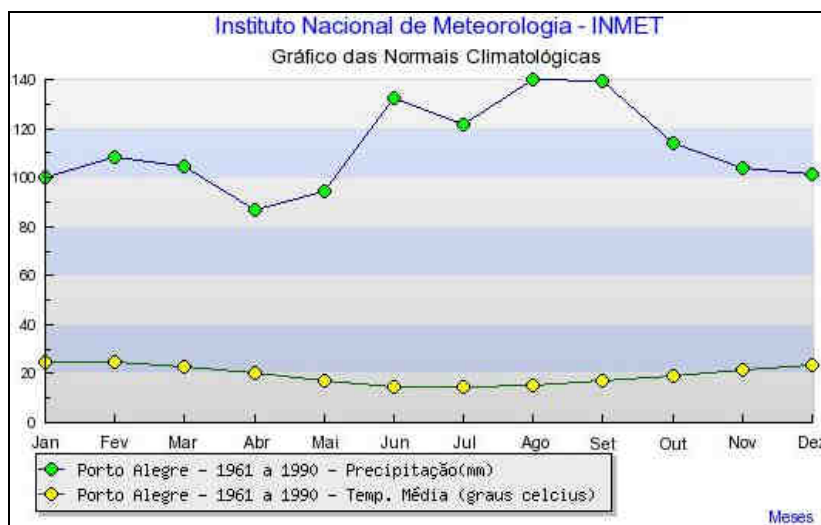


Figura 18 – Normal Climatológica de Porto Alegre, estação mais próxima da bacia hidrográfica do rio Caí, RS.

O domínio dos sistemas frontais ocorre nos meses mais frios do ano (de junho à setembro), período em que as massas de ar frias e úmidas vindas do Oceano Atlântico Sul predominam sobre as massas quentes tropicais. Isso influencia na leve concentração das chuvas nesses meses, conferindo uma relativa sazonalidade à ocorrência de enchentes e inundações no RS (Wollmann, 2008).

Aliado ao fortalecimento dos sistemas frontais durante o inverno, a geomorfologia também exerce grande influência nos volumes de chuva, justificando o maior volume de chuvas na escarpa do Planalto da bacia do Paraná. No entanto, como a orientação preferencial dos rios na área de estudo é NE-SW, a concentração das águas, resultantes do excedente pluviométrico, se dá nos vales e várzeas dos rios que deságuam na Depressão Central, como o rio Caí, onde predominam as enchentes e as inundações (Wollmann, 2008).

De acordo com Wollmann (2008), ainda existe uma considerável influência do fenômeno “El Niño” sobre o regime de precipitação no estado do RS e, conseqüentemente, na bacia hidrográfica do rio Caí. Sabe-se que este fenômeno fortalece o Anticiclone do Atlântico, que impede o deslocamento das frentes polares, fazendo com que essas massas de ar permaneçam estacionadas sobre o RS por alguns dias, aumentando o volume de chuvas e favorecendo a ocorrências de enchentes.

Quanto às instabilidades tropicais, estas predominam no período mais quente do ano, coincidindo com a temporada de atuação de sistemas convectivos no RS, com destaque para

os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs). De acordo com Viana *et al.* (2009), os CCMs caracterizam-se como uma junção de células convectivas com formato quase circular e com um crescimento rápido, entre seis e doze horas. Os CCMs podem produzir uma grande variedade de fenômenos meteorológicos, tais como tornados, granizo, fortes rajadas de vento, enchentes, enxurradas e tempestades elétricas (Viana *et al.*, 2009).

3.1.3. Processo de Ocupação e as Inundações do Rio Caí

A ocupação antrópica na bacia hidrográfica do rio Caí iniciou-se com as tribos indígenas Caingangues, seguidos pelos tropeiros e pelos açorianos. No entanto, a aceleração da ocupação se deu após o processo migratório que culminou com a chegada dos alemães e italianos na região, no Século XIX. De modo geral, a migração ocorreu via transporte fluvial, através do rio Caí. Os imigrantes transitavam às margens do rio e seus principais afluentes, formando as primeiras cidades (COMITECAÍ, 2008).

De acordo com COMITECAÍ (2008), no século XVIII, o rio Caí já era uma importante rota para mercadores espanhóis e portugueses. No final do século XVIII e início do século XIX, tem-se o registro de sesmarias em São Sebastião do Caí, próximas ao rio. A chegada dos alemães se deu na primeira metade do século XIX, os quais se instalaram preferencialmente nos vales dos rios. O município de São Sebastião do Caí surgiu em 1848 e Montenegro em 1857. A partir de 1875, com a chegada dos imigrantes italianos, que se estabeleceram predominantemente na porção norte da bacia, nas escarpas do planalto, cresceu ainda mais a importância econômica do porto de São Sebastião do Caí, uma vez que se intensificava o comércio realizado entre as colônias e a cidade de Porto Alegre. A Figura 19 ilustra o antigo porto de São Sebastião do Caí.

Em virtude da histórica ocupação às margens do rio Caí, alguns municípios enfrentam graves problemas com as inundações, principalmente, Montenegro e São Sebastião do Caí, embora outros também apresentem prejuízos como Pareci Novo, Bom Princípio e Feliz. A periodicidade desses eventos em Montenegro e São Sebastião do Caí, é o fator mais preocupante. Estima-se que, em média, a área urbana deste último é atingida pelas águas a cada 1,5 anos.

Os dados existentes indicam a ocorrência de muitos eventos extremos durante as últimas décadas na bacia. As maiores inundações ocorridas desde os anos 1980 foram as de 1982, 2000 e 2007, ilustradas pelas Figuras 20, 21 e 22. Somente em um intervalo de dois anos, entre setembro de 2007 e 2009, a área urbana de São Sebastião do Caí foi atingida cinco

vezes, sendo que as três últimas ocorreram num intervalo de 45 dias, entre agosto e setembro de 2009. Das cinco inundações, a maior delas ocorreu em setembro de 2007.

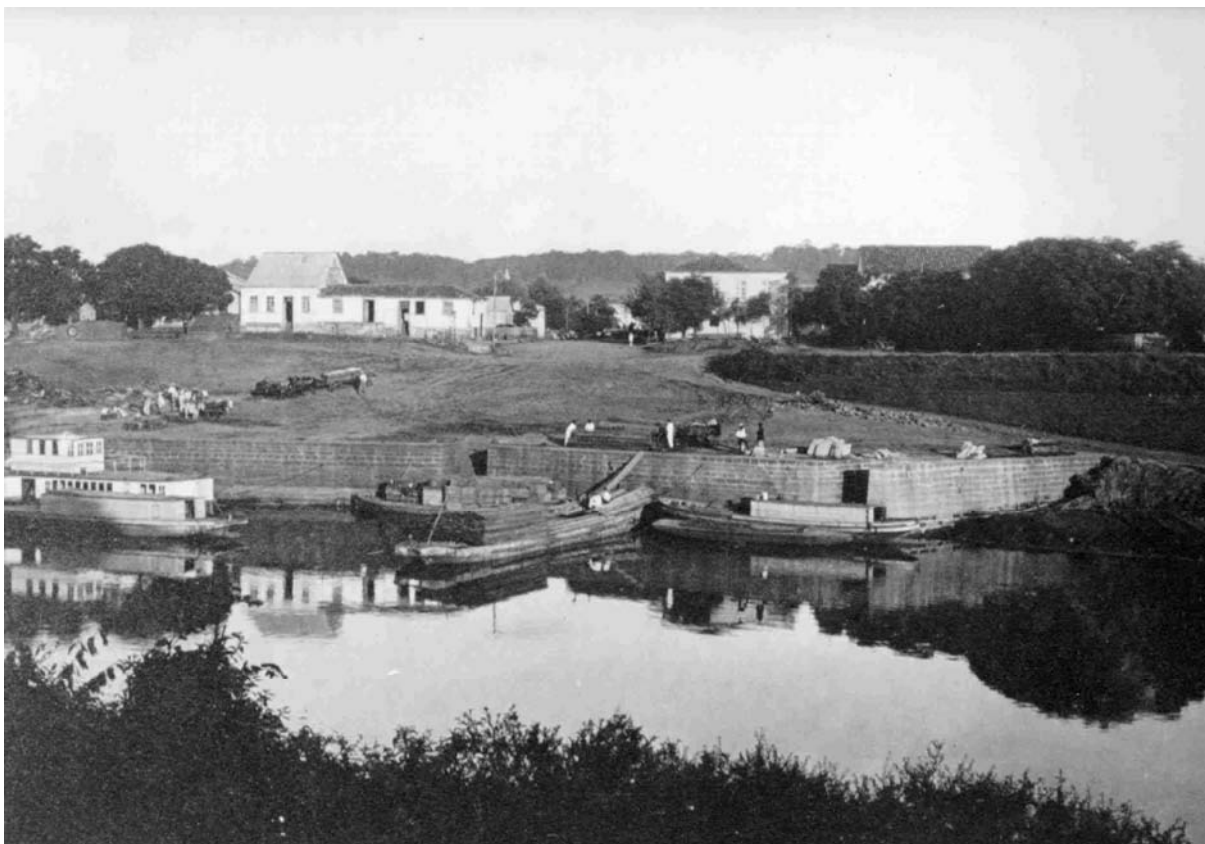


Figura 19 – Porto de São Sebastião do Caí

(Fonte: Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Caí).



Figura 20 – Inundação de 1982: vista panorâmica da cidade de São Sebastião do Caí

(Fonte: Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Caí).



Figura 21 – Inundação de 2000: área central da cidade de São Sebastião do Caí (Fonte: Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Caí).



Figura 22 – Inundação de 2007: bairro residencial da cidade de São Sebastião do Caí (Fonte: Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Caí).

De acordo com a Defesa Civil do Estado do Rio Grande do Sul, a inundação de 24 de setembro de 2007 afetou 14.331 habitantes no município de São Sebastião do Caí, sendo que, destes, 3.038 ficaram desalojados, desabrigados ou foram deslocados. Além disso, centenas de estabelecimentos comerciais e industriais foram atingidos, dos quais, 120 foram danificados, acarretando em altos prejuízos. Houve danos em serviços urbanos essenciais,

como no abastecimento de água, energia e no sistema de transporte. Nas propriedades rurais, grande parte da produção de hortaliças foi perdida, além das áreas adubadas para o plantio na várzea do rio Caí, afetando a única fonte de sustento de inúmeras famílias.

Em Montenegro, o pico da inundação de 2007 ocorreu no dia 25 de setembro. Aproximadamente 5.000 pessoas foram afetadas pelo evento, que ocasionou perdas de grande proporção em todos os setores do município (residencial, comercial e industrial). Foram danificados também bens patrimoniais, itens do sistema viário, entre outros gêneros de primeira necessidade. As Fotografias 23, 24 e 25 ilustram a problemática das inundações no município de Montenegro.



Figura 23 – Inundação de 2007: área urbana de Montenegro.



Figura 24 – Casa “elevada” em bairro frequentemente atingido por inundações.



Figura 25 – Inundação de 2007: água invadindo uma residência.

3.2. Módulo I – Aplicação na Bacia Hidrográfica do Rio Caí

3.2.1. Materiais Utilizados

- a) Dados fluviométricos: série histórica de cotas das estações Barca do Caí (localizada em São Sebastião do Caí), Nova Palmira (em Caxias do Sul) e Passo do Montenegro (em Montenegro), operadas pela CPRM;
- b) Dados da DSG, na escala 1:50.000: curvas de nível com equidistância de 20m, pontos cotados, hidrografia e banhados – digitalizados e vetorizados, disponibilizados pelo Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Caí;
- c) Dados SRTM, resolução espacial de 90m, disponibilizados pela NASA;
- d) GPS de navegação, com precisão de posicionamento aproximada de 10m, disponibilizado pelo Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

3.2.2. Manipulação dos Dados Fluviométricos

O processamento das séries históricas compreendeu a obtenção da cota média do rio, do TR e da distribuição sazonal das cheias e inundações, nos três pontos do rio com estações fluviométricas. Os softwares utilizados nesta etapa do trabalho foram o Hidro 1.0.8, Microsoft Office Access e Microsoft Office Excel.

Das três séries obtidas, a mais completa é a da estação localizada em Montenegro (Passo do Montenegro), com dados diários desde dezembro de 1939. A série histórica da estação Nova Palmira apresenta dados desde outubro de 1942 e a da estação Barca do Caí desde abril de 1947. A Figura 26 ilustra a localização das estações.

A organização e manipulação destes dados para a geração de resultados confiáveis constituiu-se em um processo complexo em virtude de dois fatores: o primeiro fator diz respeito às falhas e erros de leitura verificados nas três séries; o segundo está relacionado à maneira como essas séries são disponibilizadas (em bancos de dados, no formato Access, com

dois níveis de consistência – brutos ou consistidos –, contendo medidas discrepantes para uma mesma data). Ainda assim, pode-se afirmar que essas séries de cotas são consistentes, principalmente se comparadas com a maior parte das séries disponíveis no Brasil.

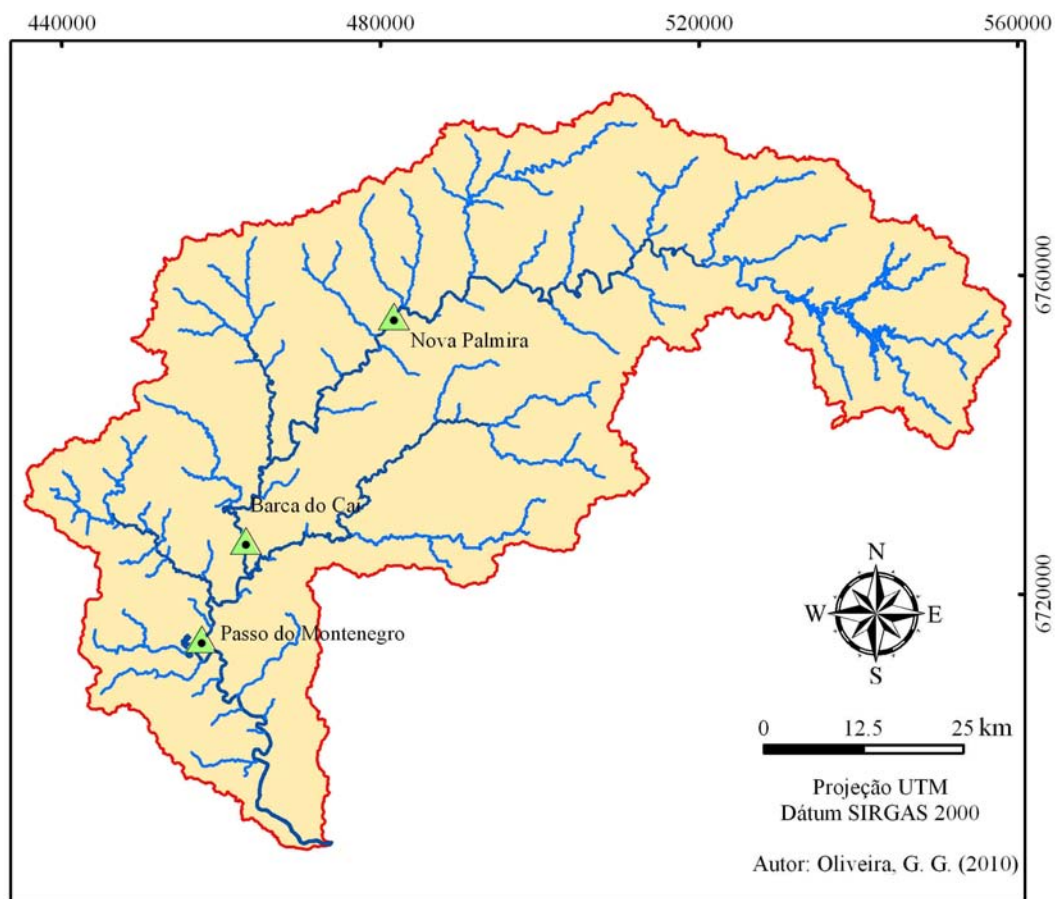


Figura 26 – Localização das estações fluviométricas da bacia hidrográfica do rio Cai.

O banco de dados foi visualizado no software Hidro 1.0.8, disponibilizado no sítio virtual da Agência Nacional de Águas (ANA), no portal HIDROWEB. Os dados foram exportados para o aplicativo Microsoft Office Excel, onde foram organizadas as séries. Depois, foi realizada uma análise dos dados, no sentido de verificar o nível de consistência (dados brutos ou consistidos) mais adequado para cada uma das três séries. Em todas, optou-se por trabalhar com os dados brutos, em virtude de estarem mais completos e livres de erros de interpretação (verificados, em algumas datas, nas séries consistidas).

A cota média do rio foi obtida pela soma das cotas registradas dividida pelo número de registros. Nesse cálculo, a fim de evitar erros grosseiros, foram ignorados os meses com registros incompletos. O cálculo do tempo de retorno – o período que decorre entre duas cheias de igual magnitude – se baseou em Christofolletti (1981), que compreende a seleção do evento de maior magnitude em cada ano da série histórica, o ordenamento dos eventos

conforme a sequência de magnitude (ranking), dos valores mais elevados para os menores, e a aplicação da seguinte equação:

$$TR = \frac{N + 1}{M}$$

Onde: TR é o tempo de retorno; N é o número total de eventos considerados na série; M é o número de ordem (ranking) que representa a posição da cheia na escala organizada.

Após o cálculo do tempo de retorno das cheias nas três estações, realizou-se a análise da distribuição sazonal para verificar os períodos do ano com maior recorrência desses eventos. Visando obter resultados mais confiáveis, trabalhou-se apenas com os anos cujos registros estavam completos.

3.2.3. Modelagem do Terreno com os Dados da DSG

A elaboração do MDE com os dados vetorizados das cartas topográficas da DSG considerou os seguintes tipos de amostras: a) curvas de nível com equidistância de 20m; b) pontos cotados; c) linhas de drenagem com orientação de montante à jusante. Esses dados foram sobrepostos no software ArcGIS 9.2 para verificar a qualidade da vetorização (comparação dos vetores com as cartas em formato analógico) e analisar a distribuição das curvas e dos pontos no interior da bacia.

A partir da análise espacial dos dados, optou-se pela utilização do *Topo to Raster*, implementado no ArcGIS 9.2, na rotina *ArcToolbox – 3D Analyst Tools – Raster Interpolation*. Como mencionado no item 2.3 desta dissertação, o interpolador se diferencia dos demais por considerar as linhas de drenagem da bacia como parâmetros de entrada na modelagem, fazendo com que a elevação dos pixels ao longo do rio decresça à medida que o mesmo se aproxima do exutório da bacia. Isso garante a continuidade do fluxo de escoamento, resultando numa superfície hidrologicamente coerente, aspecto essencial para a modelagem das áreas de inundação.

Os parâmetros de processamento e saída do modelo foram os seguintes: a) resolução espacial: 30m; b) iterações: 40; c) fonte primária de informações: curvas de nível; d) raio de interpolação: 20 pixels.

3.2.4. Espacialização das Áreas Atingidas pela Inundação Ocorrida em 24-25/09/2007

A inundação ocorrida nos dias 24 e 25 de setembro de 2007 foi uma das maiores já registradas na bacia. A espacialização deste evento contribui para o entendimento das inundações e permite também avaliar a qualidade dos dados altimétricos utilizados neste módulo. Além disso, por se tratar de um evento de alta magnitude, possibilita estimar, no futuro, o avanço da água em inundações com maior TR.

Esse mapeamento foi realizado a partir de informações coletadas em campo (consulta aos moradores e aos órgãos competentes, observações de marcas deixadas pela água em construções, entre outras), da interpretação de bases morfométricas derivadas dos MDEs SRTM e da DSG (declividade, curvaturas horizontal e vertical, sombreamento do relevo, curvas de nível) e das características associadas à geomorfologia fluvial (sinuosidade, largura e forma do canal).

As bases morfométricas foram geradas no software ArcGIS, na rotina *ArcToolbox – 3D Analyst Tools – Raster Surface*. O mapeamento preliminar das áreas inundadas no evento de 2007 foi realizado sobre estas bases através da interpretação visual das feições do relevo, levando em consideração principalmente as curvas de nível e a declividade.

Com base no mapeamento preliminar, foram identificados os locais que deveriam ser visitados nas atividades de campo, dando prioridade para as áreas mais planas (nos terraços e nas planícies fluviais), onde os dados da missão SRTM e da cartografia da DSG não permitem uma delimitação confiável do limite da inundação. Foram realizados três trabalhos de campo: a) 03, 04 e 05 de abril de 2009; b) 12, 13 e 14 de julho de 2009; c) 04, 05 e 06 de setembro de 2009. O objetivo foi delimitar a inundação de 2007 ao longo dos terraços e planícies fluviais. A Figura 27 apresenta o roteiro de campo, com o trajeto e os locais de parada.

A última etapa deste mapeamento consistiu na atualização (por meio de vetorização) do mapa preliminar através das informações coletadas em campo. A concatenação das delimitações realizadas em campo com as realizadas sobre as bases morfométricas (locais não visitados em campo) originou o produto final, caracterizando-se como o mapeamento da inundação ocorrida em 24 e 25 de setembro de 2007.

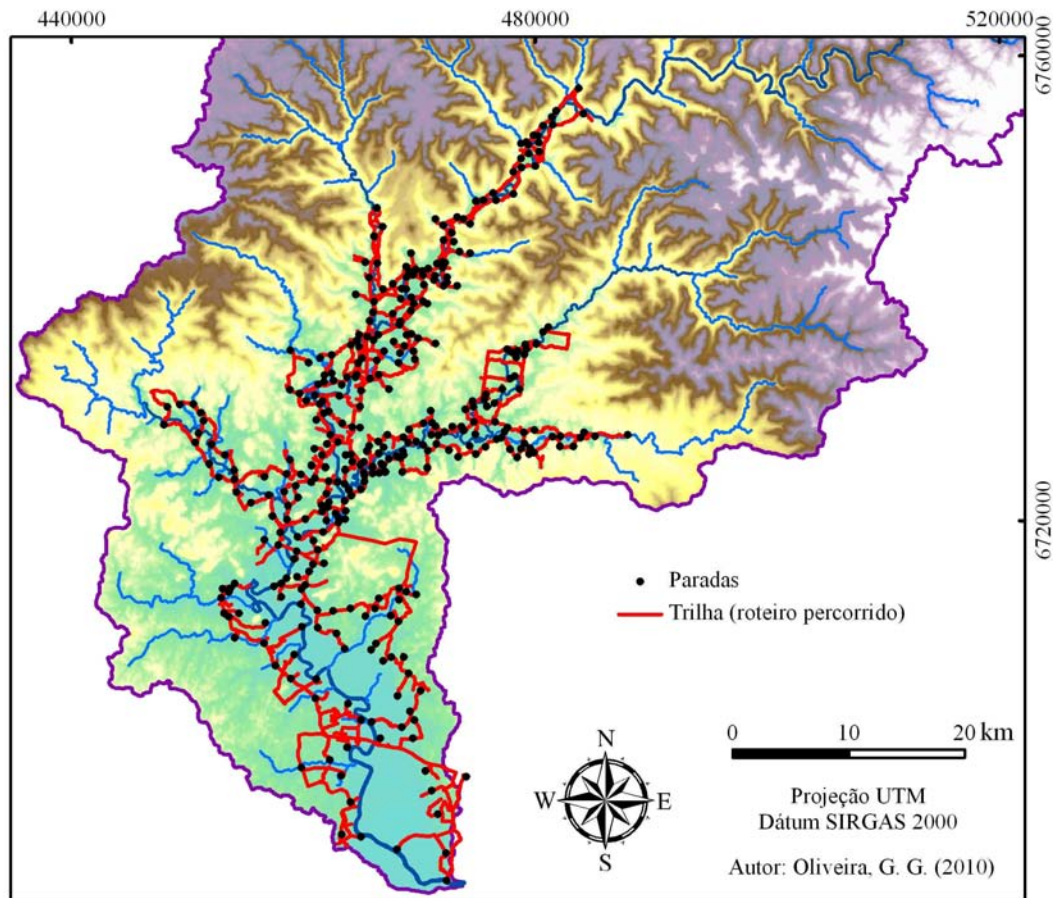


Figura 27 – Roteiro das atividades de campo.

3.2.5. Modelagem das Áreas Inundadas por Elevação do Nível dos Cursos d'água

Neste subitem da dissertação, realizou-se a modelagem, com base nos dois MDEs (SRTM e DSG), das áreas atingidas por inundações a partir da elevação do nível dos principais cursos d'água, de modo a espacializar o avanço da água sobre a superfície da bacia para cada metro de subida no nível do rio. Todo processo foi realizado no ArcGIS 9.2.

Para identificar os principais cursos, foi necessário hierarquizá-los, conforme a metodologia de Strahler (1952), na qual a ordem do curso se altera no encontro com outro de mesma ordem ou maior. Esse método de ordenamento da drenagem é o mais conhecido e o mais utilizado nos trabalhos envolvendo os recursos hídricos.

A partir desse método, foram selecionados somente os cursos d'água de ordem superior ou igual a quatro (Figura 28). Esse critério foi adotado com o auxílio dos trabalhos

de campo, onde se verificou que cursos de ordem inferior a quatro não apresentaram volume de água suficiente para a ocorrência de grandes inundações.

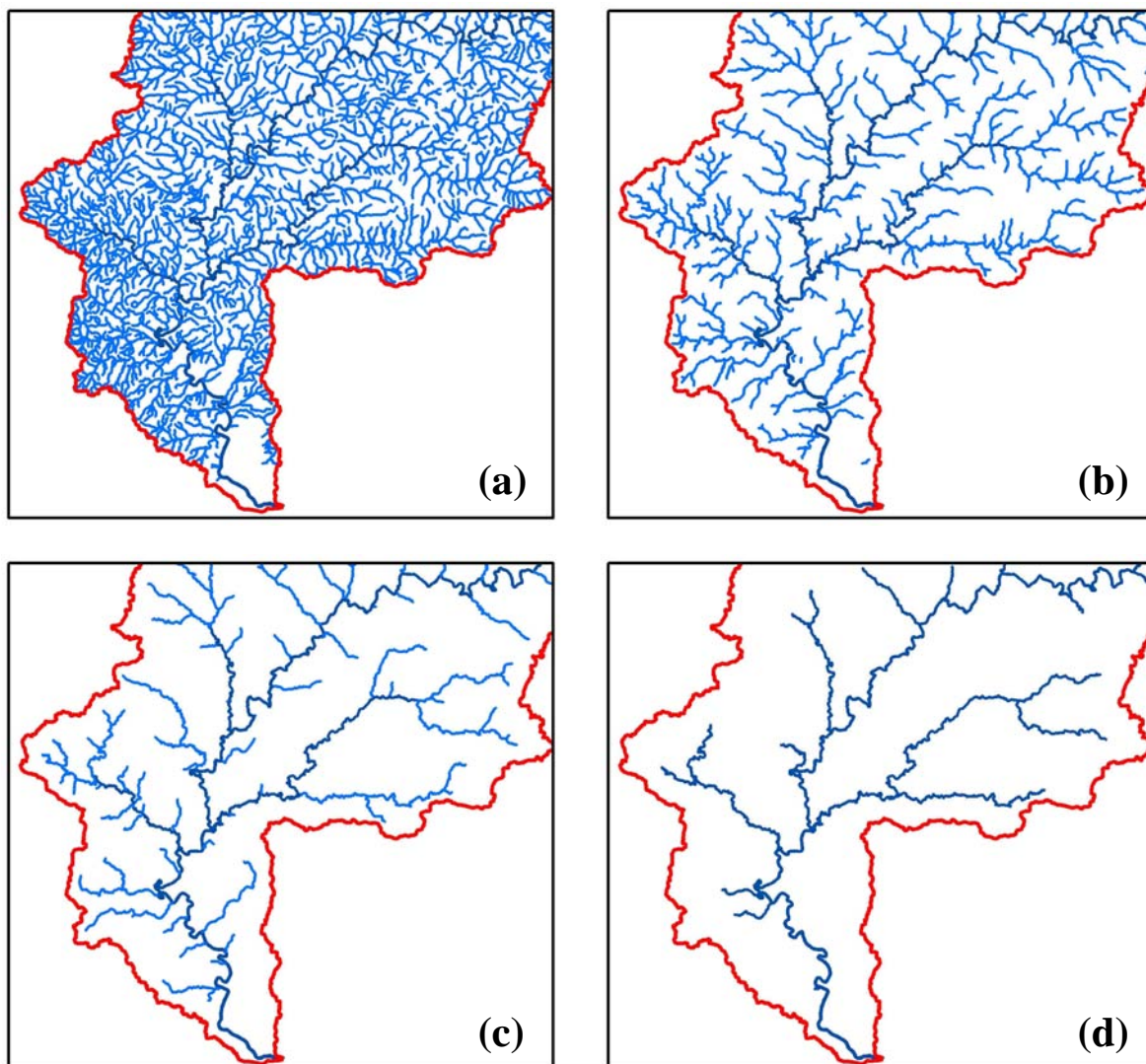


Figura 28 – Rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Caí hierarquizada: (a) de 1ª à 6ª ordem; (b) de 2ª à 6ª ordem; (c) de 3ª à 6ª ordem; (d) de 4ª à 6ª ordem.

Em seguida, foi realizado um recorte da hidrografia principal, de modo a selecionar somente os cursos localizados em cotas altimétricas inferiores a 60m, uma vez que acima desta cota não se observa a presença de várzeas ou terraços planos, característicos das áreas de inundação. Acima dessa cota, apenas as áreas planas do topo do planalto, adjacentes aos reservatórios das barragens estão sujeitas às inundações. No entanto, em virtude da inexpressiva ocupação destas, não constituem área de interesse desse trabalho.

Após o ordenamento e o recorte, os vetores de hidrografia foram segmentados nos vértices, e estes foram convertidos para pontos através da ferramenta *Feature to Point*, na

rotina *ArcToolbox – Data Management Tools – Features*. Nesse procedimento, gera-se um ponto no centro de cada segmento de linha da hidrografia.

Essa conversão é necessária para a extração dos valores de elevação para a hidrografia, já que só é possível executá-la em arquivo de pontos. Os valores de elevação são fundamentais para a modelagem, pois denotam a cota altimétrica de cada segmento do rio, constituindo-se como o ponto de partida da modelagem.

A extração foi realizada na extensão *Spatial Analyst*, ferramenta *Extract Values to Points*, na rotina *ArcToolbox – Spatial Analyst Tools – Extraction*. Esse processamento gera um arquivo de pontos com o valor de elevação na tabela de atributos. Foram extraídos dois valores de elevação por ponto, um proveniente do MDE SRTM e o outro do MDE DSG.

Para modelar a elevação do nível da água nos rios foram criados novos campos na tabela de atributos do arquivo de pontos. Um campo para cada nível de simulação. Com base nos dados fluviométricos e no que foi observado em campo optou-se por modelar cenários de elevação do nível da água entre 1 e 12 metros, sendo esta última, a máxima registrada ao longo do rio Caí.

Dessa forma, foram criados 24 campos na tabela de atributos, sendo 12 para simular o aumento do nível de acordo com os dados do MDE SRTM e 12 com os dados do MDE DSG. A expressão utilizada para cada campo foi a seguinte:

$$C = CR + AN$$

Onde: C é a cota atingida pelo rio no cenário modelado; CR é a cota normal (altimétrica) do rio; AN é o aumento no nível.

Esse cálculo foi aplicado para simular 12 cenários diferentes (com AN entre 1 e 12 metros), para os dois tipos de informação altimétrica (SRTM e DSG). Como resultado, se obteve a cota atingida pelas águas para cada metro de aumento de nível.

Em seguida, iniciou-se o processo de interpolação desses pontos. Foi realizada uma interpolação para cada um dos campos criados, gerando uma superfície de cota atingida para cada cenário (de 1 a 12 metros) e tipo de dado (SRTM e DSG). O método de interpolação utilizado foi o Inverso do Quadrado da Distância (*Inverse Distance Weighted - IDW*), disponível na rotina *ArcToolbox – Spatial Analyst Tools – Interpolation*. Como resultado obteve-se 24 superfícies, nas quais cada célula possui um valor interpolado da cota que é atingida pelas águas.

A espacialização das áreas afetadas pelas águas (inundadas) ocorre através do cruzamento de cada superfície com o seu respectivo MDE. Esse procedimento foi realizado de forma automática através da ferramenta *Raster Calculator*, disponível na extensão *Spatial Analyst*. Esta ferramenta realiza uma comparação entre os valores de dois ou mais *layers*, através de operações lógicas (adição, subtração, multiplicação, divisão, maior que, maior ou igual que, etc.), retornando uma nova superfície de acordo com o objetivo do usuário.

