

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**PLANEJAMENTO PARA COMUNIDADES RURAIS
EM SITUAÇÕES DE ENCHENTES**

TESE DE DOUTORADO

Alessandro Carvalho Miola

Santa Maria, RS, Brasil

2013

PPGEA/UFSM,RS

MIOLO, Alessandro Carvalho

Doutor

2013

PLANEJAMENTO PARA COMUNIDADES RURAIS EM SITUAÇÕES DE ENCHENTES

Alessandro Carvalho Miola

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Agrícola**

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Lopes da Silveira

Santa Maria, RS, Brasil

2013

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Miola, Alessandro C.

Planejamento para comunidades rurais em situações de enchentes / Alessandro C. Miola.-2013.

216 p.; 30cm

Orientador: Geraldo Lopes da Silveira

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2013

1. Enchentes 2. Microbacias 3. Geoprocessamento 4. Modelagem Digital do Terreno 5. Modelos Hidrológico-Hidráulicos I. Silveira, Geraldo Lopes da II. Título.

© 2013

Todos os direitos autorais reservados a Alessandro Carvalho Miola. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Colégio Politécnico da UFSM – Campus da UFSM, Prédio 70, sl. F 211-B. Bairro Camobi, Santa Maria, RS. CEP 97105-970.

Fone: (0XX) 55 3220-9419. E-mail: alessandro@politecnico.ufsm.br

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

A Comissão Examinadora abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**PLANEJAMENTO PARA COMUNIDADES RURAIS
EM SITUAÇÕES DE ENCHENTES**

elaborada por
Alessandro Carvalho Miola

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Agrícola

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Geraldo Lopes da Silveira
(Presidente/Orientador)

Prof. Ph.D. Carlos André Bulhões Mendes (IPH-UFRGS)

Prof. Dr. Paulo Roberto Jaccques Dill (UFRPe)

Prof. Dr. Toshio Nishijima (UFSM)

Prof. Dr. Mario Luiz Trevisan (UFSM)

Santa Maria, 26 de fevereiro de 2013.

Agradecimentos

À Deus, que em Si, resume o significado da vida e de nossa existência, Muito Obrigado!

Inicialmente gostaria de expressar minha imensa gratidão à Universidade Federal de Santa Maria, instituição na qual obtive toda minha formação acadêmica, da graduação ao Doutorado.

Da mesma forma, agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA-UFSM) pela possibilidade de cursar o Doutorado em Engenharia Agrícola, na Área de Concentração de Engenharia de Água e Solo.

Os meus maiores agradecimentos ao Professor Dr. Geraldo Lopes da Silveira, que aceitou orientar-me na jornada de elaboração desta Tese, e cuja longa experiência e vasto conhecimento em Recursos Hídricos nortearam-me a encontrar as respostas necessárias à conclusão desse trabalho. Ao Prof. Geraldo, muito obrigado é pouco para agradecer à oportunidade que me concedeu, de cursar o Doutorado sob sua ilustre orientação.

Muito obrigado, também, a todos os colegas e alunos do Colégio Politécnico da UFSM, instituição que foi determinante para que eu pudesse realizar as atividades desenvolvidas ao longo dos quatro anos dessa pesquisa.

Um especial agradecimento a toda a comunidade do Distrito de Arroio Grande, em Santa Maria-RS, como também às pessoas de localidades vizinhas, que de alguma forma contribuíram com informações e relatos pessoais sobre fatos históricos relacionados ao objeto desse estudo.

Muito obrigado ao Instituto Nacional de Meteorologia; à 1ª Divisão de Levantamentos do Ministério do Exército; ao Arquivo Público Municipal de Santa Maria, à Base Aérea de Santa Maria e aos escritórios da EMATER de Itaára e Silveira Martins-RS, pela cedência de dados e materiais fundamentais para a realização da pesquisa.

Por fim, não tenho palavras para manifestar minha gratidão à minha família; minha esposa Sabrina e filhos Isabela e Artur, pois ao longo desses anos, têm sido as pessoas que, com amor e alegria têm me ensinado a maneira mais simples de ser feliz. É para eles que eu dedico todo o esforço e a perseverança para chegar ao fim de mais esta etapa de minha formação profissional.

Dedico este trabalho à memória de minha mãe, Teresinha Carvalho Miola e meu pai, Antônio Biscaro Miola.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta Tese, muito obrigado!

Caiu a chuva, vieram as enchentes, sopraram os ventos e investiram contra aquela casa; ela, porém, não caiu, porque estava edificada na rocha.

Mas aquele que ouve as Minhas palavras e não as põe em prática é semelhante a um homem insensato, que construiu sua casa na areia.[...]

(Mateus; 7, 24-25)

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria

PLANEJAMENTO PARA COMUNIDADES RURAIS EM SITUAÇÕES DE ENCHENTES

AUTOR: ALESSANDRO CARVALHO MIOLA

ORIENTADOR: GERALDO LOPES DA SILVEIRA

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 26 de fevereiro de 2013.

Esta tese pesquisou, em uma bacia hidrográfica tipicamente rural, meios de prevenir a falta de mobilidade da população, durante e após ocorrências de enchentes. Os estudos realizados também demonstraram a viabilidade de desenvolver um sistema de apoio à defesa civil, capaz de indicar áreas de segurança a partir de cenários de enchentes, baseados em ocorrências do passado. As enchentes acontecem quando a pluviosidade é extrema e desencadeia graves impactos socioeconômicos e ambientais, potencializados pela falta de planejamento territorial em nível de bacia hidrográfica. As enchentes desenvolvem-se rapidamente no espaço, principalmente em microbacias com nascentes em relevo montanhoso e jusantes em planícies aluviais. Em tais condições, a população rural necessita estar preparada com a maior antecedência possível, pois os danos são agravados por alagamentos nas estradas ou por rompimento de pontes e galerias. O método considerou os trechos de estradas que ficaram submersos, as pontes, os bueiros, as lajes, as pinguelas, bem como aqueles trechos próximos dos arroios, que foram rompidos ou obstruídos pela força da correnteza nas enchentes do passado. Nesses locais a água deixou marcas que foram georreferenciadas e niveladas topograficamente. Isso possibilitou delimitar as áreas de alagamento e correlacioná-las às suas chuvas causadoras, registradas durante os últimos cinquenta anos. Essa aproximação permitiu simular espacialmente os efeitos das chuvas extremas, com intensidades semelhantes àquelas que já causaram prejuízos sobre a rede viária rural e, com isso, espacializar os locais e trechos de estradas que podem ficar submersos. Permitiu também identificar locais estratégicos para monitorar o nível dos cursos de água – as pontes. Nesses locais obtiveram-se as cotas de enchentes, ocorridas na última década, que foram aplicadas no ajuste de áreas de inundação simuladas. O sistema integrou aos dados físicos da bacia, a delimitação das áreas alagadas e a série histórica de precipitação e produziu informações estratégicas nas situações de enchentes e inundações em uma bacia piloto, na Região Central do Rio Grande do Sul, confirmando que sua metodologia adequa-se à realidade de bacias rurais.

Palavras-chave: Enchentes; Geoprocessamento; Microbacias; Mobilidade Rural.

ABSTRACT

Doctoral Thesis
Graduate Program in Agricultural Engineering
Federal University of Santa Maria

PLANNING FOR RURAL COMMUNITIES IN SITUATIONS OF FLOODS

AUTHOR: ALESSANDRO CARVALHO MIOLA

COACH: GERALDO LOPES DA SILVEIRA

Date and Location of Defense: Santa Maria, February 26, 2013.

This thesis researched, in a watershed typically rural, ways to prevent the lack of mobility of the population, during and after flood events. Studies have also demonstrated the feasibility of developing a system to support civil defense, able to indicate safe areas from flooding scenarios, based on past occurrences. Floods happen when rainfall is extreme and triggers severe socioeconomic and environmental impacts, exacerbated by the lack of territorial planning-level watershed. The floods develop rapidly in space, especially in watersheds with headwaters in mountainous and downstream in floodplains. In such conditions, the rural population needs to be prepared as early as possible because the damage is aggravated by flooding or disruption on roads galleries and bridges. The method considered the stretches of roads that have been submerged, bridges, culverts, slabs, pencil bridges as well as those sites near the streams that were disrupted or blocked by the force of the current floods in the past. In these places the water left marks that were georeferenced and topographically leveled. This allowed delineate areas of flooding and correlate them to their cause rains recorded during the last fifty years. This approach allowed spatially simulate the effects of extreme rainfall, with intensities similar to those that have caused damage on the rural road network and thereby spatialize locations and sections of roads that can be submerged. Also identified strategic locations to monitor the level of water courses - the bridges. These locations were obtained odds of flooding that occurred in the last decade that have been applied in the adjustment of simulated inundation areas. The system has integrated the physical data of the basin, the delineation of wetlands and time series of precipitation and produced strategic information in situations of floods and flooding in a pilot basin in the Central Region of Rio Grande do Sul, confirming that its methodology fits the reality of rural watersheds.

Keywords: Floods; GIS; Watershed; Rural Mobility.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Infraestrutura de armazenamento de águas para minimização de riscos de cheias e secas, em países de cinco continentes, no ano 2005.	26
Figura 2 – Página eletrônica do NWS nos Estados Unidos.....	30
Figura 3 - Serviço Avançado de Previsão Hidrológica (AHPS) – Rios em observação.	31
Figura 4 – Visualização dos locais das estações de medição com alertas de enchentes informadas pelo AHPS, no instante da pesquisa.	32
Figura 5 – Hidrograma da enchente em ocorrência no instante do acesso ao AHPS.	33
Figura 6 – Ilustra um local de estação medidora do AHPS e link para o Google Earth.	34
Figura 7 – Manchas de inundação do Condado de Burgaw (Carolina do Norte – EUA) conforme distribuição por classes do AHPS.	35
Figura 8 - Manchas de inundação conforme a profundidade da inundação.	35
Figura 9 – Áreas de inundação do Condado de Burgaw (Carolina do Norte – EUA) para tempo de retorno de 100 e 500 anos e a região dos “ <i>floodways</i> ”.....	36
Figura 10 – Perdas por inundações nos Estados Unidos entre anos 1981 e 2000. Nota: Dados em bilhões de dólares, indexados pelo nível de preços do ano 2000. .	37
Figura 11 – Perda por inundações prevenidas pelo USACE de 1981 a 2000.	38
Figura 12 – Sequência de telas dos boletins meteorológicos eletrônicos do <i>Meteoinfo</i> (SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL, 2010) via iPod®.....	41
Figura 13 – Sistema de prognósticos em rios mexicanos.....	42
Figura 14 – Distribuição das estações convencionais do INMET no sul do Brasil....	48
Figura 15 – Distribuição das estações automáticas do INMET no sul do Brasil.	48
Figura 16 – Sistema de monitoramento experimental instalado no Rio Alto-Sapucaí, em Itajubá-MG.	51
Figura 17: Diferentes etapas da inundação sobre a planície	57
Figura 18 – Representação da planície de inundação e do leito menor (<i>normal river channel</i>).	58
Figura 19 – Situação das pessoas isoladas pelas cheias do Rio Vacacaí, no município de São Gabriel-RS.	61
Figura 20: RS-509 (Santa Maria-RS).....	64
Figura 21: ERS-511 (Santa Maria-RS).	64
Figura 22: Estrada do Baú (Itaára - Santa Maria-RS).....	64
Figura 23: Estrada interrompida do Arroio do Meio (Santa Maria-RS).	64
Figura 24: Caminho em Três Barras (Arroio Grande, Santa Maria-RS).	64
Figura 25: Trilha em Val Feltrina (Silveira Martins-RS).....	64
Figura 26 – Imagem em perspectiva tridimensional da bacia na região do estudo. .	76
Figura 27 – Desmoronamento de margem originado por processo erosivo causado por uma cheia, sobre a margem do Arroio Grande, tangenciando uma estrada rural.	79

Figura 28 – Dique construído para evitar o extravasamento do Arroio do Meio.....	81
Figura 29 – Problemas de mobilidade nos municípios atingidos por enchentes.	85
Figura 30 – Inundação da várzea do Rio Jacuí, na Região Centro – RS.	86
Figura 31 – Bacia estudo: subdivisão em bacias vertentes (BV) e área alagável (AA).	90
Figura 32 – Equipamentos GNSS utilizados na coleta de pontos do terreno e de pontos de marcas de enchentes.	94
Figura 33 – Mosaico de fotos de alguns dos pontos no leito dos arroios onde foram coletadas e georreferenciadas as cotas de terreno.....	95
Figura 34 – Gráfico do coeficiente de distribuição espacial da chuva ($K\%$).	103
Figura 35 – Mosaico de fotos com exemplos de marcas de enchentes: (a) e (b) – Ponte da ERS511 no Arroio do Meio (14/09/2010 e 15/04/2011); (c) e (d) – Residência na várzea do Arroio do Veado (07/01/2001 e 04/01/2010); (e) e (f) – Ponte da Estrada de Três Barras no Arroio Manoel Alves (04/01/2010 e 15/04/2011).	109
Figura 36 – Croqui de um nivelamento georreferenciado de marca de enchente. ...	111
Figura 37 – Procedimento de nivelamento georreferenciado: a) marco de georreferenciamento; b) Nível laser; c) Receptor GNSS sobre o marco; d) Receptor GNSS e Nível; e) Mira, Nível e ao fundo o receptor GNSS.....	111
Figura 38 – Tela do HEC-RAS que mostra os valores do Coeficiente de Rugosidade de Manning para cada trecho das seções transversais (n#1 – margem direita; n#2 – canal principal; e n#3 – margem esquerda).	113
Figura 39 – Diagrama unifilar da propagação das vazões na bacia do Arroio Grande.	114
Figura 40 – Diagrama de fluxos de geoprocessamento do HEC-GeoRAS.	117
Figura 41 – Geometria das feições hidrológicas usadas na modelagem das áreas de alagamento através do HEC-RAS.....	118
Figura 42 – Calibração das condições de limite do sistema fluvial na bacia.	119
Figura 43 – Atribuição dos níveis observados das marcas de enchentes às respectivas SHRs.....	120
Figura 44 – Polígono da área de inundação (azul) circunscrevendo as linhas que formam o sistema viário na bacia hidrográfica – área de pesquisas.	125
Figura 45 – Ordenamento fluvial realizado a partir do MDT no software ArcGIS 9.2.	128
Figura 46 – Estrada (IRM=3) em área ribeirinha plana, obstruída pelo transbordamento de arroio (esquerda). Data: 13/09/2010. Foto: Alessandro Miola.	131
Figura 47 – Moradores da localidade rural na Estrada da Invernadinha, Distrito de Arroio Grande em Santa Maria-RS, durante a enchente de 16/01/2010.....	135
Figura 48 – Modelo Digital de Terreno (MDT) hidrológicamente consistente.....	138
Figura 49 – Histograma das diferenças entre cotas medidas no terreno por GNSS e cotas obtidas do MDT.	139
Figura 50 – Representação de uma seção hidrológica comparando o relevo a partir dos dados de entrada (pontos cartográficos e GNSS) e relevo do MDT (saída).....	141

Figura 51 – Gráfico da distribuição das precipitações diárias máximas anuais, comparadas com as variações do fenômeno ENOS.	143
Figura 52 – Gráfico das distribuições de precipitações diárias máximas anuais e modelos matemáticos de determinação.	149
Figura 53 – Representação esquemática de seções para os termos da equação 18.	155
Figura 54 – Perfil longitudinal do Arroio Grande, contendo os níveis de inundação modelados (N_{HR}) para TR de 5 anos e as marcas de enchentes mapeadas (N_{ME}).	157
Figura 55 – Comparativos entre N_{HR} e N_{ME} . Gráfico “A” – Diferença ($N_{HR} - N_{ME}$). Gráfico “B” – Perfis das elevações de N_{HR} (azul) e N_{ME} (vermelho).	159
Figura 56 – Perfil longitudinal do Arroio Grande com o perfil de inundação de TR de 5 anos (linha vermelha), ajustado pelas marcas de enchentes.	166
Figura 57 - Perfil longitudinal do Arroio Grande com os perfis de todos os TR's ajustados.	167
Figura 58 – Gráfico da relação entre o tempo de retorno, área inundável e a precipitação pluviométrica diária máxima calculada para a Bacia do Arroio Grande.	169
Figura 59 – Mapa das resistências à mobilidade nas áreas de inundação, na Bacia do Arroio Grande, considerando diferentes tempos de retorno.	170
Figura 60 – Mapa do ordenamento fluvial, segundo o Método de Strahler.....	175
Figura 61 – Mapa do sistema viário classificado conforme o IRM.	176
Figura 62 – Mapeamento da fragilidade pontual na bacia do Arroio Grande.....	177
Figura 63 – Mapa das fragilidades pontuais do sistema viário, classificado pelo IRM, sobre as áreas de inundação, na Bacia Hidrográfica do Arroio Grade.	178
Figura 64 – Quilometragem por tipos de vias que potencialmente ficam submersas.	179
Figura 65 – Mapa das profundidades de inundação do sistema viário na Bacia do Arroio Grande, para uma cheia com Tempo de Retorno de 5 anos.	181
Figura 66 – Fragilidades do sistema viário decorrentes das declividades combinadas com as altitudes.....	183
Figura 67 – Área efetiva de pesquisa (linha tracejada) - polígono viário (em vermelho) e da bacia do Arroio Grande (em azul).	203
Figura 68 – Construção de mosaico georreferenciado com imagens do Google Earth.	204
Figura 69 – Tela do ArcGIS durante a edição da hidrografia sobre a carta-imagem.	205

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Exemplos de impactos regionais projetados pelo IPCC (2007), relacionados à ocorrência de enchentes.	24
Quadro 2 – Síntese sobre os países que promovem ações para mitigar os efeitos das enchentes comparados com os respectivos graus de desenvolvimento econômico.	26
Quadro 3 - Ações imediatas em casos de inundações.	40
Quadro 4 – Tipos de alertas do Sistema de Alertas de Cheias no Rio de Janeiro. ...	53
Quadro 5 – Classificação do sistema viário, conforme Ministério da Defesa (2008). ...	64
Quadro 6 – Valores médios normais e máximos para a precipitação em Santa Maria, Rio Grande do Sul, no período 1912 - 2004.	83
Quadro 7 – Fluxograma metodológico da tese.	92
Quadro 8 - Equações de chuvas intensas: altura de precipitação com duração “d” e tempo de retorno “TR” em percentagem do valor médio.	105
Quadro 9 - Distribuição da propagação das cheias na bacia do Arroio Grande, conforme o Diagrama Unifilar da figura 35.	115
Quadro 10 – Classificação do sistema viário e do índice IRM.	127
Quadro 11 – Classificação das declividades e do grau de fragilidade das estradas.	130
Quadro 12 - Modelos matemáticos para estimar $P_{max}(y)$ em função de TR (x).	149
Quadro 13 – Classificação numérica do Índice de Fragilidade Pontual na área de pesquisas.	173
Quadro 14 - Tipificação das estruturas de transposição dos cruzamentos do sistema viário com a rede de drenagem na área de pesquisas.	173
Quadro 15 – Especificações sobre as relações entre os Índices de Fragilidade Pontuais do sistema viário e os tipos de estruturas de transposição nos cursos de água da bacia do Arroio Grande.	174