A operação utilizada foi:

$$ALTITUDE\ MDE < ou = COTA\ DE\ INUNDAÇÃO.$$

Com a aplicação dessa operação, se a cota do pixel avaliado (verificada nos MDE's) é igual ou inferior à cota atingida pela água nele (nas superfícies de cada cenário), o mesmo é dado como inundado. Do contrário, se a cota do pixel avaliado é superior à cota atingida pela água no local, o mesmo é dado como livre de inundação (seco).

Para finalizar, foi realizada uma análise topológica para restringir os pixels inundados apenas aos conectados à rede hidrográfica. Isto é, se um dado pixel possuir cota inferior ao nível do rio em um determinado cenário de inundação, porém não estiver conectado topologicamente com a hidrografia (direta ou indiretamente), o mesmo será considerado livre de inundação. Esse critério representa de forma adequada a presença de barreiras que impedem o avanço das águas, como diques, estradas, etc.

3.3. Módulo II – Aplicação na Área Urbana de São Sebastião do Caí

3.3.1. Materiais Utilizados

- a) Dados fluviométricos: série histórica de cotas das estações Barca do Caí (São Sebastião do Caí) e Nova Palmira (à montante, no município de Caxias do Sul);
- b) Nivelamento municipal, fornecido pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), realizado por técnicas de topografia, escala aproximada 1:2.000;
- c) Dados altimétricos (curvas de nível e pontos cotados) compatíveis com a escala 1:10.000;
- d) Imagem de satélite QuickBird georreferenciada através de posicionamento relativo por GPS, com resolução espacial de 0,61m;
- e) Receptor de sinal GPS, de navegação, com precisão de posicionamento aproximada de 10m.

3.3.2. Modelo Matemático de Previsão de Enchentes e Inundações

O modelo matemático de previsão elaborado neste módulo baseou-se na relação cota-cota apresentada em Eckhardt (2008), conforme a descrição realizada no item 2.5 desta dissertação. Neste procedimento de modelagem, foram utilizados os valores de cotas de duas estações fluviométricas: Nova Palmira (à montante) e Barca do Caí (local da previsão).

O modelo se baseia na relação entre as cotas máximas atingidas nas duas estações em eventos de grande magnitude ao longo da série histórica. A distância entre elas é de 54,9km e o tempo que decorre entre o pico da cheia em Nova Palmira e na Barca do Caí varia entre 20h e 28h, sendo este intervalo de tempo, a antecedência média na previsão do pico da inundação.

A seleção de eventos para o processo da modelagem matemática teve como referência a série de São Sebastião do Caí e baseou-se em dois critérios: a) o maior evento anual registrado; b) todos os eventos com TR superior a dois anos. Com esses critérios, foi

garantida a seleção de, no mínimo, um evento por ano, não descartando nenhum nível de inundação com TR superior a dois anos.

Depois de selecionados os eventos e extraídas as cotas atingidas em São Sebastião do Caí, foram coletadas as cotas alcançadas, nos mesmos eventos, porém com um dia de defasagem, na estação à montante (Nova Palmira) para verificação da correlação e posterior regressão. Estes foram inseridos no pacote estatístico LabFit, que seleciona uma das centenas de funções de ajuste de curva para os dados, de acordo com o Qui-Quadrado Reduzido. O algoritmo utilizado para o ajuste foi o Levenberg-Marquardt.

O resultado é uma expressão que calcula a cota a ser atingida na Barca do Caí, em função da cota registrada à montante, além de um arquivo gráfico com a espacialização das amostras e a curva ajustada. Além disso, o pacote estatístico LabFit disponibiliza as faixas de confiança e a precisão do modelo para vários intervalos ao longo da curva ajustada, permitindo assim uma avaliação mais criteriosa da modelagem.

3.3.3. Modelo Digital do Terreno de São Sebastião do Caí

A modelagem do terreno foi realizada no software ArcGIS 9.2, a partir dos materiais disponíveis para o município – o nivelamento municipal (pontos cotados em escala aproximada de 1:2.000) e as curvas de nível e os pontos cotados de uma base altimétrica na escala 1:10.000. Ressalta-se que a qualidade e precisão desses dados são inferiores aos obtidos por uma restituição aerofotogramétrica, que seriam mais adequados para a elaboração deste tipo de modelagem.

A base altimétrica na escala 1:10.000 só foi utilizada nas áreas sem ocupação urbana, justamente as de menor interesse neste módulo. O nivelamento abrange a área urbanizada do município e apresenta um bom detalhamento. No entanto, neste segundo, os valores não representam a elevação, mas sim cotas ajustadas a um referencial no terreno.

Assim, a primeira etapa da elaboração do modelo do terreno compreendeu a compatibilização das bases, na qual foram estabelecidas relações entre os valores de elevação da base altimétrica e as cotas do nivelamento. A diferença de valores entre as bases foi verificada numa análise automática, pixel a pixel, nas áreas do município com ambos os registros. Os valores da base altimétrica foram convertidos para a escala de valores do nivelamento municipal.

Em seguida, com os dados já compatibilizados, foi realizada a concatenação, de maneira a organizar todos os dados num único arquivo vetorial. Esse processo é feito na ferramenta *Merge*, disponível em *ArcToolbox – Data Management Tools – General*.

A última etapa do procedimento de modelagem da superfície correspondeu à interpolação dos dados. O método adotado para a interpolação foi o de Redes Irregulares de Triângulos – *Triangular Irregular Network*. A escolha desse método levou em consideração uma avaliação preliminar da distribuição das curvas de nível e dos pontos cotados, e dos padrões de forma de relevo presentes na área de estudo.

A rotina para a criação do TIN foi a seguinte: *3D Analyst – Create/Modify TIN – Create TIN from Features*. Como resultado final deste processo, obteve-se um modelo digital do terreno de alta precisão altimétrica nas áreas urbanizadas, onde foram utilizados os dados do nivelamento municipal, e de média precisão nas demais áreas.

A combinação deste modelo com a imagem de satélite QuickBird permitiu a visualização da área de estudo em 3D, através da extensão ArcScene. Esse recurso se mostrou interessante para a apresentação dos cenários de inundação de forma mais didática.

3.3.4. Simulação e Espacialização das Áreas de Inundação por TR

A última etapa do Módulo II compreendeu a simulação e espacialização das áreas de inundação por tempo de retorno, e a identificação dos setores mais impactados (uso residencial, comercial e industrial). Os intervalos de TR utilizados foram de 30, 10, 5 e 2 anos, e os valores foram extraídos do cálculo realizado no subitem 3.2.2. Em virtude da indisponibilidade de uma base digital de uso urbano, a identificação dos setores econômicos se deu através da interpretação visual sobre a imagem QuickBird e das observações realizadas nas atividades de campo.

O mapeamento das áreas atingidas foi gerado de forma automatizada, utilizando um algoritmo que cria um arquivo vetorial compreendendo todas as áreas com cota inferior à desejada, desde que não haja impedimentos para a passagem de água (diques ou barreiras). A função utilizada foi a *Less Than Equal*, disponível no software ArcGIS 9.2, através da rotina *ArcToolbox – Spatial Analyst Tools – Math – Logical*. Juntamente com o mapa de inundação na área urbana de São Sebastião do Caí, foram elaboradas simulações em perspectiva 3D para ilustração dos cenários de inundação por TR.

Por falta de registros e informações referentes ao comportamento do avanço da água sobre a área urbana de São Sebastião do Caí, considerou-se uma única cota de inundação para

todo município em cada cenário, diferentemente do que ocorre na realidade. Dessa forma, o modelo considerou que a água avança de forma plana sobre área urbana, desconsiderando o desnível existente na lâmina d'água ao longo do trecho. Essa simplificação não compromete significativamente a qualidade do modelo, uma vez que o desnível no rio no trecho compreendido pela cidade é bastante sutil (inferior a um metro).

A avaliação do modelo do terreno e da espacialização das áreas de inundação foi realizada a partir do mapeamento da inundação ocorrida em 24/09/2007 (TR de 30 anos). A verificação da real extensão da inundação nesta data se deu em trabalhos de campo, tomando como referência as informações fornecidas pela Defesa Civil e pela população local, além das manchas causadas pela subida da água do rio, observadas nas paredes e muros. O posicionamento foi realizado a partir do receptor de sinal GPS. Os pontos foram coletados de forma bem distribuída pela área urbana, alguns no limite do extravasamento das águas e outros em locais que ficaram submersos (nestes, foi anotada a altura da lâmina d'água para avaliação do modelo).

3.4. Módulo III – Aplicação na Área Urbana e Entornos de Montenegro

3.4.1. Materiais Utilizados

- a) Dados fluviométricos: série histórica de cotas das estações Passo do Montenegro (Montenegro) e Barca do Caí (São Sebastião do Caí);
- b) Tabelas de controle do nível do rio Caí, de hora em hora, na régua instalada na TANAC S.A, disponibilizadas pela própria indústria;
- c) Plantas cadastrais (escala 1:2.000) restituídas e desenhadas em 1991, a partir de levantamento aerofotogramétrico (escala 1:8.000) realizado em 1989, disponibilizadas pela Prefeitura Municipal de Montenegro;
- d) Dados SRTM;
- e) Imagem de satélite QuickBird ortorretificada através de pontos obtidos por posicionamento relativo com GPS, dos RPC's (*Rational Polynomial Coefficients*) e de um MDE;
- f) Planta de zoneamento de uso e ocupação do solo (Plano Diretor Municipal de Montenegro), atualizada em 2004;
- g) Receptor de sinal GPS.

3.4.2. Modelo Matemático de Previsão de Enchentes e Inundações

O modelo de previsão de enchentes e inundações para a área urbana e entornos de Montenegro seguiu a mesma metodologia (critérios de seleção de eventos, software utilizado, etc.) do apresentado para São Sebastião do Caí (subitem 3.3.2). Porém, nesta modelagem, foram utilizados os valores de cotas das estações fluviométricas Barca do Caí (à montante) e Passo do Montenegro.

A distância entre as estações é de 20,2km e o tempo de concentração (entre os picos) varia entre 12 e 16h. Embora a distância entre essas estações seja bastante pequena, se comparada à distância entre as estações do modelo anterior, o tempo que decorre entre os picos não é tão inferior em virtude da baixa declividade e diferença altimétrica observada no trecho do rio entre São Sebastião do Caí e Montenegro.

3.4.3. Digitalização e Vetorização das Plantas Cadastrais

As plantas cadastrais, adquiridas junto a Prefeitura Municipal de Montenegro, contêm informações relacionadas à topografia, hidrografia, vegetação e infra-estrutura de toda área urbana do município (totalizando 27 plantas). A utilização desse material se deve a escala de mapeamento detalhada da área de estudo (restituição em escala 1:2.000), na qual se obteve curvas de nível com equidistância de um metro e pontos cotados com precisão submétrica.

Essas plantas foram disponibilizadas em meio analógico, o que implicou no processo de digitalização e vetorização das informações contidas. A digitalização foi realizada em um *scanner* e os procedimentos de registro e de vetorização das plantas digitais no Sistema de Informações Geográficas ArcGIS 9.2.

Embora as plantas possuam coordenadas precisas, os arquivos digitais saem do processo de *scannerização* sem georreferenciamento (coordenadas X e Y do arquivo digital sem vínculo com as coordenadas S e W da projeção UTM). Desse modo, foi necessário realizar um registro desses arquivos digitais com base nas coordenadas das quadrículas desenhadas. Ao final do registro, todas as plantas já estavam sobrepostas à imagem de satélite QuickBird ortorretificada.

Depois do registro, foram criados três arquivos vetoriais (*shapefiles*): arquivo de ponto para os pontos cotados; arquivo de linha para as curvas de nível; arquivo de linha para a hidrografia. Foram vetorizadas somente as curvas e pontos com elevação inferior a 15 metros, tendo em vista que as cotas superiores não apresentam riscos de inundação.

A vetorização foi realizada em escala visual de 1:500 (quatro vezes superior à escala da planta), a fim de evitar erros grosseiros no procedimento. Esse critério garantiu que os vetores tivessem a mesma exatidão do produto original, permitindo a produção de um modelo digital de elevação compatível com a escala das plantas (1:2.000). Juntamente com a vetorização, procedeu-se o preenchimento dos atributos das curvas de nível e dos pontos cotados, ou seja, a inserção do valor de elevação no banco de dados dos vetores.

3.4.4. Modelo Digital de Elevação

A geração do MDE da área urbana e entornos de Montenegro foi realizada a partir da interpolação dos dados vetorizados em escala 1:2.000 e dos dados SRTM (áreas com elevação superior a 15m). Os dados SRTM foram utilizados em áreas que não estão sujeitas às inundações para garantir que o MDE possua um formato retangular, sob a justificativa de reduzir o tempo de vetorização.

Nesta etapa, foram testados dois interpoladores: a triangulação (TIN) e o *Topo to Raster*. De acordo com os testes, o método de interpolação por triangulação representou de forma mais adequada (mais exata) o terreno em boa parte da área de estudo. O interpolador apresentou apenas problemas pontuais, com a formação de triângulos planos (três pontos de uma única curva), principalmente nos talvegues, por onde passam os pequenos cursos d'água. Nesses locais, a implementação *Topo to Raster* obteve melhor desempenho, basicamente em virtude de suas propriedades que garantem a elaboração de superfícies hidrologicamente coerentes.

Assim, com base nos resultados dos testes, optou-se pela geração de um MDE híbrido, conciliando as qualidades dos dois métodos de interpolação. Primeiramente, procedeu-se a interpolação por triangulação por meio da rotina *3D Analyst – Create/Modify TIN – Create TIN from Features*. Em seguida, com a inserção dos mesmos dados, fez-se a interpolação pelo *Topo to Raster*, através da rotina *ArcToolbox – 3D Analyst Tools – Raster Interpolation*.

Depois, de forma automatizada, foram selecionados, através da ferramenta *Select by Attributes*, todos os triângulos planos (*Aspect* igual a -1) obtidos com a primeira interpolação. Nesses locais, foram criados diversos pontos, para os quais foram extraídos os valores de elevação do MDE interpolado pelo *Topo to Raster*.

A partir da inserção desses novos pontos, fez-se a atualização do arquivo TIN. Esse procedimento forçou o algoritmo a não criar triângulos planos. Na atualização, são modificados somente os locais onde houve o ingresso de novos dados, reduzindo o esforço computacional.

Como resultado final, obteve-se um MDE de alta precisão altimétrica nas áreas com cotas inferiores a 15m, e de média precisão nas áreas de entorno. O arquivo TIN foi convertido para o formato de grade (*raster*), com resolução espacial de 0,6m, com a finalidade de tornar a manipulação do modelo mais rápida (arquivo mais leve do ponto de vista computacional). Esse procedimento é realizado pela ferramenta *TIN to Raster*, na rotina *3D Analyst – Convert*.

3.4.5. Espacialização das Áreas de Inundação por Cota e por TR

Esta etapa compreendeu a espacialização das áreas de inundação por cota (intervalos de 50cm) e por TR, e a identificação dos tipos de uso e ocupação do solo mais impactados (uso residencial, comercial, industrial, etc.). Os intervalos de TR utilizados foram de 30, 20, 10, 5 e 2 anos, e os valores foram extraídos do cálculo realizado no subitem 3.2.2.

Para a identificação dos tipos de uso e ocupação atingidos pelas inundações em diferentes cenários, utilizou-se a planta de zoneamento do Plano Diretor Municipal de Montenegro, atualizada em 2004 por levantamento aerofotogramétrico e trabalhos de campo, e a imagem de satélite QuickBird, adquirida no mesmo ano.

O mapeamento das áreas atingidas foi gerado de forma automatizada, assim como no Módulo II, conforme o subitem 3.3.4, através da função *Less Than Equal*. A grande diferença entre os modelos de espacialização de inundações dos municípios de São Sebastião do Caí e de Montenegro é que no Módulo III foram consideradas diversas cotas de inundação para um mesmo cenário, tornando o modelo mais realista. O avanço da água sobre a área de estudo não foi plano, isto é, o modelo representou o desnível existente na lâmina d'água no trecho, assim como nas cartas de inundação apresentadas em Schult & Pinheiro (2003).

Esse aprimoramento da representação do avanço da inundação sobre a cidade de Montenegro foi possível através de pontos de controle coletados em diferentes locais, de forma bem distribuída, onde se pôde estimar (através de marcas em paredes e casas; de relatos de moradores; de informações de órgãos competentes; dos dados do controle realizado pela empresa TANAC S.A) a altura da lâmina da água em dois eventos recentes, um em 2007 e o outro em 2008.

Após a coleta dos pontos, foi possível, a partir da sobreposição destes com o MDE, verificar que a cota de inundação variava espacialmente. As maiores cotas de inundação foram verificadas predominantemente à montante da estação Passo do Montenegro, e as menores à jusante da estação.

Esses pontos foram interpolados pelo método do Inverso do Quadrado da Distância, processo que originou uma superfície de variação na cota de inundação. Ao cruzar essa superfície com o MDE, obteve-se um modelo normalizado capaz de reproduzir o avanço da água (um plano levemente inclinado) de forma mais realista e complexa.

A avaliação do modelo de espacialização das áreas de inundação foi realizada a partir dos pontos coletados em campo que não foram utilizados no processo de criação da superfície de variação da cota de inundação. Todo posicionamento foi realizado a partir de GPS.

3.4.6. Simulação da Inundação de 25 de Setembro de 2007 na área urbana e entornos de Montenegro

A última etapa do Módulo III consistiu em simular a inundação ocorrida no dia 25 de setembro de 2007 na área urbana e entornos de Montenegro. Para esta simulação foram utilizados o modelo de inundação apresentado no subitem anterior (3.4.5) e os dados do controle de nível realizado pela TANAC S.A (com informações de hora em hora do nível da água). Esse processo não foi realizado em ambiente 3D em virtude do tamanho dos arquivos referentes ao MDE e à imagem de satélite, o que necessitaria de uma elevada demanda computacional para a execução da simulação nesse ambiente.

As cotas de inundação atingidas na régua da TANAC S.A foram extrapoladas para todo município baseando-se no modelo de variação apresentado no subitem 3.4.5. Para calibração da simulação também foram consultados os dados da estação Passo do Montenegro, que dispõe de apenas duas leituras por dia.

Na simulação do avanço da água (elevação do nível do rio Caí), considerou-se a presença de barreiras e/ou diques que impedem a passagem da água. Isso significa que, para um pixel ser inundado, é necessário que o mesmo tenha uma cota inferior à cota atingida pela água na estação Passo do Montenegro (compatibilizada) e esteja conectado topologicamente à drenagem (sem nenhum impedimento para a passagem da água). Já, na simulação da retração da inundação (redução do nível do rio), as barreiras e diques foram desconsiderados, pois o nível de água acumulada, em locais isolados, reduz em um ritmo mais semelhante ao nível do rio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os principais resultados obtidos e as discussões pertinentes ao estudo a partir da aplicação dos procedimentos metodológicos mencionados no capítulo anterior. O capítulo está estruturado em módulos, assim como na apresentação dos materiais e métodos, que foram ordenados de acordo com a escala de detalhamento dos modelos (do Módulo I ao Módulo III).

4.1. Módulo I – Bacia Hidrográfica do Rio Caí

4.1.1. Cota Média, TR e Sazonalidade das Cheias e Inundações

Os valores de cota média foram importantes para a obtenção da verdadeira magnitude das inundações, uma vez que o valor registrado na régua não representa o aumento do nível do rio. Por cota média, entende-se o nível normal das águas em cada uma das três réguas das estações fluviométricas operadas pela CPRM.

A cota média é de 1,00m na régua da estação Nova Palmira (Caxias do Sul), de 2,72m na Barca do Caí (São Sebastião do Caí) e de 1,62m na régua da estação Passo do Montenegro (Montenegro). No maior evento registrado na estação Nova Palmira, a cota atingida foi de 9,00m, representando um aumento no nível médio de 8,00m. Em São Sebastião do Caí a maior cota registrada foi de 14,75m (12,03m acima da média), e em Montenegro foi 9,20m (7,58m acima da média).

O resultado dos cálculos de TR das cheias em Nova Palmira, Barca do Caí e Passo do Montenegro é apresentado nas Tabelas 1, 2 e 3, respectivamente. A Tabela 4 ilustra a cota atingida e o aumento do nível em TR de 2, 5, 10, 20 e 30 para as três estações.

Tabela 1. Tempo de retorno das cheias na estação Nova Palmira, em Caxias do Sul, RS.

Ano	Cota	Ordem	TR	Ano	Cota	Ordem	TR
1986	9,00	1	62,00	2002	5,08	32	1,94
2000	8,80	2	31,00	1961	4,93	33	1,88
1982	8,00	3	20,67	1970	4,91	34	1,82
2007	7,80	4	15,50	1977	4,86	35	1,77
2003	7,40	5	12,40	1956	4,85	36	1,72
1990	7,20	6	10,33	1979	4,76	37	1,68
1980	7,19	7	8,86	1944	4,75	38	1,63
1975	7,03	8	7,75	2005	4,72	39	1,59
1988	6,98	9	6,89	1946	4,38	40	1,55
1983	6,68	10	6,20	1969	4,31	41	1,51
1967	6,61	11	5,64	1947	4,30	42	1,48
1985	6,54	12	5,17	1993	4,20	43	1,44
1989	6,20	13	4,77	1981	4,12	44	1,41
1972	6,05	14	4,43	1974	4,00	45	1,38
1959	5,95	15	4,13	1957	3,96	46	1,35
1998	5,93	16	3,88	1945	3,94	47	1,32
1984	5,90	17	3,65	1955	3,85	48	1,29
1965	5,89	18	3,44	1999	3,66	49	1,27
1963	5,65	19	3,26	1958	3,57	50	1,24
1973	5,64	20	3,10	1964	3,41	51	1,22
1987	5,61	21	2,95	1951	3,35	52	1,19
1978	5,54	22	2,82	1948	3,16	53	1,17
2001	5,52	23	2,70	1960	2,95	54	1,15
1954	5,47	24	2,58	1996	2,73	55	1,13
1971	5,47	25	2,48	1950	2,69	56	1,11
1966	5,40	26	2,38	2004	2,64	57	1,09
1953	5,39	27	2,30	1968	2,63	58	1,07
1994	5,36	28	2,21	1943	2,44	59	1,05
1997	5,26	29	2,14	1952	2,21	60	1,03
1976	5,23	30	2,07	1962	1,47	61	1,02
1949	5,20	31	2,00				

Ao todo, foram utilizados no cálculo do TR das cheias na estação Nova Palmira, 61 eventos, considerados os maiores de cada ano da série histórica. A maior inundação ocorreu em dezembro de 1986, quando o rio atingiu a cota 9m, com TR de 62 anos. O rio atinge a cota 8m com TR de aproximadamente 21 anos, a cota 7m com TR de 7 anos e a cota 6m com TR de 4 anos.

De acordo com os resultados expostos na Tabela 1, três das cinco maiores inundações registradas na estação Nova Palmira ocorreram a partir de 2000 (8,8m em outubro de 2000; 7,8m em setembro de 2007; 7,4m em fevereiro de 2003). Esse dado acena para a possibilidade de um aumento na frequência de eventos de grande magnitude na região, uma vez que não se tem registros de desnivelamento da régua no período compreendido pela série histórica.

Embora existam evidências desse aumento, não é possível concluir que a periodicidade desses eventos tenha se alterado nas últimas décadas em virtude das falhas existentes na série histórica e também dos possíveis erros de leitura.

Tabela 2. Tempo de retorno das cheias na estação Barca do Caí, em São Sebastião do Caí, RS.

Ano	Cota	Ordem	TR	Ano	Cota	Ordem	TR
2000	14,75	1	60,00	1992	11,98	31	1,94
2007	14,70	2	30,00	1993	11,87	32	1,88
1982	14,60	3	20,00	2005	11,74	33	1,82
1956	14,50	4	15,00	1969	11,58	34	1,76
1980	13,98	5	12,00	1976	11,54	35	1,71
1990	13,98	6	10,00	1973	11,50	36	1,67
1954	13,90	7	8,57	1994	11,50	37	1,62
1965	13,74	8	7,50	1995	11,46	38	1,58
1997	13,66	9	6,67	1974	11,44	39	1,54
1984	13,60	10	6,00	1970	11,40	40	1,50
1985	13,60	11	5,45	1967	11,10	41	1,46
1988	13,58	12	5,00	1949	11,00	42	1,43
2003	13,46	13	4,62	1955	11,00	43	1,40
2008	13,38	14	4,29	1953	10,80	44	1,36
1987	13,34	15	4,00	1991	10,80	45	1,33
1986	13,16	16	3,75	1978	10,79	46	1,30
1959	13,15	17	3,53	1964	10,72	47	1,28
1963	13,00	18	3,33	1951	10,60	48	1,25
1961	12,86	19	3,16	1981	10,38	49	1,22
1966	12,68	20	3,00	1996	10,20	50	1,20
2001	12,56	21	2,86	1999	10,10	51	1,18
1998	12,52	22	2,73	1960	9,84	52	1,15
1975	12,50	23	2,61	1950	9,70	53	1,13
2002	12,48	24	2,50	1979	9,37	54	1,11
1983	12,36	25	2,40	1958	9,10	55	1,09
1957	12,24	26	2,31	1968	8,66	56	1,07
1971	12,18	27	2,22	1948	8,40	57	1,05
1977	12,10	28	2,14	1952	7,58	58	1,03
1989	12,10	29	2,07	1962	5,88	59	1,02
1972	11,98	30	2,00				

A Tabela 2 mostra que a maior inundação registrada em São Sebastião do Caí, com base nas 59 séries anuais completas da CPRM, ocorreu em outubro de 2000, quando o rio atingiu a cota 14,75m (elevação do nível do rio de 12,03m), com TR de 60 anos. A cota de 14m é atingida a cada 10 anos (aproximadamente), a cota 13m possui TR de 3,33 anos e a cota 12m tem TR de 2 anos.

Ao conjugar esses dados com uma análise exploratória do terreno, verificou-se que uma elevação de 8m no nível do rio é suficiente para o extravasamento das águas para a planície de inundação em São Sebastião do Caí. Após isso, não há uma significativa elevação no nível do rio e sim um aumento de área atingida, já que se observa uma variação de apenas 1,12m na cota do rio entre uma inundação com TR de 5 anos e outra com TR de 30 anos. A Tabela 2 mostra também que a cota de extravasamento do leito (10,72m) – valor obtido pela observação do modelo do terreno – é atingida, em média, a cada 1,28 anos.

Tabela 3. Tempo de retorno das cheias na estação Passo do Montenegro, em Montenegro, RS.

Ano	Cota	Ordem	TR	Ano	Cota	Ordem	TR
1941	9,20	1	63,00	1975	7,30	32	1,97
2007	8,70	2	31,50	1953	7,24	33	1,91
1982	8,52	3	21,00	1995	7,13	34	1,85
1942	8,38	4	15,75	1957	7,10	35	1,80
1965	8,32	5	12,60	1977	7,08	36	1,75
1967	8,32	6	10,50	1998	7,07	37	1,70
2000	8,24	7	9,00	1940	6,96	38	1,66
1956	8,20	8	7,88	1945	6,92	39	1,62
1988	8,20	9	7,00	1970	6,92	40	1,58
1984	8,13	10	6,30	1955	6,90	41	1,54
2003	8,05	11	5,73	1994	6,88	42	1,50
1985	8,01	12	5,25	1976	6,85	43	1,47
1944	8,00	13	4,85	1949	6,70	44	1,43
1954	8,00	14	4,50	1947	6,65	45	1,40
2001	8,00	15	4,20	1981	6,64	46	1,37
1997	7,91	16	3,94	1996	6,64	47	1,34
1987	7,90	17	3,71	1974	6,52	48	1,31
1959	7,80	18	3,50	1964	6,35	49	1,29
1990	7,80	19	3,32	1951	6,30	50	1,26
1963	7,70	20	3,15	1999	6,28	51	1,24
1980	7,70	21	3,00	1978	6,27	52	1,21
2002	7,70	22	2,86	1979	6,23	53	1,19
1983	7,62	23	2,74	1946	6,20	54	1,17
1971	7,50	24	2,63	1960	6,04	55	1,15
1986	7,48	25	2,52	1943	5,74	56	1,13
1973	7,45	26	2,42	1950	5,50	57	1,11
1992	7,45	27	2,33	1958	5,50	58	1,09
1966	7,42	28	2,25	1948	5,35	59	1,07
1972	7,40	29	2,17	1968	5,26	60	1,05
1989	7,38	30	2,10	1952	4,76	61	1,03
1969	7,30	31	2,03	1962	3,92	62	1,02

É interessante observar que os dois maiores eventos registrados na série histórica de São Sebastião do Caí (Tabela 2) ocorreram na última década (2000 e 2007), embora existam indícios (relatos de moradores mais antigos) de outros eventos de magnitude superior. Além disso, através de uma observação preliminar dos dados de janeiro a setembro de 2009 (não utilizados na elaboração da tabela de TR) constatou-se que o rio atingiu a cota de 13m (TR de 3,33 anos) em três ocasiões, sendo que em uma delas ultrapassou a cota 14m (TR de 10 anos).

Assim como na estação Nova Palmira, caso a régua não tenha sofrido nenhum tipo de ajuste, os dados acenam para um aumento na frequência de eventos de grande magnitude nos últimos anos. Para compreender os fatores que levam a esse aumento, faz-se necessário, em futuros trabalhos, um estudo aplicado no âmbito da climatologia e meteorologia, e uma investigação mais profunda a respeito de um possível desnivelamento da régua ou de erros de leitura de cota.

De acordo com a série histórica de Montenegro e a tabela de TR (Tabela 3), a maior inundação ocorreu em maio de 1941 (evento que, inclusive, motivou a instalação das outras duas estações), quando o rio atingiu a cota 9,2m (TR superior a 60 anos), única vez em que a cota de 9m foi atingida e ultrapassada. A cota 8m é atingida com recorrência de 5 anos e a cota 7m possui TR inferior a 2 anos.

A Tabela 3 mostra que há uma pequena variação da cota (1m) entre um evento com mais de 30 anos de TR (8,7m em 2007) e outro com TR de 3 anos (7,7m em 1980). Essa diferença é de 2m na estação Barca do Caí e superior a 3m na estação Nova Palmira.

Tabela 4. Cota atingida e aumento no nível do rio por TR.

Nova Palmira			Barca do Caí			Passo do Montenegro		
TR	Cota	Aumento no nível do rio (AN)	TR	Cota	Aumento no nível do rio (AN)	TR	Cota	Aumento no nível do rio (AN)
30	8,80	7,80	30	14,70	11,98	30	8,70	7,08
20	8,00	7,00	20	14,60	11,88	20	8,50	6,88
10	7,20	6,20	10	14,00	11,28	10	8,30	6,68
5	6,40	5,40	5	13,60	10,88	5	8,00	6,38
2	5,20	4,20	2	12,00	9,28	2	7,30	5,68

Esse aspecto é reforçado pela Tabela 4, onde se observa que a diferença de cota entre eventos de baixa magnitude (TR de 2 anos) e de alta (30 anos) decresce de montante à jusante, isto é, das áreas de maior declividade onde o rio está encaixado no vale às áreas de várzeas. A diferença é de 3,60m na estação Nova Palmira, decresce para 2,70m na Barca do Caí e é de apenas 1,40m na estação Passo do Montenegro.

Uma análise comparativa entre os dados das Tabelas 1, 2, 3 e 4, mostra que apenas três inundações tiveram grandes magnitudes em todas as estações, sendo elas: a) junho de 1982 (terceira maior cheia nas três estações) com TR superior a 20 anos; b) outubro de 2000 (maior cheia na Barca do Caí, segunda maior em Nova Palmira e sétima no Passo do Montenegro) com TR superior a 9 anos nas três estações; c) setembro de 2007 (segunda maior cheia na Barca do Caí e no Passo do Montenegro, e quarta em Nova Palmira) com TR superior a 15 anos nas estações.

A maior parte dos eventos não apresentou grande magnitude nos três pontos estudados. Embora exista a possibilidade de erro de leitura nas medidas, esse fato pode ser explicado por fatores locais, como o remanso das águas, as obstruções nos canais, as variações na forma do vale, o microclima, etc. Todos esses fatores podem contribuir na intensificação dos eventos em certos pontos do rio e na amenização destes em outros locais.

A Tabela 4 mostra ainda que o AN é superior na estação Barca do Caí, em São Sebastião do Caí. Isso se deve, em parte, à altura do talude neste ponto, onde se verifica um maior desnível (aproximadamente 8m) entre o rio e a planície de inundação. Além desse, outro fator ajuda a explicar o elevado AN no local: a presença de um ponto de ‘estrangulamento’ do rio a 2km, no sentido jusante, onde o curso principal passa entre dois morros de vertentes íngremes, indicado pela elipse na Figura 29.

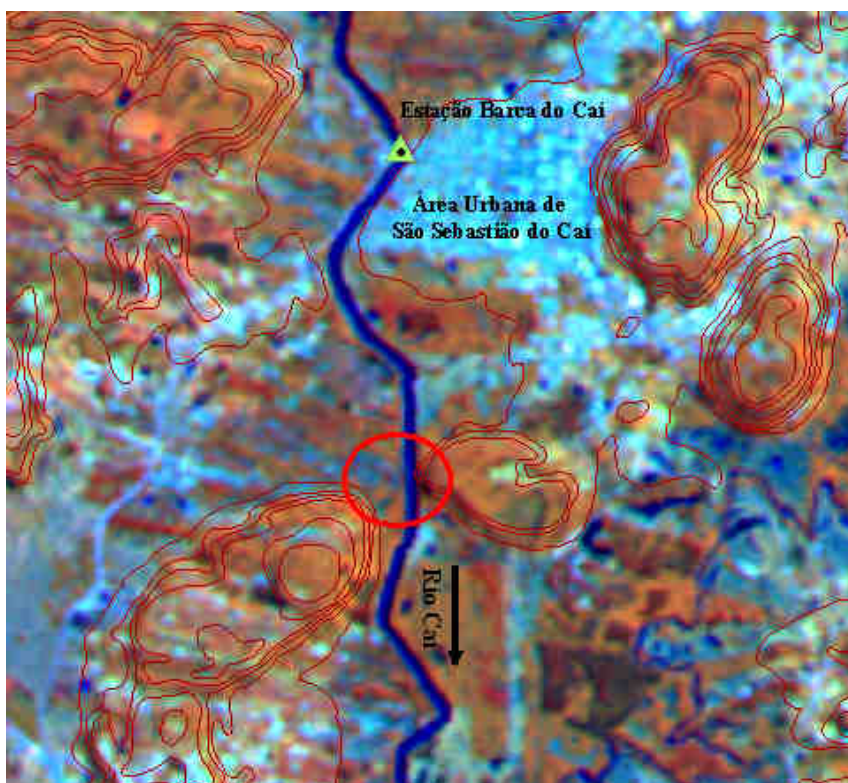


Figura 29 – Estrangulamento do rio à jusante de São Sebastião do Caí, RS.

As Figuras 30, 31 e 32 apresentam, respectivamente, os gráficos com as máximas anuais ao longo das séries históricas de Nova Palmira, da Barca do Caí e do Passo do Montenegro, e a linha de tendência por média móvel centrada em um período de cinco anos. Esses gráficos permitem analisar a distribuição dos grandes episódios de cheias no transcorrer da série de registros e verificar os períodos com inundações de maiores proporções.

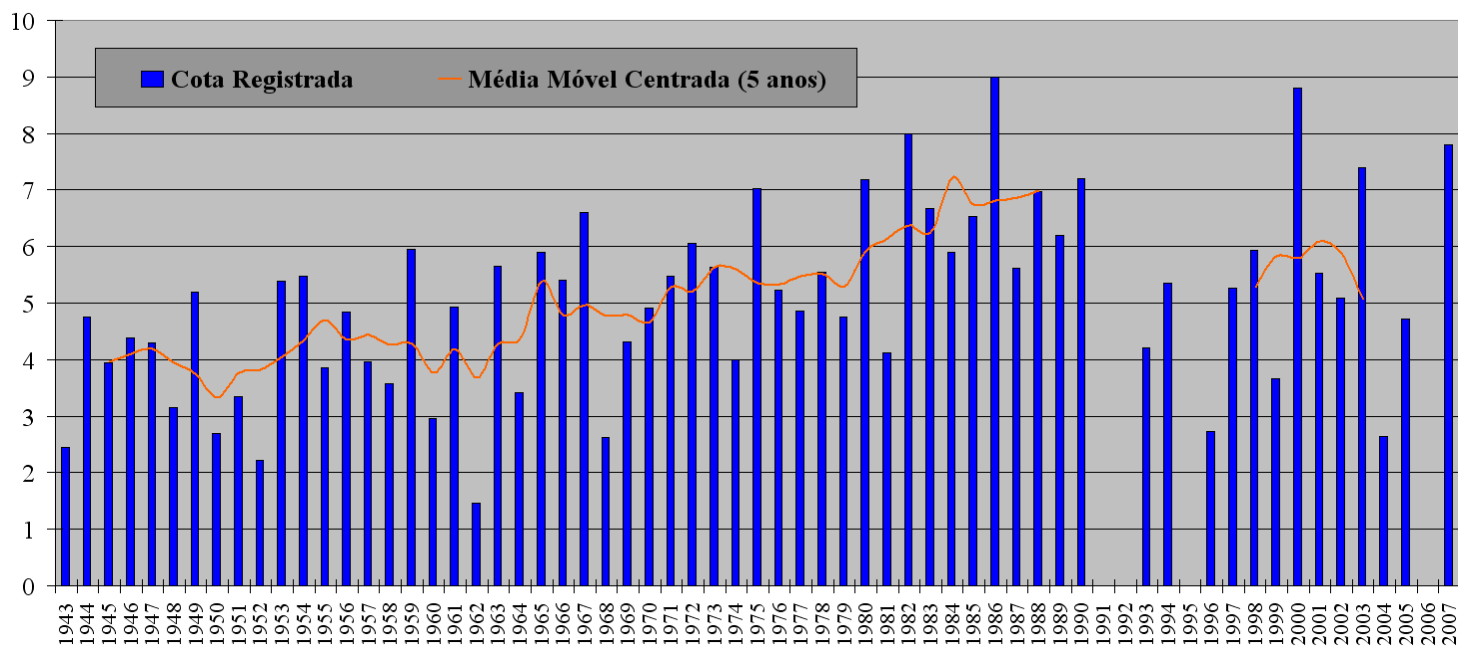


Figura 30 – Cotas máximas anuais na estação Nova Palmira, Caxias do Sul, RS.

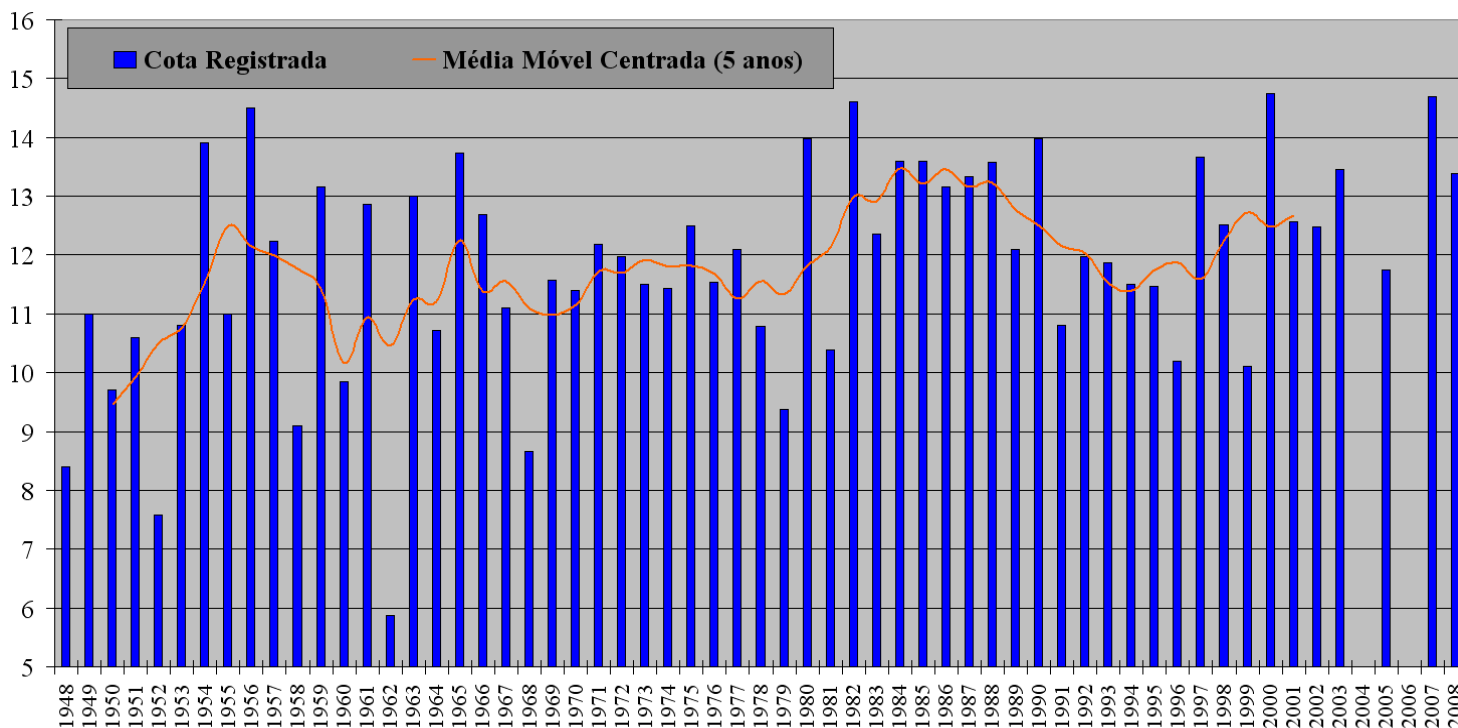


Figura 31 – Cotas máximas anuais na estação Barca do Caí, São Sebastião do Caí, RS.

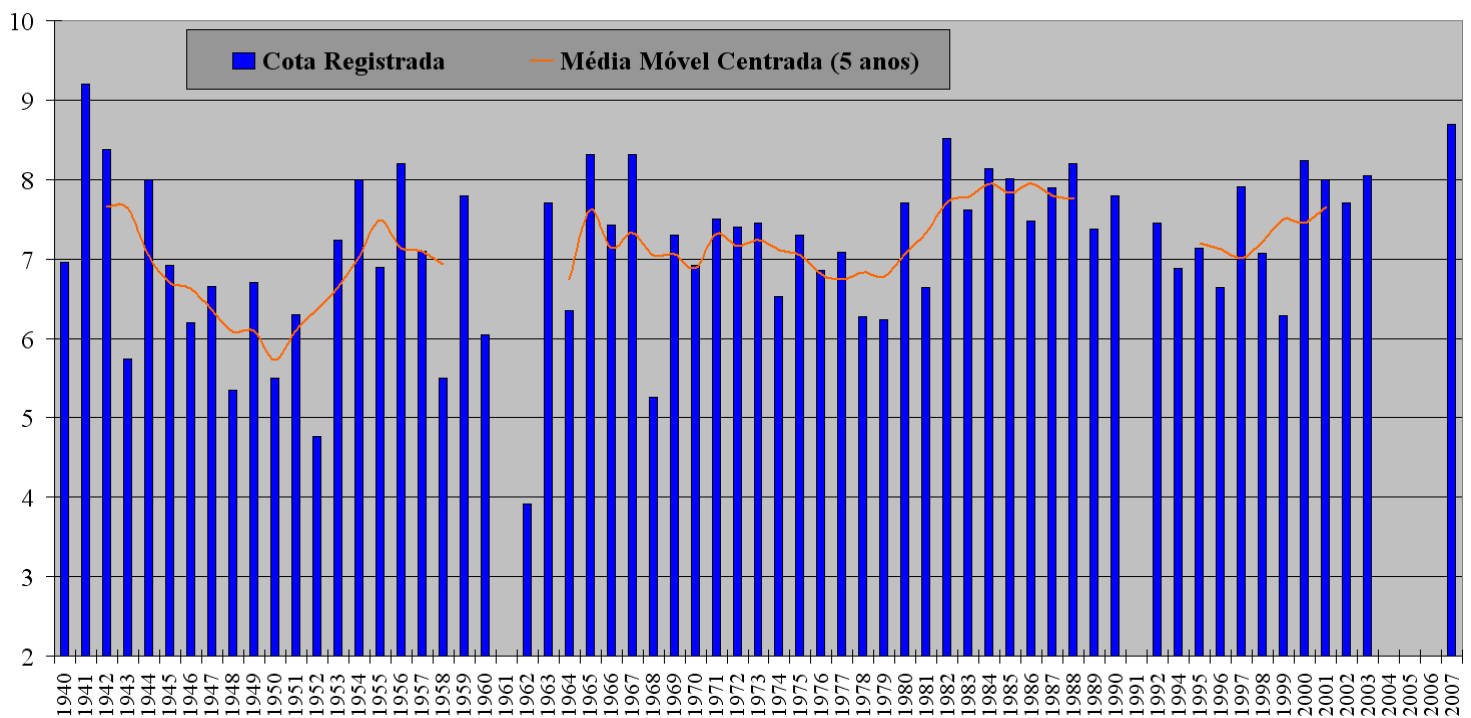


Figura 32 – Cotas máximas anuais na estação Passo do Montenegro, Montenegro, RS.

Os registros de cotas máximas verificados em Nova Palmira (Figura 30) ilustram que as cotas máximas anuais apresentaram um significativo incremento ao longo da década de 1980. A média móvel de cotas superou a cota de 7m apenas em 1984. A cota de 6m foi superada em dois períodos: entre 1980 e 1988; e 2001. Observa-se que antes de 1965 a média móvel centrada em um período de cinco anos nunca havia superado a cota de 5m.

Na série de São Sebastião do Caí (Figura 31), observa-se que existe apenas um período em que a média móvel superou os 13m: entre 1984 e 1988. Antes da década de 1980, apenas em duas oportunidades (entre 1955 e 1957; e 1965) a média móvel ultrapassou a cota de 12m. Isso reforça ainda mais a tendência observada de aumento na frequência de inundações de maiores magnitudes a partir da década de 1980, embora não esteja descartada a possibilidade de erros nas leituras.

Em Montenegro (Figura 32) não foi verificada a tendência de crescimento na frequência de eventos de maior magnitude nas últimas décadas, como nas outras duas estações. Analisando a média móvel, constataram-se três períodos com cotas máximas mais elevadas (próximas a 8m): entre 1942 e 1943; entre 1982 e 1988 (período que coincide com as outras duas estações); e 2001.

Quanto à distribuição sazonal das cheias ao longo das séries históricas, a Tabela 5 revela que há uma concentração entre junho e outubro, representando 77% das cheias em Nova Palmira, 75% na Barca do Caí e 79% na estação Passo do Montenegro. O mês de setembro se destaca em duas estações fluviométricas, sendo que, na Barca do Caí, representa mais do que 25% das cheias (15 eventos), e em Nova Palmira 21,31% (13 eventos). Na estação localizada em Montenegro, o mês com maior ocorrência de cheias foi em junho, totalizando 11 eventos (17,74%). O resultado condiz com o esperado, pois corresponde ao período mais chuvoso do ano (INMET, 2009), em que ocorre o predomínio dos sistemas frontais (Wollmann, 2008).

Tabela 5. Sazonalidade das cheias na bacia hidrográfica do rio Caí, RS.

Nova Palmira			Barca do Caí			Passo do Montenegro		
Mês	Cheias	Proporção	Mês	Cheias	Proporção	Mês	Cheias	Proporção
Jan	2	3,28%	Jan	2	3,39%	Jan	2	3,23%
Fev	2	3,28%	Fev	1	1,69%	Fev	1	1,61%
Mar	1	1,64%	Mar	1	1,69%	Mar	1	1,61%
Abr	1	1,64%	Abr	2	3,39%	Abr	2	3,23%
Mai	1	1,64%	Mai	2	3,39%	Mai	2	3,23%
Jun	10	16,39%	Jun	8	13,56%	Jun	11	17,74%
Jul	6	9,84%	Jul	6	10,17%	Jul	10	16,13%
Ago	7	11,48%	Ago	7	11,86%	Ago	9	14,52%
Set	13	21,31%	Set	15	25,42%	Set	9	14,52%
Out	11	18,03%	Out	8	13,56%	Out	10	16,13%
Nov	1	1,64%	Nov	1	1,69%	Nov	1	1,61%
Dez	6	9,84%	Dez	6	10,17%	Dez	4	6,45%

4.1.2. Mapa da Inundação de 24-25/09/2007 na Bacia do Rio Caí

Neste subitem da dissertação são apresentados os resultados referentes à espacialização das áreas atingidas pela inundação ocorrida entre os dias 24 e 25 de setembro de 2007, realizada conforme a metodologia descrita no subitem 3.2.4. O mapeamento desse evento, de modo geral, revela as áreas mais suscetíveis às inundações (TR médio de 25,7 anos e superior a 15 anos nas três estações), constituindo-se em um mapa de risco de inundação da bacia hidrográfica do rio Caí.

A espacialização desse episódio de inundação é apresentada na Figura 33. O mapeamento, embora apresentado em escala inferior, é compatível com a escala 1:250.000.

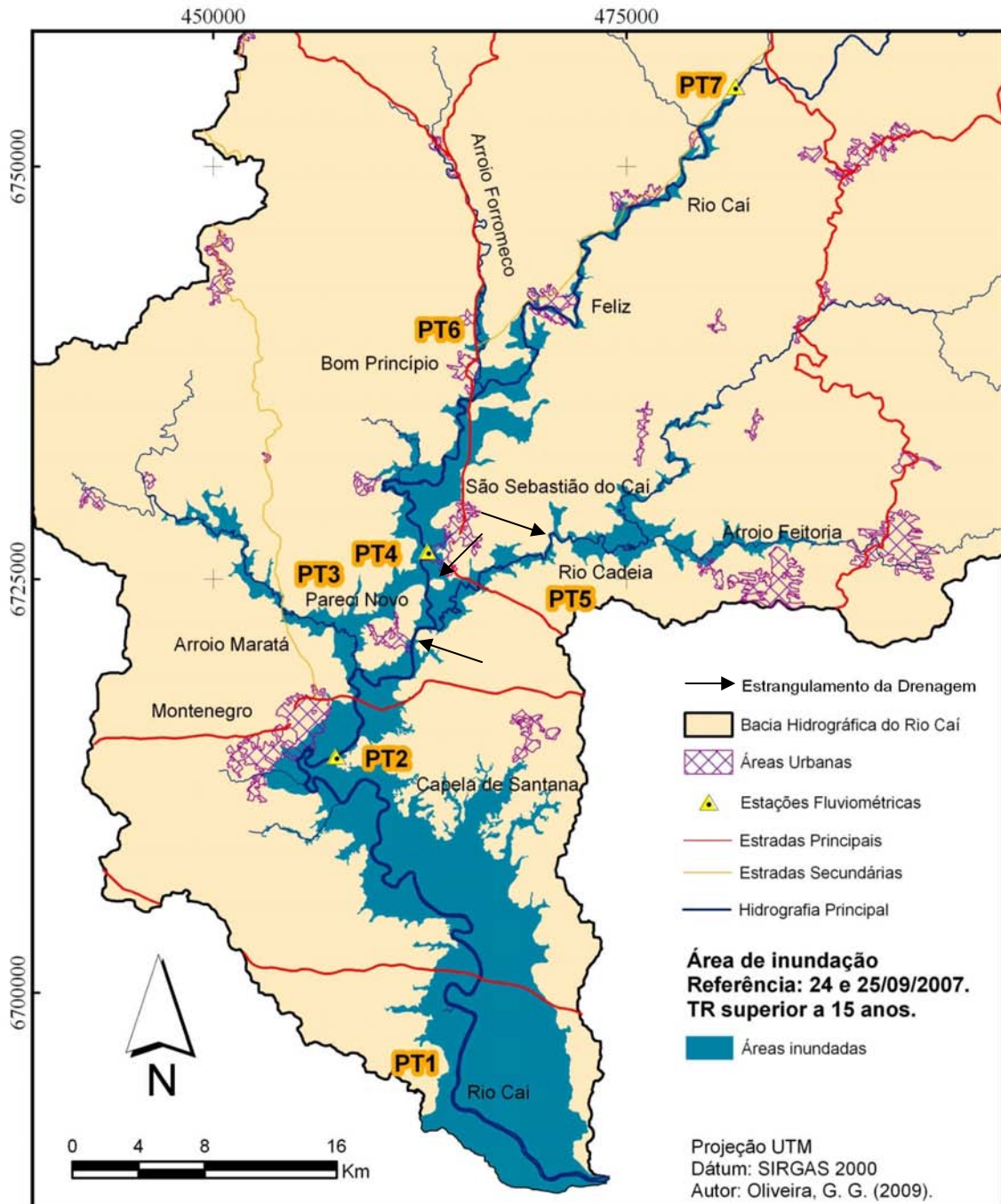


Figura 33 – Áreas inundadas em 24-25/09/2007 na bacia hidrográfica do rio Caí, RS.

A maior parte das áreas inundadas na ocasião estava localizada nas áreas planas das várzeas e terraços fluviais do rio Caí, que se estendem desde a área urbana de Feliz até o exutório da bacia. Outras áreas menores são observadas ao longo do rio Cadeia (PT5) e do arroio Maratá (PT3). Em alguns pontos próximos à foz do rio Caí, constatou-se um extravasamento de até 8km das águas.

A área total de inundação nesse evento foi de 347km² (6,97% da bacia). A declividade média das áreas inundadas é de 1,36%, de acordo com os dados SRTM. O extravasamento do

rio está bem relacionado com o volume de água e a área de concentração, uma vez que este aumenta na medida em que se aproxima da foz. No entanto, verificam-se pontos de afunilamento do rio, sem a presença de áreas de várzea ou terraços aluviais (indicação com setas na Figura 33). Geralmente, à montante desses pontos, forma-se uma extensa área de inundação, possivelmente associada ao represamento das águas.

A Figura 33 mostra também que a maior parte das áreas inundadas está localizada junto à margem esquerda do rio principal, evidenciando que o processo de deposição foi mais intenso nessa margem do que na outra, originando extensas áreas de várzea. Além disso, verificou-se que o rio possui uma forma arqueada, onde à montante da estação Nova Palmira (PT7) tem dois sentidos preferenciais, Sudeste-Noroeste e Leste-Oeste (ver Fig. 12), e à jusante assume os sentidos Nordeste-Sudoeste, Norte-Sul e Noroeste-Sudeste. Estas características estão relacionadas à estrutura geológica da bacia. Seria necessária, portanto, uma análise detalhada do arcabouço geológico e geomorfológico para a compreensão das mudanças de direção do rio e das grandes diferenças espaciais de deposição e erosão, bem como suas relações com as inundações.

Quanto aos municípios mais afetados na inundação de 2007, destacaram-se Montenegro, Pareci Novo, São Sebastião do Caí, Bom Princípio e Feliz. As duas áreas urbanas mais afetadas foram Montenegro (158,86ha) e São Sebastião do Caí (118,40ha). A lâmina d'água chegou a cobrir completamente algumas casas nesses dois municípios, tal a magnitude do evento.

No PT1 (Fig. 33) observou-se em campo e na base cartográfica da DSG a presença de uma extensa área úmida, composta por diversos banhados (Figura 34). A largura do rio no trecho varia entre 120 e 150m, sendo que uma elevação de dois a quatro metros no nível da água do rio já é suficiente para o extravasamento do leito menor e para a inundação de grandes extensões de área (Figura 35). Embora não se tenha medições precisas, dificilmente o nível do rio sobe mais que cinco metros acima da cota média. Estima-se, com base em entrevistas, que as águas subiram entre três e quatro metros durante a inundação de 2007.

O PT2, localizado em Montenegro, também representa uma área de inundação de interesse para o estudo, justamente por afetar o município mais populoso às margens do rio Caí (Figuras 36 e 37). A largura do rio é de aproximadamente 60m e o extravasamento das águas ocorre quando o nível do rio aumenta entre cinco e seis metros em relação à média (em 2007, no pico da inundação, o nível subiu 7,08m). Em campo, foram observados diversos banhados, geralmente com cotas inferiores às observadas no limite do leito menor, em virtude, muitas vezes, da presença de diques naturais e artificiais.



Figura 34 – PT 1: área úmida próxima à foz do rio Caí.



Figura 35 – Rio Caí no PT 1: largura aproximada de 150m.



Figura 36 – Rio Caí, em Montenegro: 3m acima do nível (04/09/2009).

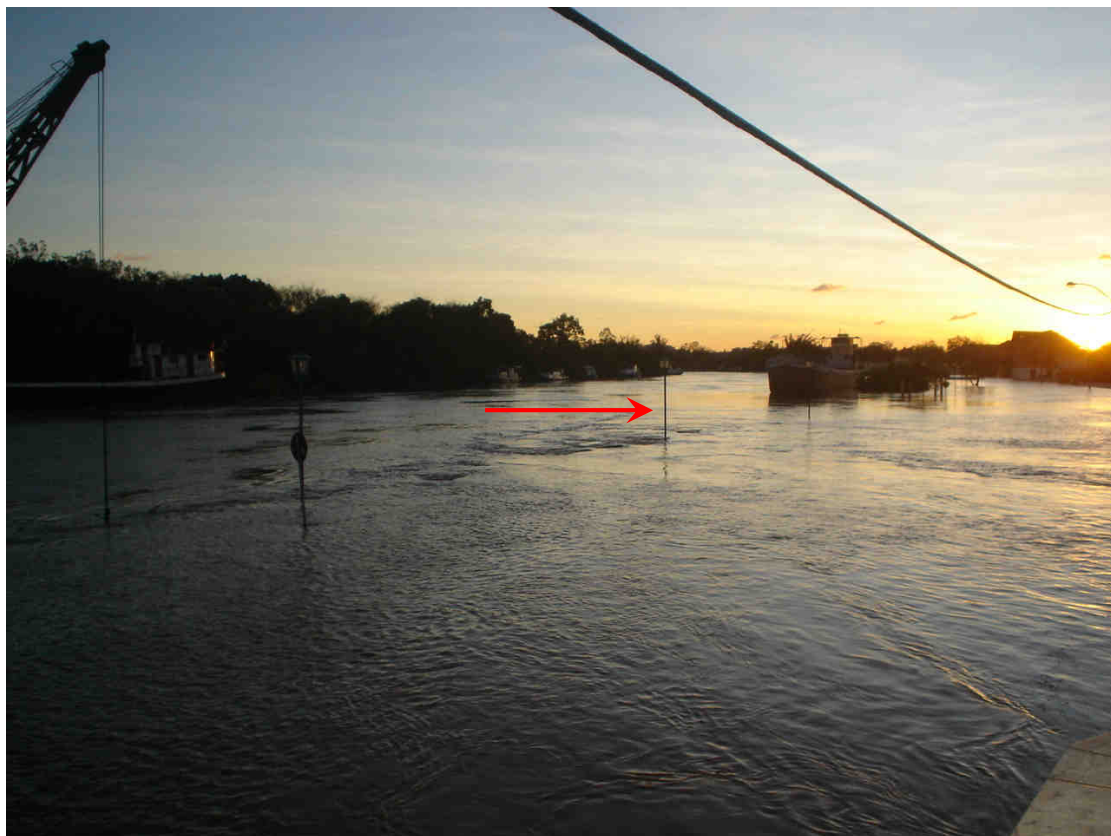


Figura 37 – Rio Caí, em Montenegro: 6,9m acima do nível (19h15m – 24/09/2007).

Também é interessante notar a alta sinuosidade do rio neste ponto, indicando a existência de um condicionamento do substrato e/ou simplesmente uma “tentativa” do regime fluvial de diminuir a velocidade do fluxo. De acordo com COMITECAÍ (2007b), em eventos de alta magnitude o meandro observado no PT2 (Fig. 33) fica totalmente submerso pelas águas, fazendo com que a velocidade do fluxo aumente consideravelmente (Figuras 38 e 39).

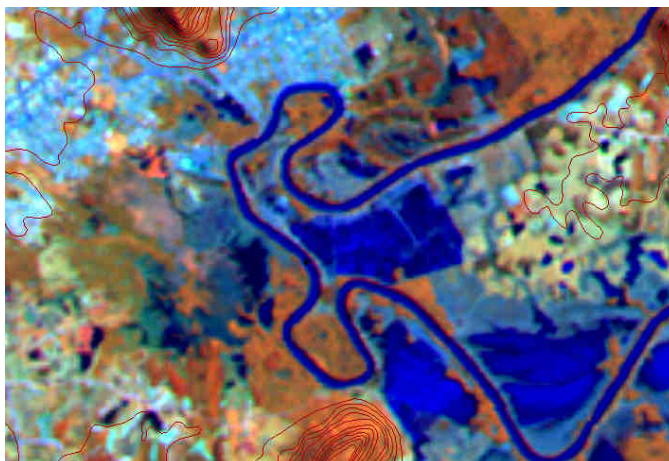


Figura 38 – PT 2: meandro do rio Caí em Montenegro.

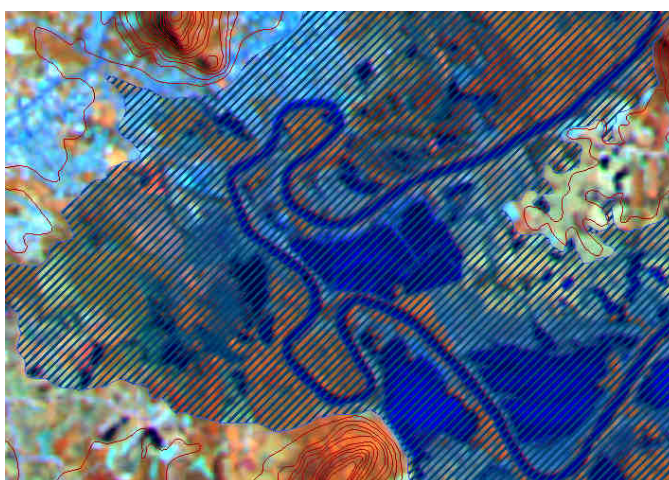


Figura 39 – PT 2: meandro do rio Caí em Montenegro, submerso em 24-25/09/2007.

Outra área que merece destaque é denominada de Várzea do Pareci (Figuras 40, 41, 42 e 43), local sinalizado pelo PT3 na Figura 33. Neste ponto, em eventos de grande magnitude como o de 2007, ocorre uma junção de duas áreas de inundação (conexão da várzea do arroio Maratá com os terraços aluviais do rio Caí, na área urbana de São Sebastião do Caí). Esse fenômeno pode formar uma extensa ilha (um alto topográfico com afloramentos basálticos – Formação Gramado – sobrepostos ao Arenito Botucatu), isolando a área urbana de Pareci Novo das cidades vizinhas.



Figura 40 – Várzea do Pareci inundada em evento de proporções medianas (04/09/2009): local próximo à foz do arroio Maratá, “submerso” nesta foto.



Figura 41 – Área submersa na Várzea do Pareci (foto de 04/09/2009).



Figura 42 – Arroio Maratá à montante do PT 3: a coloração da margem e a direção dos galhos e raízes indicam a altura da lâmina d'água e a força da correnteza.



Figura 43 – Estrada interrompida pelas águas do arroio Maratá (04/09/2009).

Para evitar o isolamento do município durante as inundações, foi promovida uma obra que pode causar impactos no município de São Sebastião do Caí. A estrada estadual RS-124, que margeia o rio Caí e liga as cidades de Montenegro, Pareci Novo, São Sebastião do Caí e Harmonia, foi elevada em mais de um metro em alguns trechos, o que poderá represar o avanço das águas sobre uma margem e intensificar as enchentes na oposta (Figuras 44 e 45).



Figura 44 – Elevação da rodovia RS-124, entre Pareci Novo e São Sebastião do Caí.