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Desastres naturais de origem hidrológica no Brasil, nos últimos 30 anos.	16
Tabela 2 – Os impactos das cheias no Quênia (1997-2000).	27
Tabela 3 – Benefícios anuais da implementação do AHPS.	38
Tabela 4 – Chuvas intensas calculadas médias para os tempos de concentração das BVs na área de pesquisas.	107
Tabela 5 – Demonstrativo das maiores diferenças entre as cotas dos pontos cartográficos e cotas obtidas do MDT.	140
Tabela 6 – Ponderação pelo Método de Thiessen das precipitações acumuladas causadoras de enchentes (datas das marcas).	146
Tabela 7 – Tempos de retorno calculados para uso na modelagem com HEC-RAS.	150
Tabela 8 – Resultados dos indicadores fisiográficos para as bacias vertentes (BVs).	151
Tabela 9 – Resultados da estimação das vazões de projeto (Q_p) para as BVs.	152
Tabela 10 – Valores de vazão propagados nas SHRs, aplicados no modelo hidrológico-hidráulico.	152
Tabela 11 – Resultados comparativos entre níveis de enchentes modelados, níveis mapeados (marcas de enchentes) e respectivas diferenças.	158
Tabela 12 – Datas, localizações, coordenadas, cotas e TR's das marcas de enchentes niveladas e georreferenciadas.	163
Tabela 13 – Relação entre os tempos de retorno, precipitações de projeto e as áreas de inundação simuladas e ajustadas para a Bacia do Arroio Grande.	168
Tabela 14 – Resultados da análise das frequências de precipitações diárias máximas anuais e seus respectivos tempos de retorno (TR).	210
Tabela 15 – Relação entre tempos de retorno e prováveis chuvas máximas diárias, estimadas para a região do estudo.	211

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Enchentes e a falta de mobilidade no meio rural	16
1.2 Hipótese em pesquisa.....	19
1.3 Objetivo Geral.....	19
1.4 Objetivos específicos.....	20
1.5 Sinopse dos capítulos	20
2 REVISÃO DE LITERATURA	22
2.1 Sistemas de previsão de cheias – Panorama mundial.....	22
2.1.1 Países Africanos	27
2.1.2 Estados Unidos	28
2.1.3 Canadá.....	39
2.1.4 México	41
2.1.5 Países Asiáticos	43
2.1.6 União Europeia.....	44
2.1.7 Oceania.....	45
2.2 Sistemas de previsão de cheias no Brasil	46
2.3 Pluviosidade e enchentes no meio rural	54
2.4 Caracterização da mobilidade viária submetida a enchentes	59
2.5 Mapas de Áreas Alagáveis	65
2.6 O SIG e geoprocessamento na modelagem de áreas alagáveis	67
3 MATERIAL E MÉTODOS	75
3.1 Material.....	75
3.1.1 Caracterização da bacia hidrográfica da pesquisa	75
3.1.2 Caracterização socioeconômica.....	79
3.1.3 As cheias na região do estudo	81
3.2 Métodos.....	87
3.2.1 Primeira fase: “Área alagada = f (Precipitação pluviométrica)”	89
3.2.2 Fluxograma metodológico	90
3.2.4 Segunda fase: “Mobilidade viária rural = f (Pp , Aa)”	121
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	134
4.1 Área Alagável (AA) na bacia.....	137
4.1.1 Resultados da modelagem digital do terreno	137
4.1.2 Análise estatística das chuvas extremas.....	142
4.1.3 Simulação das Áreas Alagáveis (AAs)	150
4.1.4 Ajuste e validação das AAs através de marcas de enchentes	161
4.2 Fragilidades do sistema viário na planície de inundação.....	171
5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	184
REFERÊNCIAS.....	188
APÊNDICES	200
Apêndice 1 – MDT e delimitação da bacia e sub-bacias hidrográficas	201
Apêndice 2 – Estatísticas das chuvas – Método e Resultados	207
Apêndice 3 – Mapa das marcas de enchentes e pontos GNSS.....	212
Apêndice 4 – Álbum de fotos das enchentes na área da pesquisa.	213

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enchentes e a falta de mobilidade no meio rural

Historicamente, as regiões ribeirinhas têm sido o local preferido para o assentamento humano e desenvolvimento econômico, devido à proximidade de rios que fornecem solo fértil, água abundante e transporte (OMM, 2006, p. 1). Em paralelo, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) destaca que os prejuízos e perigos das enchentes têm graves repercussões sobre a economia e a segurança das pessoas.

A Base Internacional de Dados de Desastres (*International Disaster Database – Emergency Events Database, EM-DAT*) do Centro para Pesquisas em Epidemiologia de Desastres (CRED, 2009), sediado na Bélgica, publicou¹ no seu site que o número de desastres de origem hidrológica no Brasil (principalmente as inundações e as enchentes) aumentou na década de 2002 a 2011, comparado à década anterior. Os dados do CRED (2009), que mantém atualizada a EM-DAT, demonstram que o número de eventos triplicou de uma década para a outra; o número de vítimas fatais quadruplicou; o número de pessoas atingidas aumentou mais de onze vezes e os prejuízos materiais cresceram mais de quarenta vezes, como mostram os dados apresentados na tabela 1:

Tabela 1 - Desastres naturais de origem hidrológica no Brasil, nos últimos 30 anos.

Dados \ Períodos	1982 - 1991	1992 - 2001	2002 - 2011	1982 - 2011
Número de eventos	35	11	33	79
Vítimas fatais	1.478	475	1.975	3.928
Pessoas atingidas	8.486.113	396.039	4.531.947	13.414.099
Danos materiais (U\$ 1000,00)	3.644.000	74.800	2.988.370	6.707.170

Fonte: EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database, www.emdat.be - *Université Catholique de Louvain – Brussels – Belgium. Created on: Oct-18-2011. Data version: v12.07.*

As áreas agrícolas da Depressão Central do Rio Grande do Sul, na Região Hidrográfica do Guaíba, assim como da Bacia Hidrográfica do Itajaí em Santa Catarina, são exemplos de onde a geomorfologia da transição planalto-planície constitui-se topograficamente de bacias hidrográficas, densamente ramificadas.

¹ Disponível em: <http://www.emdat.be/country-profile>. Acessado em: 18/10/2011.

Com maior densidade de drenagem e com declividades em gradientes abruptos, essas áreas drenam a chuva e geram escoamento superficial acelerado, que rapidamente inunda as áreas rurais, principalmente em várzeas.

As enchentes ocorrem quando a capacidade de escoamento de um canal de drenagem é superada, gerando a inundação do leito maior ou das áreas ribeirinhas, como menciona Tucci (2000). As perdas nessas áreas e em suas adjacências são muito severas quando ocorrem eventos extremos de precipitação, pois não existem mecanismos suficientemente estruturados para alertar as comunidades que ali habitam.

A mobilidade das comunidades rurais agrícolas é especialmente mais dificultada do que em áreas urbanizadas, pois as famílias aglomeram-se em menor quantidade em núcleos de convivência, alguns situados em locais remotos, com acesso por uma única estrada ou caminho. Nas comunidades rurais a relação de vizinhança nem sempre corresponde à proximidade geográfica, pois com frequência há os que habitam a centenas, até milhares de metros distantes dos vizinhos mais próximos. O deslocamento de insumos, pessoas e máquinas agrícolas e, por consequência de toda a cadeia produtiva, depende da mobilidade viária em condições permanentes de trafegabilidade.

Agrava a situação das calamidades de enchentes, a configuração viária no meio rural, especialmente nas planícies inundáveis (várzeas). A rede viária cruza em muitos pontos a rede hidrográfica e trechos de estradas, nas áreas mais planas, ficam frequentemente obstruídos por diversos motivos: queda de pontes; rompimento de galerias; de lajes (pranchadas); de pinguelas; desmoronamentos nas margens dos arroios – tangentes às estradas; escorregamento de encostas; assoreamento dos arroios por troncos e galhos de árvores, blocos rochosos, além das inundações nas baixadas; são as principais consequências decorrentes das chuvas intensas e prolongadas.

No meio rural, especialmente as estradas não pavimentadas, por servirem a um menor número de habitantes apresentam trajetos mal projetados, em muitos casos procedentes de caminhos feitos por animais de transporte, no século passado. A má conservação do pavimento – predominantemente de terra – é outro aspecto negativo que se encontra com frequência nas estradas rurais brasileiras.

Destaca-se, também, que as várzeas cultivadas no sul do Brasil são atravessadas por rodovias asfaltadas sobre aterros, elevados até metros acima do

nível do terreno no entorno, sazonalmente ocupado, ou por lavouras irrigadas, ou por pastagens. Isso transforma as estradas em diques, causando o represamento do escoamento superficial, visto que os bueiros e galerias de passagem nem sempre conseguem drenar toda água da montante, para as regiões a jusante das rodovias.

Com essa característica no ambiente rural, quando da ocorrência de chuvas intensas e, por consequência, das enchentes, as comunidades ficam desorientadas. Validação desta situação foram os episódios ocorridos em novembro de 2008 em SC, e novembro de 2009 até os primeiros meses de 2010, na Região Central do RS e no Nordeste do Brasil². Recentemente, no verão de 2011/2012 o estado de Goiás e a Região Sudeste (Minas Gerais e Rio de Janeiro), somados às ocorrências em outras regiões, conforme dados da Base Internacional de Desastres – EM-DAT (2011³), deixaram na última década 284.145 pessoas desabrigadas e mais de 4,5 milhões de atingidos em comunidades urbanas e rurais, isoladas pelas enchentes e pela destruição de pontes e estradas no Brasil.

Na ênfase deste estudo, os elementos que causam as situações de calamidades, por enchentes e inundações, e a fragilidade do sistema viário estão entre os que merecem uma maior atenção de pesquisadores do assunto, de gestores públicos, da defesa civil e das comunidades rurais atingidas. As estradas exercem papel fundamental na mobilidade da população, pois é através delas que as pessoas deslocam-se com seus pertences para locais mais seguros. Assim, quando uma enchente começa a acontecer, a elevação do nível das águas dos rios pode atingir as estradas em áreas ribeirinhas mais próximas, fazendo com que certos trechos fiquem bloqueados (submersos). O rompimento de estruturas de drenagem, e eventualmente, as quedas de pontes onde as estradas cruzam os arroios, também produzem os mesmos efeitos de isolamento das comunidades, que dependem das estradas para obterem socorro e/ou buscarem locais mais seguros.

Para minimizar os impactos adversos e negativos desse tipo de evento, que, muitas vezes, leva a perda de vidas humanas, é necessário à defesa civil e aos moradores disporem de um sistema de informações e orientações ao deslocamento em situações de calamidade. E mais, na época fora de cheia, os efeitos adversos podem ser minimizados com planejamento territorial eficaz, evitando inclusive o

² Informações disponibilizadas nos telejornais diários na época das ocorrências.

³ Disponível em: <http://www.emdat.be/country-profile>. Acessado em: 18/10/2011.

manejo agrícola incorreto, como a supressão das florestas de encosta e das matas ciliares, e a ocupação das áreas de risco em planícies de inundação.

O elemento chave para a delimitação dessas áreas alagáveis (AA), em regiões onde não existe monitoramento fluviométrico, está na modelagem digital de terreno com precisão; na correta modelagem hidráulica-hidrológica da estimação de vazões de cheias nas bacias de contribuição ou vertentes (BVs); e na validação dos níveis simulados nas seções de referência para as AAs, com subsídio em marcas de enchentes.

Além disso, esta tese propõe um sistema de apoio à mobilidade rural em situações de enchentes, que se baseia na determinação dos locais com maior fragilidade a rompimentos ou obstruções na rede viária. Esses locais podem ser determinados em função das precipitações pluviométricas acumuladas a partir de eventos que causaram transtornos dessa natureza, em ocorrências anteriores.

1.2 Hipótese em pesquisa

É possível planejar a mobilidade agrícola e rural em regiões submetidas às inundações, **em locais onde não existe o monitoramento fluviométrico**, por meio da identificação das áreas alagadas, tendo-se somente os registros de chuvas diárias acumuladas e o inventário das marcas das enchentes?

1.3 Objetivo geral

Esta tese objetivou desenvolver um método para planejar a gestão e a organização da mobilidade em áreas agrícolas e rurais, em situações de calamidades por enchentes, em regiões sem monitoramento fluviométrico. Tem como foco a identificação de deslocamentos seguros durante a enchente e a obtenção de cenários para o planejamento preventivo do espaço rural, para os períodos pré e pós-inundação. Com isso, objetiva-se orientar o planejamento rural, por meio de mapas das áreas alagadas por chuvas de diferentes tempos de retorno (TRs) e pela espacialização das fragilidades pontuais e lineares do sistema viário.

1.4 Objetivos específicos

Para dar o encadeamento necessário, que viabilize a metodologia atingir o propósito da hipótese, os objetivos específicos foram assim organizados:

- a) Propor método de estimativa da área alagada baseado somente na precipitação, na modelagem digital do relevo da bacia e nas marcas de enchentes, em região onde não existe monitoramento fluviométrico;
- b) Gerar mapas das áreas alagáveis (AAs) por chuvas de diferentes TRs e validá-los por meio das cotas georreferenciadas das marcas de enchentes remanescentes de cheias antigas em prédios, substratos ou em memória da população;
- c) Definir estratégia para identificar caminhos seguros para a mobilidade rural, considerando o menor grau de fragilidade do sistema viário, pontual e linearmente, em toda sua extensão, livre da possibilidade de rompimento de pontes, desmoronamentos em trechos marginais ou da obstrução das estradas e caminhos vicinais, em bacias hidrográficas.

1.5 Sinopse dos capítulos

Após contextualizar o problema e o foco da hipótese em pesquisa neste capítulo 1 – INTRODUÇÃO segue um breve resumo de cada um dos próximos capítulos, de maneira a dar uma visão geral da tese.

O capítulo 2 – REVISÃO DE LITERATURA resgata alguns conceitos pertinentes ao tema da tese, especialmente aqueles que servem de fundamentação para a hipótese pesquisada e outros, que orientam a concepção metodológica proposta neste trabalho. Esse capítulo apresenta os aspectos relacionados à formação das enchentes no meio rural, os principais sistemas de monitoramento e previsão de enchentes no mundo e no Brasil, a caracterização do clima e da precipitação pluviométrica na área de aplicação da metodologia e considerações sobre o sistema viário em áreas rurais. O Capítulo 2 enfoca, também, os aspectos geométricos, geográficos e técnicos envolvidos na determinação de medidas das enchentes, bem como, a relação entre a chuva e as áreas inundadas.

O capítulo 3 – MATERIAL E MÉTODOS aborda os procedimentos aplicados no trabalho, partindo da caracterização da área de pesquisas, quanto aos aspectos

fisiográficos e socioeconômicos. Esse capítulo trata de detalhar a organização metodológica da tese, desde a coleta e tratamento dos dados geográficos e hidrológicos na área de pesquisa, até a obtenção de cenários. Apresenta como são feitas as modelagens e as análises multicritério, necessárias à determinação das relações entre a precipitação pluviométrica, a formação das enchentes e os impactos gerados na mobilidade das comunidades rurais, atingidas por esses tipos de desastres naturais.

No capítulo 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO inclui-se uma análise dos resultados desde o processo de coleta e tratamento de dados, até a geração das informações espaciais na forma de mapas temáticos digitais. Também são comentados os resultados obtidos de cenários de enchentes e falta de mobilidade rural, elaborados a partir de análises hidrológico-hidráulicas da variação espacial da enchente por meio de mapas das áreas alagáveis (AAs) na região de interesse. A partir desses cenários mostram-se as correlações entre os tipos, as aptidões e as ocupações do solo, e a distribuição espacial das vias de ligação das comunidades rurais aos centros urbanos mais próximos.

O capítulo 5 – CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES, conclui a respeito dos resultados obtidos pelo trabalho, em relação à hipótese previamente desenvolvida, confirmando sua utilização como um sistema de apoio à gestão da mobilidade em comunidades rurais.

Nas REFERÊNCIAS constam todas as fontes de leitura e outros tipos de consultas, que serviram de base para os estudos, desde a elaboração da hipótese até a conclusão da pesquisa. E, encerra a tese, um APÊNDICE, constituído por um álbum de fotografias das atividades da tese e da área utilizada como piloto para a metodologia, além de mapas não incluídos nos capítulos anteriores.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Primeiramente mostra-se o panorama atual dos sistemas de alerta em termos mundiais e a quase carência de sistemas de alerta em nível nacional, o que deixou milhares de pessoas desassistidas, em desastres massivos ocorridos de 2008 a 2010. Isso levou o Governo Federal a construir, em nível nacional, a Política Nacional de Defesa Civil, finalizada em 10 de abril de 2012 (BRASIL, 2013).

Neste contexto é que se insere o presente estudo, como é demonstrado neste capítulo. Se por um lado os países desenvolvidos apresentam sistemas de grande investimento tecnológico e financeiro, o Brasil, com suas dimensões continentais e pouco investimento histórico em fluviometria, requer métodos que considerem esta realidade como um “passo” de aproximação à situação dos países desenvolvidos.

A contextualização do problema em estudo parte de uma visão global de sua existência. Sendo um evento procedente da combinação de fenômenos espaciais e climáticos, terrestres e atmosféricos – globais, é importante que a revisão bibliográfica busque informações sobre como vários países do mundo reagem frente à ocorrência de enchentes e inundações.

Trazendo o problema para o âmbito nacional, fez-se também uma investigação a respeito das ações e do conjunto de instituições e infraestruturas que o país dispõe para enfrentar enchentes de proporções trágicas. Adiante, buscou-se contextualizar o processo hidrológico e atmosférico de formação das enchentes e seu impacto sobre áreas, predominantemente, agrícolas ou rurais, com foco no impedimento da mobilidade das comunidades, quando tais fenômenos ocorrem.

2.1 Sistemas de previsão de cheias – Panorama mundial

As civilizações, desde tempos imemoriais, têm prosperado nas planícies de inundação, beneficiando-se das enchentes. Mas elas também causaram dificuldades incalculáveis para milhões de pessoas no mundo inteiro. Apesar de seus enormes benefícios econômicos e ambientais, as enchentes seguem sendo o desastre natural que mais causa vítimas e que mais afeta o desenvolvimento sustentável (OMM, 2006).

O Relatório do Desenvolvimento Humano de 2006, do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), teve como temática a gestão mundial das águas e, segundo os dados do PNUD (2006), existem 263 bacias hidrográficas internacionais, que cobrem quase metade da superfície da Terra e abrigam mais de 40% da população mundial. Entre os recursos hídricos transfronteiriços existem 145 países com bacias compartilhadas.

Conforme a APFM-OMM-GWP (2004, p. 6) a repetição de anomalias extremas de precipitação, seja na abundância excessiva ou na escassez de água, é um componente normal da variabilidade natural do clima. Segundo esse documento entre os efeitos negativos das inundações destacam-se as perdas de vidas e os danos materiais; as migrações em massa de pessoas e animais; a deterioração do meio ambiente; a escassez de alimentos, energia, água e outras necessidades básicas.

O Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (*International Panel of Climate Change – IPCC*) menciona, segundo o relatório do PNUD (2006, p.163) que:

[...] a vulnerabilidade e a insegurança associadas à água vão aumentar. A produtividade na produção agrícola, e em particular de sequeiro, é influenciada tanto pela periodicidade como pelo volume da precipitação. E uma das conclusões mais óbvias a retirar dos diversos testes de simulação realizados é de que os níveis de precipitação tendem a tornarem-se mais variáveis e instáveis. Haverá também uma crescente incidência de intempéries, sob a forma de secas e de inundações, o que contribuirá para aumentar a ameaça que paira sobre as populações dos países com infraestruturas de adaptação limitadas.

De acordo com esse relatório a diminuição do risco na gestão dos recursos hídricos, através de sistemas de controle de inundações e do desenvolvimento de infraestruturas econômicas, tem-se revelado fundamental para o progresso humano em muitos países ricos (PNUD, 2006, p. 156). Entretanto não se verifica o mesmo progresso em relação aos países pobres. Por outro lado, a escalada de investimentos em infraestruturas hidráulicas nos países ricos não é muito bem vista, pois esses investimentos têm gerado, em alguns casos, grandes prejuízos ambientais, mas também têm sido base de sustentação da maior prosperidade econômica e progresso social desses países, conforme o PNUD (2006, p.156).

A OMM (2006, p. 7) cita que, em termos monetários, os danos causados pelas enchentes são diretamente proporcionais ao alcance das mesmas, à sua intensidade e duração, à velocidade da correnteza nas áreas inundadas, e, também, à vulnerabilidade das atividades econômicas e das comunidades. Essa

vulnerabilidade é mencionada no documento da OMM (2006, p.11) como o grau de propensão de uma comunidade a acusar os efeitos adversos consequentes de enchentes, e, manifesta-se na incapacidade de uma comunidade ou grupo prever, fazer frente, resistir e/ou recuperar-se de seus efeitos.