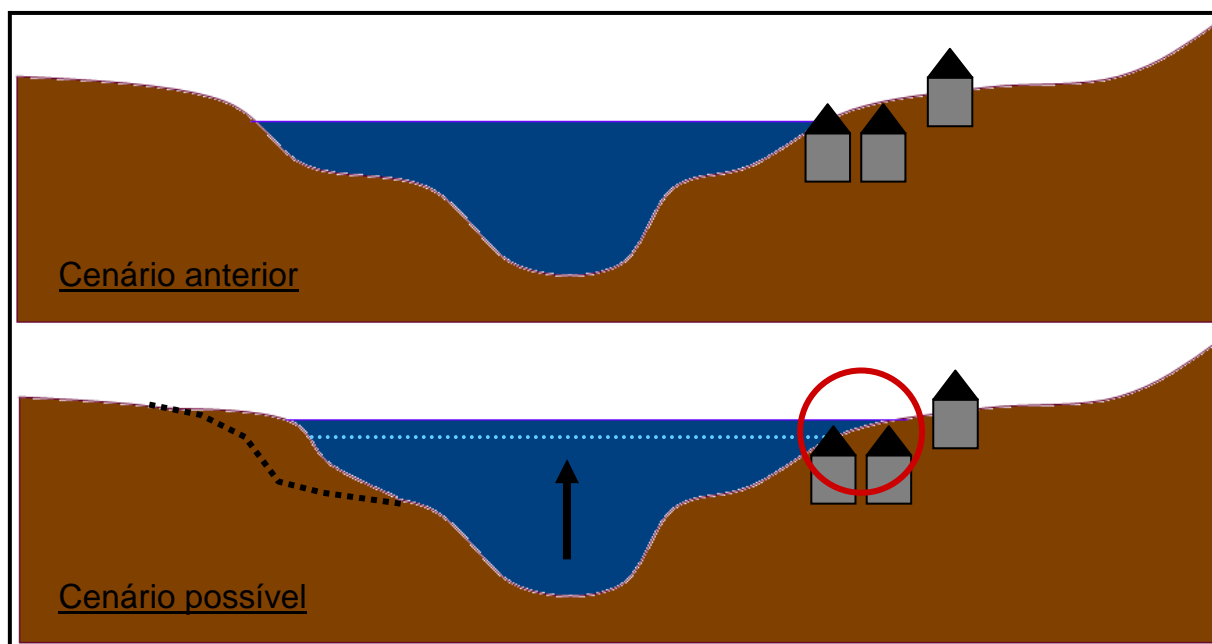


Figura 45 – Esquema do possível efeito da elevação da RS-124 nas enchentes.

O PT4 está relacionado à estação Barca do Caí, em São Sebastião do Caí. Neste ponto, o rio tem em média 45m de largura, e o extravasamento das águas sobre o leito maior ocorre com uma elevação de 7,8m no nível médio do rio. Dos pontos visitados em campo, este é o que apresenta a maior variação na cota do rio, podendo chegar aos 12m. Em 2007, por exemplo, o rio subiu 11,98m em relação à média (Figura 46). No período entre set/07 e set/09, o rio transbordou cinco vezes, todas atingindo moradias da área urbana do município.



Figura 46 – Marcas das inundações de 2000 e 2007 em residência na área urbana de São Sebastião do Caí, RS.

Ao longo do rio Cadeia (Figura 47) se observa algumas áreas de inundação, especialmente na confluência com o arroio Feitoria (PT5). Neste ponto, as inundações costumam ter baixa duração, em virtude de a declividade ser mais acentuada do que nos quatro pontos detalhados anteriormente. A largura do rio Cadeia não ultrapassa os 30m na foz, e 15m no PT5. As águas transbordam o leito sob uma elevação de nível superior a 3m.

Assim como no PT5, o PT6, que está localizado próximo à foz do arroio Forromeco (Figura 48), caracteriza-se como uma área de inundações rápidas. No PT6, no entanto, não ocorrem inundações com a frequência observada nos demais pontos. Além disso, a área de inundação ao longo deste arroio é pequena. Isso se deve à declividade elevada desse trecho do

arroio, a qual confere mais velocidade ao escoamento da água. Além disso, o arroio possui baixa sinuosidade, fator que também contribui para aumentar a velocidade do fluxo. A largura do curso é de 20m no PT6 e o extravasamento das águas ocorre em elevações superiores a quatro metros do nível do arroio.



Figura 47 – Rio Cadeia, próximo à foz, em São Sebastião do Caí, RS.



Figura 48 – Arroio Forromeco: águas com maior velocidade; inundações rápidas.

Por fim, o último ponto destacado é o PT7 (Fig. 33), localidade de Nova Palmira, em Caxias do Sul. A largura média do rio Caí neste trecho é de 30m e o extravasamento das águas é muito raro, em virtude da alta velocidade de escoamento no rio, que impede a formação de áreas mais planas (terraços). Em 2007, o nível do rio ficou em 6,8m acima da média, e resultou em poucos pontos de inundação na área, de curta duração.

4.1.3. Espacialização de Inundações com os MDEs SRTM e DSG

As Figuras 49 e 50 apresentam as áreas de inundação na bacia do rio Caí através da utilização dos dados SRTM e da DSG, respectivamente, na qual se observa o avanço da água em função da elevação de 1 a 12 metros do nível médio dos rios.

Ao analisar a distribuição espacial das áreas modeladas como inundáveis, ambos os resultados foram considerados satisfatórios. O padrão de distribuição das áreas atingidas pela água nos modelos (Figuras 49 e 50) se assemelha ao observado em 24-25/09/2007 (Fig. 33).

Na modelagem a partir dos dados SRTM (Fig. 49), pode-se observar que há uma superestimação das áreas inundadas, principalmente no que se refere à elevação de um metro no nível dos rios (magnitude insuficiente para o extravasamento das águas do leito menor dos principais cursos d'água). Esse aspecto condiz com o que era esperado, uma vez que os dados SRTM não possuem acurácia vertical suficiente para identificar o leito menor dos rios existentes na bacia, fazendo com que praticamente não haja desnível entre o curso d'água e as várzeas ou terraços aluviais adjacentes.

A modelagem das áreas de inundação por elevação do nível dos principais rios com os dados das cartas da DSG (Fig. 50), embora também tenha superestimado as áreas de inundação, apresentou maior concordância com o observado em campo, se comparada à modelagem com dados SRTM. O método de interpolação utilizado (*Topo to Raster*) foi fundamental para a obtenção dos bons resultados nesta modelagem. Os problemas verificados se devem, em geral, à escassez de pontos cotados ao longo dos rios e das margens e à escala de mapeamento.

Analisando pontualmente a qualidade dos modelos, verificou-se que os mesmos não representaram satisfatoriamente as áreas de inundação no PT1. O modelo oriundo do MDE SRTM (Fig. 49) até simulou bem a inundação de 2007, onde se verificou que as áreas de inundação até uma elevação de quatro metros no nível do rio (provável magnitude do evento) se assemelham com o observado na Figura 33. No entanto, ao utilizar o MDE SRTM para simular inundações com magnitudes inferiores, observa-se que o mesmo superestima as áreas

afetadas no PT1. Já no modelo com o MDE DSG (Fig. 50), verificou-se o contrário: a) baixa qualidade no mapeamento de eventos de maior magnitude (como o de 2007), subestimando a área inundada no PT1 (devido à equidistância de 20m das curvas de nível e à escassez de pontos); b) melhor representação de eventos de magnitude inferior a três metros no PT1.

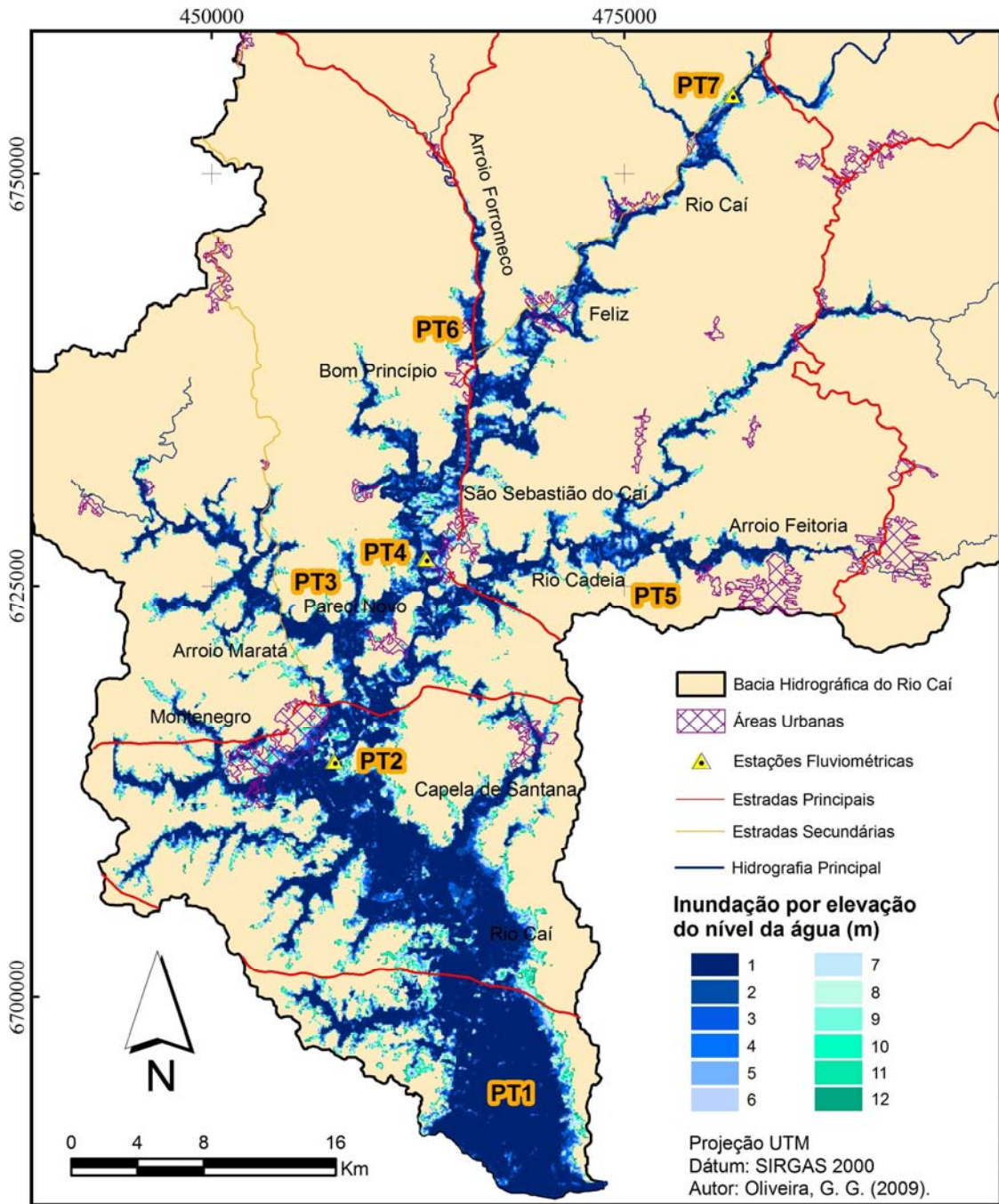


Figura 49 – Áreas de inundação por elevação do nível dos principais rios (MDE SRTM).

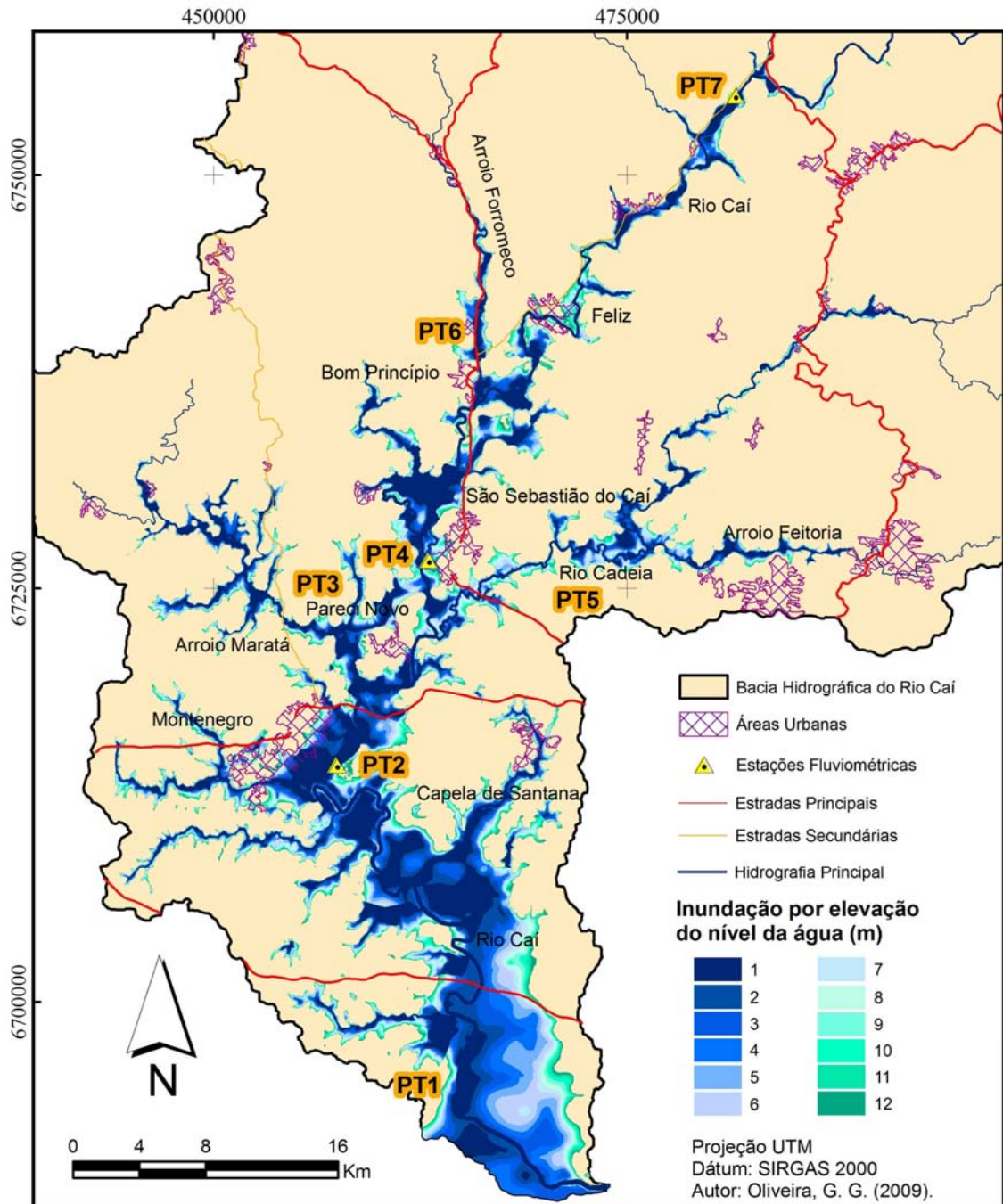


Figura 50 – Áreas de inundação por elevação do nível dos principais rios (MDE DSG).

No PT2, em Montenegro, os MDEs SRTM e DSG superestimaram as áreas inundadas em 2007 (considerando elevação de 7m no nível). A área urbana inundada, de acordo com o modelo SRTM, foi de 474,58ha, ou seja, três vezes superior ao mapeado na Figura 33 (158,86ha). Com o modelo DSG se obteve um resultado um pouco melhor, com 291,61ha atingidos pela inundação.

Em São Sebastião do Caí, o modelo de inundação a partir do MDE DSG representou melhor a inundação de 2007 (elevação de 12m no nível do rio). A área urbana atingida, de

acordo com o cruzamento entre o modelo e a mancha urbana de São Sebastião do Caí, foi de 100,48ha (subestimação de 18ha). O MDE SRTM novamente superestimou a área atingida (275,33ha).

Nos outros pontos, observou-se uma boa relação entre o padrão de distribuição das áreas inundadas nos modelos e no mapeamento de referência. O MDE SRTM, em geral, superestimou mais as áreas atingidas do que o MDE DSG. O motivo disso é o erro associado às áreas inundadas com a elevação de apenas um metro no nível dos rios (em virtude da baixa acurácia vertical e da influência de alvos como a vegetação – efeito dossel).

Essa constatação é bem ilustrada na Tabela 6, na qual são apresentadas as áreas inundadas por elevação da cota do rio nos dois modelos. Para os outros níveis de elevação, a área inundada no modelo DSG é maior do que a observada nos dados SRTM.

Tabela 6. Área inundada na bacia do rio Caí, a partir dos modelos SRTM e DSG.

Elevação da cota do rio	Área inundada SRTM (ha)	Área inundada DSG (ha)
1m	292,77	133,80
2m	40,19	52,32
3m	33,77	47,24
4m	28,54	40,29
5m	24,87	35,24
6m	22,83	30,63
7m	20,86	23,92
8m	19,17	22,58
9m	18,55	21,18
10m	18,39	20,66
11m	16,82	18,52
12m	16,98	18,15
Total	553,74	464,53

É importante lembrar ainda que, embora a área inundada pelo MDE DSG, em cenário de um metro de elevação do nível, seja bastante inferior à observada pelo uso do MDE SRTM, esta também não condiz com o observado na realidade. Como já citado anteriormente, uma cheia de magnitude tão baixa não ocasiona problemas com inundações em nenhum dos cursos d'água estudados detalhadamente.

4.2. Módulo II – Área Urbana de São Sebastião do Caí

4.2.1. Modelo Matemático de Previsão de Enchentes e Inundações

Para o processo de modelagem, foram selecionados 77 pares de cotas (Barca do Caí – Nova Palmira), de acordo com a metodologia apresentada no subitem 3.3.2. O coeficiente de correlação dos dados foi de 0,8247. A função que apresentou o melhor ajuste dos dados, de acordo com o Qui-Quadrado Reduzido, é expressa pela seguinte equação (representada também pela Figura 51):

$$Y_p = \frac{1}{(0,0298 * [X - 3,3538]^2 + 0,2017)} + 1,641 * X$$

Onde: Y_p é a cota prevista para São Sebastião do Caí e X é a cota em Nova Palmira.

O coeficiente de determinação (R^2) da regressão adotada na modelagem foi de 0,7568. Esse valor indica que houve um bom ajuste dos dados. O resíduo médio foi de 0,68m e a amostra que apresentou maior discrepância entre o medido e o previsto obteve um erro de 2,28m. As faixas de confiança variam de acordo com a magnitude da inundação a ser prevista. Nos intervalos de cota com mais amostras, a precisão do modelo e o grau de confiabilidade na previsão foram maiores.

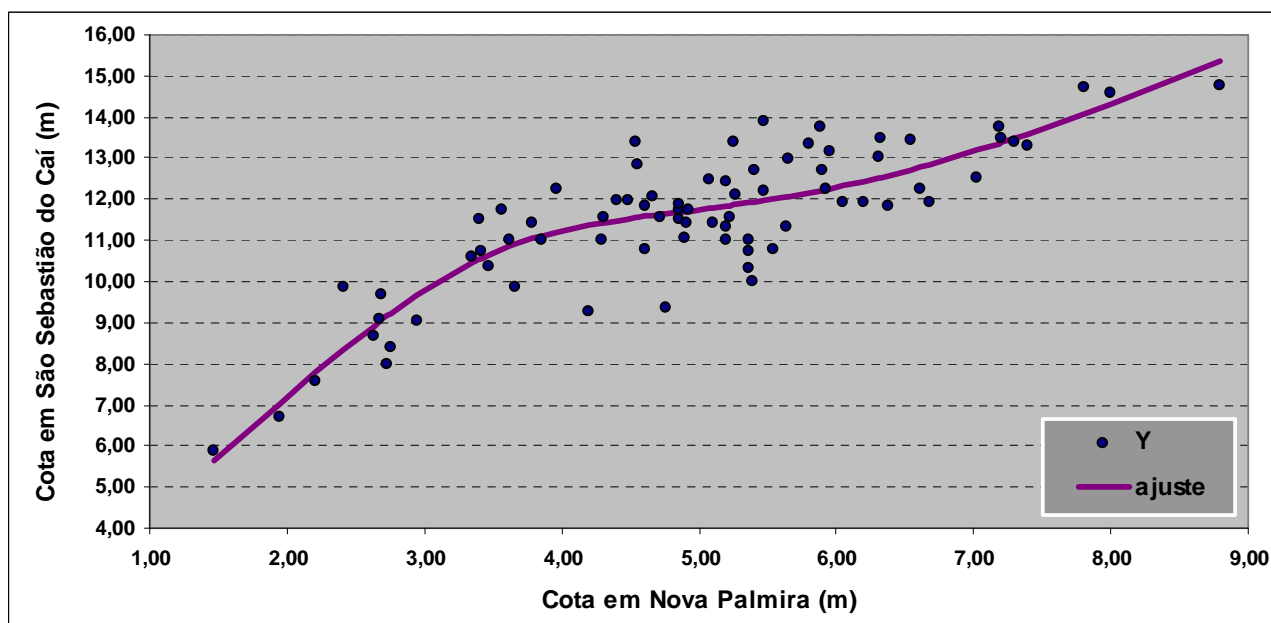


Figura 51 – Linha de ajuste para a previsão da cota do rio Caí, na estação Barca do Caí, em São Sebastião do Caí.

As Tabelas 7 e 8 apresentam, respectivamente, a síntese das características relacionadas à confiabilidade do modelo matemático e as cotas previstas em São Sebastião do Caí nos 77 eventos selecionados. A precisão média do modelo para a previsão de cotas entre 11m e 12m é de 0,65m. Logo, se a cota prevista em São Sebastião do Caí for de 11,40m, significa que com 95% de confiança o nível do rio ficará entre 11,075m e 11,725m (0,325m para mais ou para menos). A mesma regra se aplica para os outros intervalos de previsão, variando somente a faixa de confiança.

Tabela 7. Síntese das características para avaliação da confiabilidade do modelo.

R ²	0,757
Resíduo Médio	0,68m
Erro Mínimo	0,00m
Erro Máximo	2,28m
Faixa de Confiança (95%)	
Previsão de cotas entre 11m e 12m	de (Yp - 0,325m) a (Yp + 0,325m)
Previsão de cotas entre 12m e 13m	de (Yp - 0,310m) a (Yp + 0,310m)
Previsão de cotas entre 13m e 14m	de (Yp - 0,475m) a (Yp + 0,475m)
Previsão de cotas > 14m	de (Yp - 0,715m) a (Yp + 0,715m)
Precisão do Modelo (95%)	
Previsão de cotas entre 11m e 12m	0,65m
Previsão de cotas entre 12m e 13m	0,62m
Previsão de cotas entre 13m e 14m	0,95m
Previsão de cotas > 14m	1,43m

De acordo com os dados apresentados na Tabela 8, 60 eventos (77,92%) obtiveram resíduo inferior a 0,80m na cota prevista. Apenas duas cotas previstas apresentaram resíduo superior a 2,00m. Esses valores estatísticos indicam que o modelo matemático apresenta boa eficiência na previsão de cotas para São Sebastião do Caí (ver a Figura 52).

Os três maiores resíduos em ordem decrescente foram: 15/12/1979 (2,28m); 11/07/2000 (2,12m); 22/07/1954 (-1,94m). Destes, dois eventos foram de pequena magnitude (9,37m em 1979 e 9,26m em 2000) e sequer resultaram na inundação de áreas ribeirinhas. Apenas um evento de grande magnitude (13,90m em 1954) obteve um erro de previsão significativo. Esses resultados reforçam a tese de que o modelo possui boa precisão, e pode ser incorporado ao futuro sistema de previsão e alerta de inundações no município.

Tabela 8. Cotas registradas, previsão de cota e resíduo (São Sebastião do Cai).

Data	X	Y	Yp	Resíduo	Data	X	Y	Yp	Resíduo
30/09/47	4,30	11,00	11,43	0,43	15/12/79	4,76	9,37	11,65	2,28
24/07/48	2,76	8,40	9,24	0,84	30/07/80	7,19	13,74	13,36	-0,38
21/09/49	5,20	11,00	11,83	0,83	23/08/80	4,61	11,81	11,59	-0,22
17/10/50	2,69	9,70	9,07	-0,63	03/12/80	4,54	13,41	11,55	-1,86
19/10/51	3,35	10,60	10,46	-0,14	08/06/81	3,47	10,35	10,64	0,29
29/06/52	2,21	7,58	7,78	0,20	29/06/82	8,00	14,60	14,31	-0,29
16/09/53	5,39	10,00	11,92	1,92	24/06/83	6,38	11,81	12,58	0,77
04/10/53	4,61	10,80	11,59	0,79	07/07/83	6,68	11,92	12,84	0,92
22/07/54	5,47	13,90	11,96	-1,94	02/08/83	4,48	11,97	11,53	-0,44
23/09/54	5,27	12,10	11,86	-0,24	17/08/83	5,20	12,43	11,83	-0,60
20/04/55	3,85	11,00	11,10	0,10	20/06/84	5,90	12,70	12,21	-0,49
19/09/56	4,85	11,72	11,68	-0,04	13/08/85	6,54	13,45	12,71	-0,74
09/09/57	3,96	12,24	11,20	-1,04	26/09/88	5,80	13,33	12,15	-1,18
12/06/58	2,68	9,10	9,04	-0,06	24/09/89	6,20	11,94	12,43	0,49
23/06/59	5,95	13,15	12,25	-0,90	30/05/90	5,36	10,72	11,90	1,18
25/06/60	2,95	9,02	9,68	0,66	13/10/90	7,20	13,49	13,37	-0,12
01/09/60	2,42	9,84	8,36	-1,48	28/05/92	5,10	11,43	11,79	0,36
06/09/61	4,56	12,86	11,56	-1,30	12/07/93	3,40	11,51	10,54	-0,97
30/09/61	4,93	11,72	11,72	0,00	26/05/94	4,90	11,05	11,70	0,65
15/01/62	1,47	5,88	5,66	-0,22	20/06/94	5,36	11,00	11,90	0,90
11/10/63	5,65	13,00	12,06	-0,94	20/07/95	3,62	11,01	10,85	-0,16
02/09/64	3,41	10,72	10,55	-0,17	26/10/96	2,73	7,97	9,17	1,20
21/08/65	5,89	13,74	12,21	-1,53	04/08/97	5,26	13,40	11,86	-1,54
12/09/65	4,85	11,89	11,68	-0,21	16/08/98	5,93	12,23	12,23	0,00
20/12/66	5,40	12,68	11,92	-0,76	15/10/99	3,66	9,85	10,90	1,05
20/09/67	6,61	12,25	12,78	0,53	11/07/00	4,20	9,26	11,38	2,12
07/11/68	2,63	8,66	8,92	0,26	13/10/00	8,80	14,75	15,36	0,61
19/02/69	4,31	11,58	11,44	-0,14	21/07/01	5,20	11,35	11,83	0,48
06/06/70	4,91	11,40	11,71	0,31	12/06/02	5,08	12,46	11,78	-0,68
17/03/71	5,47	12,18	11,96	-0,22	21/02/03	7,40	13,30	13,59	0,29
14/08/71	4,66	12,08	11,61	-0,47	09/07/03	6,32	13,46	12,53	-0,93
20/07/72	6,05	11,94	12,32	0,38	01/09/05	3,56	11,74	10,77	-0,97
20/09/72	4,40	11,98	11,49	-0,49	17/10/05	4,72	11,58	11,63	0,05
19/09/73	5,64	11,35	12,05	0,70	22/06/06	1,95	6,70	7,04	0,34
10/06/74	3,78	11,44	11,03	-0,41	11/07/07	6,31	13,02	12,52	-0,50
13/06/75	5,37	10,34	11,91	1,57	24/09/07	7,80	14,70	14,06	-0,64
15/09/75	7,03	12,50	13,19	0,69	27/10/08	7,30	13,38	13,48	0,10
09/08/76	5,23	11,54	11,84	0,30	X e Y representam, respectivamente, a cota medida em Nova Palmira e São Sebastião do Cai; Yp é a cota prevista em São Sebastião do Cai.				
18/08/77	4,86	11,49	11,69	0,20					
07/12/78	5,54	10,79	12,00	1,21					

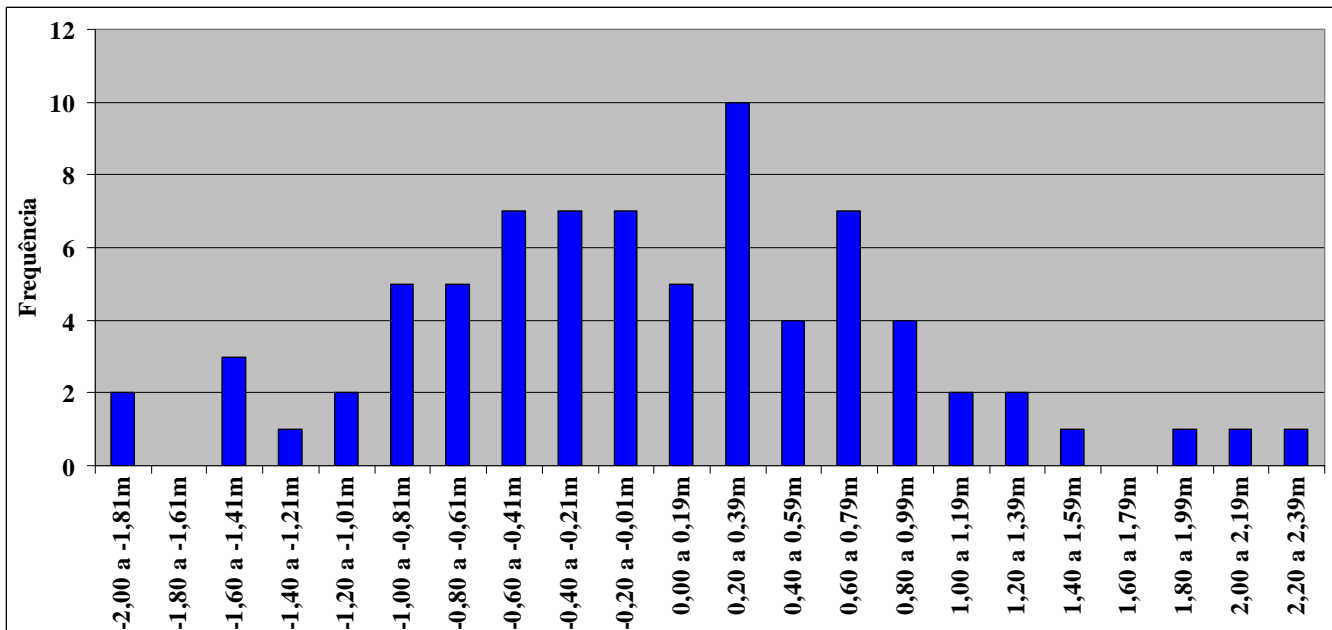


Figura 52 – Frequência de eventos por intervalos de resíduo.

Outro resultado relevante diz respeito às tendências de superestimação e de subestimação do valor de cota previsto em virtude da magnitude do evento (Figura 53). Observa-se que o modelo apresentado possui a tendência de superestimar a cota na previsão de eventos de menor magnitude, principalmente, no intervalo entre 9m e 11m, e de subestimar a cota em eventos de grandes proporções, predominantemente, no intervalo entre 12m e 14m.

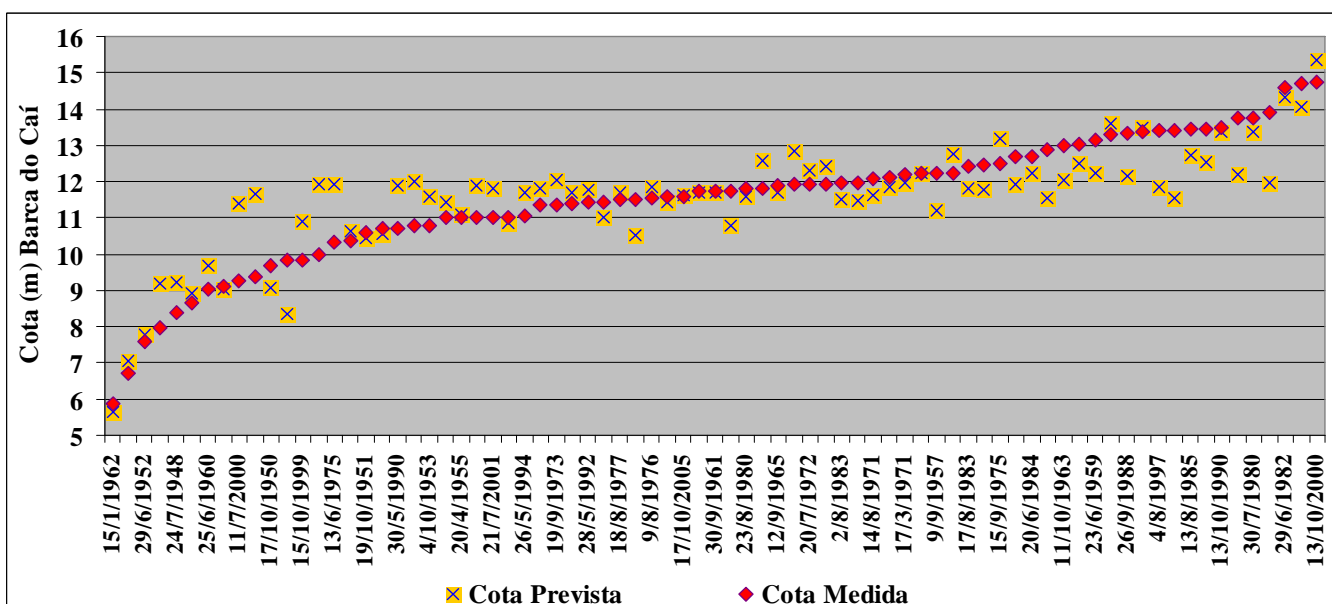


Figura 53 – Tendências de superestimação e subestimação do modelo de previsão de cotas, na estação Barca do Caí, conforme a magnitude do evento.

Como mencionado no subitem 3.3.2, o intervalo de tempo médio entre o pico da enchente em Nova Palmira e o pico na estação Barca do Caí, em São Sebastião do Caí, é de aproximadamente 24h. Isso significa que, para determinados intervalos de cotas, pode-se obter uma precisão submétrica na previsão do pico em São Sebastião do Caí com um dia de antecedência. Isso permitiria elaborar planos de ação para o deslocamento de pessoas e a instalação destas em local seguro, e a remoção de móveis, reduzindo assim os danos provocados pelas inundações.

É importante destacar que o modelo matemático proposto neste módulo pode ser refinado com a inclusão de novos dados. Com a previsão da CPRM de instalar novos equipamentos para leitura automática da cota de hora em hora, as estações utilizadas neste estudo passarão a operar com maior confiabilidade, o que permitirá monitorar com mais precisão a elevação do nível do rio.

Além disso, está prevista a instalação de réguas em outros pontos da bacia, o que permitirá a inclusão de mais cotas de referência para a previsão. Um desses pontos foi estrategicamente selecionado para aprimorar a modelagem em São Sebastião do Caí. A nova régua deverá ser instalada na foz do arroio Forromeco, um importante tributário do rio Caí, a aproximadamente 20km da estação Barca do Caí (estimativa de 10h de antecedência na previsão). A conciliação entre os dados de Nova Palmira e desta nova estação poderá inferir mais confiabilidade às previsões de inundação em São Sebastião do Caí.

Por fim, outra medida interessante para aprimorar a previsão de magnitude das inundações seria elaborar um modelo distribuído para estimar o escoamento superficial e a vazão a partir de dados de chuva. Essa modelagem aumentaria o tempo de antecedência na previsão, e poderia servir de alerta para o início do monitoramento das cotas do rio.

4.2.2. Simulação e Espacialização das Áreas de Inundação

O mapa de inundação e as simulações em 3D foram obtidos após o processo de modelagem digital do terreno. Foram espacializadas sobre a imagem de satélite as áreas atingidas com TR de 2, 5, 10 e 30 anos na área urbana de São Sebastião do Caí. Como resultados, foram obtidos: a) mapa de inundação por TR; b) simulações em 3D de cada cenário; c) quantificações da área atingida, dos bairros e dos tipos de uso e ocupação afetados diretamente.

A Figura 54 apresenta o mapa de inundação por tempos de retorno da área urbana de São Sebastião do Caí/RS.

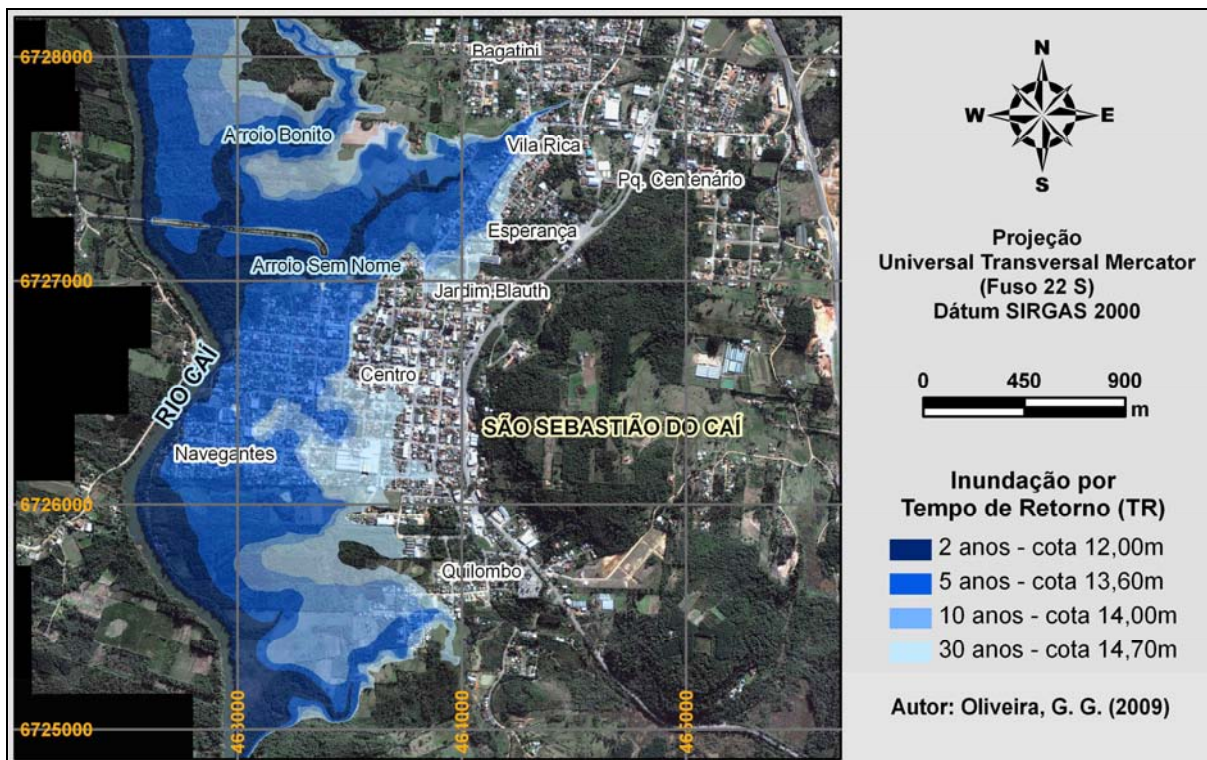


Figura 54 – Mapa de inundação da área urbana do município de São Sebastião do Caí.

As simulações em 3D são visualizadas nas Figuras 55, 56, 57, 58 e 59, de acordo com o cenário modelado. Essas simulações ilustram o avanço da água sobre a cidade de São Sebastião do Caí em cenários entre 2 e 30 anos de TR.



Figura 55 – Cenário normal (TR de 0 anos) em São Sebastião do Caí.



Figura 56 – Cenário de áreas inundáveis com TR de 2 anos em São Sebastião do Caí.



Figura 57 – Cenário de áreas inundáveis com TR de 5 anos em São Sebastião do Caí.



Figura 58 – Cenário de áreas inundáveis com TR de 10 anos em São Sebastião do Caí.



Figura 59 – Cenário de áreas inundáveis com TR de 30 anos em São Sebastião do Caí.

As áreas mais extensas de inundação estão localizadas às margens dos arroios que deságuam no rio Caí – arroios Bonito e Sem Nome. O extravasamento médio das águas para TR de 2, 5, 10 e 30 anos é, respectivamente, de 150m, 500m, 550m e de 800m. Ao todo, seis bairros em São Sebastião do Caí são afetados diretamente pelas inundações com TR de até 30 anos: Navegantes, Quilombo, Centro, Jardim Blauth, Esperança e Vila Rica.

Na Figura 59 (cenário para TR de 30 anos), observa-se a grande porção de área urbana impactada pelo aumento no nível do rio. Trata-se de uma área muito plana com declividades inferiores a 1%, onde muitas residências ribeirinhas ficam totalmente encobertas pela água em eventos de grande magnitude (como na inundação de 24/09/2007).

A área urbana atingida pelas inundações por TR e os bairros afetados são indicadores importantes para a avaliação dos impactos causados pelas inundações em cada nível de magnitude. Esses indicadores são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Área urbana atingida e o número de bairros afetados por TR, na área urbana de São Sebastião do Caí.

TR (anos)	Área Urbana atingida (ha) - acumulada	Proporção (%) – em relação à área urbana total - acumulada	Bairros afetados
2	3,34	0,83	1
5	58,64	14,55	4
10	70,00	17,37	5
30	92,89	23,05	6

O único bairro afetado por inundações com TR de 2 anos é o Navegantes, onde dezenas de casas são atingidas pela água, totalizando 3,34ha. No entanto, a área urbana atingida aumenta significativamente em eventos com TR de 5 anos, o que implica em danos para centenas de famílias nos bairros Navegantes, Quilombo, Esperança e Vila Rica. Neste cenário, aproximadamente 15% da área urbana municipal fica tomada pelas águas, com estimativa de mais de 2.400 pessoas afetadas diretamente.

De acordo com a Tabela 9, não há um significativo aumento de área atingida para TR de 10 anos. Em eventos dessa magnitude, aproximadamente 17% da área urbana de São Sebastião do Caí é atingida pelas águas (70ha). Além dos quatro bairros mencionados no cenário com TR de 5 anos, o bairro central passa a ser atingido.

No último cenário (TR de 30 anos), a área urbana atingida é de 92,9ha (23% da área urbana municipal). Estima-se que mais de três mil pessoas são atingidas pelas águas nessa

magnitude (Figuras 60, 61 e 62). Neste cenário, as águas avançam significativamente sobre o bairro central, além de atingirem o bairro Jardim Blauth.



Figura 60 – Inundação de 24 de setembro de 2007: imediações do Centro de São Sebastião do Caí. (Fotografia de Cássio A. Wollmann)



Figura 61 – Reportagem sobre a inundação de 1982. (Acervo do Museu Municipal de São Sebastião do Caí)



**Figura 62 – Reportagem sobre a inundação de 2000.
(Acervo do Museu Municipal de São Sebastião do Caí)**

O tipo de uso mais impactado na área urbana é o residencial, independente da magnitude da inundação. Os estabelecimentos comerciais e industriais são afetados com inundações de magnitude superior a 2 anos. Quando as águas atingem o bairro central, o setor comercial é seriamente impactado (TR igual ou superior a 10 anos).

É importante salientar que a análise realizada neste módulo teve enfoque nas áreas atingidas diretamente (com lâmina d'água) na área urbana. Se contabilizados os danos indiretos (equipamentos e serviços urbanos danificados, produção das áreas rurais comprometida, etc.) o número de pessoas afetadas aumenta significativamente. De acordo com os cálculos da Defesa Civil, o impacto da inundação de 2007 foi muito grande, afetando indiretamente 13 mil moradores de São Sebastião do Caí (aproximadamente 65% da população total).

4.2.3. Avaliação do Modelo

A avaliação do modelo de espacialização das áreas de inundação por TR foi realizada a partir de dados de campo, de acordo com o mencionado no item 3.3.4. Como referência utilizou-se o evento ocorrido em 24 de setembro de 2007. Essa escolha foi motivada por dois fatores: a) a atualidade do evento, permitindo obter informações mais precisas; b) e a magnitude da inundação, a qual permite avaliar a precisão do modelo do terreno e do mapeamento para eventos que causam mais danos.

A Figura 63 apresenta a disposição dos pontos coletados na área urbana e as Figuras 64 e 65 ilustram dois exemplos de erros observados em pontos no limite da inundação.

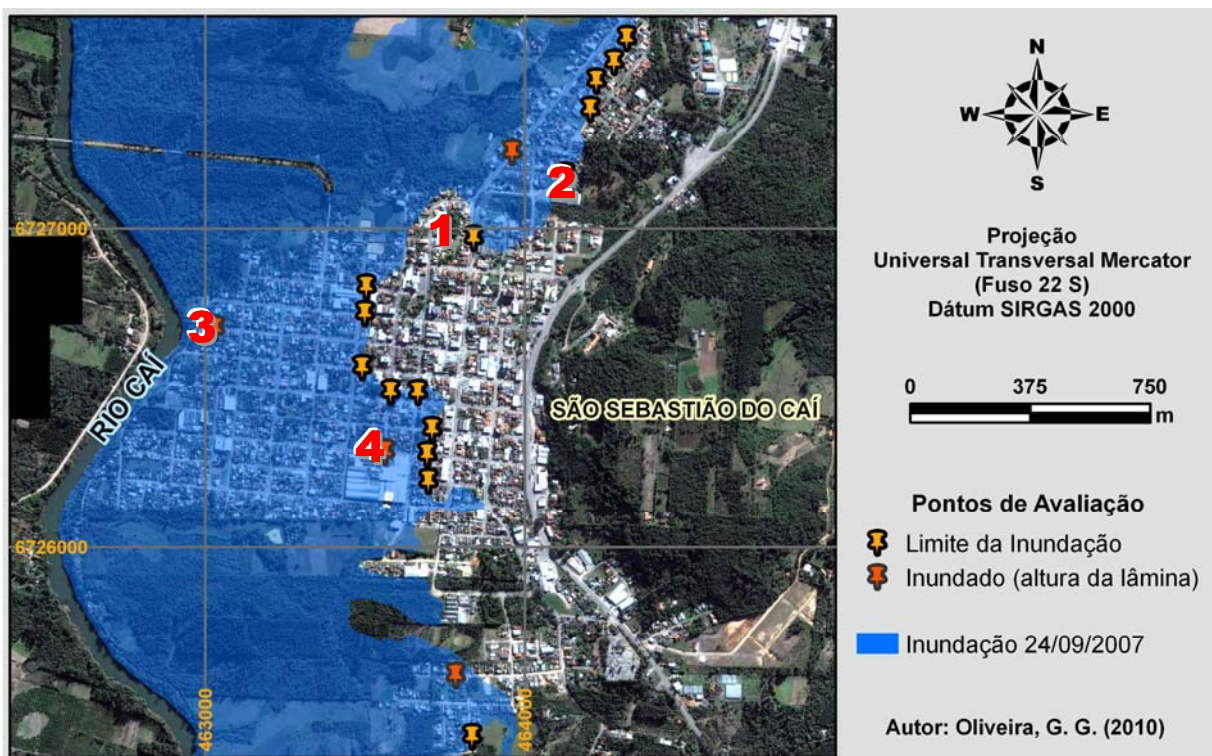


Figura 63 – Disposição dos pontos coletados em campo para avaliação do modelo de inundações na área urbana de São Sebastião do Cai.

De modo geral, comprovou-se que o mapeamento das inundações por TR apresentou uma acurácia maior do que a esperada. O erro planimétrico médio das 15 amostras coletadas no limite do extravasamento das águas foi de apenas 19m, indicando que o mapa superestimou um pouco as áreas inundadas. O maior erro planimétrico observado nas amostras foi de 38m e o menor foi de apenas 4m. Esses valores são baixos se considerada a

ausência de ortorretificação na imagem de satélite e a forma de elaboração do MDT (somente com pontos cotados na área urbana, do nivelamento municipal).



Figura 64 – Ilustração do Ponto 1: erro planimétrico de 22m na modelagem.



Figura 65 – Ilustração do Ponto 2: erro planimétrico de 14m na modelagem.

Os quatro pontos coletados em locais inundados (ver Figura 63) foram utilizados para verificar o erro altimétrico do modelo de inundações (diferença entre a lâmina medida e a modelada). O maior erro altimétrico observado foi de 0,70m e o menor foi de apenas 0,10m (Ponto 3). O erro médio foi de 0,30m. As Figuras 66 e 67 apresentam dois exemplos (Pontos 3 e 4) de erros verificados quanto à altura da lâmina modelada.



**Figura 66 – Ilustração do Ponto 3: erro altimétrico de 0,10m na modelagem.
(Ponto referente à Figura 46)**



**Figura 67 – Ilustração do Ponto 4: erro altimétrico de 0,15m na modelagem.
(Ponto referente à Figura 68)**



Figura 68 – Inundação de 24/09/2007 no Ponto 4 (Foto: Cássio A. Wollmann).

4.3. Módulo III – Área Urbana e Entornos de Montenegro

4.3.1. Modelo Matemático de Previsão de Enchentes e Inundações

O processo da modelagem voltada à previsão de cotas em Montenegro seguiu a mesma metodologia do modelo matemático de São Sebastião do Caí, conforme descrição apresentada no subitem 3.4.2. Para este modelo, no entanto, foram selecionados 82 pares de cotas (Passo do Montenegro – Barca do Caí).

O coeficiente de correlação dos dados foi de 0,9221, superior ao modelo de previsão apresentado no Módulo II. A função que apresentou o melhor ajuste dos dados, de acordo com o Qui-Quadrado Reduzido, é semelhante à função utilizada no modelo de São Sebastião do Caí, e é expressa pela seguinte equação (ver também a Figura 69):

$$Y_p = \frac{1}{(0,0715 * [X - 11,0745]^2 + 0,9452)} + 0,5336 * X$$

Onde: Y_p é a cota prevista em Montenegro e X é a cota em São Sebastião do Caí.

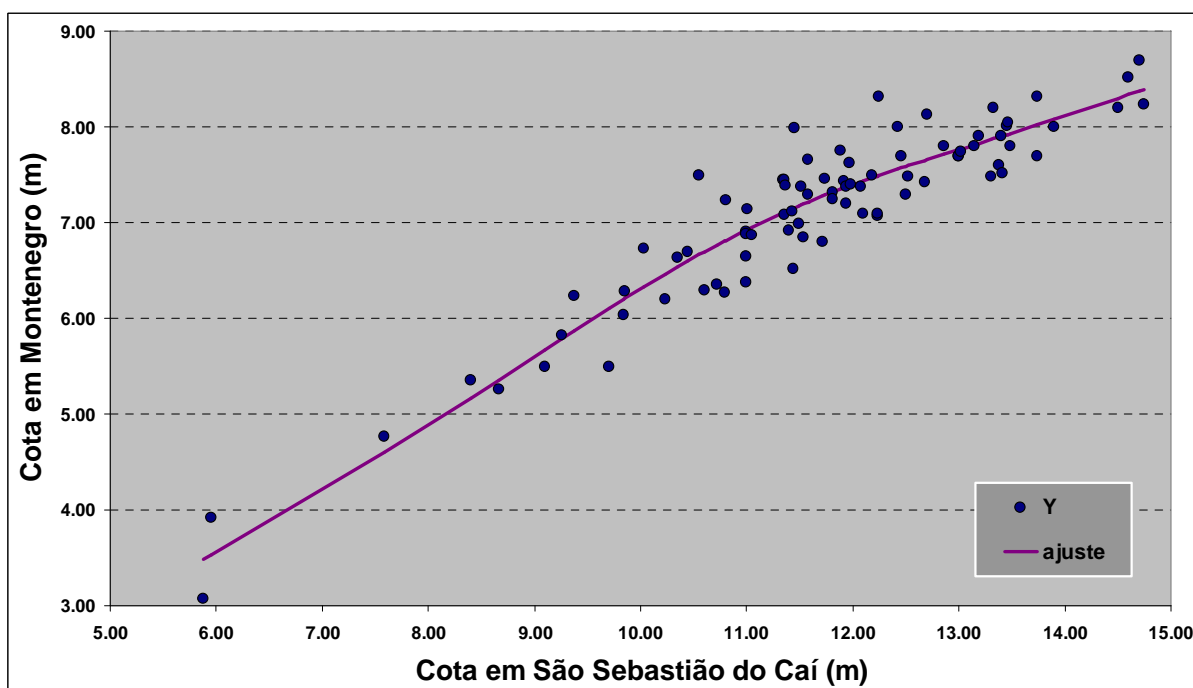


Figura 69 – Linha de ajuste dos dados para previsão de cota do rio Caí em Montenegro.

O coeficiente de determinação (R^2) da regressão adotada na modelagem foi de 0,894. Esse valor indica que o ajuste dos dados deste modelo de previsão é ainda melhor do que o

obtido em São Sebastião do Caí (0,7568). O resíduo médio foi de 0,25m e a amostra que apresentou maior discrepância entre o medido e o previsto obteve um erro de 0,83m.

As Tabelas 10 e 11 apresentam, respectivamente, a síntese das características relacionadas à confiabilidade do modelo matemático, e as cotas previstas para Montenegro nos 82 eventos selecionados. A precisão média do modelo para a previsão de cotas entre 5m e 6m é de 0,42m, entre 6m e 7m é de 0,28m, entre 7m e 8m é de 0,23m (intervalo com os melhores resultados) e a partir de 8m é de 0,42m.

Tabela 10. Síntese de características relacionadas à confiabilidade do modelo.

R ²	0,894
Resíduo Médio	0,25m
Erro Mínimo	0,00m
Erro Máximo	0,83m
Faixa de Confiança (95%)	
Previsão de cotas entre 5m e 6m	de (Y _p - 0,210m) a (Y _p + 0,210m)
Previsão de cotas entre 6m e 7m	de (Y _p - 0,140m) a (Y _p + 0,140m)
Previsão de cotas entre 7m e 8m	de (Y _p - 0,115m) a (Y _p + 0,115m)
Previsão de cotas > 8m	de (Y _p - 0,210m) a (Y _p + 0,210m)
Precisão do Modelo (95%)	
Previsão de cotas entre 5m e 6m	0,42m
Previsão de cotas entre 6m e 7m	0,28m
Previsão de cotas entre 7m e 8m	0,23m
Previsão de cotas > 8m	0,42m

De acordo com os dados apresentados na Tabela 11, 78 eventos (95,12%) obtiveram resíduo inferior a 0,60m, sendo que, destes, apenas três apresentaram resíduo superior a 0,45m. Esses valores indicam que o modelo matemático é bastante eficiente para a previsão de cotas no município de Montenegro.

O maior resíduo (-0,83m) foi verificado em três eventos, ocorridos em: 20/09/1967; 17/10/1997; 28/04/2001. Esse valor de resíduo é bem inferior aos obtidos no modelo apresentado no Módulo II. Considerando o método utilizado de leitura (manual) e a dificuldade de organização das séries históricas utilizadas, os resultados verificados neste modelo (precisão submétrica para todos os intervalos de previsão) são excelentes.

O Figura 70 ilustra as tendências do modelo (superestimação e subestimação) em relação à magnitude do evento a ser previsto. Assim como no modelo matemático do Módulo II, observa-se que este também superestima a cota na previsão de eventos de menor magnitude (até 7m) e subestima um pouco a cota em eventos com cotas superiores a 7,5m.

**Tabela 11. Cotas registradas e previstas na estação Passo do Montenegro,
e o resíduo por amostra.**

Data	X	Y	Yp	Resíduo	Data	X	Y	Yp	Resíduo
1/10/1947	11,00	6,65	6,93	0,28	16/12/1979	9,37	6,23	5,87	-0,36
25/7/1948	8,40	5,35	5,17	-0,18	31/7/1980	13,74	7,70	8,02	0,32
17/7/1949	10,44	6,70	6,60	-0,10	24/8/1980	11,81	7,25	7,32	0,07
22/9/1949	11,00	6,38	6,93	0,55	4/12/1980	13,41	7,52	7,90	0,38
18/10/1950	9,70	5,50	6,10	0,60	9/6/1981	10,35	6,64	6,54	-0,10
20/10/1951	10,60	6,30	6,70	0,40	29/6/1982	14,60	8,52	8,34	-0,18
30/6/1952	7,58	4,76	4,59	-0,17	25/6/1983	11,81	7,32	7,32	-0,00
3/10/1953	10,80	7,24	6,82	-0,42	10/7/1983	11,92	7,44	7,36	-0,08
22/7/1954	13,90	8,00	8,08	0,08	2/8/1983	11,97	7,62	7,38	-0,24
23/9/1954	12,10	7,10	7,44	0,34	20/6/1984	12,70	8,13	7,66	-0,47
22/4/1955	11,00	6,90	6,93	0,03	14/8/1985	13,45	8,01	7,92	-0,09
6/4/1956	14,50	8,20	8,30	0,10	26/12/1986	12,52	7,48	7,59	0,11
20/9/1956	11,72	6,80	7,28	0,48	31/7/1987	11,37	7,39	7,12	-0,27
9/9/1957	12,24	7,10	7,49	0,39	14/8/1987	13,19	7,90	7,83	-0,07
13/6/1958	9,10	5,50	5,67	0,17	26/9/1988	13,33	8,20	7,88	-0,32
23/6/1959	13,15	7,80	7,81	0,01	25/9/1989	11,94	7,38	7,37	-0,01
30/8/1959	13,00	7,70	7,76	0,06	13/10/1990	13,49	7,80	7,93	0,13
2/9/1960	9,84	6,04	6,20	0,16	28/12/1991	10,23	6,20	6,46	0,26
6/9/1961	12,86	7,80	7,71	-0,09	29/5/1992	11,43	7,12	7,15	0,03
1/1/1962	5,95	3,92	3,53	-0,39	7/7/1992	11,36	7,45	7,11	-0,34
16/1/1962	5,88	3,07	3,49	0,42	12/7/1993	11,51	7,38	7,18	-0,20
12/10/1963	13,00	7,70	7,76	0,06	26/5/1994	11,05	6,87	6,95	0,08
3/9/1964	10,72	6,35	6,77	0,42	20/6/1994	11,00	6,88	6,93	0,05
21/8/1965	13,74	8,32	8,02	-0,30	21/7/1995	11,01	7,14	6,93	-0,21
12/9/1965	11,89	7,75	7,35	-0,40	16/10/1996	10,03	6,73	6,33	-0,40
21/12/1966	12,68	7,42	7,65	0,23	5/8/1997	13,40	7,91	7,90	-0,01
20/9/1967	12,25	8,32	7,49	-0,83	17/10/1997	11,45	7,99	7,16	-0,83
8/11/1968	8,66	5,26	5,36	0,10	17/8/1998	12,23	7,07	7,49	0,42
20/2/1969	11,58	7,30	7,22	-0,08	16/10/1999	9,85	6,28	6,21	-0,07
7/6/1970	11,40	6,92	7,13	0,21	12/7/2000	9,26	5,82	5,79	-0,03
17/3/1971	12,18	7,50	7,47	-0,03	14/10/2000	14,75	8,24	8,39	0,15
15/8/1971	12,08	7,38	7,43	0,05	28/4/2001	10,55	7,50	6,67	-0,83
20/7/1972	11,94	7,20	7,37	0,17	22/7/2001	12,43	8,00	7,56	-0,44
21/9/1972	11,98	7,40	7,39	-0,01	14/6/2002	12,46	7,70	7,57	-0,13
20/9/1973	11,35	7,45	7,11	-0,34	21/2/2003	13,30	7,48	7,87	0,39
11/6/1974	11,44	6,52	7,15	0,63	10/7/2003	13,46	8,05	7,92	-0,13
16/9/1975	12,50	7,30	7,59	0,29	1/9/2005	11,74	7,46	7,29	-0,17
10/8/1976	11,54	6,85	7,20	0,35	16/10/2005	11,58	7,66	7,22	-0,44
3/8/1977	11,36	7,08	7,11	0,03	11/7/2007	13,02	7,74	7,77	0,03
19/8/1977	11,49	6,99	7,18	0,19	25/9/2007	14,70	8,70	8,37	-0,33
7/12/1978	10,79	6,27	6,81	0,54	27/10/2008	13,38	7,60	7,89	0,29

**X e Y representam, respectivamente, a cota medida em São Sebastião do Caí e Montenegro;
Yp é a cota prevista em Montenegro.**

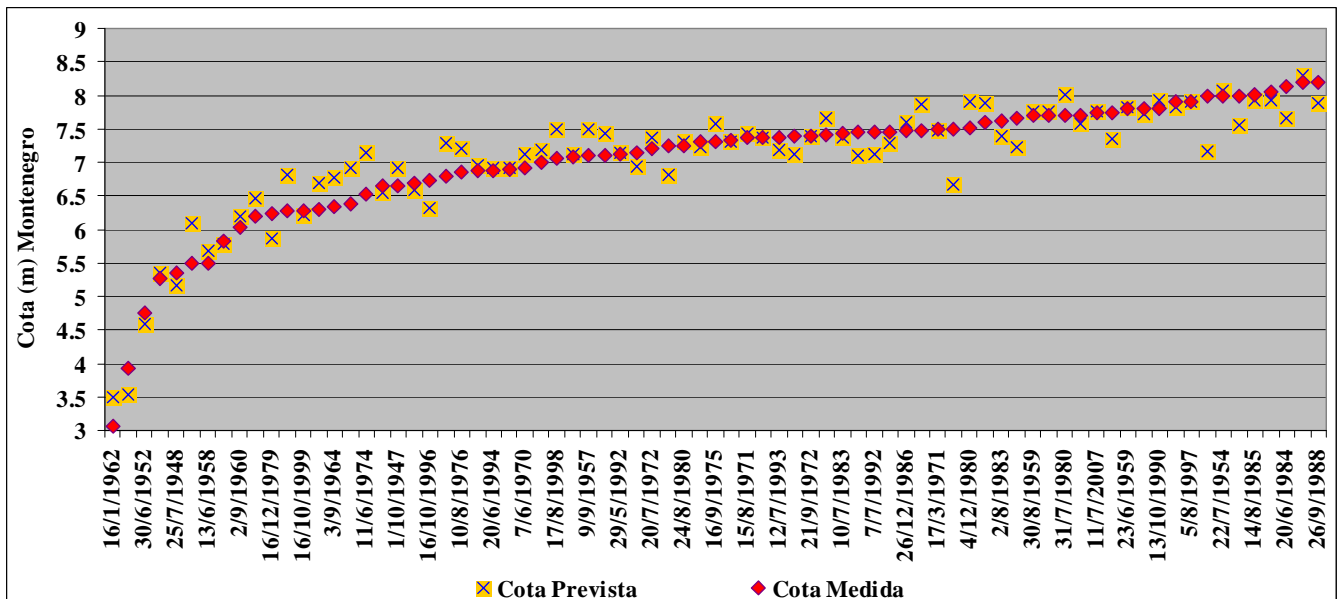


Figura 70 – Tendências do modelo matemático conforme a magnitude.

O principal motivo, pelo qual este modelo apresentou resultados mais satisfatórios do que o modelo de previsão para São Sebastião do Caí, advém da menor distância existente entre as estações fluviométricas utilizadas no Módulo III. Esse fator garante um modelo matematicamente mais preciso para a previsão de cotas em Montenegro.

O tempo de antecedência da previsão de cota neste modelo é inferior ao apresentado no Módulo II. Só é possível estimar a cota máxima em Montenegro de 12h a 16h antes de a mesma ser registrada. No entanto, salienta-se que esse aspecto não interfere significativamente nas ações de deslocamento e remoção de pessoas e de objetos, uma vez que não é necessário aguardar o pico da cheia em São Sebastião do Caí para iniciar o monitoramento e as simulações de cenários de inundação.

Assim como no modelo de previsão de cotas para São Sebastião do Caí, a inclusão de dados advindos dos novos equipamentos, que serão instalados na bacia hidrográfica do rio Caí, aumentará a confiabilidade do modelo matemático e permitirá monitorar o avanço das águas de forma mais eficiente.

4.3.2. Modelo Digital de Elevação

O Modelo Digital de Elevação, realizado conforme a metodologia descrita no subitem 3.4.4, é apresentado na Figura 71. Para melhorar a visualização, foi aplicado um contraste via manipulação do histograma do arquivo, no qual se destacaram as áreas com elevação inferior a 15 metros.