O IPCC (2007, p.11-12) apresenta um quadro resumo com alguns dos impactos projetados para as regiões continentais no planeta. Para efeito do estudo de sistemas de apoio à mobilidade em situações de enchentes, fez-se uma síntese dessas projeções, que se encontra no quadro 1.

Região	Impactos causados pelas alterações climáticas
Ásia	<ul style="list-style-type: none"> • Áreas costeiras, especialmente as regiões dos grandes deltas superpovoados do sul, leste e sudeste da Ásia seriam os mais ameaçados, devido ao aumento das inundações do mar e dos rios em alguns grandes deltas; • Morbidade e mortalidade endêmicas causadas por doenças diarréicas principalmente associadas às inundações e secas no leste, sul e sudeste da Ásia, como resultado de mudanças projetadas no ciclo hidrológico.
Austrália e Nova Zelândia	<ul style="list-style-type: none"> • Até 2050, o contínuo desenvolvimento costeiro e o crescimento demográfico em certas áreas da Austrália e Nova Zelândia agravariam os riscos de aumento do nível do mar, e da intensidade e freqüência de tempestades e inundações costeiras.
Europa	<ul style="list-style-type: none"> • Espera-se que a mudança climática amplie as diferenças regionais em termos de recursos naturais em geral na Europa. Entre os impactos negativos incluem um aumento do risco de inundações no interior, mais freqüentes inundações costeiras e aumentou da erosão (devido a tempestades e elevação do mar).
América do Norte	<ul style="list-style-type: none"> • Nas montanhas ocidentais, o aquecimento reduziria os bancos de neve aumentaria as inundações de inverno e reduziria o escoamento no verão, intensificando a competição por recursos hídricos escassos.

Quadro 1 – Exemplos de impactos regionais projetados pelo IPCC (2007), relacionados à ocorrência de enchentes.

Fonte: IPCC (2007, p. 11-12).

O relatório do PNUD também descreve que:

A distribuição mundial de infraestruturas hídricas é inversamente proporcional à distribuição mundial dos riscos de insegurança da água. Os climas sazonais, as variações de pluviosidade e os riscos de inundações e de secas são uma ameaça ainda maior nos países em desenvolvimento do que nos países ricos, enquanto as instituições e as infraestruturas necessárias à segurança da água são muito mais frágeis.

Segundo a OMM (2006) a inundação de áreas ocupadas com atividades socioeconômicas leva a uma série de efeitos negativos. O escopo destes depende da vulnerabilidade dessas atividades, da população e da frequência, intensidade e extensão da inundação.

O que se observa em relação à prevenção contra enchentes é que nos países industrializados, os caudais dos rios são regulados e geridos por meio do armazenamento de água para múltiplos fins. Nesses países os investimentos em infraestruturas hídricas criam condições para a segurança da água, para o crescimento econômico e criação de emprego e, também, combatem o poder destruidor da água nos períodos de cheias ou secas, minimizando seus efeitos.

Em contrapartida, na maior parte do mundo em desenvolvimento, especialmente nos países mais pobres, os custos humanos a pagar por infraestruturas débeis e vulnerabilidade aos choques hídricos são vividos diariamente (PNUD, 2006 p.156). Nota-se que a capacidade de investimento dos países mais ricos, especialmente no que se referem às infraestruturas hidráulicas, lhes permite melhor proteger seus cidadãos e seu desempenho econômico.

Os efeitos negativos mais importantes relacionados às enchentes e inundações são: a perda de vidas humanas, danos aos bens, destruição de cultivos, perda de gado, inutilização de infraestruturas, ou problemas de saúde decorrentes das doenças com veiculação hídrica (OMM, 2006, p. 7). A mesma fonte revela também que outros danos muito significativos estão relacionados às perdas dos meios de subsistência, pois quando as estradas ficam danificadas a atividade econômica pára, causando uma interrupção das atividades normais, muito além da duração da enchente. Nas comunidades rurais os mais afetados são aqueles cuja renda depende da agricultura. Além disso, esses danos causam prejuízos de longo prazo, pois afetam o abastecimento de água potável, de eletricidade, os transportes e as comunicações, a educação e a atenção sanitária (OMM, 2006, p. 8).

Conforme considera a Organização Mundial de Meteorologia (OMM), as enchentes são processos hidrológicos naturais, que aportam fluxos água variáveis e recarregam os mananciais; transportam sedimentos e nutrientes que se depositam nas planícies de inundação, enriquecendo o solo agrícola; desencadeiam a ecologia pesqueira e rejuvenecem o ecossistema fluvial, constituído dos peixes, fauna e flora silvestre e aves aquáticas (OMM, 2006, p. 6).

Observou-se a partir dessa visão geral sobre as ações de defesa contra os impactos das enchentes, que as diferentes realidades econômicas dos países contrastam com os diferentes riscos potenciais de danos que podem ser causados, em escala inversamente proporcional. Na realidade essas “ações” para mitigação dos efeitos danosos das enchentes, têm maior ou menor eficácia e, em alguns

casos, essas “ações são inexistentes”. A seguir, em um panorama amplo mostrado no quadro 2 observa-se essa diferença.

Países	Grau de desenvolvimento econômico	Eficácia das ações de previsão e controle de cheias
Países africanos	Baixo	Baixa
Países asiáticos	Em desenvolvimento	Baixa
Brasil	Em desenvolvimento	Baixa
México	Em desenvolvimento	Incipiente
Estados Unidos	Desenvolvido	Alta
Canadá	Desenvolvido	Alta
Oceania	Desenvolvido	Alta
Europa	Desenvolvido	Alta

Quadro 2 – Síntese sobre os países que promovem ações para mitigar os efeitos das enchentes comparados com os respectivos graus de desenvolvimento econômico.

Fonte: Do autor.

Pelo quadro 2 nota-se que os países desenvolvidos, como Estados Unidos e Canadá, por exemplo, realizam com maior eficácia ações destinadas ao controle e à mitigação dos problemas causados pelas enchentes. Tradicionalmente os países ricos, como ilustra a figura 1, aportam maior volume de recursos e tecnologia para esse fim do que os países pobres ou em desenvolvimento, que não conseguem nem mesmo planejar ações para redução dos danos das cheias.

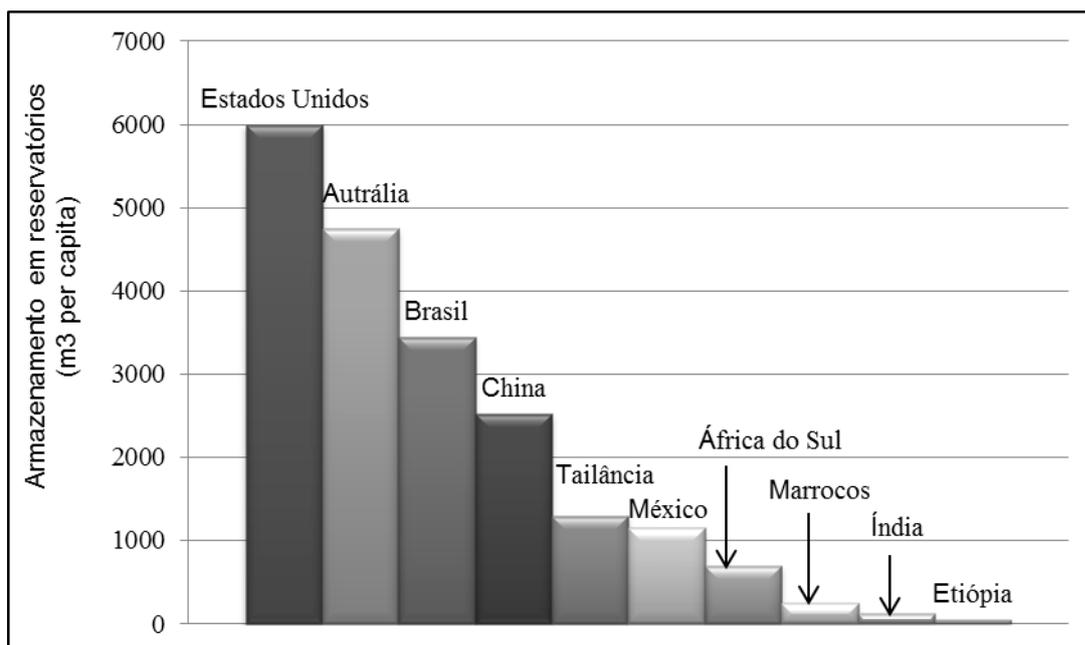


Figura 1 – Infraestrutura de armazenamento de águas para minimização de riscos de cheias e secas, em países de cinco continentes, no ano 2005.

Fonte: Adaptado de Banco Mundial (2005) apud PNUD (2006, p.158).

O Brasil, apesar de estar entre os países que mais investem em armazenamento de água, tem o foco dessas estruturas voltado à geração de energia. Exemplos das estruturas mais conhecidas de amenização dos impactos das enchentes, existentes no Brasil, são os piscinões da bacia do Rio Tietê, na região metropolitana de São Paulo-SP; construídos para reter o excesso do escoamento superficial e reduzir as possibilidades das inundações ocorrerem (DAEE-SP, 2011).

Para detalhar essa síntese do panorama mundial dos sistemas de controle de cheias, segue uma revisão mais aprofundada sobre alguns dos países elencados no quadro 2.

2.1.1 Países Africanos

Nos últimos anos o continente africano tem experimentado inundações cada vez mais graves. Na África Setentrional, a escala dos eventos de inundação no ano 2007, foi a pior em extensão e gravidade das últimas três décadas. Mais de um milhão de pessoas foram afetadas em mais de 20 países (em particular: Uganda, Etiópia, Sudão, Burkina Faso, Togo, Mali e Nigéria); cerca de 500 vidas foram perdidas e mais de 1,2 milhão de pessoas foram deslocadas (ROO e THIEMIG, 2010).

No Quênia, os dados do Banco Mundial de 2004, publicados no relatório do PNUD (2006 p. 157) e apresentados na tabela 2, demonstram que aquele país teve o impacto mais forte das cheias sobre sua infraestrutura de transportes, representando 88,5% do total dos impactos sofridos.

Tabela 2 – Os impactos das cheias no Quênia (1997-2000).

Impacto	Valor (Em milhões de dólares)	Total (%)
Infraestruturas de transportes	777	88,5
Infraestruturas de abastecimento de água	45	5,1
Setor da saúde	56	6,4
Total	878	
% do PIB	-	11,0

Fonte: Banco Mundial (2004) apud PNUD (2006 p.157).

Segundo Aderamo e Magaji (2010, p.172), citando constatações de Ogunsayama (1987) e Filani (1993) – que analisaram o papel desempenhado pelo

transporte rodoviário na distribuição de equipamentos públicos, em um ambiente rural na Nigéria – as estradas rurais do país são na maioria, de terra, estreitas, tortuosas e com pontes precárias; são dificilmente transitáveis durante a estação chuvosa, quando os veículos ficam presos na lama ou quando as pontes improvisadas, feitas de troncos de madeira, são arrastadas pela inundação. Observa-se que, em relação à mobilidade, a realidade rural sul brasileira tem se apresentado muito semelhante à nigeriana⁴.

Os riscos resultantes da debilidade das infraestruturas atingem, sobretudo, as pessoas pobres. Em Moçambique, conforme os dados do PNUD (2006, p.158), são as famílias pobres das planícies ao longo das margens dos rios que mais sofrem com as cheias. Os dados do relatório do PNUD (2006) mostram que os países africanos são os que menos investem em infraestruturas destinadas a minimizar os riscos associados às cheias e às secas.

Entretanto, nos últimos anos surgiram parcerias internacionais que têm mobilizado governos, instituições de pesquisas e as populações, no sentido de desenvolver sistemas de previsão e alertas de cheias, de forma a reduzir esses impactos. Um exemplo dessa cooperação internacional está na bacia hidrográfica do rio *Juba-Shabelle*, entre os países da Somália, Quênia e Etiópia. Lá está em implementação o Sistema Africano de Alerta de Enchentes (*African Flood Alert System – AFAS*), o qual conta com a colaboração entre o Projeto de Gestão Territorial e de Águas da Somália (*Somalia Water and Land Management Project - SWALIM*) e o Centro Europeu de Previsão de Tempo em Médio Prazo (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasting – ECWMF*). Eles estão testando a aplicabilidade das técnicas, metodologias e experiências do Sistema Europeu de Alerta Contra Inundações (*European Flood Alert System – EFAS*) nas bacias africanas (ROO e THIEMIG, 2010).

2.1.2 Estados Unidos

Da mesma forma que ocorrem no âmbito global, nos Estados Unidos da América, as inundações são uma parte natural e inevitável da vida ao longo dos rios. De fato, 75% de declarações presidenciais de Desastres Nacionais são devido a

⁴ Nota do autor.

inundações (RUBIN et al., 1986 apud NATIONAL HYDROLOGIC WARNING COUNCIL, 2002, p.2).

Os Estados Unidos são uma das nações que há mais tempo apresenta infraestruturas e instituições destinadas à proteção e prevenção de situações relacionadas às inundações e outros tipos de desastres naturais. A página eletrônica do Departamento de Segurança Interna dos Estados Unidos (*United States Department Homeland Security - DHS*⁵) descreve que o Congresso Nacional norte americano criou em 1803, por meio de lei, a Agência Federal de Gerenciamento de Emergências (*Federal Emergency Management Agency – FEMA*), que passou a integrar o DHS em março de 2003. Essa agência destina-se a apoiar todos os cidadãos e as agências de resposta imediata para garantir que, como país, haja um trabalho conjunto de desenvolvimento, melhoria e manutenção da capacidade de preparação, proteção, resposta, recuperação e mitigação diante de todos os tipos de perigos.

Em 1968, o Congresso criou o Programa Nacional de Seguro de Inundações (*National Flood Insurance Program – NFIP*) para ajudar a fornecer um meio para os proprietários se protegerem financeiramente. O NFIP oferece seguro contra enchentes para os proprietários, inquilinos e proprietários de negócios, bem como a toda comunidade participante do programa. Comunidades participantes concordam em adotar e aplicar preceitos que atendem ou superem as exigências da FEMA para reduzir o risco de inundação (NATIONAL FLOOD INSURANCE PROGRAM, 2011).

Segundo a Administração Atmosférica e Oceânica Nacional (NOAA, 2011, p. 1), o NFIP da FEMA mede o risco de inundações com base na probabilidade de ocorrência, especificamente, de inundações. A probabilidade de ocorrência é medida como a chance anual de excedência. É usado 1% de chance anual (isto é, enchentes com período de retorno de 100 anos), como padrão para regulamentar os fins de seguro contra inundações. Esta referência é comumente utilizada no gerenciamento e mitigação de inundações em áreas de várzeas (NOAA, 2001, p. 1).

Um dos mais importantes sistemas de prevenção, previsão e controle de situações de enchentes da América do Norte é o do Serviço Nacional do Clima (*National Weather Service – NWS*⁶) da Administração Atmosférica e Oceânica Nacional (NOAA) dos Estados Unidos.

⁵ <http://www.fema.gov/esp/sobre/historia.shtm>

⁶ <http://www.nws.noaa.gov>

A NOAA e o NWS são as agências federais mandatárias e designadas para realizar a previsão dos níveis dos rios e fornecer alerta às comunidades norte americanas, todos no esforço conjunto de minimizar os impactos das enchentes e potencializar o salvamento de vidas. O NWS coordena estes esforços com a participação do serviço de Levantamento Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey – USGS*) e de colaboradores locais. Além disso, o NWS trabalha com muitas autoridades de recursos hídricos, como o Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (*United States Army Corps Engineers – USACE*) e o serviço de ouvidoria do “*Bureau of Reclamations*”, para melhorar as previsões das águas dos rios (NOAA, 2011, p 1).

O sistema norte americano baseia-se na integração de modelos de previsão de chuvas, imagens de radar, dados de qualidade do ar, análises climáticas, imagens de satélites, observações e previsões para rios monitorados, como mostram as figuras 2 e 3.

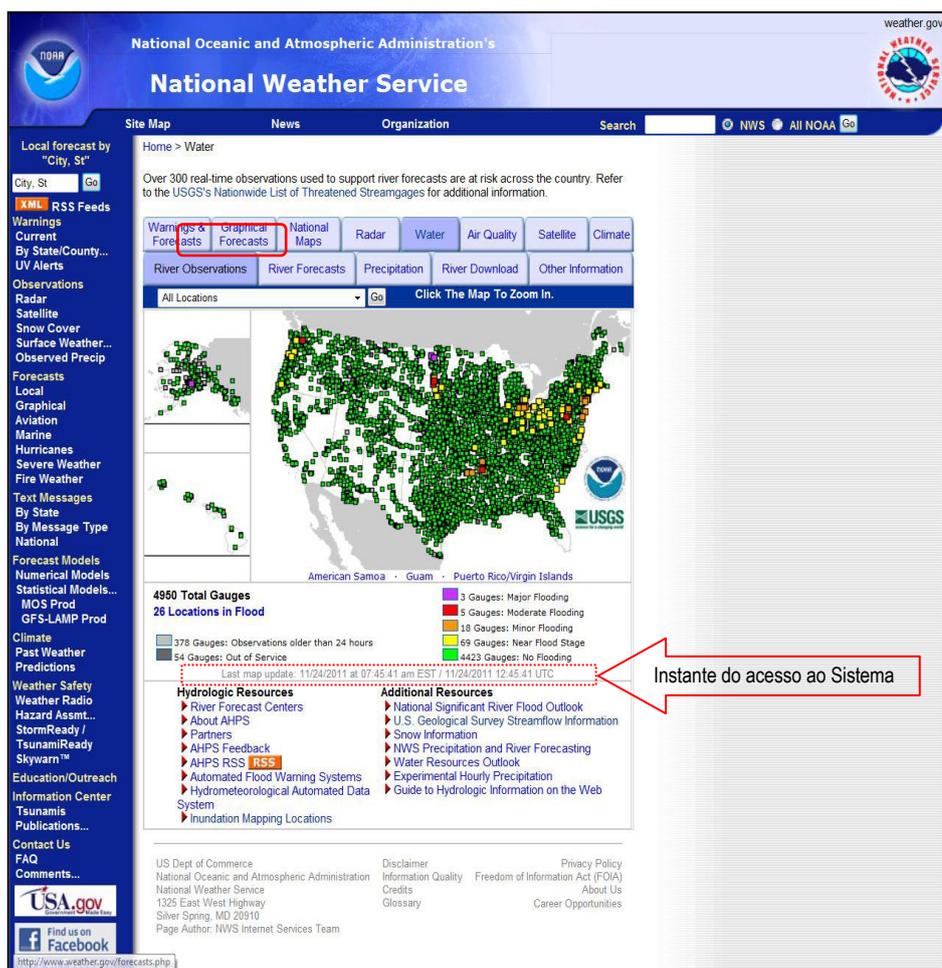


Figura 2 – Página eletrônica do NWS nos Estados Unidos.

Fonte: Adaptado de <<http://water.weather.gov/ahps/>>. (Acessado em 24/11/2011).

O serviço mantém, entre outros mecanismos de monitoramento, um moderno sistema de alertas para prevenção de desastres naturais causados por enchentes. São mais de 300 observações em tempo real usadas para apoiar as previsões dos rios que estão em risco de inundações, em todo o país (NOAA - NWS, 2011).