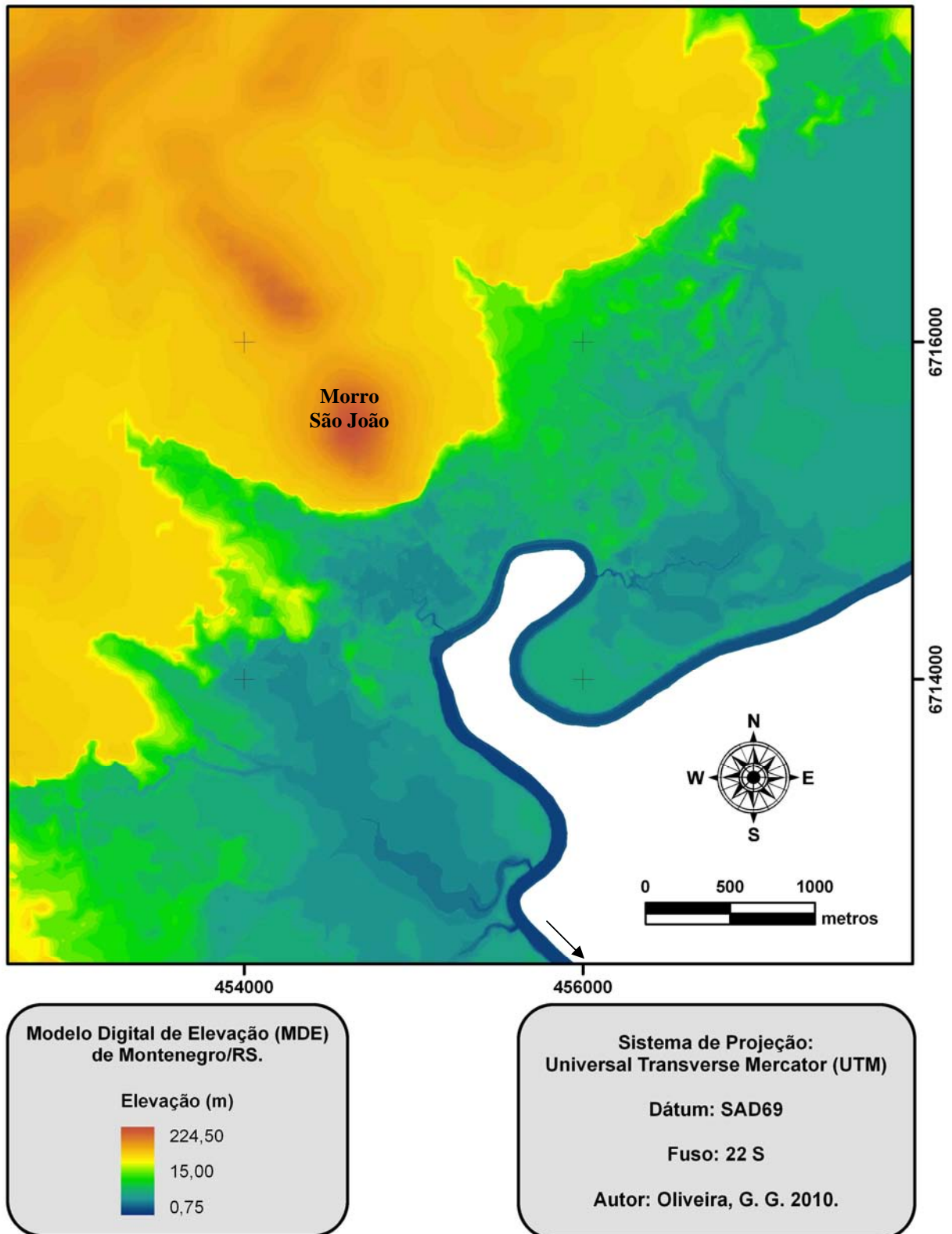


Figura 71 – MDE da área urbana e entornos de Montenegro/RS.

De acordo com o MDE, a elevação varia entre 0,75m e 224,50m, sendo que a maior parcela da área está situada em elevações inferiores a 15m (Planície de inundação do rio Caí). O ponto de maior elevação é observado no Morro São João, na porção central do recorte.

Como pode ser visualizado na Figura 71, o MDE apresenta características bem detalhadas nas áreas mais planas e baixas, feições predominantes do relevo, na área de estudo. Os talwegues foram bem delimitados e apresentaram grande concordância com o observado nos trabalhos de campo.

4.3.3. Modelo para Espacialização de Inundações

Neste subitem, são apresentados os resultados e as discussões referentes ao modelo para espacialização de inundações na área urbana e entornos de Montenegro/RS. Conforme foi descrito no subitem 3.4.5, esta etapa do trabalho compreendeu a modelagem das áreas de inundação pela cota atingida na estação Passo do Montenegro, em intervalos de 0,50m, e por TR, e a quantificação dos tipos de uso e ocupação do solo mais impactados pelas inundações.

É importante destacar que a espacialização das áreas inundadas considerou o modelo de elevação normalizado, que tem como referência a estação Passo do Montenegro. A normalização do MDE teve como objetivo representar o desnível existente na lâmina d'água das inundações, e foi obtida pelo cruzamento do MDE inicial com a superfície de variação da lâmina (conforme subitem 3.4.5).

Após esse processo, dois pixels com a mesma cota normalizada, independente da localização na área de estudo, apresentam a mesma probabilidade de serem inundados. Esse aspecto reduz significativamente o tempo de processamento dos dados para a espacialização das áreas de inundação, sem ignorar as diferentes cotas atingidas pela água, ao longo da área de estudo, em um mesmo evento.

As Figuras 72 e 73 apresentam, respectivamente, as áreas de inundação, na área modelada de Montenegro/RS, pela cota atingida na estação Passo do Montenegro e por tempos de retorno. O intervalo de cotas utilizado no primeiro mapa (Fig. 72) foi de 3m a 10m, valor superior a maior cota já registrada em Montenegro (9,2m em 1941). No segundo mapa (Fig. 73), foram espacializadas as áreas inundação por TR de 30, 20, 10, 5 e 2 anos (cotas 8,70m; 8,50m; 8,30m; 8,00m; 7,30m, respectivamente).

De acordo com os mapas (Figuras 72 e 73), os bairros mais afetados por inundações são: Tanac, Bairro Municipal, Industrial, Passo do Manduca, Ferroviário e Olaria. Outros bairros também são afetados, mas com menores prejuízos, como o Zootecnia e o São João.

Observa-se que existem três áreas de extravasamento do rio Caí: a) na porção nordeste, área com presença de banhados, onde as águas invadem os bairros Passo do

Manduca, Ferroviário e Olaria; b) na porção sul da área modelada, extensa área úmida ao longo do arroio da Cria; c) na porção central, no bairro Industrial.

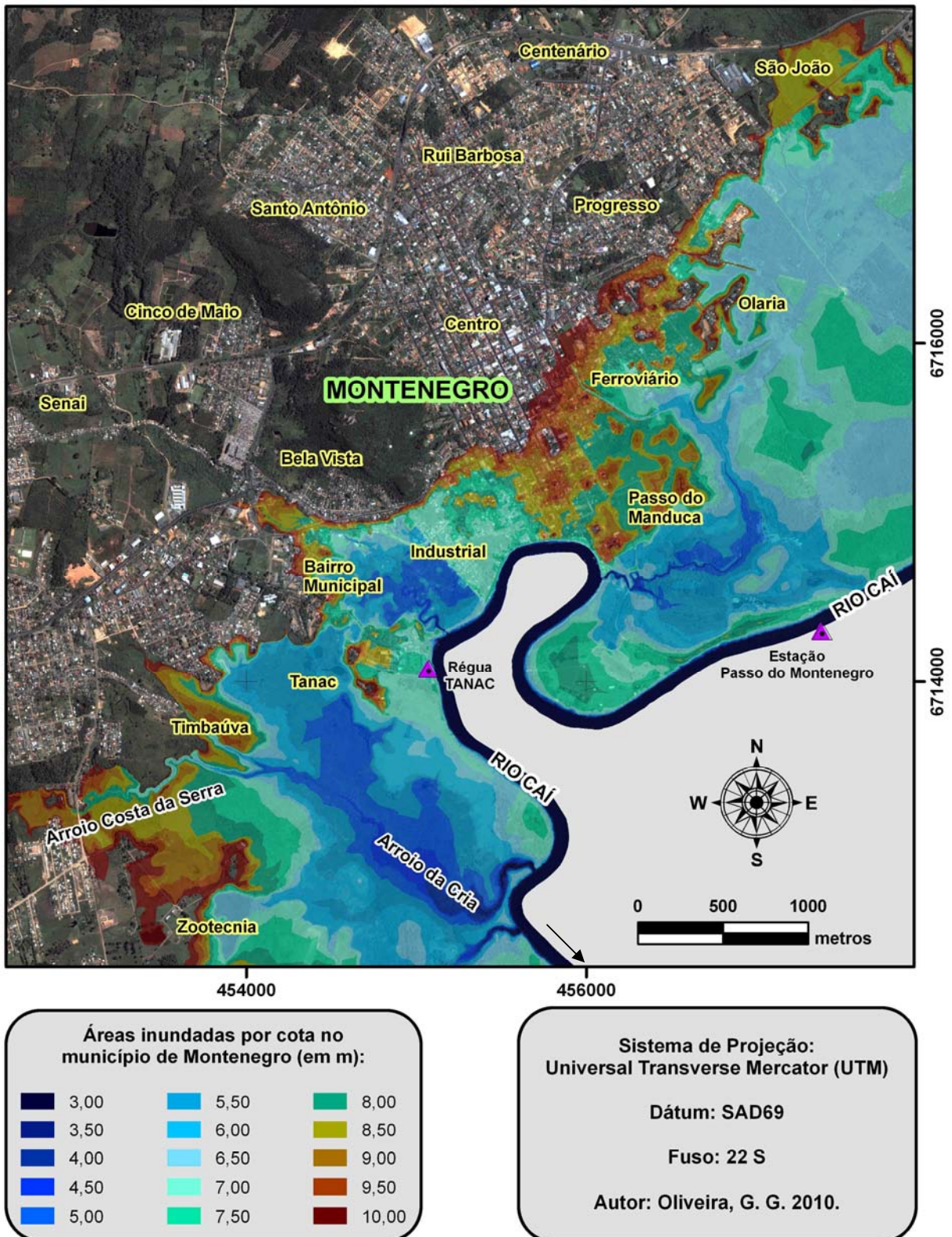


Figura 72 – Mapa das áreas inundáveis na área urbana e entornos de Montenegro/RS.

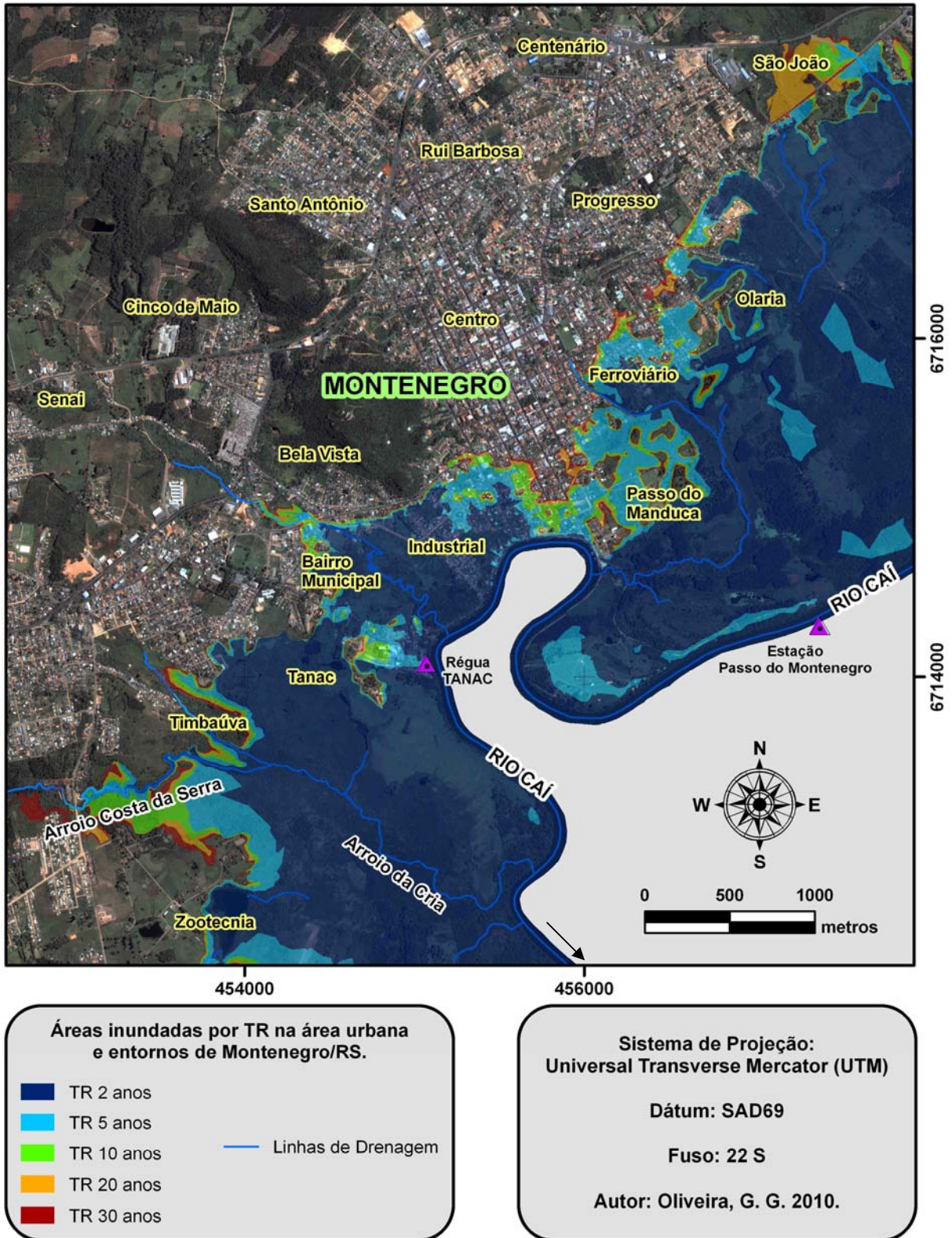


Figura 73 – Espacialização das áreas inundáveis por TR na área urbana e entornos de Montenegro/RS.

A Figura 72 mostra que grande parte da área modelada de Montenegro é atingida por inundações com magnitude inferior a 7,5m na estação Passo do Montenegro. Essa é uma

constatação preocupante, uma vez que essa cota é atingida frequentemente, com TR aproximado de 2 anos (diferente do observado em São Sebastião do Caí). Essa característica também é ilustrada pela Figura 73, na qual fica evidente a predominância de áreas atingidas com recorrência igual ou inferior a 2 anos. Somente na porção central da área modelada, entre os bairros Industrial e Passo do Manduca, é que a extensão da inundação se altera significativamente em eventos com tempos de retorno maiores.

Considerando todos os tipos de uso e ocupação do solo, a área atingida por inundações aumenta consideravelmente até a magnitude de 8m, em que aproximadamente 1.147ha da área modelada ficam tomados pelas águas. Em eventos com magnitude de cota entre 8m e 9m, ocorre um acréscimo moderado de área afetada, e entre a cota 9m e 10m, praticamente não se alteram os locais atingidos pelas águas. Assim, se ocorresse um evento com magnitude superior (até 10m) à registrada em 1941, a dimensão da inundação seria praticamente a mesma.

A Figura 74 ilustra os tipos de uso e ocupação do solo observados na área de inundação modelada do município de Montenegro/RS. Foram consideradas as seguintes categorias de uso e ocupação do solo:

- a) Vegetação e banhados (florestas, campos e áreas úmidas);
- b) Uso Rural (cultivos agrícolas, em geral);
- c) Uso Urbano, subdividido em cinco classes: áreas de lazer e recreação, residenciais, mistas, comerciais e industriais.

As áreas de vegetação e de banhados correspondem à categoria de uso e ocupação do solo que é mais atingida pelas inundações na área modelada (Fig. 74). Aproximadamente 1.138ha dessa categoria são atingidos pelas águas, considerando magnitudes inferiores a 10m. Esse valor representa 80,86% da área total inundada no modelo.

A categoria menos afetada é a de uso rural, com apenas 65ha (4,63% da área total). Estas áreas estão localizadas na porção sudoeste do recorte (Fig. 74).

Quanto ao uso urbano, cerca de 204ha são atingidos por inundações com magnitude de 10m. Esse valor representa 14,51% da área total inundada no modelo. Considerando apenas o contexto urbano, destacam-se as categorias de uso misto (109ha) e de uso residencial (58ha) como as mais afetadas. O uso urbano comercial é o que sofre os menores impactos diretos das inundações, com área inundada de aproximadamente 5ha.

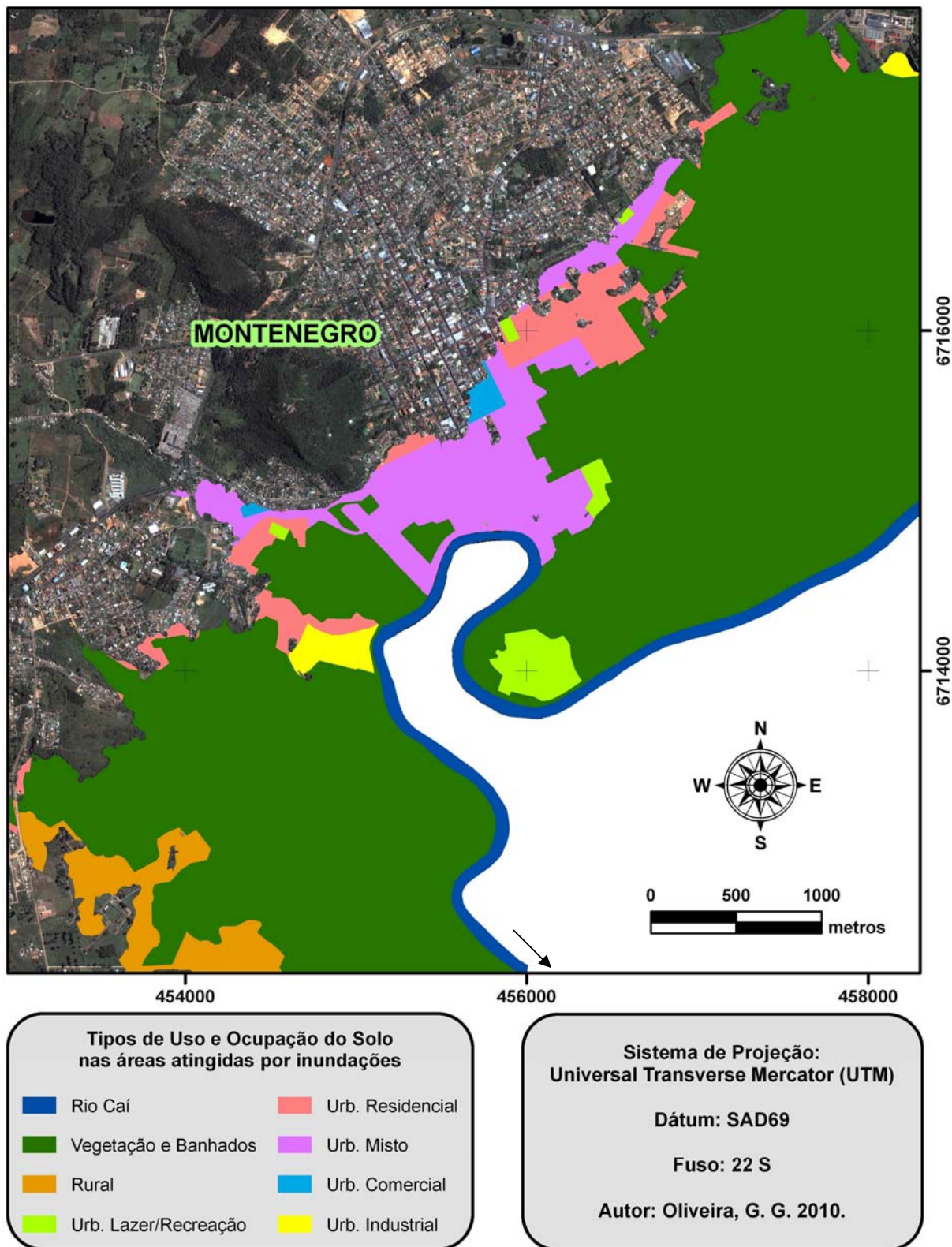


Figura 74 – Uso e ocupação do solo das áreas atingidas por inundações na área urbana e entornos de Montenegro/RS.

A Tabela 12 apresenta a quantificação da área inundada (acumulada) de cada uso e ocupação do solo por cota registrada em Passo do Montenegro.

Tabela 12. Uso e ocupação do solo inundado por cota na área urbana e entornos de Montenegro/RS.

Cota (m)	Área inundada (acumulada) em hectares							Total
	Vegetação e Banhados	Rural	Urb. Lazer Recreação	Urb. Residencial	Urb. Misto	Urb. Comercial	Urb. Industrial	
3,00	4,46	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	4,47
3,50	7,43	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	7,57
4,00	15,19	0,00	0,00	0,00	0,22	0,00	0,01	15,42
4,50	28,17	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,02	28,49
5,00	99,79	0,00	0,00	0,00	0,53	0,00	0,03	100,36
5,50	194,81	0,00	0,00	0,11	0,73	0,00	0,06	195,70
6,00	354,64	0,00	0,00	1,34	1,48	0,00	0,11	357,57
6,50	644,84	0,04	0,19	3,37	2,50	0,00	0,25	651,20
7,00	860,38	1,54	4,07	6,70	16,63	0,00	1,95	891,27
7,50	978,27	7,13	11,19	10,74	28,91	0,00	5,24	1041,47
8,00	1033,01	16,24	16,73	23,29	50,27	0,25	7,28	1147,07
8,50	1079,86	22,81	17,13	31,47	68,08	0,51	9,94	1229,79
9,00	1115,34	31,66	18,92	42,04	86,03	0,87	10,54	1305,39
9,50	1128,37	42,14	20,23	49,42	100,51	2,11	10,95	1353,74
10,00	1138,30	65,23	21,28	57,85	108,70	4,71	11,73	1407,80

Percebe-se, a partir dos dados apresentados na Tabela 12, que ocorre um incremento significativo de área atingida por inundações da categoria de vegetação e banhados em eventos de magnitude entre 6m e 7m. Este intervalo de cotas corresponde ao limite superior do leito menor, consistindo assim na cota de extravasamento das águas sobre a planície de inundação.

O mesmo não ocorre com as áreas de uso urbano, que começam a ser inundadas, substancialmente, em eventos de magnitude de cota igual ou superior a 7m em Passo do Montenegro (Tabela 12 e Figura 75). Isso se deve ao fato destas estarem localizadas em uma área levemente mais elevada da planície de inundação.

Verifica-se que em eventos de magnitude inferior a 6,5m, pouco mais de 4ha de uso urbano ficam inundados. Esse valor aumenta para 29ha na cota 7m, 98ha na cota 8m e 158ha na cota 9m. No evento ocorrido em 25 setembro de 2007 (simulado neste módulo), que atingiu a cota 8,7m em Passo do Montenegro, cerca de 140ha de uso urbano foram atingidos pela inundação. Esse valor é inferior ao obtido no Módulo I, no qual foram utilizados materiais com menor grau de detalhamento.

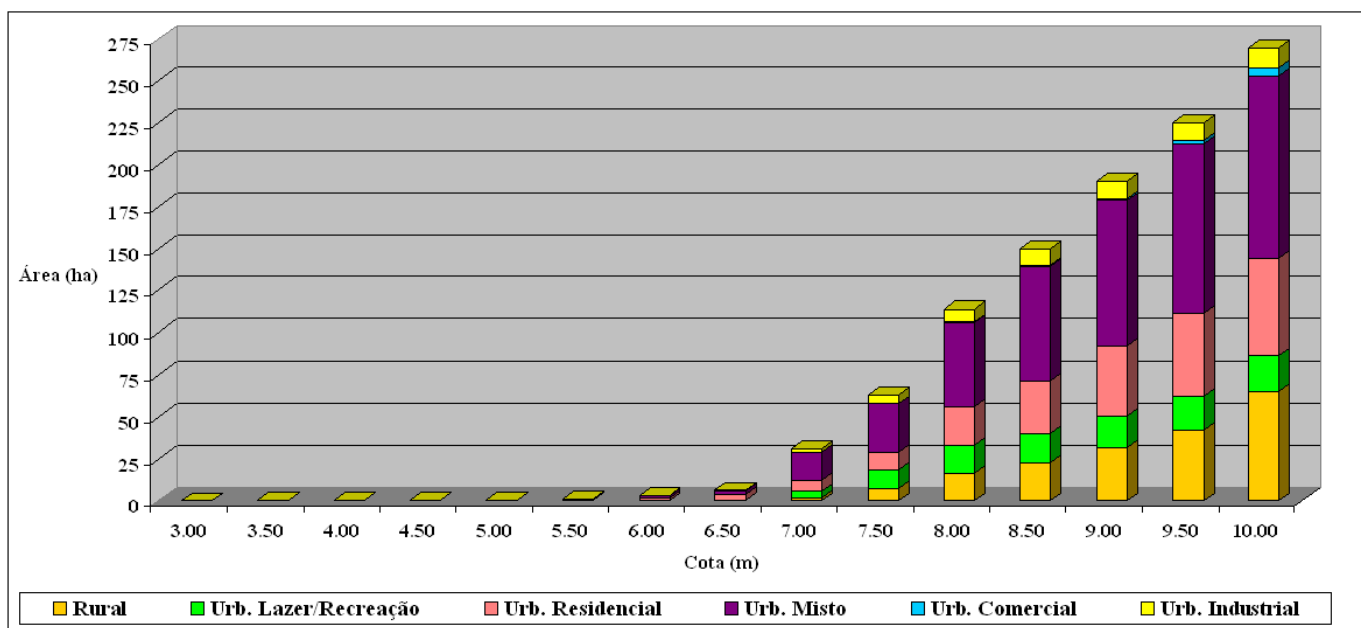


Figura 75 – Uso urbano e rural inundados por cota em Montenegro.

4.3.4. Simulação do Evento Ocorrido em 25 de Setembro de 2007

A inundação de 25 de setembro de 2007 foi o evento escolhido para a simulação da dinâmica das águas sobre a área urbana e entornos de Montenegro, em virtude da sua alta magnitude e da atualidade de sua ocorrência. Esse episódio de inundação foi monitorado de hora em hora pela TANAC S.A, na régua instalada no rio Caí, nos fundos da indústria, no período compreendido entre o dia 22/09/2007 (às 08h) ao dia 28/09/2007 (às 20h). Esses dados permitiram a modelagem com maior realismo da dinâmica de inundação.

As cotas atingidas pela água na TANAC S.A foram compatibilizadas com as cotas da estação Passo do Montenegro, e em seguida, extrapoladas para toda a área de estudo, baseando-se no modelo de variação da lâmina d'água apresentado no subitem 3.4.5.

A simulação do período monitorado (22/09 à 28/09) é retratada em intervalo de tempo de 4h, pelas Figuras 76 a 115, às quais ilustram toda a dinâmica de inundação (avanço e retração das águas). O avanço das águas é apresentado nas Figuras 76 a 93 e a retração nas Figuras 94 a 115. Para ampliar o detalhamento e melhorar a visualização, fez-se um recorte da área modelada na porção mais densamente ocupada do município de Montenegro.



Figura 76 – 22/09/2007, às 8h: cota 3,96m.

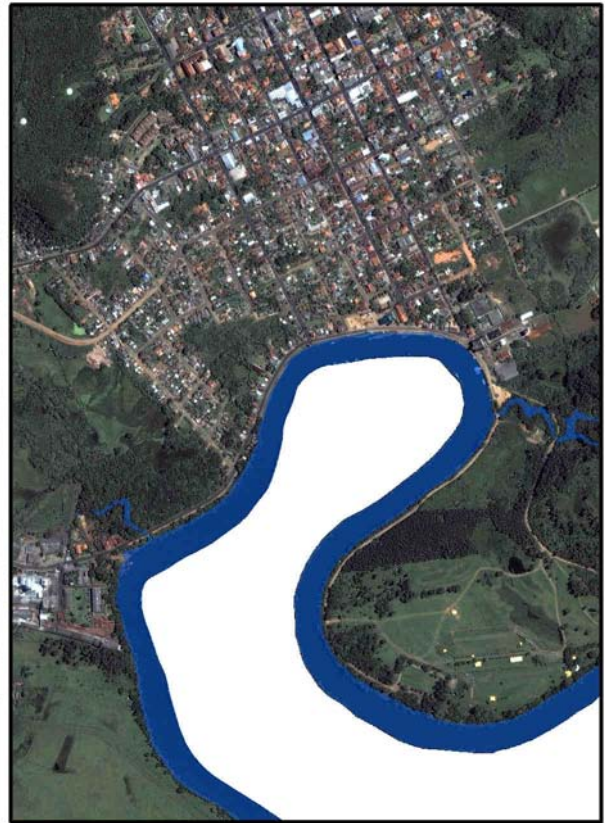


Figura 77 – 22/09/2007, às 12h: cota 4,08m.



Figura 78 – 22/09/2007, às 16h: cota 4,18m.



Figura 79 – 22/09/2007, às 20h: cota 4,40m.



Figura 80 – 23/09/2007, à 0h: cota 4,75m.



Figura 81 – 23/09/2007, às 4h: cota 5,08m.



Figura 82 – 23/09/2007, às 8h: cota 5,40m.



Figura 83 – 23/09/2007, às 12h: cota 5,77m.



Figura 84 – 23/09/2007, às 16h: cota 6,07m. Figura 85 – 23/09/2007, às 20h: cota 6,35m.

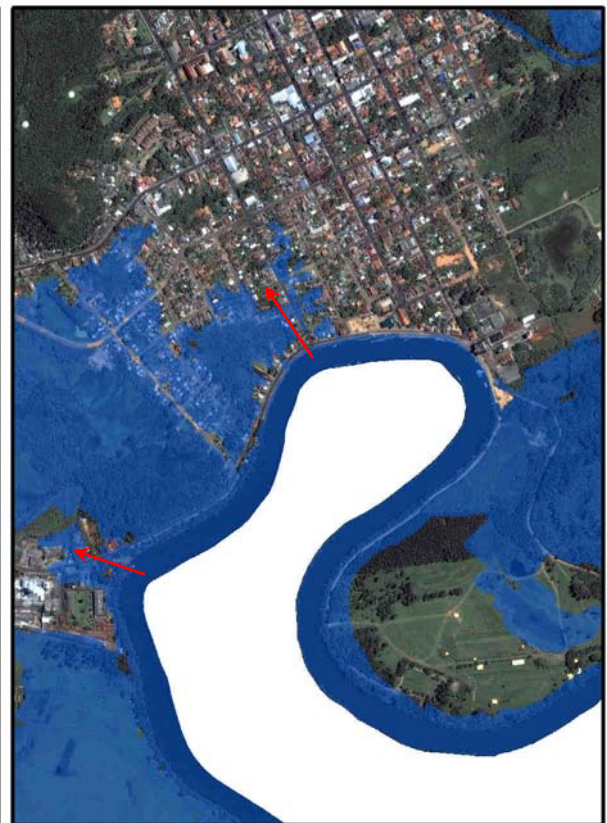


Figura 86 – 24/09/2007, à 0h: cota 6,65m. Figura 87 – 24/09/2007, às 4h: cota 6,98m.

Nas Figuras 86, 87 e 89 as setas identificam as direções preferenciais do avanço da inundação sobre o recorte da área urbana. Observa-se que à 0h do dia 24/09/2007 (Fig. 86) a lâmina d'água começa a inundar a área urbana de Montenegro, com fluxo na direção nordeste. No cenário posterior (Fig. 87), às 4h do mesmo dia, com o extravasamento do rio Caí, o fluxo adquire o sentido sudeste-noroeste.

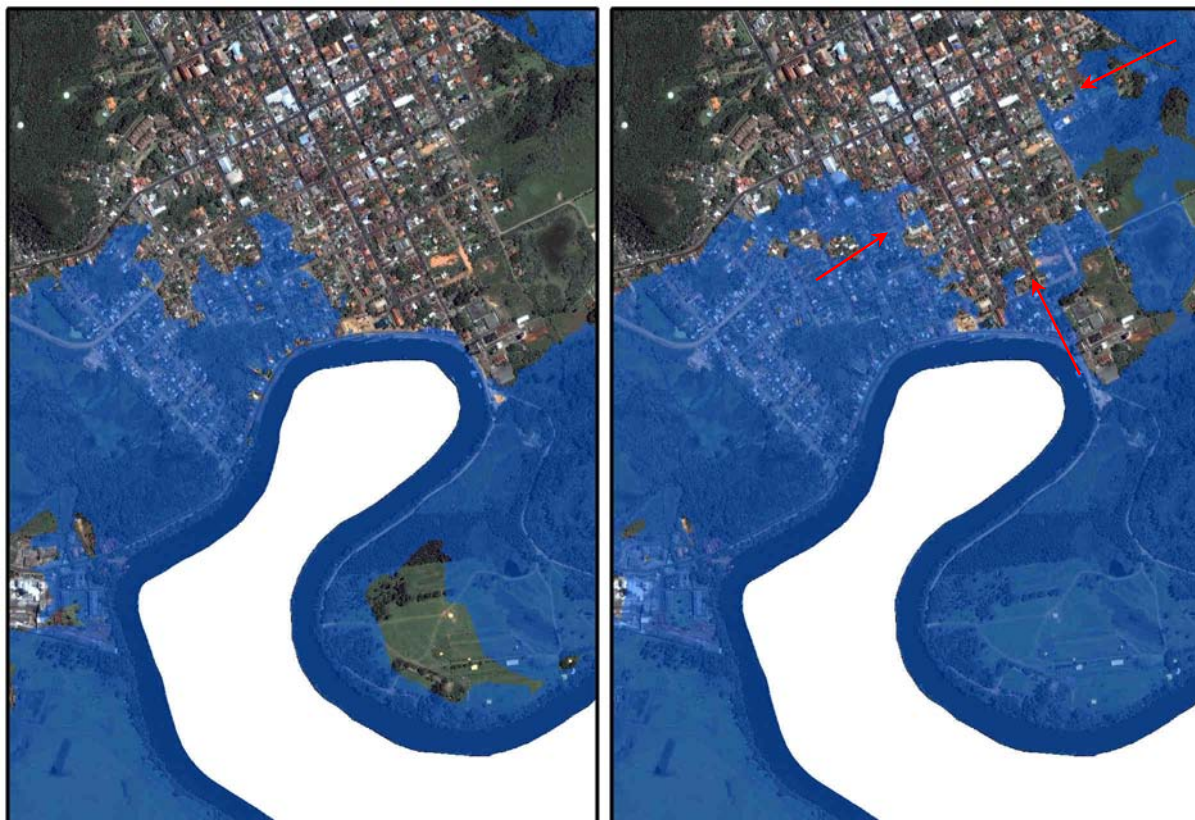


Figura 88 – 24/09/2007, às 8h: cota 7,37m. Figura 89 – 24/09/2007, às 12h: cota 8,02m.

O pico da inundação ocorreu entre os instantes retratados nas Figuras 92 (25/09, à 0h) e 93 (25/09, às 4h), precisamente à 1h do dia 25 de setembro (8,70m). Nesses dois instantes, boa parte da área urbana ilustrada no recorte já estava sob as águas do rio Caí.

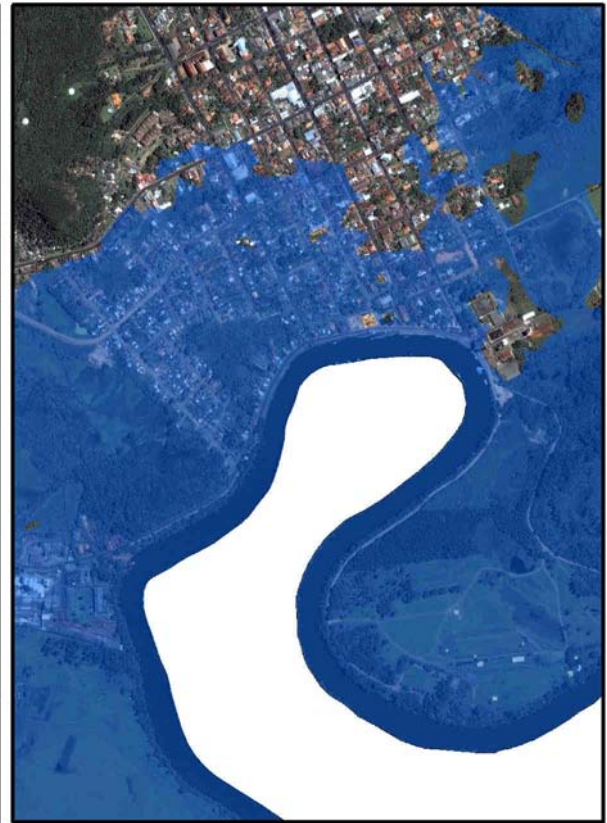


Figura 90 – 24/09/2007, às 16h: cota 8,42m. Figura 91 – 24/09/2007, às 20h: cota 8,60m.

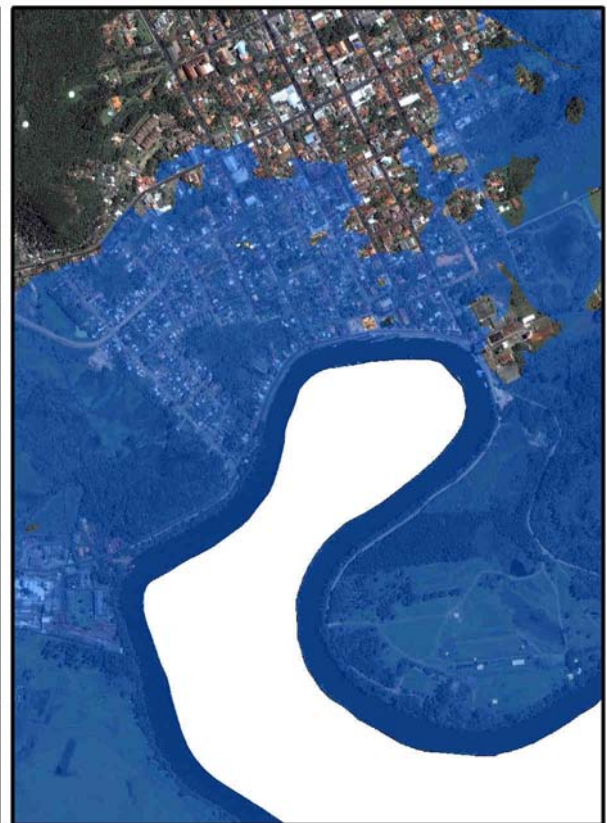


Figura 92 – 25/09/2007, à 0h: cota 8,68m. Figura 93 – 25/09/2007, às 4h: cota 8,68m.



Figura 94 – 25/09/2007, às 8h: cota 8,63m.

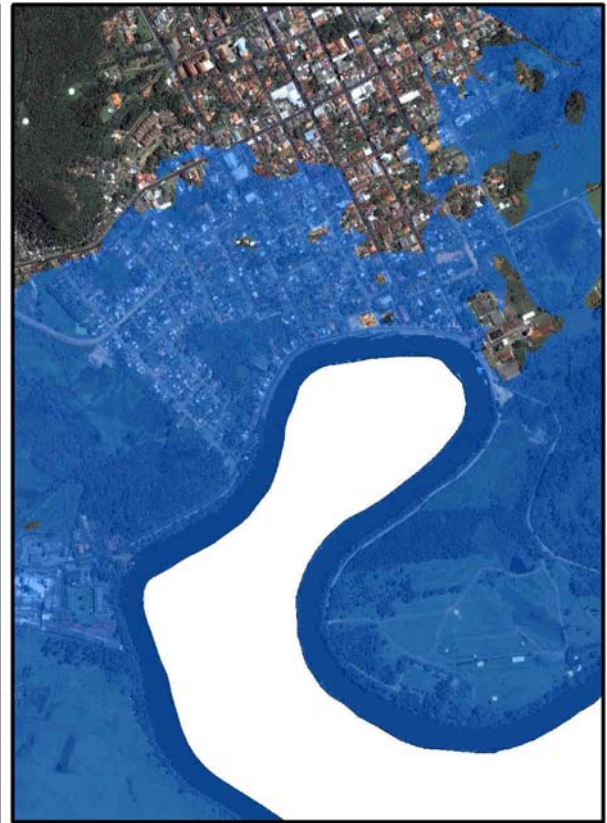


Figura 95 – 25/09/2007, às 12h: cota 8,53m.

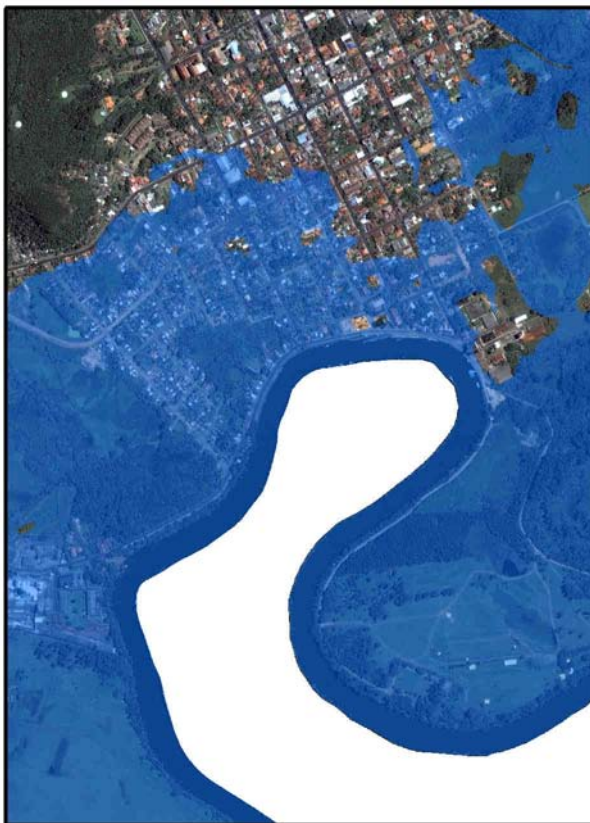


Figura 96 – 25/09/2007, às 16h: cota 8,42m.

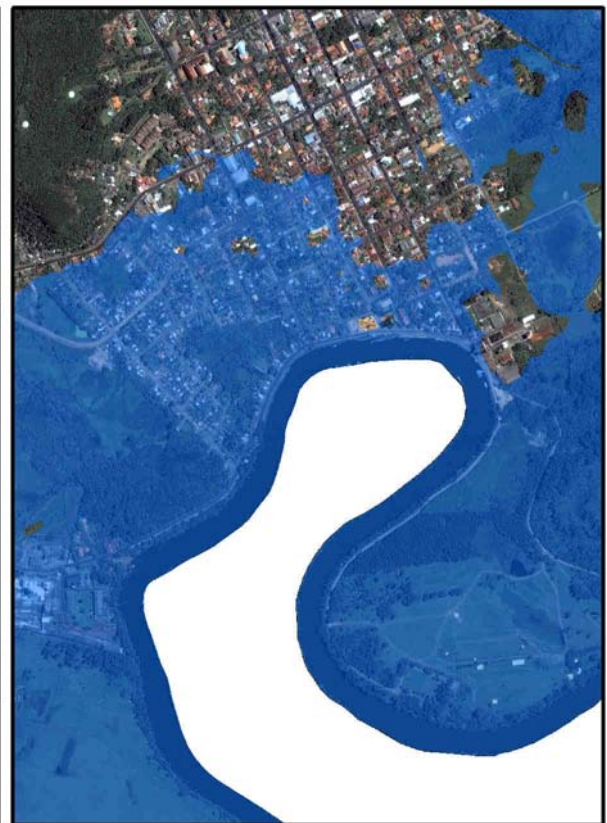


Figura 97 – 25/09/2007, às 20h: cota 8,30m.



Figura 98 – 26/09/2007, à 0h: cota 8,16m.

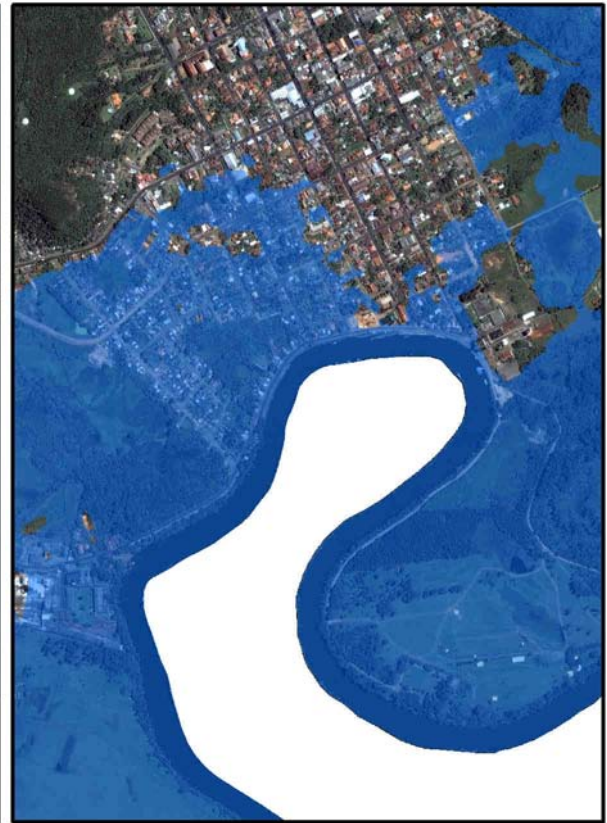


Figura 99 – 26/09/2007, às 4h: cota 8,00m.



Figura 100 – 26/09/2007, às 8h (7,85m).

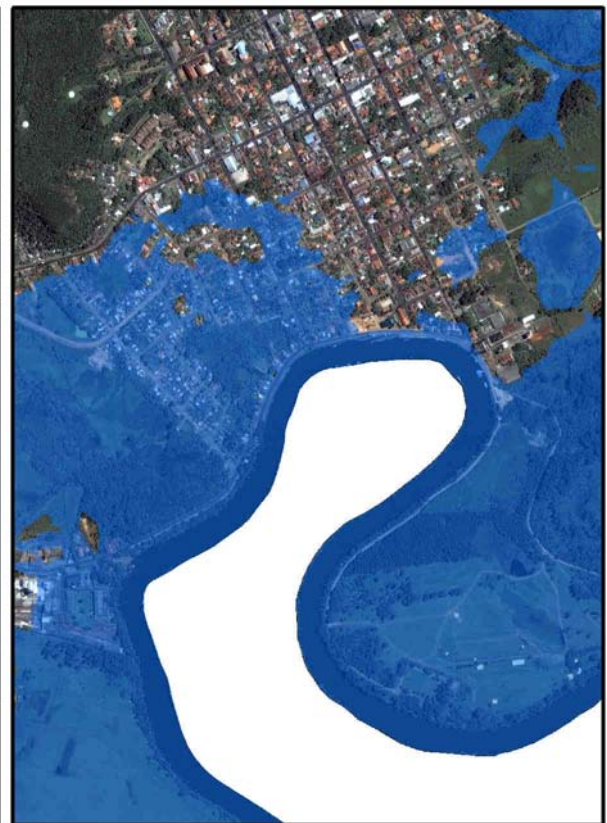


Figura 101 – 26/09/2007, às 12h (7,73m).



Figura 102 – 26/09/2007, às 16h (7,55m).

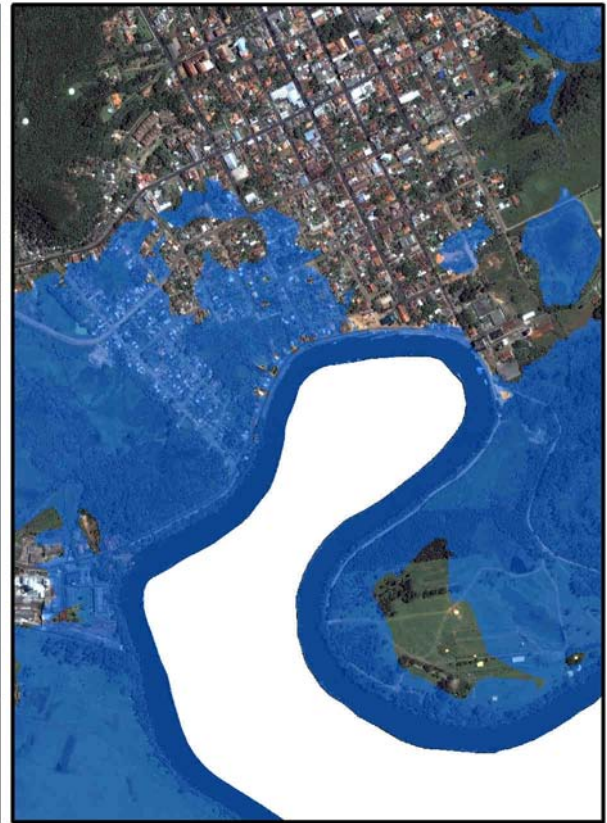


Figura 103 – 26/09/2007, às 20h (7,41m).



Figura 104 – 27/09/2007, à 0h (7,30m).

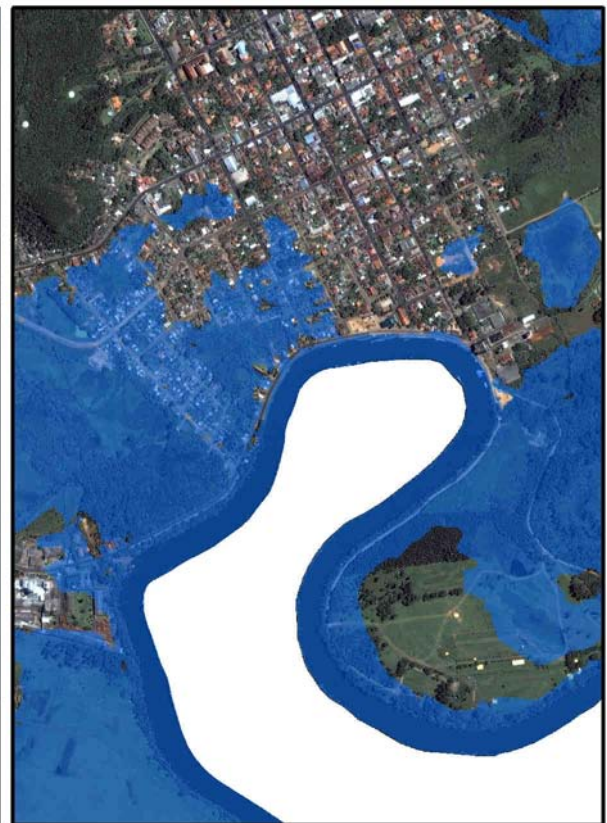


Figura 105 – 27/09/2007, às 4h (7,16m).

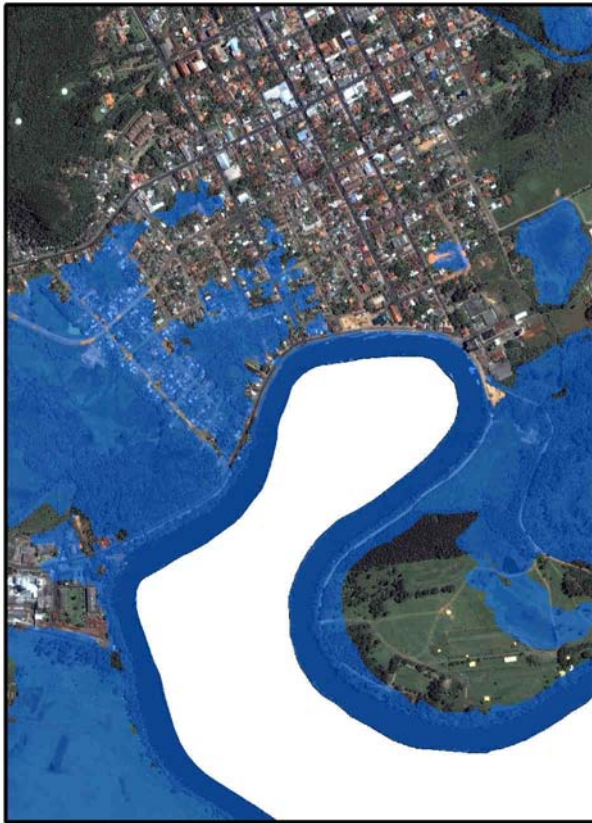


Figura 106 – 27/09/2007, às 8h (7,00m).

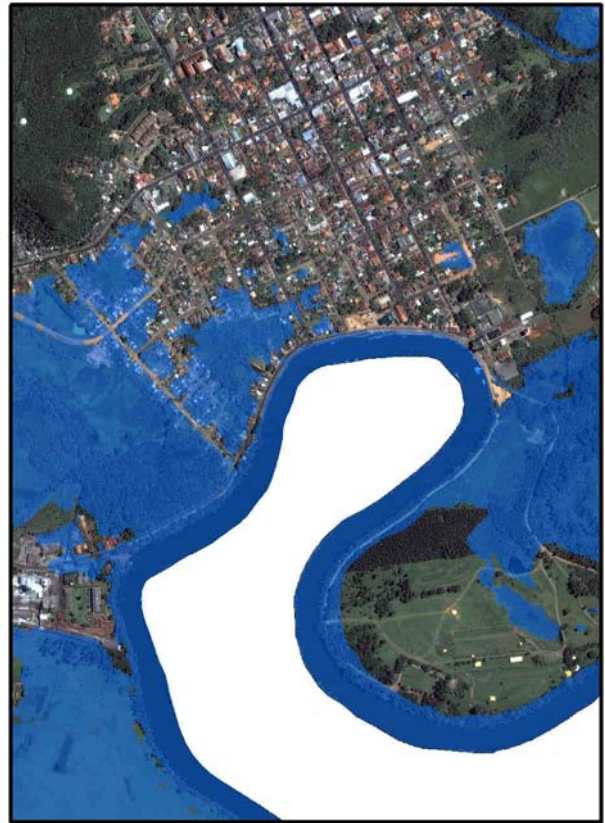


Figura 107 – 27/09/2007, às 12h (6,86m).



Figura 108 – 27/09/2007, às 16h (6,73m).



Figura 109 – 27/09/2007, às 20h (6,60m).



Figura 110 – 28/09/2007, à 0h (6,51m).



Figura 111 – 28/09/2007, às 4h (6,39m).



Figura 112 – 28/09/2007, às 8h (6,25m).



Figura 113 – 28/09/2007, às 12h (6,11m).

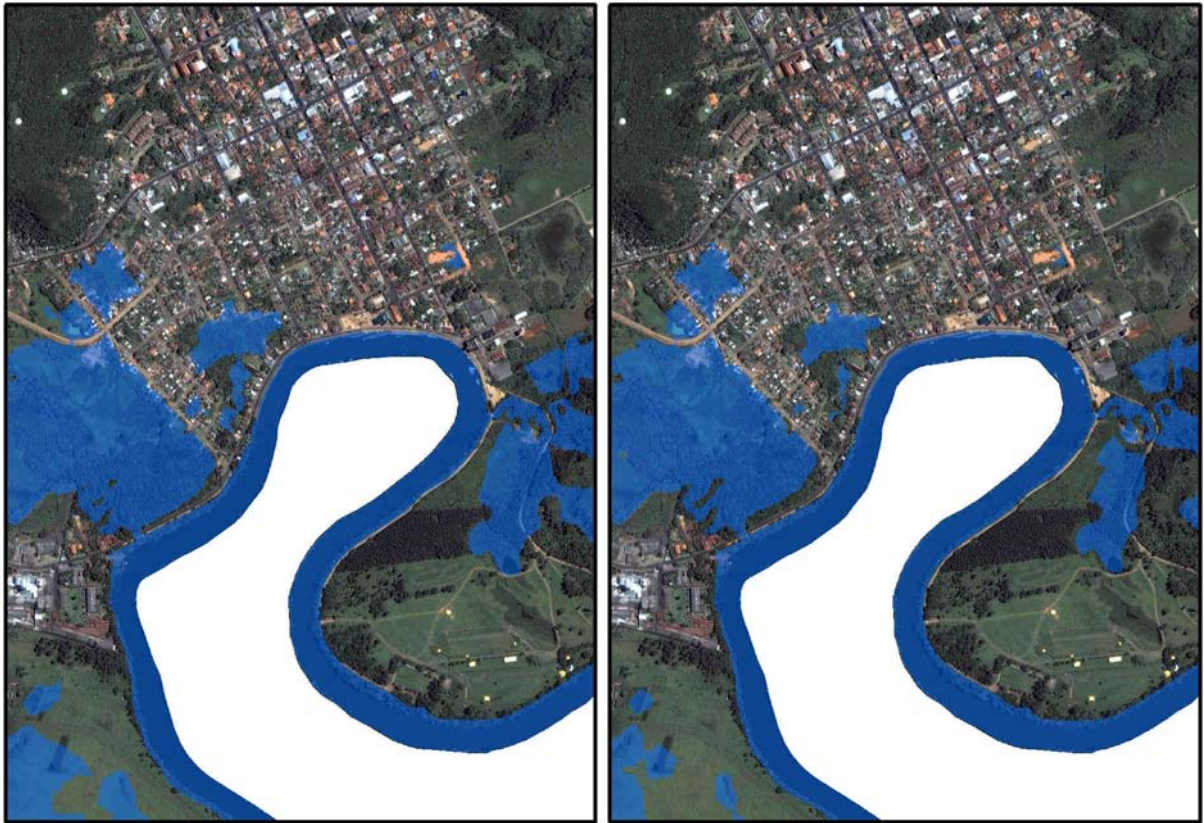


Figura 114 – 28/09/2007, às 16h (5,96m). Figura 115 – 28/09/2007, às 20h (5,82m).

No evento simulado, a retração da água ocorreu muito mais lentamente do que o avanço da inundação sobre a área modelada. A Figura 116 ilustra esse aspecto e reproduz, de forma sintética, a variação no nível do rio Caí no período entre os dias 22 e 28 de setembro de 2007, de acordo com o monitoramento da TANAC S.A.

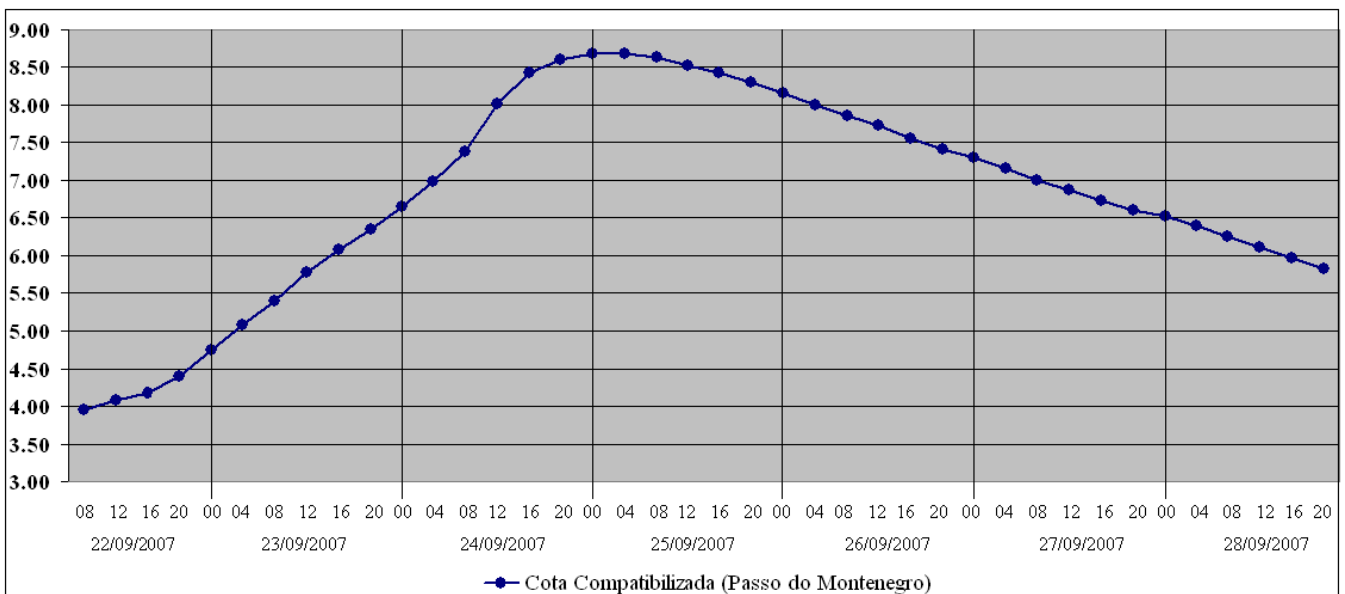


Figura 116 – Variação do rio Caí na estação Passo do Montenegro (22–28/09/2007).

Nas 36 horas que antecederam o pico da inundação, o nível das águas aumentou aproximadamente 3m. Após o pico, foram necessárias 96h para a redução do nível em 3m. Isso significa que a retração das águas foi 2,67 vezes mais demorada que o avanço.

O dia 24 de setembro foi que apresentou o maior aumento no nível do rio (2,03m), variando de 6,65m a 8,68m. No dia anterior (23), esse aumento foi um pouco menor, cerca de 1,9m. O período entre as 8h e 12h do dia 24 de setembro se destaca como o de maior variação no nível do rio Caí, em torno de 0,65m em apenas 4 horas, surpreendendo a população pela rapidez do avanço das águas (ver Figuras 86 e 87).

De acordo com a simulação realizada, mesmo depois de 96 horas do pico da inundação, havia alguns locais inundados na área urbana e entorno (Fig. 115). Considerando todo período de inundação, muitas áreas permaneceram mais de 100 horas (cerca de 4 dias) sob as águas do rio Caí.

Na Figura 117, observa-se o tempo sob a inundação das áreas atingidas pelas águas no período entre 22 e 28 de setembro de 2007.

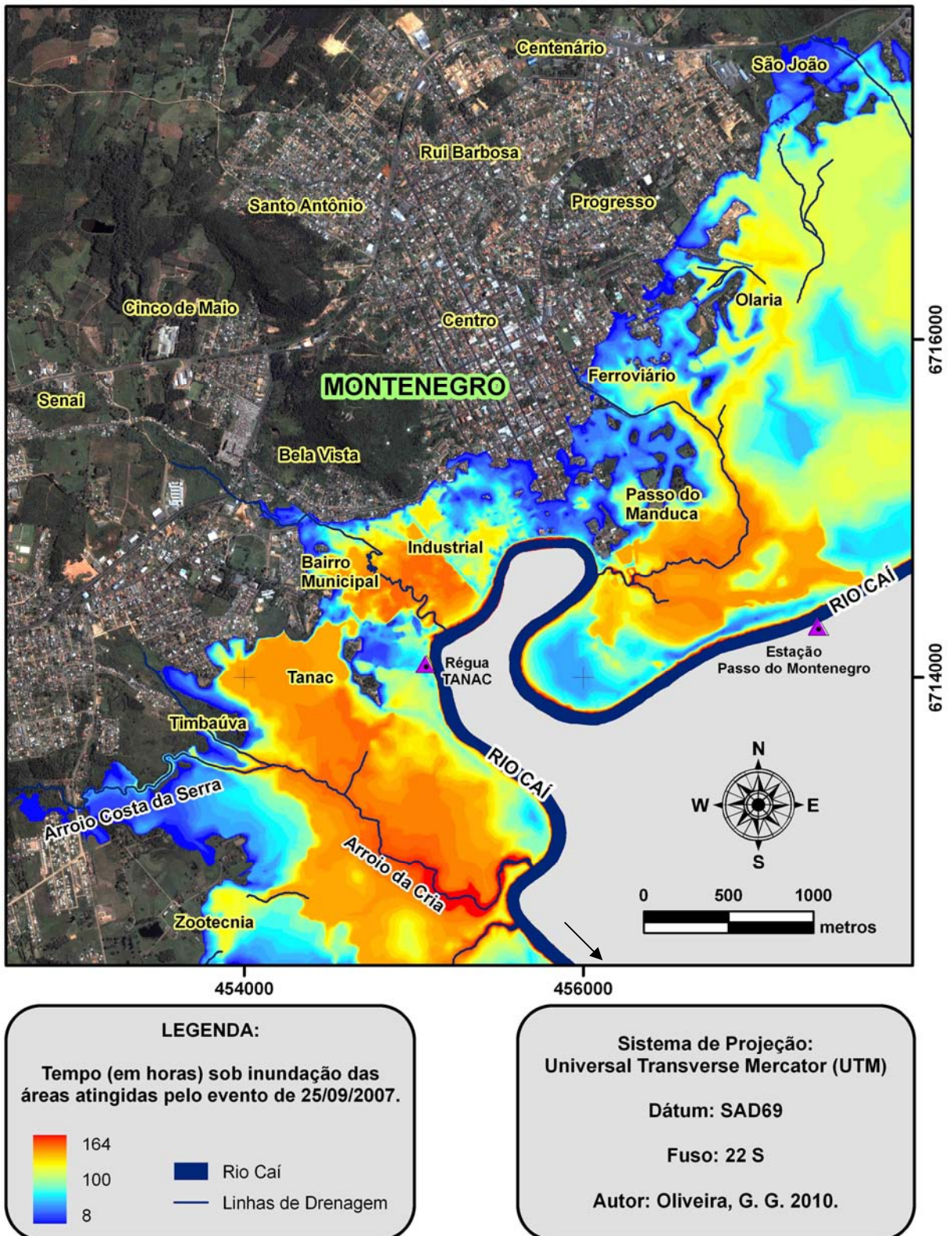


Figura 117 – Tempo sob inundação das áreas atingidas pelo evento ocorrido entre 22 e 28 de setembro de 2007, na área urbana e entornos de Montenegro/RS.

Os bairros Tanac, Municipal, Industrial, Passo do Manduca e Olaria foram os que ficaram um intervalo de tempo maior sob as águas do rio Caí (Fig. 84). A área localizada

entre o Bairro Municipal e o Industrial ficou inundada em torno de 130h (5 dias e 10 horas). Nas áreas úmidas, ao longo do arroio da Cria e do curso d'água ao sul do bairro Passo do Manduca, muitos locais ficaram mais de 140h sob a inundação (~ 6 dias).