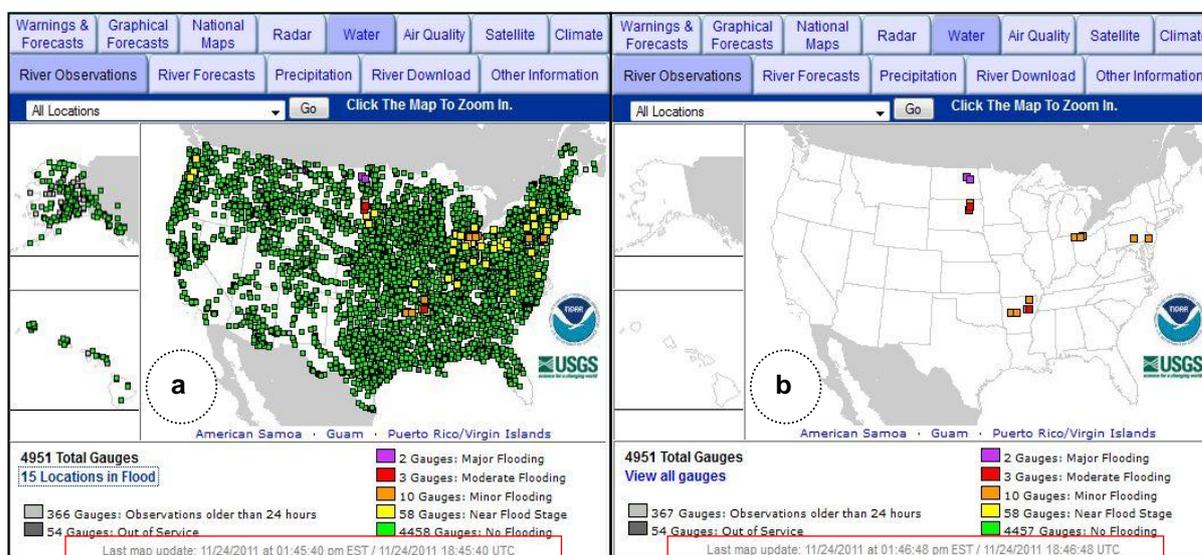


Figura 3 - Serviço Avançado de Previsão Hidrológica (AHPS) – Rios em observação. Nota: Em “a” os 4951 medidores de observação ativos com 15 localizações em inundação. Em “b” o filtro com os locais em situação de enchente no instante do acesso.

Fonte: Adaptado de <<http://water.weather.gov/ahps/index.php>>. Acessado em: 24/11/2011.

Conforme a página eletrônica do NWS⁷ o sistema é chamado de “Serviço Avançado de Predição Hidrológica (*Advanced Hydrological Prediction Service - AHPS*) e...

[...] é um componente novo e essencial dos nossos Serviços de Meteorologia, Clima e Água. *AHPS* é um menu de produtos de previsões precisas e rico em informações, baseado em tecnologia web. Eles exibem a magnitude e a incerteza de ocorrência de inundações ou secas, de horas a dias e meses, de antecedência. Estes produtos gráficos são informações úteis e ferramentas de planejamento para muitos gerentes econômicos e de emergência. Estes novos produtos permitirão que as agências governamentais, instituições privadas e os indivíduos tomem decisões baseadas em políticas mais informadas sobre os perigos e ações para mitigar os riscos de inundações e secas.

O AHPS tem abrangência sobre todo território norte americano, incluindo áreas rurais e urbanas, Alasca e ilhas oceânicas. Seus alertas são dados pela internet – por *e-mail*, *RSS Feeds*, *Facebook*[®], *Twitter*[®] – e destinam-se a toda população estadunidense (NOAA - NWS, 2011).

⁷ Disponível em :<<http://water.weather.gov/ahps/about/about.php>>. Acessado em 24/11/2011.

Ao clicar em um dos marcadores de locais com previsão de enchente, o usuário do AHPS acessa os dados espaciais e hidrológicos da seção de referência. A tela do sistema mostra opções para visualizar os marcadores sobre “layers” de outros temas, como drenagem, limites estaduais, municipais, estradas e cidades e seus nomes, como mostra a figura 4.

Para acessar os dados hidrológicos da seção de referência dá-se o clique no ícone marcador do local da enchente e, imediatamente, abre-se uma nova janela com os dados em um hidrograma (Figura 5). Sob o hidrograma, abre uma janela de acesso à base de dados geográficos do Google[®], visualizáveis na forma de mapas ou imagens de satélites.

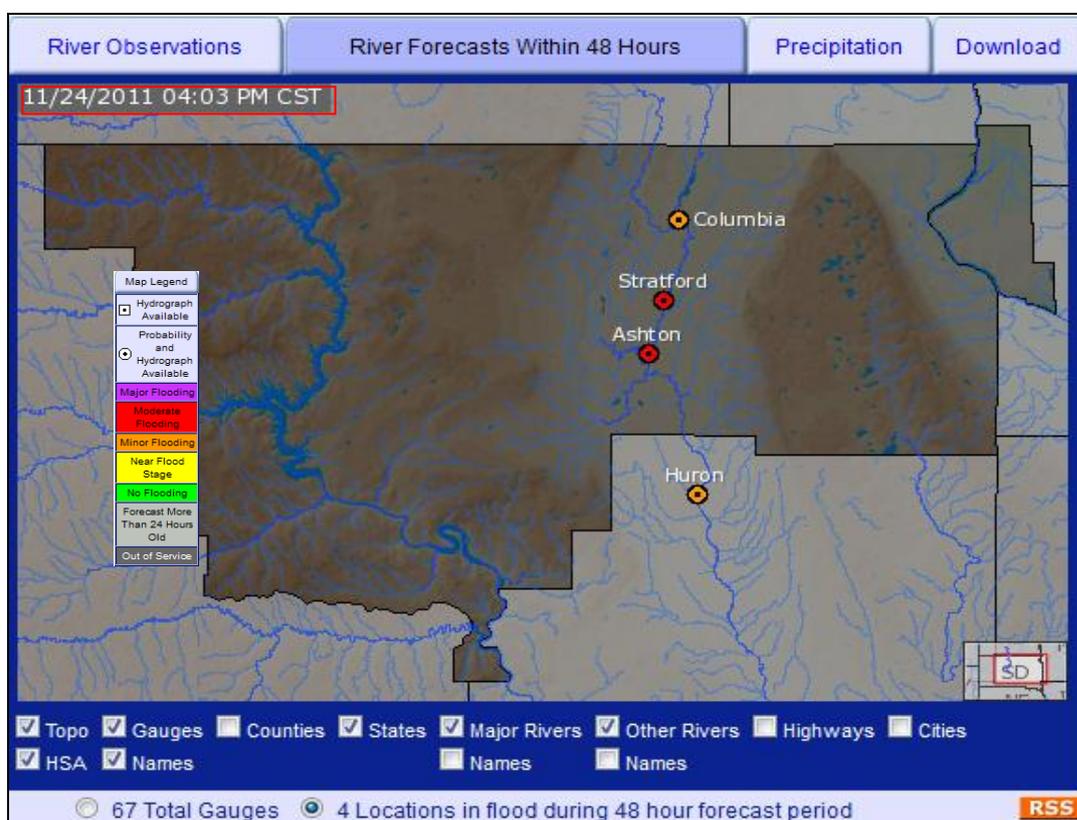


Figura 4 – Visualização dos locais das estações de medição com alertas de enchentes informadas pelo AHPS, no instante da pesquisa.

Fonte: <<http://water.weather.gov/ahps2/forecasts.php?wfo=abr>>. Acessado em: 24/11/2011.

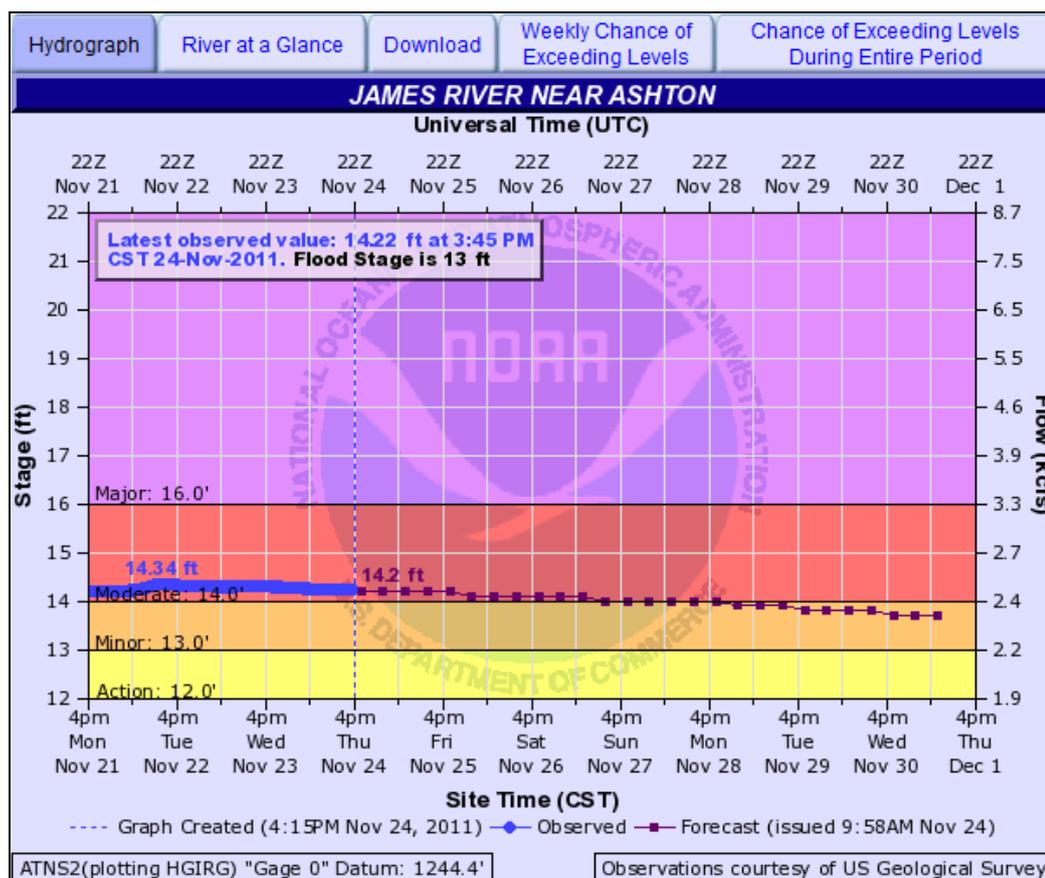


Figura 5 – Hidrograma da enchente em ocorrência no instante do acesso ao AHPS.
 Fonte: <<http://water.weather.gov/ahps2/hydrograph.php?wfo=abr&gage=atns2&view=1,1,1,1,1,1,1,1&toggles=10,7,8,2,9,15,6>>. Acessado em: 24/11/2011.

O sistema de alerta norte americano tem a intenção de ajudar as comunidades locais e autoridades de recursos hídricos a comunicar melhor os riscos futuros de inundação nos Estados Unidos, através do desenvolvimento e implementação de uma base de mapas digitais de inundações por enchentes via internet. Essa biblioteca de mapas de inundações, combinada com as observações dos rios, feitas pelo USGS, e as previsões do NWS, melhoram a comunicação dos riscos de inundações e fornecem aos decisores as informações necessárias para mitigar os impactos das inundações (NOAA, 2011, p. 2).

É possível também abrir os dados através do Google Earth[®], pois o sistema habilita um ícone de hiperlink (Figura 6).

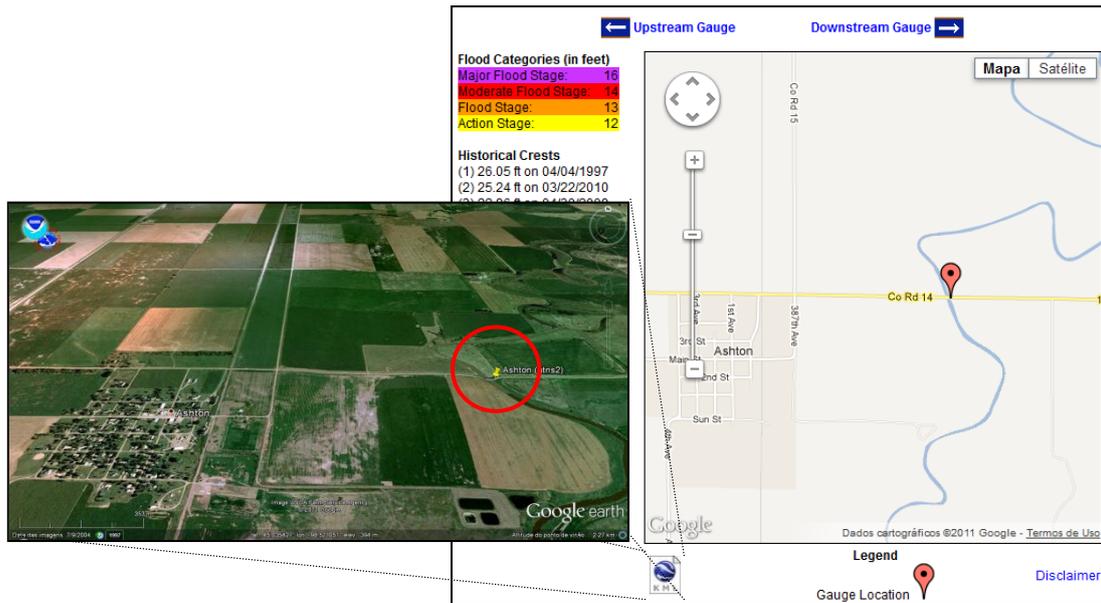


Figura 6 – Ilustra um local de estação medidora do AHPS e link para o Google Earth. Nota: O local situa-se nos arredores do Condado de Ashton (região agrícola no norte dos Estados Unidos), bacia hidrográfica do Rio James. Fonte: <<http://water.weather.gov/ahps2/hydrograph.php?wfo=abr&gage=atns2&view=1,1,1,1,1,1,1,1&toggles=10,7,8,2,9,15,6>>. Acessado em: 24/11/2011.

Existem algumas bacias hidrográficas nos Estados Unidos, cujas agências de gerenciamento já possuem o mapeamento das áreas de inundação, especializadas em função da pluviosidade, seguindo as diretrizes da NOAA. Um desses exemplos é o mapeamento das áreas de inundação do Condado de Burgaw, no estado da Carolina do Norte. A sequência de imagens a seguir mostra a espacialização da mancha de inundação sobre o terreno, considerando diferentes critérios. Na figura 7 o critério de espacialização é a classificação da inundação; em cor amarela – estágio próximo à inundação, em cor laranja – inundação menor, em vermelho – inundação moderada. A escala de classificação vai até inundação maior, na cor lilás.

Outra classificação desenvolvida pelo AHPS é em função da profundidade da inundação sobre o terreno seco. As áreas inundáveis aparecem na figura 8 e quando mais profundo o local submerso, mais escuro é o tom azul.

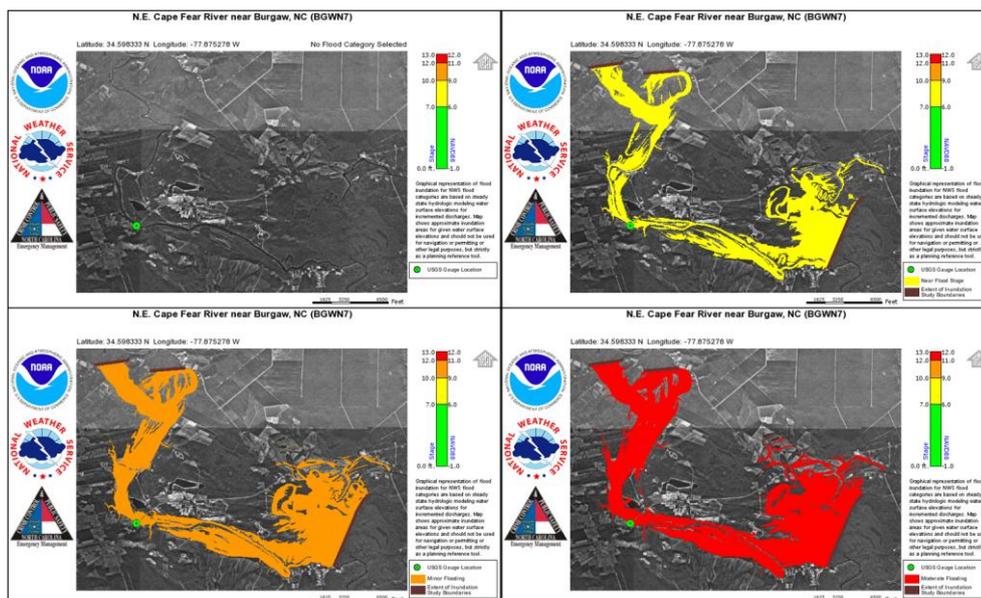


Figura 7 – Manchas de inundação do Condado de Burgaw (Carolina do Norte – EUA) conforme distribuição por classes do AHPS.

Fonte: <<http://water.weather.gov/ahps2/inundation/inundation.php?gage=bgwn7>>. Acessado em 25/11/2011.

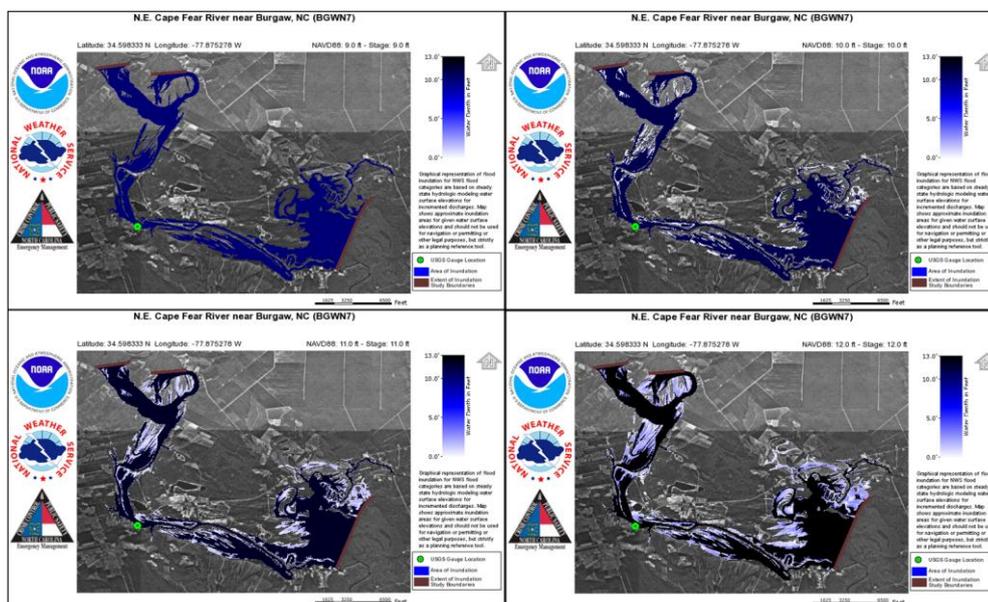


Figura 8 - Manchas de inundação conforme a profundidade da inundação.

Fonte: <<http://water.weather.gov/ahps2/inundation/inundation.php?gage=bgwn7>>. Acessado em: 25/11/2011.

Uma terceira classificação no mapeamento de manchas de inundação é demonstrada na figura 9, pelo sistema do AHPS, considerando o tempo de retorno de 100 e 500 anos e, também, os dados dos caminhos de enchentes (“*floodways*”).

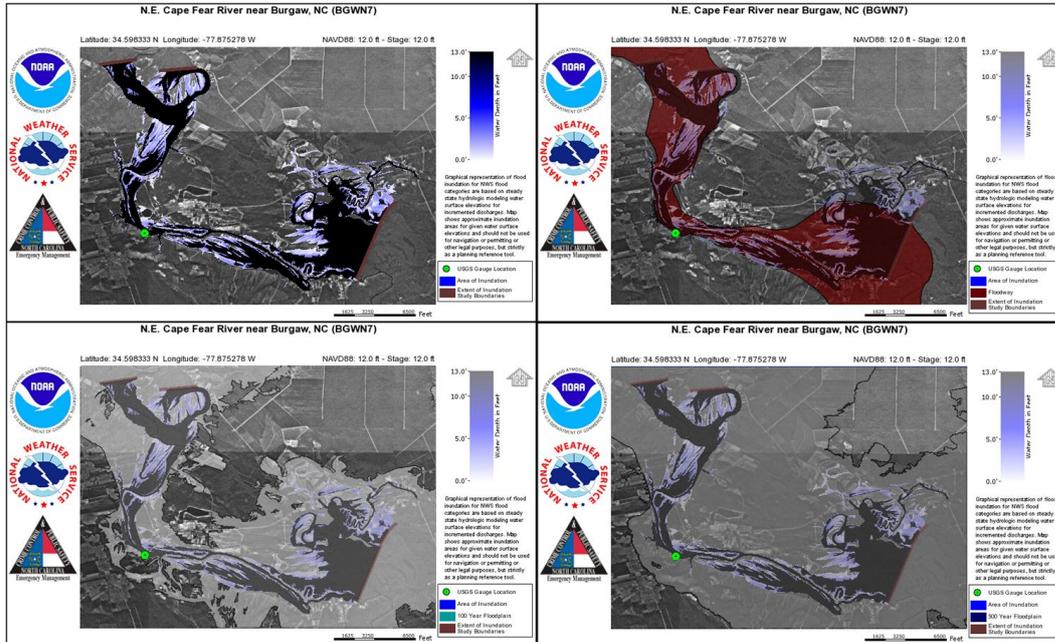


Figura 9 – Áreas de inundação do Condado de Burgaw (Carolina do Norte – EUA) para tempo de retorno de 100 e 500 anos e a região dos “floodways”.

Fonte: <<http://water.weather.gov/ahps2/inundation/inundation.php?gage=bgwn7>>. Acessado em: 25/11/2011.

Sobre esse termo – “floodway” – cabe nesta revisão de literatura a conceituação estabelecida pela FEMA (NOAA, 2011), pela relação às necessidades observadas na área de pesquisa da tese. Segundo FEMA (NOAA, 2011) “floodway” pode ser caracterizado como um “caminho de enchente”.

Um caminho regulatório de enchente significa que o canal de um rio ou curso d’água e outras áreas de terra adjacentes devem ser reservados para suportar a enxurrada sem cumulativamente aumentar a elevação da superfície da água acima de uma altura conhecida. As comunidades devem regular o desenvolvimento desses passadores de enchentes para garantir que não ocorram aumentos de elevações de inundação a montante. Para córregos e outros cursos de água onde FEMA tem proporcionado crescimento na Base de dados de Elevações de Inundações (BFEs), mas se caso não tenha sido designado um passador de enchente, a comunidade deve revisar o desenvolvimento da várzea, para garantir que os aumentos de elevações da superfície da água não ocorram, ou identificar a necessidade de adotar um caminho de enchente se a informação adequada estiver disponível.

O NWS, através do seu Programa de Rios e Inundações, mantém uma vigília em torno do tempo de avisos de rios em todo o país para proteger a vida e a propriedade, quando a ameaça de inundação ocorre (STALLINGS e WENZEL, 1995). Quando o tempo de alerta dado é suficiente para as comunidades que serão afetadas por uma inundação, as ações apropriadas são tomadas e os benefícios econômicos que ocorrem são diretamente atribuíveis às oportunas previsões

hidrológicas do NWS (apud NATIONAL HYDROLOGIC WARNING COUNCIL, 2002, p.2).

Antes da implantação do AHPS pelo NWS as perdas registradas nos Estados Unidos eram da ordem de vários bilhões de dólares. Conforme dados do National Hydrologic Warning Council (2002, p. 5) no período de 1981 a 2000 a perda média registrada por inundações foi de 4,3 bilhões de dólares (Figura 10).

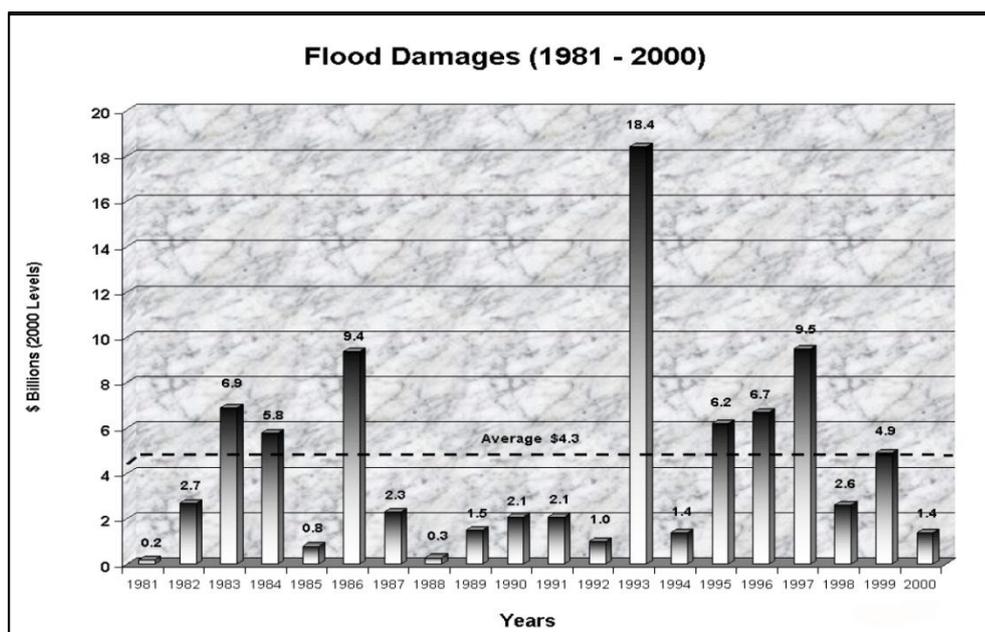


Figura 10 – Perdas por inundações nos Estados Unidos entre anos 1981 e 2000.

Nota: Dados em bilhões de dólares, indexados pelo nível de preços do ano 2000.

Fonte: American Institute for Economic Research (2000) apud National Hydrologic Warning Council (2002, p. 5).

De acordo com o National Hydrologic Warning Council (2002, p. 5), ...

[...] o AHPS está introduzindo uma exibição visualmente orientada de informações ricas dos maiores rios e previsões de recursos hídricos. Estas previsões relacionadas com a água incluem a probabilidade de ocorrência para grandes e pequenas áreas e por períodos de tempo de uma hora a uma temporada. Esta informação permite que as agências governamentais, instituições privadas e os cidadãos americanos tomem decisões informadas, com base de risco para a gestão dos recursos hídricos e ações para reduzir os perigos colocados pelas inundações e secas. AHPS aproveita a infraestrutura NWS e as competências existentes e aumenta a capacidade da NOAA para trabalhar com a comunidade de pesquisa e aplicar rapidamente os avanços da ciência para melhorar as previsões hidrológicas.

Com o AHPS, os benefícios de redução de danos de inundação foram 243 milhões de dólares anualmente e os benefícios para uso dos recursos hídricos foram de U\$ 523 milhões. A tabela 3 mostra a repartição categorizada dos benefícios econômicos do AHPS associados com as previsões hidrológicas do NWS.

Tabela 3 – Benefícios anuais da implementação do AHPS.

Centros de Previsão de Rios	Benefícios da redução de cheias (\$U.10 ⁶)	Benefícios dos Recursos Hídricos (\$U.10 ⁶)			
		Navegação	Hidroelétricas	Irrigação/água	TOTAL
Alaska	1,0	0	0,2	0	1,2
Arkansas-Red	27,6	16,5	3,1	28,3	75,5
Califórnia-Nevada	18,9	0	13,6	49,3	81,8
Colorado	4,6	0	0,7	19,9	25,2
Lower Missisipi	20,3	41,5	2,0	9,0	72,8
Middle Atlantic	25,6	0	1,7	1,3	28,6
Missouri	29,0	15,1	5,5	66,7	116,3
North Central	31,7	23,6	1,5	9,9	66,7
Northesh	14,0	0	8,8	0,7	23,5
Northwest	16,0	10,9	35,7	40,1	102,7
Ohio	25,2	40,9	2,6	1,1	69,8
Southeast	11,4	20,5	5,4	19,3	56,6
West Gulf	17,7	0	0,2	27,4	45,3
Subtotal	243,0	169,0	81,0	273,0	766,0
TOTAL	243,0		523,0		766,0

Nota: \$U.10⁶ = Dados em milhões de dólares indexados pelo nível de preços do ano 2000.

Fonte: National Hydrologic Warning Council (2000, p. 12).

Da mesma forma que o AHPS contribui na mitigação dos impactos causados por enchentes nos Estados Unidos, outros órgãos nacionais como o USACE também executam ações de prevenção e redução desses impactos. A figura 11 trata do montante de recursos economizados com projetos do USACE de 1981 a 2000.

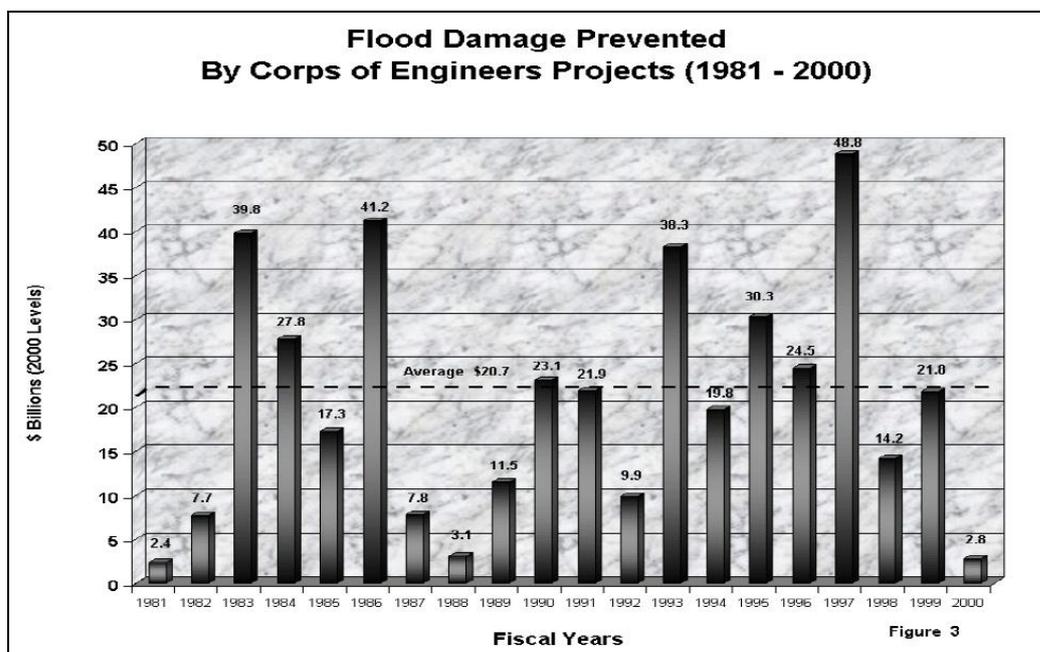


Figura 11 – Perda por inundações prevenidas pelo USACE de 1981 a 2000.

Nota: Dados em bilhões de dólares, indexados pelo nível de preços do ano 2000.

Fonte: National Hydrologic Warning Council (2002, p. 13)

2.1.3 Canadá

O Canadá mostra-se um país muito organizado na convivência com o problema das inundações e enchentes. O país mantém sua população permanentemente informada e educada para reagir eficaz e rapidamente antes, durante e depois da ocorrência de fenômenos naturais, especialmente naqueles em que as causas são hidrológicas. Em relação à hipótese desta tese, o exemplo canadense trouxe contribuições importantes, principalmente relacionadas às medidas não estruturais que podem ser organizadas.

No Canadá, o governo federal tenta desestimular o desenvolvimento em planícies inundáveis por meio de ações da instituição chamada “*Environment Canada*”, que atua na proteção, preservação do patrimônio natural do país e no fornecimento de informações meteorológicas para a segurança dos canadenses (ENVIRONMENT CANADA, 2010a). Essa instituição, segundo seu site (<http://www.ec.gc.ca/>), trabalha para reparar danos do passado, coletar e transmitir conhecimentos, implementar e executar políticas para evitar problemas futuros, garantindo que os canadenses tenham um ambiente seguro.

O Canadá possui sistemas de alerta em nível de desenvolvimento próximo ao dos EUA, não sendo estes aqui reportados. Entretanto, destacam-se as medidas de cunho não estrutural (Quadro 3), que objetivam o controle e o gerenciamento da ocupação das planícies inundáveis, inibindo a ocupação das áreas alagáveis (AAs). A gestão dessas áreas envolve adoção de regulamentos de uso da terra baseados na premissa de que a área especificada como em perigo, continuará a ser inundada, ocasionalmente. Outras medidas não estruturais implementadas pela *Environment Canada*, tratam da previsão e do alerta de enchentes. (ENVIRONMENT CANADA, 2010b).

Passo 1 – Conheça os riscos e esteja preparado.		
Antes da inundação	Durante a inundação	Após a inundação
<p><u>Para reduzir a probabilidade de danos:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Vedar as frestas das janelas e a base das portas no nível do solo, principalmente no porão; ▪ Não armazenar seus documentos importantes em partes baixas. Mantenha-os em um nível elevado, protegido do alcance da inundação. <p><u>Se a inundação está prevista:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fechar as válvulas de gás externas; ▪ Tomar precauções especiais para salvaguardar a eletricidade, gás natural ou equipamentos de aquecimento a gás; ▪ Se não houver tempo suficiente, consultar seu fornecedor de energia elétrica; ▪ Desligar a energia elétrica somente se a inundação ainda não começou e a área ao redor da caixa de fusíveis está completamente seca. Desviar a visão do painel de disjuntores ao desligá-los. Tenha uma lanterna com você. <p><u>Se a inundação é iminente:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mover móveis, eletrodomésticos e outros pertences para pisos acima do solo; ▪ Remover substâncias tóxicas, como pesticidas e inseticidas da área de inundação para evitar a poluição; ▪ Em alguns casos, casas podem ser protegidas com sacos de areia ou barreiras de polietileno. Siga as instruções das autoridades de emergência local; ▪ NÃO tente desligar eletricidade se a água está presente. Água e fios elétricos ao vivo podem ser letais. Deixe sua casa imediatamente e não voltar até que as autoridades indicam que é seguro fazê-lo. 	<p><u>Informe-se:</u></p> <p>Ouvir o rádio para descobrir quais as áreas estão afetadas, quais as estradas são seguras, para onde ir e o que fazer se a equipe de emergência local pede-lhe para deixar a sua casa.</p> <p><u>Se você precisar evacuar:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Desocupar sua casa quando você é aconselhado a fazê-lo pelas autoridades de emergência local. Ignorar tal advertência pode comprometer a segurança de sua família ou aqueles que poderiam eventualmente ter de vir a seu salvamento; ▪ Leve seu kit de emergência com você; ▪ Siga as rotas especificadas pelos oficiais. Não tome atalhos. Eles podem levar você a uma área bloqueada ou perigosa; ▪ Tome providências para animais de estimação; ▪ Se o tempo permitir, deixar uma nota informando a outras pessoas quando você saiu e onde você foi. Se você tiver uma caixa de correio, deixe a nota lá. <p><u>Nunca atravesse a área alagada:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Se estiver a pé, a água rapidamente poderia varrer-lhe para longe; ▪ Se você estiver em um carro, não conduza através das águas da inundação ou passagens subterrâneas. A água pode ser mais profunda do que parece e seu carro pode ficar preso ou ser arrastado pela água rapidamente; ▪ Evite cruzar pontes se a água é elevada e fluir rapidamente; ▪ Se você for pego em rápido aumento das águas em seu carro, deixá-lo e salvar a si mesmo e aos seus passageiros. 	<p><u>Re-entrar na sua casa:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Não voltar para casa até que as autoridades tenham aconselhado que seja seguro fazê-lo; ▪ Se o interruptor principal de alimentação não foi desligado antes da inundação, não re-entrar em sua casa até que um electricista qualificado determine que seja seguro fazê-lo; ▪ Os aparelhos que podem ter sido inundados constituem-se em um risco de incêndio ou de choque quando ligados. Não use qualquer aparelho de aquecimento, pressão, ou sistema de esgoto até os componentes elétricos sejam cuidadosamente limpos, secos, e inspecionados por um electricista qualificado; ▪ O painel elétrico principal deve ser limpo, seco e testado por um electricista qualificado para garantir que está seguro; <p><u>Garantir a segurança da construção:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Certifique-se o edifício está estruturalmente seguro; ▪ Olhe para paredes ou pisos; ▪ Cuidado com buracos no chão, vidros quebrados e entulho potencialmente perigoso. <p><u>Água:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Enchentes podem ser contaminadas com esgoto e outros poluentes. Ela pode causar doenças e infecções; ▪ Se através do odor, cor ou sabor você suspeitar que sua água potável foi contaminada, não beba; ▪ Itens domésticos que tenham sido danificados pelas inundações terão de ser descartados de acordo com as regulamentações locais.
<p>Passo 2 – Tenha um plano de emergência.</p> <p>Começar por discutir o que poderia acontecer e o que você deve fazer em casa, na escola ou no trabalho, se ocorrer uma emergência.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Para estar preparado, faça uma lista do que precisa ser feito antes do tempo; ▪ Armazene importantes documentos da família, tais como certidões de nascimento, passaportes, testamentos, documentos financeiros, seguros, etc. em recipiente à prova de água; ▪ Identificar um contato apropriado fora da cidade – que pode atuar como um ponto central de contato em caso de emergência. ▪ Anotar e exercer o seu plano com toda a família pelo menos uma vez por ano. Certifique-se de toda a gente tem uma cópia e que o mantém por perto. 		
<p>Passo 3 – Tenha um kit de emergência.</p> <p>Os itens do kit devem estar fáceis de encontrar e de transportar. Coloque os itens em uma mala com rodas ou mochila e guarde em um lugar acessível e fácil de alcançar, como em um armário. Todos na casa devem saber onde está o kit de emergência. Os itens básicos de um kit são os seguintes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Água – pelo menos dois litros de água por pessoa, por dia. Incluir pequenas garrafas que podem ser transportadas facilmente em caso de plano de evacuação; ▪ Alimentos não perecíveis, como enlatados, barras de cereal e alimentos secos (lembre-se de substituir comida e água do seu kit, uma vez por ano); ▪ Abridor de latas manual; lanterna à corda ou por bateria (com baterias extras); rádio e pilhas reservas; Kit de primeiros socorros; ▪ Itens especiais como remédios com prescrição médica, fórmulas infantis e equipamentos para pessoas com deficiências. 		

Quadro 3 - Ações imediatas em casos de inundações.

Fonte: Adaptado de Public Safety Canada (2011, p. 2-9).

2.1.4 México

O México é outro país da América do Norte que mantém organização e sistematização das ações para o enfrentamento das enchentes. O sistema de gestão de inundações no México está subordinado à Comissão Nacional da Água (*Comisión Nacional del Agua – CONAGUA*), que realiza a gestão das águas no país, conforme as informações constantes no site “*conagua.gob.mx*” (CONAGUA, 2010).

Pesquisando a organização institucional mexicana sobre a gestão de enchentes observou-se que o México possui um moderno sistema de alerta de condições meteorológicas. O Serviço Meteorológico Nacional (*Servicio Meteorológico Nacional – SMN*), subordinado à CONAGUA é o órgão responsável por informar a população mexicana sobre prognósticos climatológicos, as previsões meteorológicas e manter o monitoramento permanente do clima e do tempo em todo território mexicano (SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL, 2010).

O site da CONAGUA (CONAGUA, 2010) mantém os cidadãos mexicanos permanentemente informados sobre as condições meteorológicas, através do *Meteoinfo*, que é um boletim meteorológico eletrônico, desenvolvido para funcionar em plataformas de comunicação móvel de dados, como o *iPhone*[®], *iPad*[®] e *Android*[®]. A figura 12 a seguir, mostra um exemplo das telas dos boletins em um equipamento *iPod*[®].