A expressiva duração da inundação sobre áreas ocupadas pela atividade humana, em Montenegro, gera grandes prejuízos para todas as esferas da sociedade e se constitui no aspecto mais preocupante do conflito entre a população e o regime fluvial. A ocupação dessas áreas deveria ser avaliada e discutida pelos órgãos públicos competentes com a participação da comunidade, para estabelecer diretrizes que restrinjam a instalação de novos empreendimentos e transfiram gradativamente a população para áreas sem riscos de inundação.

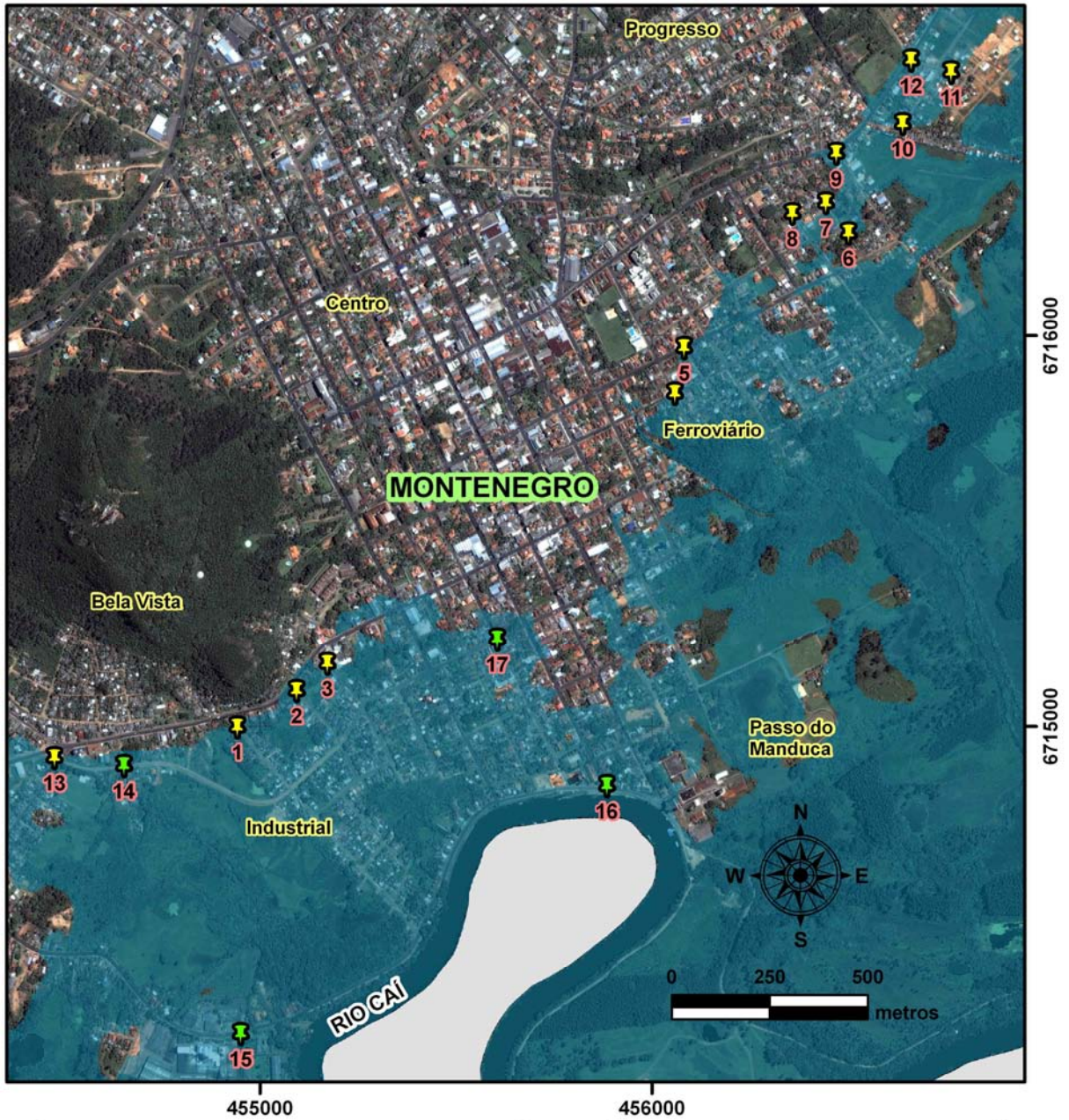
4.3.5. Avaliação do Modelo de Inundação

A avaliação do modelo de espacialização das inundações na área urbana e entornos de Montenegro foi realizada a partir das informações coletadas e das observações realizadas em campo. O posicionamento dos pontos de referência para a avaliação do modelo foi obtido com o auxílio de croquis e com o manuseio do aparelho receptor de sinal GPS. Assim como em São Sebastião do Caí, adotou-se como referência para essa avaliação os limites da inundação e os registros de altura de lâmina d'água do evento ocorrido em setembro de 2007.

A Figura 118 apresenta a distribuição dos pontos coletados para a avaliação da qualidade do modelo de inundação. Ao todo, 16 pontos foram utilizados na avaliação do modelo de inundação da área de estudo em Montenegro. O erro planimétrico médio foi de apenas 9m, sendo que o maior erro foi observado no Ponto 2, com discrepância de 24m entre o limite real e o modelado da inundação de 2007 (Figura 119).




O erro altimétrico médio obtido na modelagem da inundação de 2007 foi de 0,15m. Esse valor é extremamente baixo e indica que o modelo possui uma excelente precisão para espacializar as áreas atingidas pelas águas. O maior erro foi obtido no Ponto 14, com diferença de 0,30m entre a altura de lâmina d'água real e a modelada.

Os Pontos 15 e 16 foram os que apresentaram a melhor precisão altimétrica, com erros de 0,05m e 0,10m, respectivamente. Esses pontos são ilustrados pelas Figuras 120 e 121.



Distribuição espacial dos pontos utilizados para avaliação do modelo de inundação.

Pontos de campo para avaliação

-  Limite da Inundação
-  Inundado (altura da lâmina)
-  Máxima extensão da inundação de 25/09/2007

Sistema de Projeção:
Universal Transverse Mercator (UTM)

Dátum: SAD69

Fuso: 22 S

Autor: Oliveira, G. G. 2010.

Figura 118 – Pontos de avaliação do modelo de inundação de Montenegro/RS.



Figura 119 – Pontos de avaliação nº 1, 2 e 3: erro planimétrico de 8m, 24m e 3m na modelagem da inundação de 25/09/2007.

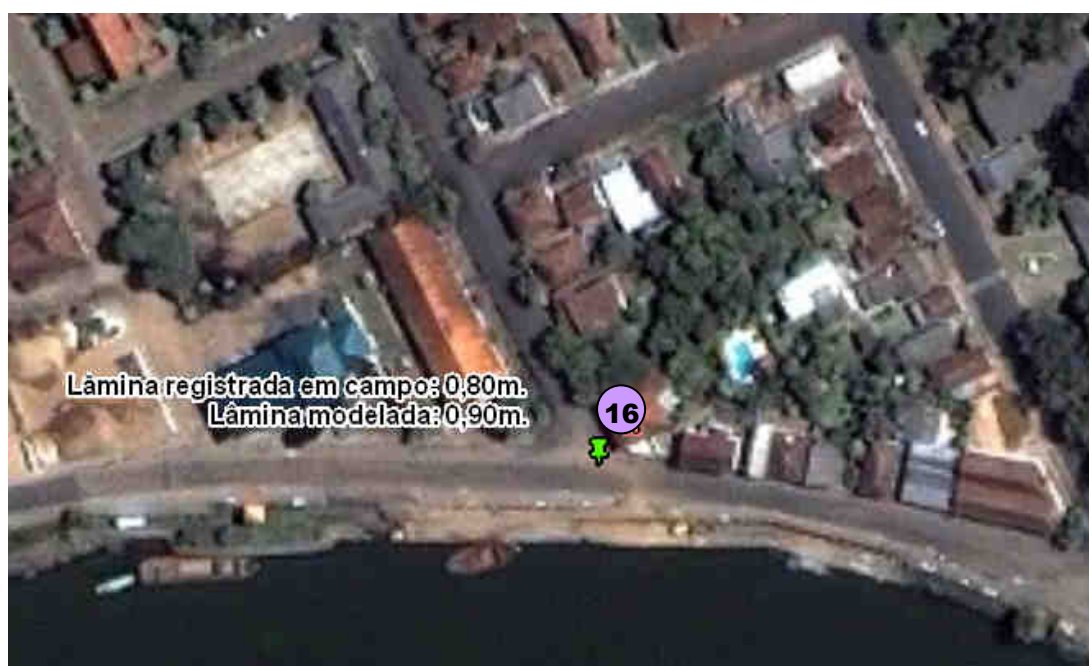


Figura 120 – Ponto de avaliação nº 16: erro altimétrico de 0,10m na modelagem da inundação de 25/09/2007.



Figura 121 – Ponto de avaliação nº 15: erro altimétrico de 0,05m na modelagem da inundação de 25/09/2007.

Os resultados evidenciam que a qualidade do modelo de inundações para Montenegro é superior ao elaborado para a área urbana de São Sebastião do Caí. Entre os motivos para essa diferença, destacam-se três aspectos: a) os dados altimétricos disponíveis para a modelagem em Montenegro possuem maior precisão e melhor distribuição (obtidos por levantamento aerofotogramétrico); b) a imagem de satélite utilizada no Módulo III está ortorretificada, enquanto que a do Módulo II possui apenas o georreferenciamento; c) a disponibilidade de informações mais precisas do limite das inundações em Montenegro e os dados complementares do monitoramento realizado pela TANAC S.A permitiram a representação do avanço da água de forma diferenciada ao longo da área de estudo, conferindo maior realismo e precisão à modelagem apresentada neste módulo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste item, são apresentadas as considerações finais pertinentes a cada módulo do trabalho, de modo a destacar os principais resultados. Além disso, são colocadas sugestões para a continuidade desta pesquisa e para o uso dos materiais elaborados nesta dissertação.

Os resultados obtidos com a manipulação dos dados fluviométricos das estações Nova Palmira, Barca do Caí e Passo do Montenegro, no Módulo I, apresentaram boa consistência, principalmente quanto à estimativa dos tempos de retorno elaborados para cada série histórica. Os valores de TR estimam a probabilidade de cada cota ser atingida nas três estações, e constituem-se em informações de grande importância para a adoção de medidas que reduzam ou coíbam a ocupação das áreas inseridas em cotas mais suscetíveis às inundações.

Mesmo com os bons resultados obtidos pela manipulação dos dados hidrológicos, seria importante considerar: a) a inclusão de outras fontes de registros históricos no sentido de validar os valores de TR estimados, pois as séries históricas podem conter inconsistências e qualquer leitura mal realizada pode comprometer o cálculo do TR e a qualidade dos modelos matemáticos de previsão de cota; b) uma investigação mais aprofundada sobre a possibilidade de desnivelamento das réguas ao longo da série histórica. Os resultados dessa investigação permitirão inferir conclusões sobre um possível aumento da frequência de inundações de maior magnitude nas últimas décadas, conforme as discussões expostas no Capítulo 4.

A espacialização da inundação de 24-25 de setembro de 2007 na bacia hidrográfica do rio Caí apresentou bons resultados e poderá servir de referência para diversas aplicações, uma vez que identifica as áreas suscetíveis às inundações com TR superior a 15 anos. Dentre as possíveis aplicações destaca-se o mapeamento das áreas de risco, que poderá subsidiar uma série de ações preventivas (remoção de pessoas, recuperação das áreas e conservação). Além disso, o mapeamento contribuiu para a avaliação preliminar dos modelos construídos no Módulo I.

De modo geral, os modelos apresentados no primeiro módulo mostraram resultados satisfatórios, tendo em vista as dificuldades impostas pela baixa acurácia vertical e resolução espacial dos dados SRTM e da DSG. Mesmo com todas as limitações inerentes aos dados de

entrada nos modelos, foram obtidos dois mapas que identificam o padrão de distribuição das áreas inundadas em diferentes cenários de elevação da água dos rios.

Os resultados obtidos no Módulo I incentivam a aplicação do mesmo método em outras bacias, ou até mesmo o aprimoramento do modelo com a entrada de novos dados ou variáveis, como MDEs de melhor qualidade e outras séries históricas de vazão ou cota. Ainda há outra alternativa para aperfeiçoar a previsão e a espacialização de áreas de inundação na bacia do rio Caí, que é a elaboração de um modelo hidrológico chuva-vazão, com a utilização de dados hidrológicos, de elevação, de declividades, entre outros.

Quanto ao Módulo II, tendo em vista os bons resultados obtidos, pode-se concluir que os objetivos propostos foram alcançados com êxito, tanto no modelo de previsão, quanto no modelo responsável pela espacialização das áreas atingidas.

O modelo matemático de previsão de enchentes e inundações na área urbana de São Sebastião do Caí apresentou precisão submétrica para estimativa de cotas entre 11m e 14m, e precisão de até 1,5m para a previsão de cotas superiores a 14m. O resíduo médio das amostras foi de apenas 0,68m. Esses valores indicam que o modelo possui uma precisão bastante elevada, principalmente se for considerada a simplicidade do método utilizado.

Outra virtude desse modelo, é que o mesmo poderá apresentar a estimativa de cota instantaneamente à leitura do nível do rio à montante, tendo em vista o seu pequeno tempo de processamento. Com a instalação das estações telemétricas, a previsão de cota poderá ser atualizada a cada hora, tornando a modelagem ainda mais dinâmica e precisa.

Baseado nessas argumentações, pode-se concluir que o modelo de previsão, proposto no Módulo II desta dissertação, representa um excelente avanço na previsão de enchentes e inundações e poderá reduzir os danos causados por esses eventos. O modelo é suficientemente confiável para sua adoção em futuros sistemas de previsão e alerta de enchentes e inundações na área urbana de São Sebastião do Caí.

O modelo aplicado à espacialização das inundações em São Sebastião do Caí também apresentou bons resultados e mostrou que é possível identificar as áreas atingidas, com precisão, fazendo uso de materiais de acesso relativamente fácil. O erro planimétrico médio verificado através das amostras de campo foi de 19m. Esse valor pode ser considerado baixo, principalmente se comparado à extensão total do extravasamento das águas. O erro altimétrico médio (diferença entre as lâminas d'água medida e modelada da inundação de 2007), nos pontos avaliados, foi de apenas 0,30m.

Embora os resultados sejam satisfatórios, recomenda-se reavaliar/calibrar esses modelos de forma periódica com base em futuros episódios de cheias, uma vez que foi

utilizado apenas um evento para validar o modelo apresentado. É importante lembrar também que a qualidade do modelo pode ser maximizada com a inclusão de dados altimétricos mais precisos (por exemplo, por levantamento aerofotogramétrico). Além disso, seria interessante expandir o mapeamento para as áreas rurais de São Sebastião do Caí, para estimar o impacto nesse setor da economia e delimitar as áreas de risco em todo município.

O Módulo III foi o que apresentou os resultados mais consistentes e precisos. O modelo de previsão obteve um resíduo médio de apenas 0,25m, e o índice de precisão oscilou entre 0,23m e 0,42m, de acordo com os intervalos de previsão de cota, superando todas as expectativas iniciais da pesquisa.

Esses valores indicam que o modelo de previsão de cota do rio Caí, em Montenegro, é significativamente mais preciso do que o apresentado para São Sebastião do Caí. A principal justificativa para isso se deve à menor distância existente entre as estações utilizadas neste módulo, aspecto que aumenta o coeficiente de correlação dos dados amostrados.

O monitoramento e a previsão poderão ser realizados de hora em hora, assim como no modelo de previsão de inundações na área urbana de São Sebastião do Caí. Essa condição garante a aplicabilidade do modelo em um futuro sistema de alerta para Montenegro.

Quanto ao modelo aplicado à espacialização das áreas inundáveis na área urbana e entornos de Montenegro, os resultados obtidos foram excelentes e indicaram que o método utilizado foi capaz de atender aos objetivos propostos no trabalho. O erro planimétrico nas amostras coletadas em campo foi de 9m e o altimétrico, de apenas 0,15m. Esses valores foram ainda mais satisfatórios do que os obtidos no Módulo II, basicamente, em virtude da qualidade dos dados de entrada do modelo.

A simulação da inundação ocorrida em 25/09/2007 mostrou-se interessante para o entendimento da dinâmica de inundação na área de estudo. O mesmo procedimento poderá ser utilizado para modelar, dinamicamente e espacialmente, o avanço e a retração das águas em eventos futuros, conjugando os dois modelos apresentados (de previsão e de espacialização) neste módulo.

Tendo em vista os resultados obtidos, sugere-se a implantação de um sistema integrado de previsão e alerta de inundações para São Sebastião do Caí e Montenegro, assim que as estações telemétricas estejam em pleno funcionamento. O sistema poderia reunir os dados apresentados nesta dissertação, contando com a articulação dos diversos agentes envolvidos (órgãos de Defesa Civil, instituições de pesquisa e ensino, as comunidades afetadas, etc.). Uma vez implantada, essa medida deverá reduzir significativamente os prejuízos decorrentes das inundações e beneficiará os milhares de moradores afetados.

6. REFERÊNCIAS

ALSDORF, D. E. *et al.* **Interferometric radar measurements of water level changes on the Amazon flood plain.** Nature, nº404, 2000. p. 174-177.

ARAÚJO, L. C. de. **Memória sobre o Clima do Rio Grande do Sul.** Boletim do Ministério da Agricultura, 1930.

BATES, P. D.; DE ROO, A. P. J. **A simple raster-based model for floodplain inundation.** In: Journal of Hydrology, nº 236, 2000. p. 54-77.

BEVEN *et al.* **TOPMODEL.** In: SINGH, V. P. ed. Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications, 1995. p. 627-668.

BOTELHO, R. G. M.; ROSSATO, M. S. **Erosão em áreas urbanas no Brasil: formas de ocorrência e fatores agravantes.** XIII Encontro Nacional de Geógrafos. (CD-ROM). João Pessoa, 2002.

BRIVIO, P. A. *et al.* **Integration of Remote Sensing Data and GIS for Accurate Mapping of Floods Areas.** International Journal of Remote Sensing, London, UK: Taylor & Francis, v. 23, n. 03, Feb. 2002. p. 429-441.

BURNASH, R. J. C. **The NWS river forecast system catchment modelling.** In: SINGH, V. J. (Editor) Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, 1995. 1130p.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **Princípios básicos em geoprocessamento.** In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. Sistemas de informações geográficas: aplicações na agricultura. 2.ed. Brasília: Serviço de Produção de Informação/Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados/Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1998. p. 3-12.

CASTRO, A. L. C. **Glossário de defesa civil, estudos de riscos e medicina de desastres.** 2.ed. Brasília: Ministério do Planejamento e Orçamento, 1998. 283p.

CAVALHEIRO, F. **Urbanização e alterações ambientais.** In: Análise ambiental: uma visão multidisciplinar. 2ª ed. Ed. UNESP, 1995, pp. 114-124.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia Fluvial.** São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1981.

COLLINS, T. **Disaster Risk for Floods: 1980 – 2000**. United Nations University. Tokyo: 2004. 6p. Disponível em: <<http://www.unu.edu/news/ehs/floods.doc>> Acesso em: 19/05/2008.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Tese de Doutorado (Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2001. 270p.

COMITECAÍ. **Plano de Bacia – Bacia Hidrográfica do Rio Caí**. Relatório Temático A1 – Dinâmica Social. Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Caí, Porto Alegre, 2007a. Disponível em: <<http://www.comitecai.com.br/plano/download.html>>. Acesso em: 10/11/2009.

COMITECAÍ. **Plano de Bacia – Bacia Hidrográfica do Rio Caí**. Relatório Temático A2 – Disponibilidade Hídrica. Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Caí, Porto Alegre, 2007b. Disponível em: <<http://www.comitecai.com.br/plano/download.html>>. Acesso em: 10/11/2009.

COMITECAÍ. **Segunda Revista do Plano da Bacia do Rio Caí**. Comunicação Impressa, 2008. 32p.

COSTA, A. J. S. T. **Hidrogeografia e a cidade do Rio de Janeiro**. In: Estudos de Geografia Fluminense. MARAFON, G. J.; RIBEIRO, M. F. (Org). Infobook Ltda., Rio de Janeiro, 2002, pp. 193-209.

COSTA, M. das G. A. *et al.* **Avaliação de áreas de risco à inundação no perímetro urbano de Caratinga – MG através do uso de dados altimétricos provenientes do sensor aerotransportado LIDAR**. In: Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG, 2009. Disponível em: <http://www.geo.ufv.br/simposio/simposio/trabalhos/trabalhos_completos/eixo1/061.pdf>. Acesso em: 16/12/2009.

DIAS, J. E. *et al.* **Geoprocessamento aplicado à análise ambiental: o caso do município de Volta Redonda/RJ**. In: SILVA, J. X. da; ZAIDAN, R. T. Geoprocessamento e análise ambiental: aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. p. 143-177.

ECKHARDT, R. R. **Geração de modelo cartográfico aplicado ao mapeamento das áreas sujeitas às inundações urbanas na cidade de Lajeado/RS**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

ENOMOTO, C. F. **Método para elaboração de mapas de inundação: estudo de caso na bacia do rio Palmital, Paraná**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

FELGUEIRAS, C. A.; CÂMARA, G. **Modelagem Numérica de Terreno**. In: Introdução à Ciência da Geoinformação. São José dos Campos, SP: INPE, 2004. Cap. 7, 36p. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf>>. Acesso em: 15/11/2008.

FEPAM. **Qualidade Ambiental: Região Hidrográfica do Guaíba**. Porto Alegre: FEPAM, 2008. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/guaiba.asp>>. Acesso em: 20/12/2008.

FERRAZ, F. F. *et al.* **Previsão de áreas inundadas na cidade de Piracicaba (SP) através de sistema de informações geográficas (SIG)**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 3, n. 3, Jul/Set, 1998. p. 17-27.

FERREIRA, E. R. *et al.* **Sistema de Previsão e Alerta de Enchentes da Região do Vale do Taquari – RS - Brasil**. In: Anais do II Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais e Tecnológicos. Santos: ABGE, 2007.

FLORENZANO, T. G. *et al.* **Utilização de dados TM-Landsat para o mapeamento de áreas submetidas à inundação na Bacia do Rio Parnaíba**. São José dos Campos: INPE, 1988. (INPE-4570-RPE/566).

FORTES, A. B. **Geografia Física do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Livraria do Globo, 1959. 393p.

GOMES, P. F. **Curso de estatística experimental**. 13. ed. Piracicaba: Nobel, 1990. 468p.

HAILE, A. T.; RIENTIES, T. H. M. **Effects of LIDAR DEM resolution in flood modeling: a model sensitivity study for the city of Tegucigalpa, Honduras**. ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop “Laser Scanning 2005”, Enschede, Netherlands, September 12-14, 2005. p. 168-173.

HUTCHINSON, M. F. **A new method for gridding elevation and streamline data with automatic removal of pits**. Journal of Hydrology 106. 1989. p. 211-232.

HUTCHINSON, M. F. **Development of a continent-wide DEM with applications to terrain and climate analysis**. In: Environmental Modeling with GIS, New York: Oxford University Press, 1993. p. 392–399.

HUTCHINSON, M. F. **A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models**. Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling. NCGIA, University of California, Santa Barbara, 1996. Disponível em: <<http://www1.gsi.go.jp/geowww/globalmap-gsi/gtopo30/papers/local.html>>. Acesso em: 12/03/2008.

IBGE. Banco de Dados Agregados – Sistema de Recuperação Automática (SIDRA): Censo Demográfico e Contagem da População, 2007. <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?z=cd&o=7&i=P&c=2093>>. Acesso em: 08/11/2009.

IBGE. **Mapa de Geomorfologia do Estado do Rio Grande do Sul**. 2009. Disponível em: <http://www.fzb.rs.gov.br/novidades/images/02_geomorfologia_total_150.pdf>. Acesso em: 20/09/2009.

INMET. **Normais climatológicas 1961 – 1990**. Instituto Nacional de Meteorologia, Brasília, 2009. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/html/clima/mapas/?mapa=prec>>. Acesso em 11/11/2009.

JENSEN, J. **Remote sensing of environment: an Earth resource perspective**. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2000. 544p.

JPL – JET PROPULSION LABORATORY. **NASA/JPL SRTM**. 2002. Disponível em <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>. Acesso em 02/03/2008.

KAFLE, T. P. *et al.* **Integration of remote sensing and GIS with flood simulation model for flood hazard mapping in the Bagmati River, Nepal**. New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, Thailand, 2006. p. 257-268.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, Integração e Aplicação**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001. 536p.

METROPLAN – Fundação de Planejamento Metropolitano e Regional. **Rede de monitoramento ambiental: monitoramento do uso e ocupação territorial: Carta de uso e ocupação do solo da Região Hidrográfica do Guaíba**. 2 v. 1999.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. **Digital Terrain Modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications**. Hydrological Processes, 5(1), 1991. p. 3-30.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. **SRTM Coverage Map**. 2005. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/coverage.html>>. Acesso em 24/07/2009.

OLIVEIRA G. G. **Mapa de suscetibilidade a inundações da Sub-bacia do Arroio da Areia/RS**. Trabalho de Graduação (Bacharelado em Geografia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS, 2007.

OLIVEIRA G. G. **Mapas aplicados às inundações na bacia hidrográfica do rio Caí, Rio Grande do Sul**. 2009.

OLIVEIRA G. G. **Mapas aplicados às inundações na bacia hidrográfica do rio Caí, Rio Grande do Sul**. 2010.

OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L. A. **Comparação de métodos para a elaboração de mapa de suscetibilidade a inundações - Sub-bacia do Arroio da Areia, Porto Alegre/RS**. Anais VII Simpósio Nacional de Geomorfologia - Sinageo, Belo Horizonte, 2008.

OSTROWSKY, M. S. B.; ZMITROWICZ, W. **Urbanização e controle de enchentes: o caso de São Paulo: seus conflitos e inter-relações.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 1991.

PAZ, A. R.; BUENO, E. O.; TUCCI, C. E. M. **Análise de metodologias de previsão de vazões em tempo real estudo de casos: bacias do rio Doce (MG) e do rio Uruguai (RS).** In: Anais do II Simpósio de Recursos Hídricos do Centro Oeste. Campo Grande: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2002. CDROM.

PÉRTILE, E. **Geração de mapas de áreas de inundação da bacia hidrográfica do alto e médio rio Cubatão do Norte/SC com aplicação do TOPMODEL.** Trabalho de Conclusão (Engenharia Sanitária e Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2008. 46p.

PEUKER, T. K. *et al.* **The Triangulated Irregular Network. Proceedings of the International Symposium on Cartographic and Computing: Applications in Health and Environment (Auto Carto 4), v.2, 1979. p. 96-103.**

PORTO, R. *et al.* **Drenagem Urbana.** In: Hidrologia: ciência e aplicação. TUCCI, C. E. M. (Org). 2ª Ed., Porto Alegre, Ed. Universidade/UFRGS: ABRH, 2001, pp. 805-847.

RIBEIRO, C. A. A. S. *et al.* **Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para a Amazônia legal.** In: Anais do II Simpósio de Recursos Hídricos do Centro Oeste. Campo Grande: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2002. CDROM.

RIVAS, R. A. N.; BRITO, J. L. N. S. **A tecnologia “Laser Scanning”: Uma alternativa para o mapeamento topográfico.** In: Anais do XXI Congresso Brasileiro de Cartografia, Belo Horizonte/MG, 2003. Disponível em: <http://www.cartografia.org.br/xxi_cbc/227-SR25.pdf>. Acesso em: 25/10/2008.

ROSENQVIST, A.; BIRKETT, C. M. **Evaluation of JERS-1 SAR mosaics for Hydrological Applications in the Congo River Basin.** International Journal of Remote Sensing, London, UK: Taylor & Francis, v. 23, n. 07, Apr. 2002. p. 1283-1302.

ROSIM, S.; FELGUEIRAS, C. A.; NAMIKAWA, L. M. **Uma metodologia para geração de MNT por grades triangulares.** Anais do VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 1993. p. 420-427.

ROSS, J. L. S. **Ecogeografia do Brasil: subsídios para o planejamento ambiental.** São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 208p.

SALDANHA, D. L. *et al.* **Mapeamento e Avaliação das áreas inundáveis do Rio dos Sinos através da utilização de imagens TM-Landsat 5.** In: Revista de Geografia da UNESP, v.13. São Paulo: Editora UNESP, 1996. p. 127-144.

SANTOS, P. R. A.; GABOARDI, C.; OLIVEIRA L. C. **Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia.** Revista Brasileira de Cartografia, nº 58/01, 2006. p. 101-107.

SARTORI, M. G. B. **O clima de Santa Maria:** do regional ao urbano. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1979. 163p.

SARTORI, M. G. B. **A dinâmica do clima do Rio Grande do Sul:** indução empírica e conhecimento científico. Revista Terra Livre, São Paulo, v. 1, n. 20, jan/jul, 2003. p. 27-49.

SCHULT, S. I. M.; PINHEIRO, A. **Ocupação e Controle das Áreas Urbanas Inundáveis.** In: Enchentes na Bacia do Itajaí: 20 Anos de Experiências. 1 ed., Blumenau: FURB, v. 1, 2003. p. 173-190.

SILVA, A. B. **Sistemas de Informações Geo-referenciadas:** conceitos e fundamentos. Campinas: Unicamp, 1999. 236p.

SILVA, A. P. M.; BARBOSA, A. A. **Validação da função mancha de inundação do SPRING.** Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis: INPE, 2007. p. 5499-5505.

SMITH, L. C. **Satellite remote sensing of river inundation área, stage, and discharge:** a review. Hydrological Processes, v. 11, 1997. p. 1427-1439.

SOUZA, J. M. **Análise da qualidade cartográfica dos dados da Shuttle Radar Topography Mission – SRTM.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2006. 116p.

STRAHLER, A. N. **Dynamic basis of Geomorphology.** Geol. Soc. America Bulletin, 63, 1952. p. 923-938.

TOWNSEND, P. A.; WALSH, S. J. **Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar and optical remote sensing.** Geomorphology, v. 21, 1998. p. 295-312.

TRENTIN, C. B. *et al.* **Análise da ocorrência de enchentes na área de abrangência do Rio Jacuí/RS com a utilização de imagens MODIS e dados SRTM.** 2008. Disponível em: <<http://www.inpe.br/crs/geodesastres/imagens/publicacoes>>. Acesso em: 23/12/2008.

TUCCI, C. E. M. **Controle de enchentes.** In: Hidrologia: ciência e aplicação. TUCCI, C. E. M. (Org). 2ª Ed., Porto Alegre, Ed. Universidade/UFRGS: ABRH, 2001, pp. 621-658.

TUCCI, C. E. M. **Plano Diretor de Drenagem Urbana:** princípios e concepção. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 2, n. 2, Jul/Dez, 1997, pp. 5-12.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (Org). **Inundações urbanas na América do Sul.** Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. de. **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (Coleção ABRH de Recursos Hídricos), 1995. 428 p.

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Mission Summary**. 2009. Disponível em <<http://srtm.usgs.gov/mission/missionsummary.php>>. Acesso em 04/05/2009.

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos, INPE, 2004. 72p.

VALERIANO, M. M. **TOPODATA**: guia de utilização de dados geomorfométricos locais. São José dos Campos: INPE, 2008. Disponível em <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/documentos.php>>. Acesso em 16/04/2009.

VALERIANO, M. M. *et al.* **Modeling small watersheds in Brazilian Amazônia with SRTM-90m data**. Computers & Geosciences 32 (8), 2006. p. 1169-1181.

VITTE A. C.; GUERRA, A. J. T. (Org). **Reflexões sobre a geografia física no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. 280p.

VÖRÖSMARTY, C. J. *et al.* **Distributed parameter models to analyze the impact of human disturbance of the surface hydrology of a large tropical drainage basin in southeastern Africa**. Hydrology for the water management of large river basins. IAHS Publication n. 201. Proceedings of the Vienna Symposium. 2001. pp. 233-244.

WAHBA, G. **Spline models for Observational data**. Paper presented at CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics. Philadelphia: Soc. Ind. Appl. Maths, 1990.

WOLLMANN C. A. **A gênese climática das enchentes na Bacia Hidrográfica do Rio Caí**. Trabalho de Conclusão (Bacharelado em Geografia). Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 2008.