Figura 12 – Sequência de telas dos boletins meteorológicos eletrônicos do *Meteoinfo* (SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL, 2010) via *iPod*[®].

Fonte: Adaptado de <<http://itunes.apple.com/us/app/meteoinfo/id464372593?mt=8>>. Acessado em: 03/01/2012.

Além da informação meteorológica em tempo real, o governo mexicano disponibiliza aos cidadãos, também pela internet, informações estratégicas de planejamento preventivo para as situações de enchentes. O Sistema de Prognóstico em Rios (*Sistema de Pronóstico en Ríos – SPR*), conforme CONAGUA/SPR (2011), é operado e atualizado pela Gerência das Águas Superficiais e Engenharia de Rios (*Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos*), que faz parte da CONAGUA.

Segundo CONAGUA/SPR (2011) o SPR é um sistema no qual as condições hidrometeorológicas são registradas e transmitidas permanentemente para um dos sete Centros de Prognóstico, distribuídos no México. Especialmente o sistema está organizado para atender cinco regiões hidrográficas, como se observa na figura 13, que mostra a tela inicial do site “conagua.gob.mx/spr”.



Figura 13 – Sistema de prognósticos em rios mexicanos.

Fonte: <<http://www.conagua.gob.mx/spr/index.html>>. Acessado em: 03/01/2012.

Os prognósticos do sistema SPR incluem alerta de inundações súbitas, informações de prognósticos em rios, abastecimento de água, previsão de incrementos de água em barragens, mapas de inundações e o manejo de recursos hídricos (SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL, 2010).

O México possui também um Sistema Nacional de Proteção Civil (*Sistema Nacional de Protección Civil*) que prepara e ampara o povo mexicano antes, durante e depois dos desastres, e, cujo lema é “*Tu participación es tu protección*” (SEGOB, 2009).

2.1.5 Países Asiáticos

Na Ásia, Bacia do Rio Mekong, entre os países do Camboja, Laos, Tailândia e Vietnam, os pesquisadores Manusthiparom et al., (2006) da *Mekong River Commission* (MRC) desenvolveram um sistema de monitoramento e previsão de inundações, que acelerou o tempo de resposta aos alarmes de cheias. Neste sistema, durante a estação seca (novembro-maio), são sete dias de monitoramento do rio e as previsões de baixo fluxo são conduzidas e atualizadas semanalmente na <http://www.mrcmekong.org>. Já as previsões de inundação em cinco dias são atualizadas diariamente em 21 estações-chave, ao longo da corrente principal do Rio Mekong, durante a estação das cheias (junho-outubro).

No Japão, como em outros países ricos segundo o PNUD (2006, p.156),

[...] os fortes investimentos pós-guerra em infraestruturas impulsionaram o rápido desenvolvimento da energia hidroelétrica, do controle de inundações e da agricultura irrigada. Até a Segunda Guerra Mundial, as cheias causadas pelas fortes chuvaradas sazonais e pelos tufões tiveram efeitos desastrosos na economia japonesa, com perdas a exceder, por vezes, os 20% do rendimento nacional bruto (RNB). A partir dos anos 70, o impacto das cheias nunca ultrapassou 1% do RNB. A maioria da população japonesa e 60% dos seus bens produtivos situam-se, atualmente, nas planícies baixas vulneráveis às cheias, mas as infraestruturas e a gestão da água reduziram o risco numa média de cerca de 9 bilhões de dólares por ano.

Em Bangladesh, Hossain e Davies (2004) programaram um sistema de apoio à redução dos impactos das enchentes sobre o sistema de transporte viário, que utiliza um mapa de profundidade média da inundação com base em dados históricos, no formato de uma grade (*grid*), com a rede viária detalhada na escala 1/250.000 e com os dados de tráfego armazenados em Microsoft Access®. O sistema proposto por esses autores pode permitir a análise e visualização do impacto de inundação sobre o volume de tráfego, bem como em outras características do fluxo de tráfego, incluindo restrição de velocidade, tempo de viagem e de nível de serviço de tráfego.

2.1.6 União Europeia

Na Europa Twigger-Ross (2005), ao publicar o relatório técnico “O impacto das inundações nas comunidades urbanas e rurais”, apresentou importantes experiências decorrentes da aplicação da política de gestão de riscos de inundações no Reino Unido. Entre os esquemas de gestão de risco de inundações destacados pela autora estão os casos do *Sutcliffe Park* e da localidade de *Gainsborough* ambos na Inglaterra. No primeiro caso, para reduzir o risco de danos causados pelas inundações no sul de Londres, o *Sutcliffe Park* tem sido re-paisagizado para se tornar uma área de armazenamento de enchentes⁸. Conforme a fonte pesquisada, em caso de alerta de cheias, ocorrerá o seguinte:

A parte interna do parque será fechado ao público. Se a água atinge um determinado nível nas áreas inundáveis (entorno de bueiros), ela entra no parque através de aberturas (açudes), construídos para os bueiros. O nível da água dentro do parque sobe lentamente e arredores ficam alagados, o nível da água sobe de uma forma controlada, durante um período de horas. Quando o aviso de inundações tiver expirado, a água flui de forma segura, para o rio Tamisa.

No caso da localidade de *Gainsborough* na margem leste do rio Trent, no condado de *Lincolnshire*, aproximadamente a 241,4 km ao norte de Londres, com passeios novos e inteligentes agora adornando as margens inundadas, que costumavam encontrar-se, com frequência, submersas pelo rio *Trent*, foi dado um impulso à imagem do centro da cidade (TWIGGER-ROSS, 2005).

Também na Inglaterra, segundo Varella (2010) foi criado em 2006 pelo professor Daniel Hughes, da Universidade de Liverpool, um minicomputador, do tamanho de uma caixa de fósforos com sensor de nível de água, que é usado para prevenir as enchentes dos rios em zonas rurais do país europeu.

Na França o sistema de prevenção de riscos de desastres naturais é coordenado pelo Centro Operacional de Gestão de Crises (COGIC⁹), subordinado ao Ministério do Interior. Em relação às enchentes, os franceses atuam na prevenção de riscos através dos Programas de Ações de Prevenção contra as

⁸ Fonte: Acessada em 20/07/2011. Disponível em:

<http://www.greenwich.gov.uk/Greenwich/YourEnvironment/GreenSpace/ParksGardens/Eltham/SutcliffeParkFloodAlleviationPlan.htm>

⁹ Fonte: http://www.interieur.gouv.fr/sections/a_1_interieur/defense_et_securite_civiles/gestion-risques/cogic

Inundações (PAPI¹⁰). Conforme esta fonte os Programas de Prevenção contra Inundações (PAPI) foram lançados em 2002. Eles são projetados para promover a gestão integrada dos riscos de inundações para reduzir seus efeitos nocivos na saúde humana, a propriedade, as atividades econômicas eo meio ambiente. Os PAPI's e outras ações de prevenção de riscos na França são operacionalizados sob a responsabilidade do Ministério de Ecologia, do Desenvolvimento Sustentável, dos Transportes e da Logística. Entre diversas ações do Ministério destaca-se o portal PRIM.net, que reúne uma grande diversidade de dados e informações a respeito da prevenção de situações de risco durante enchentes.

Na Alemanha, está sediado o Global Runnof Data Centre (GRDC), que é um arquivo internacional de dados com até 200 anos de idade, que promove estudos multinacionais e globais sobre variabilidade e mudança climática global. O órgão opera subordinado à Organização Meteorológica Mundial (OMM) e contribui para estudos internacionais sobre meios de prevenir e controlar as cheias transacionais, principalmente na Europa (GRDC, 2008).

Os países membros da União Européia conjugaram esforços para o controle de enchentes e inundações, somente no início da década de 2000, quando em 2002, uma enchente transnacional nas bacias dos rios Elba e Danúbio. Em 2002 a Comissão Européia lançou o Sistema Europeu de Alerta contra Inundações (*European Flood Alert Systema – EFAS*). Esse sistema funciona por meio da colaboração entre os centros de previsão de cheias nacionais e vários serviços meteorológicos dos Estados-Membros e prepara informações de alertas de cheias com até dias de antecedência (EUROPEAN COMMISSION, 2012).

2.1.7 Oceania

Na Austrália, o Bureau de Meteorologia (*Bureau of Meteorology – BOM*) é responsável por fornecer um serviço eficaz de previsão e alerta em cada estado e território. Este serviço é prestado em colaboração com outras organizações, tais como agências de governo estaduais e territoriais de gestão de rios, agências de gestão de emergência, as autoridades de captação e conselhos locais (BUREAU OF METEOROLOGY - AUSTRALIAN GOVERNMENT, 2009).

¹⁰ Fonte: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-programmes-d-actions-de.html>

Na Nova Zelândia, Gardiner et al. (2009) publicaram o estudo “*Climate change effects on the land transport network*” que trata exaustivamente o problema causado pelas inundações sobre a estrutura viária do país. Apesar de este estudo tratar não somente sobre o tema enchentes, sua abordagem, especificamente em relação à mobilidade, mostra como o governo neozelandês trata do problema, como se lê em Gardiner et al. (2009, p.11):

Este estudo estimou o provável aumento do risco de inundação em seções vulneráveis das redes rodoviárias e ferroviárias estatais sob a mudança climática, a fim de auxiliar o plano dos operadores das redes para uma resposta de adaptação adequada (por exemplo, planejamento, projeto, operação ou manutenção).

A metodologia compreendeu a identificação atualizada das partes inundáveis das redes, baseadas em inundações registradas, estabelecendo um intervalo de recorrência anual (Annual Recurrence Interval – ARI) para cada inundação, prevendo futuros ARI em 2040 e 2090, usando um fator de escala, e plotagem dos dados de inundação em um mapa GIS de cada rede. Dados de enchentes nacionais que afetaram a rede ferroviária foram recuperados do banco de dados (ONTRACK) dos incidentes de julho de 2004 a setembro de 2008. Informações semelhantes para as rodovias estatais foram solicitadas a cada um dos 24 operadores da Agência de Transportes da Nova Zelândia (NZTA).

O método de triagem assume que a mudança no risco futuro de inundação, numa determinada localização, é proporcional ao aumento das precipitações extremas nesse local e que um dado aumento nos resultados de precipitações fortes é proporcional a um aumento semelhante no pico do fluxo do rio. Estas hipóteses simplificadoras são aceitáveis para os fins deste perfil nacional, embora que eles sejam ditos 'quase acidentais' não são identificados (ou seja, seções que são susceptíveis de inundações, no futuro, mas que não estão atualmente em risco).

2.2 Sistemas de previsão de cheias no Brasil

De acordo com Kelman (1999, p. 19) os recursos hídricos têm sido historicamente administrados no Brasil, não diferentemente da maior parte do resto do mundo, [...] o gerenciamento foi centralizado em um sistema de comando e controle no qual o governo decide. Isto é o chamado “velho” paradigma, assim definido pela Declaração de Dublin. Conforme esse mesmo autor, nas cidades brasileiras maiores, a ocorrência de enchentes é o maior problema. A caótica expansão de conglomerados urbanos – comuns no Brasil, submetidos a climas quentes e úmidos, geralmente aumenta a frequência de inundação. Agrava isso a deficiência de sistemas de monitoramento fluviométrico no Brasil onde na maioria das regiões não se encontram pluviômetros e fluviômetros para referenciar os estudos.

Krebs, Tucci e Silveira (1985) mencionam que para efetuar a previsão de cheia, em curto prazo, são necessários: sistema de medições, comunicações, telemetria; entre outros que são utilizados para transmitir os dados de precipitação, nível e vazão durante a ocorrência do evento. O processo de estimativa é realizado através do uso de modelos matemáticos que representam o comportamento das diferentes fases do ciclo hidrológico.

Segundo Calvetti et al. (2010) para desenvolver sistemas de alerta contra cheias a variável climatológica principal é a precipitação. A precipitação na forma de chuva é o processo pelo qual a água condensada na atmosfera atinge gravitacionalmente a superfície terrestre, e que, segundo Tubelis e Nascimento (1980), é expressa pela espessura da camada de água líquida, denominada altura de precipitação, que se deposita sobre uma superfície horizontal, plana e impermeável. Sua unidade de medida no Sistema Internacional é o milímetro (*mm*).

Esta determinação é feita com pluviômetros, ou por registradores de chuva chamados pluviógrafos. Esses têm uma vantagem sobre os pluviômetros, pois possibilitam determinar duas características importantes das chuvas: a intensidade – quantidade de água precipitada por unidade de tempo – expressa em milímetros por hora (*mm.h⁻¹*), e a duração das chuvas definida como a diferença de tempo entre o início e o término do evento (VAREJÃO-SILVA, 2006).

A distribuição espacial de pluviômetros da rede básica é escassa. Para Calvetti et al. (2010) a espacialização da chuva tem sido motivo de limitação e mesmo de discussão devido à baixa representatividade espacial dos pluviômetros das áreas de interesse e à própria característica deste sistema de medição, ou seja, medição pontual.

Sampaio (2011) reafirma tal condição ao descrever que essa precariedade de estações de medição pluvio, hidro e sedimentométricas é ainda maior em pequenas bacias hidrográficas, cuja maior dificuldade na determinação da vazão máxima está na ausência de dados observados de vazão (o que impede a aplicação de métodos estatísticos) ou de chuvas intensas (o que impede a aplicação de métodos indiretos).

No Brasil, o órgão oficial que gerencia a coleta, processamento e divulgação de dados meteorológicos, entre eles a precipitação pluviométrica, é o Instituto Nacional de Meteorologia – o INMET, que possui uma rede de estações meteorológicas convencionais e automáticas (Figuras 14 e 15).

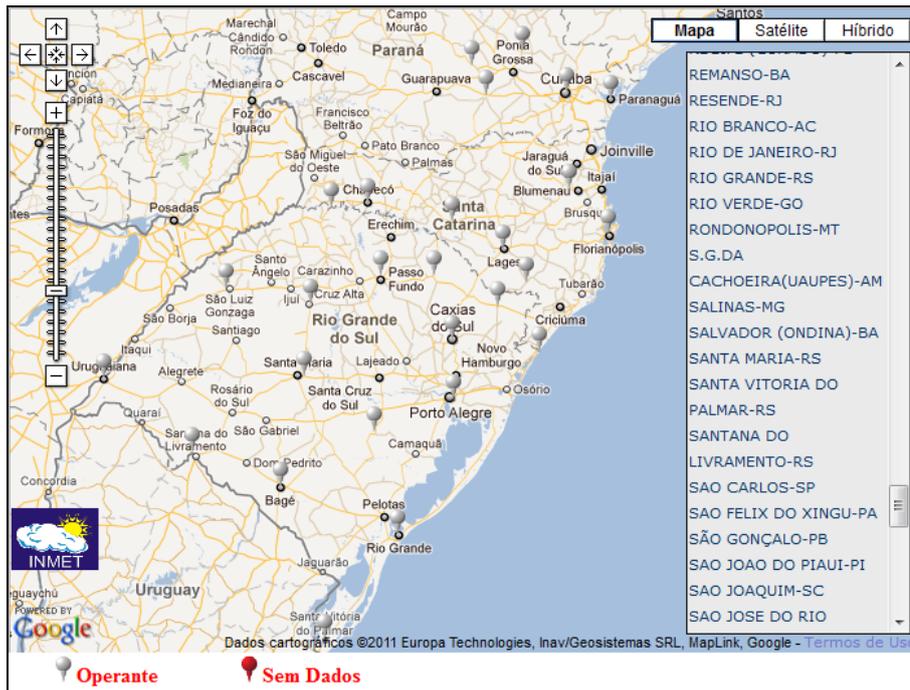


Figura 14 – Distribuição das estações convencionais do INMET no sul do Brasil.
 Fonte: <<http://www.inmet.gov.br/sim/sonabra/convencionais.php>>. Acessado em: 17/11/2011.

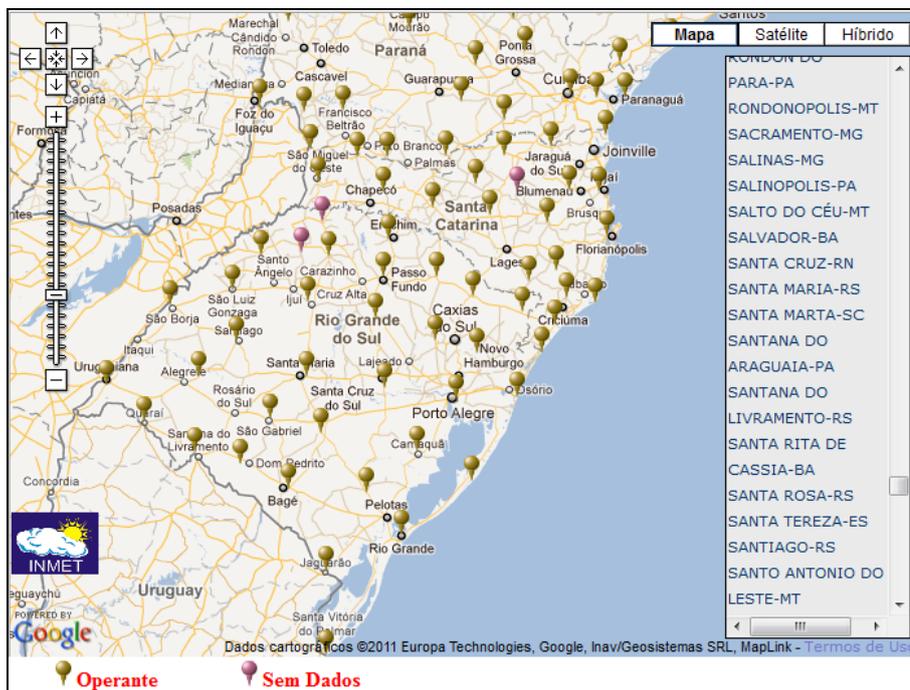


Figura 15 – Distribuição das estações automáticas do INMET no sul do Brasil.
 Fonte: <http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/pg_automaticas.php>. Acessado em: 17/11/2011.

Apesar de controlar a rede nacional de estações meteorológicas o INMET não tem a missão de prover alertas de cheias, pois não atua diretamente no gerenciamento e manejo das bacias hidrográficas brasileiras.

Nas estações convencionais do INMET os dados são coletados por observadores em três diferentes horários ao longo do dia, às 12 UTC (*Coordinated Universal Time*), às 18 UTC e às 24 UTC conforme normatização da Organização Mundial de Meteorologia (OMM), enquanto as estações automáticas disponibilizam dados diários de hora em hora (ROSA, et al., 2011, p. 2139).

Segundo Queiroz (2008), a importância da previsão meteorológica para períodos muito curtos de tempo tem aumentado nos últimos anos, devido ao aumento considerável de desastres naturais como furacões, enchentes, deslizamentos de terra, tempestades de granizo, etc.

Somente em 10 de abril de 2012 o governo brasileiro publicou Lei Federal 12608/2012 – Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), definindo as diretrizes para prevenção aos desastres naturais e apoio às comunidades atingidas. Essa lei dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil – CONPDEC. Também, autorizou a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres (BRASIL, 2012). Entre os objetivos da PNPDEC têm-se:

[...];

VII - promover a identificação e avaliação das ameaças, suscetibilidades e vulnerabilidades a desastres, de modo a evitar ou reduzir sua ocorrência;

VIII - monitorar os eventos meteorológicos, hidrológicos, geológicos, biológicos, nucleares, químicos e outros potencialmente causadores de desastres;

IX - produzir alertas antecipados sobre a possibilidade de ocorrência de desastres naturais;

[...];

XV - integrar informações em sistema capaz de subsidiar os órgãos do SINPDEC na previsão e no controle dos efeitos negativos de eventos adversos sobre a população, os bens e serviços e o meio ambiente.

[...] (BRASIL, 2012).

No ano de 2012, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) colocou em funcionamento o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), que é vinculado à Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisas e Desenvolvimento (SEPED), do MCTI. O CEMADEN tem por objetivo desenvolver, testar e implementar um sistema de previsão de ocorrência de desastres naturais em áreas suscetíveis de todo o Brasil (BRASIL, 2013).

Através do esforço conjunto entre oito universidades com cursos de meteorologia, o Centro de Previsão e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) e a Sociedade Brasileira de Meteorologia (SBMET) foi criado, em novembro de 2010, o

Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisas – BDMEP (INMET, 2010, p. 2) para apoiar as atividades de ensino e pesquisa na área de meteorologia e, por conseguinte, apoiar as pesquisas para desenvolvimento de sistemas de alerta contra cheias.

Oliveira, Saldanha e Guasselli (2010, p. 414), ressaltam que na maioria das cidades brasileiras atingidas, observam-se poucos investimentos, tanto em medidas estruturais (obras de infraestrutura para amenizar os efeitos das inundações) quanto em medidas não estruturais (mapeamentos, previsão e planejamento).

No sul do Brasil um dos sistemas mais importantes para a prevenção de situações de calamidades por enchentes está em Santa Catarina, na Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí, conforme página eletrônica do Centro de Operação do Sistema de Alerta - CEOPS (<http://ceops.furb.br/>). No ano de 1984 o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE instalou uma rede telemétrica com cinco estações de coleta automática de chuva e níveis nos municípios de Blumenau, Apiúna, Ituporanga, Taió e Ibirama (CEOPS-FURB, 2010). Conforme essa fonte de pesquisa, o CEOPS desenvolve atividades como: previsão do tempo, monitoramento do nível dos rios e previsão hidrológica, laudos técnicos, pesquisa e extensão.

Conforme CEOPS-FURB (2010) a bacia do rio Itajaí-Açu é monitorada por dezesseis estações telemétricas, que coletam, em tempo atual, o nível dos rios e a precipitação ocorrida. Com base nessas informações, são realizadas as previsões de nível para Blumenau, com até oito horas de antecedência. Entretanto, em 10/09/2011 uma falha no sistema de monitoramento de cheias no rio Itajaí-Açu impediu a previsão exata e surpreendeu os moradores, que receberam um alerta equivocado. Segundo a fonte pesquisada¹¹, o erro nas previsões ocorreu devido a falhas de comunicação entre a central do sistema (sediada na FURB) e as treze estações de telemetria que transmitem os dados via sinal de telefonia celular.

Na bacia do Rio Doce, entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, o Serviço Geológico do Brasil (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM) desde 1997 mantém um sistema de alerta contra enchentes, por meio de uma parceria com a Agência Nacional das Águas (ANA) e o Instituto Mineiro de

¹¹ Disponível em: <<http://zerohora.clicrbs.com.br/rs/noticia/2011/09/falha-no-sistema-de-monitoramento-impede-previsao-exata-das-cheias-no-rio-itajai-acu-3482573.html>> Acessado em: 08/08/2012

Gestão das Águas (IGAM). Segundo a página eletrônica do sistema¹² ele consiste na coleta e análise de dados de diversas entidades, elaboração de previsão hidrológica e transmissão de informações para a Defesa Civil, Corpo de Bombeiros, Polícia Militar e prefeituras dos municípios a margem dos principais rios da bacia.

Também em Minas Gerais, como descreve Barbosa, Matos e Ribeiro (S.I.) na bacia do Rio Alto-Sapucaí, um sistema experimental de monitoramento de cheias utilizou um sistema não convencional, composto de um sensor ultrassônico e transmissão via celular, com recepção de dados via correio eletrônico (Figura 16).



Figura 16 – Sistema de monitoramento experimental instalado no Rio Alto-Sapucaí, em Itajubá-MG.

Fonte: BARBOSA, MATOS e RIBEIRO, sem data.

Segundo Barbosa, Matos e Ribeiro (S.I.) os sistemas existentes de medidas de nível não são preparados para executarem suas medidas em níveis extremos de vazão, pois são frequentemente arrastados e deixam de funcionar justamente em momentos em que suas medições são necessárias.

O Sistema de Alerta a Inundação da bacia do Alto Rio Sapucaí, em Minas Gerais, conforme a página eletrônica do SIMGE (Sistema de Meteorologia e Recursos Hídricos de Minas Gerais) adota um esquema sequencial de alertas sobre risco de enchente. Primeiramente, um cenário de risco de enchente é identificado

¹² Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/alerta/site/index.html>> Acessado em: 08/08/2012.

através da previsão da chuva com até 54 horas de antecedência e é emitido um estado de para a Defesa Civil, a qual entrará em estado de prontidão. Depois, no segundo alerta, a população é convocada a ficar atenta aos avisos da Defesa Civil para evacuação das áreas de risco. Este estado de risco é identificado pela previsão hidrológica da onda de cheia, com 48 horas de antecedência, baseada na precipitação prevista. E, por fim, no terceiro alerta, as populações serão convocadas a evacuar as áreas de risco, devendo a Defesa Civil prestar assistência a comunidade (SIMGE, 2002).

Em São Paulo, conforme a página eletrônica do jornal Estadão¹³(2010), um sistema de alerta constituído de 200 estações de monitoramento, captará informações das condições climáticas e do nível dos rios, córregos e piscinões, e transmitirá para uma central, que fornecerá alertas com duas horas de antecedência para a população. De acordo com Gerbelli (2010) os dados coletados serão atualizados a cada dez minutos e enviados para uma central, localizada na Universidade de São Paulo (USP), que retransmitirá as informações para três bases.

Mesmo com o elevado investimento aportado pelo Governo do Estado de São Paulo, conforme a Agência Estado (2010), no primeiro teste após ser anunciado oficialmente, o Sistema de Previsão e Alerta de Enchentes falhou ao não prever o transbordamento do ribeirão dos Aterrados, em Americanópolis, zona sul da capital paulista. No episódio ocorreram duas mortes e seis famílias ficaram desabrigadas.

No Estado do Rio de Janeiro, segundo o INEA (2012) o Sistema de Alerta de Cheias que foi desenvolvido conta com estações telemétricas, que enviam dados automaticamente via celular, a cada quinze minutos, com medição da quantidade de chuva e do nível da água dos rios. Quando há previsão de chuvas fortes ou possibilidade de transbordamento dos rios para a região monitorada, o órgão de controle do sistema (Centro de Controle Operacional – CCO) do INEA envia alertas via mensagens para telefones celulares e mensagens de e-mail aos agentes da Defesa Civil. Atualmente o sistema subdivide-se em Sistema de Alerta de Cheias da Baixada Fluminense e Sistema de Alerta de Cheias da Região Serrana – Nova Friburgo. Os tipos de alerta são dados como mostra o quadro 4.

¹³ Disponível em: <http://www.estadao.com.br/noticias/impreso,sistema-dara-alerta-de-enchente-2-horas-antes,624533,0.htm>. Acessado em: 08/08/2012.

Estágio	Situação
Vigilância	Sem chuvas ou chuvas fracas e esparsas. Nível de água normal.
Atenção	Previsão de ocorrência de chuvas moderadas e fortes.
Alerta	Registro de chuvas intensas. Subida do nível do rio acima do normal.
Alerta Máximo	Continuação da chuva. Rio atingindo 80% do nível de transbordamento.

Quadro 4 – Tipos de alertas do Sistema de Alertas de Cheias no Rio de Janeiro.
Fonte: Instituto Estadual do Ambiente (INEA, 2012).

Ao se analisarem os sistemas de alerta para cheias e inundações no Brasil, pelas experiências pesquisadas nos quatro estados em que esses sistemas estão em funcionamento ou em fase de desenvolvimento, constata-se a incipiência brasileira no enfrentamento do problema das enchentes. Os sistemas pesquisados apresentaram falhas operacionais em alguns casos (São Paulo e Santa Catarina) e seus esquemas de funcionamento mostram ineficiências tecnológicas, especialmente quanto à transmissão de dados dos alertas de cheias em tempo real¹⁴.

A previsão de áreas atingidas por inundações é fortemente dependente da topografia, ocupação e mudanças climáticas. Trata-se de um processo dinâmico, complexo tanto no contexto espacial como no temporal. Para tanto, pode-se elaborar previsões de inundações, através de modelos hidrodinâmicos associados a Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) (SILVA, 2006).

De acordo com Silveira (1991) a medida mais eficiente para diminuir o prejuízo com novas enchentes é estabelecer parâmetros para uma convivência harmônica com a natureza através de uma política de ocupação e uso do espaço urbano e rural adequada. Para Silveira et al. (2009), a maior parte das reações aos desastres se concentra na melhoria das previsões meteorológicas e na prestação de ajuda pós-desastre, os quais já salvaram muitas vidas. Todavia, os autores afirmam que, considerando os prejuízos sociais e ecológicos evitados, a mitigação é obviamente um grande investimento.

No caso urbano, para Winkler et. al. (2009), o estudo das vazões em pequenas bacias é importante para o dimensionamento de obras hidráulicas, como pontes e bueiros em estradas, bem como para o aproveitamento dos recursos hídricos com ênfase ao abastecimento de água, irrigação e outros. Tucci, (1993, p.

¹⁴ Observação do autor.

393) descreve como pequenas as bacias com menos de 500km², e que as precipitações convectivas de alta intensidade, pequena duração e distribuídas numa pequena área, podem provocar as grandes enchentes. Assim, para a determinação mais segura da vazão de projeto é imprescindível, além das características físicas básicas da bacia hidrográfica em estudo, o conhecimento do tempo de concentração da mesma.

Sintetizando, as medidas para controle da inundação podem ser do tipo estrutural e não estrutural. As estruturais são aquelas que modificam o sistema fluvial evitando os prejuízos decorrentes das enchentes, enquanto que as medidas não estruturais são aquelas em que os prejuízos são reduzidos pela melhor convivência da população com as enchentes (TUCCI, 1993).

2.3 Pluviosidade e enchentes no meio rural

Para a OMM (2006, p. 5) as inundações são um fenômeno natural. No entanto, esses desastres são o resultado de uma interação entre este fenômeno natural e os processos ambientais, sociais e econômicos. A OMM afirma que para definir uma metodologia integrada de gestão de inundações é necessário compreender a vulnerabilidade da sociedade exposta aos perigos das enchentes e, também, as características hidrológicas de riscos de inundação e da percepção social desse fenômeno.

O planejamento das atividades agrícolas no Rio Grande do Sul, que ocorrem preponderantemente em áreas rurais, é dependente das condições meteorológicas, principalmente, da precipitação pluvial, como aborda Nishijima (2004).

No sul do Brasil os solos das várzeas e das planícies aluviais são aproveitados com as culturas agrícolas que necessitam terrenos sistematizados, para a irrigação por sulcos ou por inundação. Essas áreas, conforme EMBRAPA (2005), frequentemente, apresentam os solos saturados de umidade, já que são mantidas constantemente irrigadas. São sistematizadas para cultivo do arroz, e, no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, apresentam drenagem naturalmente deficiente, decorrente de densidade elevada, baixa porosidade total, alta relação micro/macroporos, presença de camada subsuperficial com baixa permeabilidade e do relevo plano a suave ondulado (EMBRAPA, 2005). Condições essas, que são acentuadas pelo manejo do solo realizado em condições de umidade excessiva.

No Rio Grande do Sul predominam as chuvas frontais, mas no verão as chuvas convectivas são frequentes e contribuem sobremaneira na água precipitada (PAULA, 2009, p. 23) e, segundo Tucci (1993 p. 623), as precipitações mais intensas atingem áreas localizadas e são em geral dos tipos convectivo e orográfico. As precipitações frontais, como descreve esse autor, são as que atuam sobre grandes áreas provocando as maiores inundações dos rios nas grandes bacias hidrográficas.

Como consequência da maior ou menor precipitação sobre a bacia, Krebs, Tucci e Silveira (1985) descrevem que o sistema fluvial varia seus níveis naturalmente. As precipitações que afetam grandes bacias são do tipo frontal, ou seja, grandes massas de umidade que se precipitam sobre áreas extensas. Em bacias pequenas, as precipitações que mais causam danos são do tipo convectivo, de alta intensidade, pequena duração e distribuída em pequenas áreas.

Para o caso das enchentes, as ondas de cheias formadas pelos escoamentos intensos das chuvas e pelas vertentes da bacia hidrográfica constituem-se na parte de interesse do hidrograma, para enfrentar e minimizar suas consequências¹⁵.

As condições meteorológica e hidrológica propiciam a ocorrência de inundação (TUCCI, 1993, p. 622). Conforme esse autor a bacia rural possui maior interceptação vegetal, maiores áreas permeáveis (infiltração no solo), menor escoamento na superfície do solo e drenagem mais lenta. Porém, o desmatamento e a urbanização (Tucci, 1993, p. 623) produzem um aumento da frequência de inundação nas cheias pequenas e médias, e um efeito menor nas grandes cheias, nas quais o autor cita que a capacidade de saturação do solo e o armazenamento são atingidos e o efeito final pouco difere.

A ocorrência de chuvas intensas sobre uma determinada região tem como consequências mais drásticas as inundações, que podem ser agravadas por outros fenômenos associados, tais como: frio, granizo e vendavais. A análise do comportamento da precipitação pluvial pode auxiliar no diagnóstico de eventos extremos, como inundações e estiagens e, também, servir de subsídio na prevenção dos impactos causados por tais desastres (ROSA et al., 2011).

Estudar o processo de formação das enchentes trata-se de analisar o escoamento superficial decorrente de intensa precipitação pluviométrica ao longo da

¹⁵ Nota do Prof. Dr. Geraldo Lopes da Silveira

bacia hidrográfica, avaliando as principais influências hidrológicas que causam o fenômeno. Assim, no que se referem ao ciclo hidrológico, as principais etapas envolvidas são: a precipitação sobre a bacia e o escoamento superficial resultante (GALVÃO, 2008).

Tucci (1993) caracteriza o escoamento superficial em bacias hidrográficas, como uma “produção” de água para escoamento rápido e, portanto, as vertentes seriam as fontes produtoras. A água das vertentes, por sua vez, tem como destino imediato a rede de drenagem, transportando a água até a seção de saída da bacia. Na zona de inundação da bacia, Tucci (1993) afirma que há um comportamento ambíguo, ora de produção, quando os rios estão com os níveis de água baixos, e vertentes atuando como fornecedoras de água para os rios; ora de transporte, quando os rios estão em cheia, com a zona de inundação usada para o escoamento.

Conforme Silveira (1991) as enchentes caracterizam-se por ser um fenômeno natural, decorrente principalmente da excessiva precipitação pluviométrica e da conformação topográfica das bacias hidrográficas. As chuvas intensas e/ou vários dias consecutivos com chuva podem provocar inundações, erosão do solo e desmoronamentos de taludes, intensificando o transporte de sedimentos que assoreiam os leitos dos reservatórios de água e dos rios (BURIOL et al., 2006).

Tucci (2007) cita que os rios normalmente drenam nas suas cabeceiras, áreas com grande declividade, produzindo escoamento de alta velocidade, o qual diminui com a diminuição da declividade, ocorrendo a inundação nas áreas situadas no leito maior do rio.

Na literatura de língua portuguesa há grande controvérsia e, até mesmo, confusão no emprego dos termos enchente e inundação, trazidos dos termos “*flood*” e “*flooding*” e, mais raramente, do termo “*inundation*” (SOUZA, 2004).

Tucci (2007, p.125) define:

Leito menor é a seção de escoamento ou calha onde a água escoar na maior parte do tempo. A seção é delimitada por uma variação muito grande de inclinação das paredes do canal. O leito maior pode ser extenso, de vários quilômetros de largura e o leito menor tem alguns metros (excetuando rios de grande porte).

Kron (2002) apud Silveira et al. (2009) comenta que as inundações tornaram-se extremamente severas no sul do Brasil, nas décadas recentes e isto evidencia que ambos, a intensidade e a frequência das inundações, vêm aumentando.

Conforme Kelman (1999, p. 29) as tempestades que no passado poderiam causar problemas menores, agora causam grandes problemas, com enorme sofrimento humano, decorrente de: (a) aumento do fluxo superficial, causado pela impermeabilização da superfície do solo; (b) da ocupação das áreas propensas a inundações, pelos pobres, que não têm qualquer outra opção; (c) entupimento de rios e canais com lixo, que não é devidamente recolhido nem descartado; e (d) sedimentação de rios e canais, como resultado da erosão nas encostas.

Conforme ilustra a figura 17, obtida de Tucci (2010), as etapas da inundação em planícies têm o seguinte encadeamento: (a) escoamento restrito à calha principal do rio, com água armazenada em lagoas da planície decorrentes de cheia anterior, chuva local ou água subterrânea; (b) início do extravasamento da calha; (c) e (d) extravasamento da calha inundando a planície, alcançando lagoas e seguindo fluxos independentes do escoamento principal na calha; (e) inundação ocorrendo sobre toda a planície e interagindo com a calha do rio ao longo de toda sua extensão; (f) após passagem da cheia, acréscimo do volume armazenado na planície em relação à situação inicial.

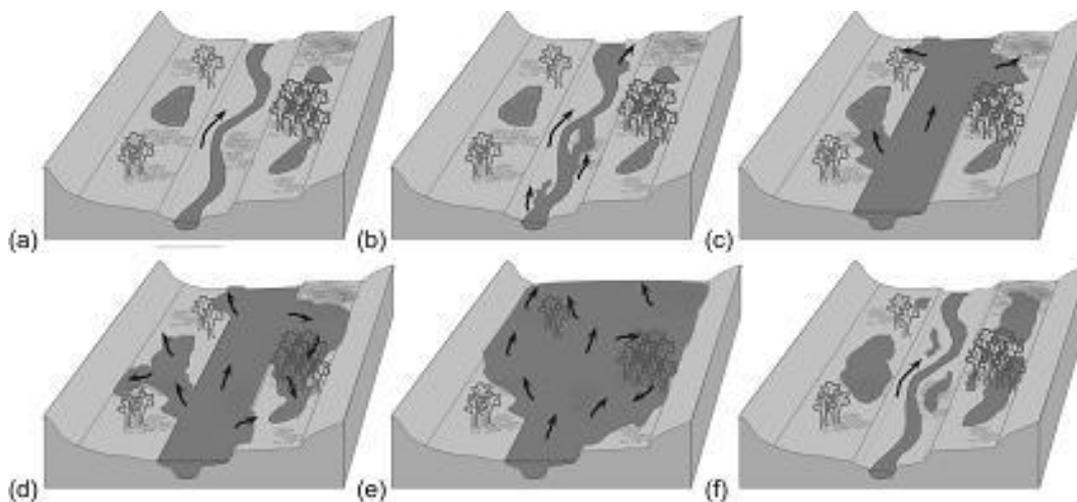


Figura 17: Diferentes etapas da inundação sobre a planície

Fonte: Tucci – Recursos Hídricos e Meio Ambiente (Blog).

Segundo um relatório técnico de ANA; CPRM; IGAM (2004, p. 1):

As enchentes são fenômenos que ocorrem quando o volume da água que atinge simultaneamente o leito de um rio é superior à capacidade de drenagem de sua calha normal, também chamada de leito menor ou calha principal. Quando essa capacidade de escoamento é superada acontece a inundação das áreas ribeirinhas também denominadas como planícies de inundação ou leito maior do rio.

Segundo esse relatório os problemas gerados por uma inundação dependem fundamentalmente da forma e do grau de ocupação das áreas ribeirinhas e da frequência de ocorrências das cheias (ANA; CPRM; IGAM, 2004, p. 1).

A várzea é a terra relativamente plana ao lado de um lago ou rio, naturalmente passível de alagamento, se qualquer transbordamento ocorre. É realmente parte do espaço da vida aquática, que o rio usa periodicamente para se estender e se espalhar. Inundações são mais destrutivas naquela parte da planície conhecida como a “*floodway*” – ou **caminho da enchente**, onde a água flui mais rápido (ENVIRONMENT CANADA, 2010), como mostra a figura 18.

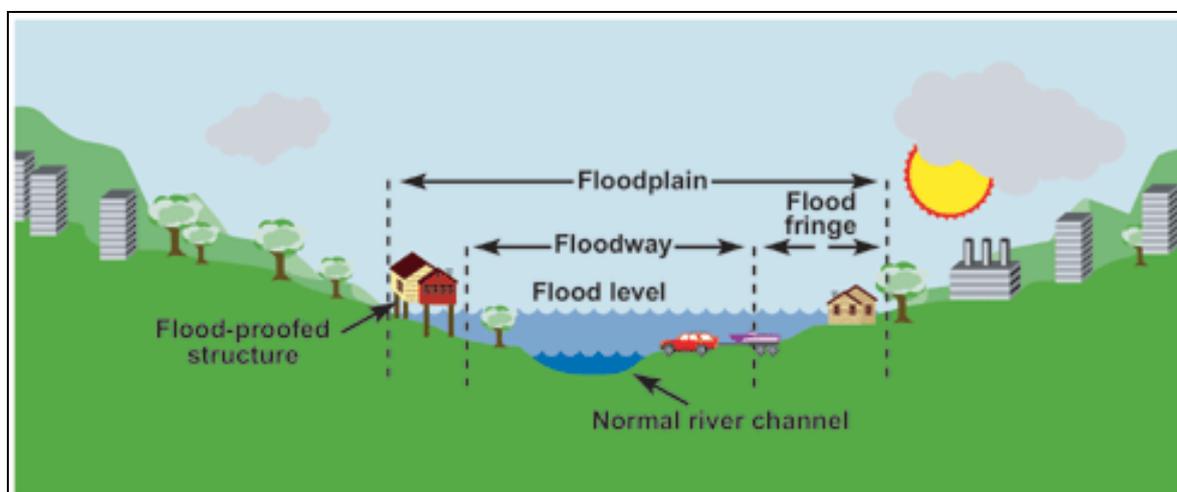


Figura 18 – Representação da planície de inundação e do leito menor (*normal river channel*).

Fonte: ENVIRONMENT CANADA (2011). Disponível em: <<http://ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=En&n=97439BCE-1>>. Acessado em: 29/11/2011.

A análise das enchentes, de acordo com USACE (1996) gera produtos categorizados com respeito ao tipo de variável (por exemplo, estágio, vazão e volume de cheia) e a medida da variável. Em outras palavras, o produto final de muitas análises de enchentes é uma definição das relações de frequência da vazão de cheia ou estágio de excedência, talvez para ambas as atuais e futuras condições alternativas, para locais de interesse na bacia hidrográfica. Os engenheiros do USACE (1996) afirmam ainda, que, geralmente, a elevação da água em um local num rio ou numa várzea é o interesse mais direto da análise de enchentes, do que a magnitude da vazão. A elevação da água é determinada com uma análise hidráulica, a qual é muitas vezes realizada subsequentemente às análises hidrológicas.

Entretanto, as características hidráulicas do movimento da onda de cheias são um importante aspecto da análise hidrológica.

Sobre a questão da formação de enxurradas os trabalhos do Departamento de Defesa (*Department of Defense - DoD*) dos Estados Unidos da América (EUA), DoD-USA (2004), descrevem que as edificações, taludes de estradas e pavimentações, geralmente afetam o balanço hídrico, diminuindo as taxas de infiltração, evaporação, transpiração e fluxo de subsuperfície, reduzindo a disponibilidade de armazenamento natural e incrementando o escoamento superficial.

Ainda segundo DoD-USA (2004) uma condição natural, como em uma floresta, pode necessitar de 25-50 mm de chuva para gerar escoamento superficial. Na condição alterada, mesmo pequenas quantidades de chuvas podem gerar escoamento devido à compactação do solo e às áreas impermeáveis conectadas. O resultado é um aumento geral do volume e da velocidade de escoamento, que aumenta a quantidade de poluição sobre as águas receptoras e amplia a geração de sedimentos e sólidos em suspensão, resultantes da erosão das margens.

Deve-se considerar que as ações antrópicas produzem modificações no ambiente rural, que afetam o escoamento superficial e tornam peculiar a relação entre a chuva e a vazão produzida, gerando inundações, escorregamentos de encostas e processos erosivos diversos.

2.4 Caracterização da mobilidade viária submetida a enchentes

Entre as consequências decorrentes das cheias tem-se a falta de mobilidade como um dos piores agravantes para as comunidades atingidas por esse tipo de desastre natural. As inundações, ao afetarem a mobilidade, extrapolam os prejuízos para além dos limites geográficos das bacias hidrográficas. Como a organização viária é uma intervenção antrópica na bacia, o planejamento do sistema deve considerar a ocorrência, senão sazonal, pelo menos esporádica das enchentes.

Hossain e Davies (2004) fundamentam o exposto acima afirmando que, quando uma inundação se constitui em uma ameaça para vários segmentos de uma rede de ligações viárias, os componentes do sistema de transporte rodoviário são expostos ao potencial impacto de inundação devido à inter-relação espacial existente entre eles. Além do que, quando uma parte da rede do percurso é afetada,

pode afetar potencialmente o fluxo de tráfego em muitas outras partes em maior ou menor grau.

Para abordar a caracterização do problema viário relacionado às cheias faz-se a transcrição de Cova e Conger (2003) que sintetiza a importância de desenvolver a pesquisa nessa área.

“Os sistemas de transporte são projetados para transportar pessoas, bens e serviços de forma eficiente, econômica e segura de um ponto na superfície da Terra para outro. Apesar deste objetivo amplo, há muitos perigos ambientais que comumente perturbam ou danificam esses sistemas em uma variedade de escalas espaciais e temporais. Considerando a geometria curva da estrada e outros riscos que podem ser resolvidos através de projetos de engenharias (Persaud, et al., 2000), riscos tais como condições meteorológicas extremas, deslizamentos de terra e terremotos são muito mais difíceis de prever, controlar e mitigar. Estes efeitos adversos podem reduzir drasticamente manutenção das redes viárias, aumentar os custos e diminuir a segurança. A sobrevivência econômica de muitos indivíduos, empresas e nações depende de transporte eficiente, e isso está incorporado nas inovações do século XX, como fabricação em tempo real e transporte durante a noite. Como o movimento de pessoas, bens e serviços aumenta em todas as escalas devido ao crescimento populacional, à inovação tecnológica e à globalização (Janelle e Beuthe, 1997), o estudo sistemático desses eventos torna-se cada vez mais importante.¹⁶”

Na revisão da literatura que segue, reafirma-se a importância das estruturas viárias, principalmente no meio rural, para a mobilização das comunidades atingidas, pois as pessoas dependem das estradas para buscar os locais seguros, acima das cotas inundáveis. Ao mesmo tempo, aqueles que precisam levar o auxílio (defesa civil, corpo de bombeiros, médicos e socorristas), também dependem das estradas (e pontes) para chegar aos que se encontram isolados, como ilustrado na figura 19.

Os esforços de prevenção de catástrofes têm-se centrado nas áreas urbanas, porque há mais pessoas e infraestrutura. No entanto, as zonas rurais enfrentam ameaças mais frequentes de desastres naturais, como incêndios e inundações. As zonas rurais enfrentam vulnerabilidades únicas, devido à sua natureza²² (CHAUDHARI, 2009, p.12).

O mesmo autor descreve que a infraestrutura rural é frequentemente mais vulnerável às inundações. Historicamente, muitas estradas rurais e municipais não foram construídas com uma engenharia de pavimento de seção. Muitas das estradas que vemos hoje são compostas principalmente de terra e cascalho,

¹⁶ Tradução nossa.

deixando estradas rurais particularmente submetidas a lavagem durante grandes inundações¹⁷.



Figura 19 – Situação das pessoas isoladas pelas cheias do Rio Vacacaí, no município de São Gabriel-RS.

Foto: Eduardo Silva – Jornal Diário de Santa Maria, de 20/11/2009.

Fonte: Arquivo Público Municipal de Santa Maria.

Segundo *Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research* (2002) as condições que produzem inundações são motivo de preocupação para todas as atividades viárias. Os prazos que os gerentes de atividades preferem ter antes de uma gama de eventos de inundações são de seis a doze horas de mobilização local e de até uma a duas semanas, para a preparação da manutenção dessas estradas e para atividades de planejamento de desvio. Para a maioria das atividades viárias, a principal ação em resposta a um alerta de inundação é de curto prazo, para evitar ou escapar das áreas de inundação previstas.

O efeito adverso de uma inundação é reconhecido quando ela interrompe o sistema de transporte rodoviário de um país, uma vez que é considerado como base de salvação social e econômica. O nível das interações entre as várias dimensões mensuráveis de inundação e as redes de transporte determina o impacto potencial de uma inundação (HOSSAIN e DAVIES, 2004).

¹⁷ Tradução nossa.

No nível estratégico regional e nacional, acessibilidade, cobertura regional e interurbana de conectividade são as principais considerações. Nessas redes esparsas, a "vulnerabilidade" da rede pode ser mais importante do que 'confiabilidade' por causa das consequências adversas potencialmente graves de degradação da rede (TAYLOR e D'ESTE, S.I.).

As enchentes, de acordo com Cova e Conger (2003) causam a maior perda em muitos países, porque elas ocorrem com frequência e sua gravidade é agravada pelo denso desenvolvimento ao longo dos muitos rios. O dano de inundação para sistemas de transporte representa uma das maiores perdas no setor público.

Para Hossain e Davies (2004, p. 1) a inundação é considerada uma das formas mais catastróficas de desastre natural e para Neves et. al. (1984) as chuvas são um fator de desorganização espacial.

Hossain e Davies (2004) mencionam que as inundações podem danificar gravemente qualquer sistema de transporte. Quando um segmento de uma rede de rotas é fechado por uma enchente, os vários impactos das cheias podem ser observados sobre as características do fluxo de tráfego, incluindo a interrupção de comunicação, congestionamento de tráfego, o volume de tráfego maior, limite reduzido de velocidade e maior tempo de viagem. Por esta razão, qualquer efeito sobre a rede de ligações viárias pode ser visto como uma ameaça potencial para as várias características de fluxo do tráfego.

Para organizar o estudo e padronizar a terminologia usada na caracterização do sistema viário, as referências técnicas constam nos Manuais Técnicos do Ministério da Defesa (BRASIL, 2008 p.324). Por esse manual denomina-se **rodovia de uma só faixa** aquela que apresente, no terreno, leito com largura igual ou superior a 3m e inferior a 6m. Quando a largura for menor que 3m, ficará caracterizado o **caminho carroçável, trilha** ou **picada**¹⁸. A classificação das vias de transportes rodoviários, de acordo com Brasil (2008), cuja descrição ajusta-se adequadamente às necessidades dos planejamentos estratégico, tático e operacional da Defesa Civil é apresentada a seguir:

- a) *Classe Especial – Autoestrada*: Rodovia de revestimento sólido (asfalto, concreto ou calçamento), com um mínimo de 4 faixas, apresentando separação física entre as pistas de tráfego;

¹⁸ Grifo nosso.

- b) *Classe 1 – Rodovia pavimentada*: rodovia de revestimento sólido (asfalto, concreto ou calçamento), com um número variável de faixas, sem separação física entre as pistas de tráfego;
- c) *Classe 2 – Rodovia não-pavimentada*: rodovia transitável durante todo ano com revestimento solto ou leve, conservado de modo a permitir o tráfego mesmo em época de chuvas, com um número variável de faixas;
- d) *Classe 3 – Rodovia de tráfego periódico*: rodovia transitável somente em tempo bom e seco, com revestimento solto ou sem revestimento, largura mínima de 3m, com pouca ou nenhuma conservação e de traçado irregular;
- e) *Classe 4 – Caminho carroçável*: via transitável somente em tempo bom e seco, sem revestimento, caracterizada pela inexistência de conservação permanente, largura média inferior a 3m, com piso e traçado irregulares, geralmente dificultando o tráfego de veículos comuns a motor;
- f) *Classe 5 – Trilha ou picada*: via sem revestimento ou conservação, com piso e traçado irregulares, só permitindo o tráfego a pé ou de animais;

Quando uma rede de rotas está fechada – como pode ocorrer com vias de classes 3, 4 e 5, ela eventualmente afeta o domínio das atividades. Isto implica que a qualidade e a capacidade do sistema de transporte são dependentes de todos os componentes do sistema combinados em conjunto (HOSSAIN e DAVIES, 2004).

O quadro 5, de forma ilustrativa, sintetiza estes conceitos, mostrando através de fotos estes tipos de vias, bem como alguns exemplos das condições de mobilidade existentes na região de influência da área pesquisada.

Conforme Twigger-Ross (2005, p.26) impactos decorrentes das enchentes também estão associados com a evacuação e alojamento temporário. Esses impactos incluem tanto os efeitos de ter que sair de casa e os de ter de viver longe de casa. Nas áreas agrícolas e rurais, especialmente aquelas remotas, alojamentos temporários podem ser localizados a uma longa distância da casa da pessoa. Especificamente, é mais difícil manter contato com os reparos etc., que estão sendo realizadas em suas casas, e mais difícil de manter rotinas normais por causa da maior distância de viagem e de novas rotas para as escolas, trabalho e serviços.

Classe Especial	Classe 1
	
<p>Figura 20: RS-509 (Santa Maria-RS). Foto: Acervo do autor.</p>	<p>Figura 21: ERS-511 (Santa Maria-RS). Foto: Acervo do autor.</p>
Classe 2	Classe 3
	
<p>Figura 22: Estrada do Baú (Itaára - Santa Maria-RS). Foto: Acervo do autor.</p>	<p>Figura 23: Estrada interrompida do Arroio do Meio (Santa Maria-RS). Foto: Acervo do autor.</p>
Classe 4	Classe 5
	
<p>Figura 24: Caminho em Três Barras (Arroio Grande, Santa Maria-RS). Foto: Acervo do autor.</p>	<p>Figura 25: Trilha em Val Feltrina (Silveira Martins-RS). Foto: Acervo do autor.</p>

Quadro 5 – Classificação do sistema viário, conforme Ministério da Defesa (2008).
Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso de inundações, a noção de um "impacto social" pode ser enganosa porque sugere que os efeitos sociais decorrem automaticamente da mudança ambiental. Eventos de inundação podem ter tanto impactos diretos e indiretos (por exemplo, danos à propriedade, a partir da água da inundação e os efeitos sobre a saúde psicológica dos prejudicados), enquanto os impactos da experiência variam ao longo do tempo (rescaldo dos que vivem com risco de inundação).

No Apêndice 4 está organizado um álbum de fotos das enchentes na Região Central do Rio Grande do Sul, com foco no sistema viário da bacia Hidrográfica do Arroio Grande e região, objeto deste estudo.

2.5 Mapas de Áreas Alagáveis

O zoneamento das áreas de inundação é mencionado por Braga, Tucci e Tozzi (1998) como alternativa para definir regras de construção e ocupação para áreas de alto risco, a partir das cotas de risco de inundação para a área envolvida.

Oliveira, Saldanha e Guasselli (2010, p. 414), afirmam que os mapas de inundação podem fundamentar a reorganização do espaço.

Sobre os mapas de inundação, Cordero, Medeiros e Teran (1999) descrevem que os mapas de inundação podem ser de dois tipos: mapa de planejamento ou carta de enchente e mapa de alerta ou mapa cota de enchente. O primeiro define as áreas atingidas por cheias de tempo de retorno escolhidos. O segundo informa em cada esquina ou ponto de controle, o nível da régua no qual inicia a inundação. Como citam esses autores, o segundo tipo de mapas permite o acompanhamento da evolução da enchente, com base nas observações da régua, pelos moradores nos diferentes locais da cidade.

Ainda sobre os mapas de cheias, Tucci (1997) cita que para serem elaborados, necessitam-se dos seguintes dados: a) nivelamento da régua a um zero absoluto; b) topografia da cidade referenciada ao mesmo zero absoluto da régua linimétrica; c) estudo de probabilidade dos níveis das inundações em uma seção do rio nas proximidades da cidade; d) níveis das enchentes ou cotas de marcas que permitam definir a linha da água; e) seções batimétricas do rio no perímetro urbano, que dependendo das características de modificações do leito e da declividade da linha de água, podem ser em intervalos de 500 a 1000 metros; e f) cadastramento

das obstruções ao longo do eixo do leito, tais como pontes, estradas, edificações, diques, etc.

De acordo com Tucci (1993, p. 622) a várzea de inundação de um rio cresce significativamente nos seus cursos médio e baixo, onde a declividade se reduz e aumenta a incidência de áreas planas. Também, segundo com Tucci (1993, p. 623) a variação do nível ou de vazão de um rio depende de características climatológicas e físicas da bacia.

Tucci (1993, p. 529), cita que a vazão máxima pode ser estimada com base nas precipitações máximas, transformadas em vazões através de modelos matemáticos, úteis para bacias que sofrem modificações.

Carvalho e Silva (2006) descrevem que uma das medidas mais fáceis de serem realizadas em um curso d'água é expressa em metros e se refere à altura atingida pelo nível d'água em relação a um nível de referência. Da mesma forma, Soares (2004) afirma que a forma mais simples de se medir vazão num canal é medir a altura (nível) acima de uma determinada referência. Normalmente as palavras cheias (dentro do curso d'água) e inundação (transbordamento) estão relacionadas ao nível atingido pela água. Estacas pintadas ou escalas verticais (vistas a partir de pontes ou bancos de areia) podem ser usadas para medir o nível.

Outra consideração importante feita por Soares (2004) é que, às vezes, o nível máximo deixa marcas que permitem sua identificação. Estimativas de altura de inundações recentes podem muitas vezes ser obtidas de marcas em pontes e árvores (sobretudo nas partes contra corrente). Galhos finos e arbustos não são confiáveis porque sua altura poder variar sob efeito das correntes.

Para Silveira (1991) a informação mais importante para delimitar as áreas de inundação é o registro das marcas de enchentes passadas, que ficam aparentes nas fachadas das casas, construções e ao longo do desenvolvimento do rio no espaço urbano e rural. O autor comenta que no ano de 1984 esta técnica foi empregada pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) na construção da "Carta de enchentes de Blumenau (SC)", que registrou 879 cotas de inundação, a partir das marcas nos cruzamentos das ruas da cidade.

Segundo Tucci, (1993) para o traçado deste mapa a seção de escoamento do rio pode ser dividida em três faixas principais, sendo que a primeira faixa relacionada a uma frequência alta de enchentes funciona hidraulicamente e permite o escoamento da enchente. Qualquer construção nessa faixa reduzirá a área de

escoamento, elevando os níveis a montante desta seção. Portanto em qualquer planejamento urbano, deve-se procurar manter esta zona desobstruída. O restante da superfície inundável deve ser regulamentada. A segunda zona fica inundada, mas devido às pequenas profundidades e baixas velocidades, não contribuem muito para a drenagem da enchente. A terceira faixa possui pequena probabilidade de ocorrência de inundações, sendo atingida em anos excepcionais por pequenas lâminas de água e baixas velocidades. A definição dessa área é útil para informar a população sobre a grandeza do risco a que esta sujeita. Essa área não necessita regulamentação, quanto às cheias (CORDERO et. al., 2007).

Relacionando tempos de retorno, relativos às áreas que podem ser atingidas em pela inundações, em função de uma dada precipitação, obtêm-se um mapa de planejamento para ocupação (ou não) destas áreas, conforme Cordero et. al. (2007).

Entretanto, Tucci e Machado (1998, p.28), menciona que as adutoras, pontes ou rodovias são frequentemente projetadas sem considerar seu impacto sobre a drenagem. Ao serem construídas, transformam-se em componentes do processo que gera a enchente.

Para Valeriano (2008, p.8) a declividade do terreno é uma variável básica para segmentação de áreas em praticamente todos os processos de planejamento territorial, dada sua estreita associação com processos de transporte gravitacional, entre eles o escoamento superficial.

2.6 O SIG e geoprocessamento na modelagem de áreas alagáveis

Conforme Hughes et al. (2008) as enchentes tem um efeito significativo sobre os moradores, empresas e pedestres em áreas propensas às inundações. O custo dos danos causados pelas inundações está intimamente relacionado com o tempo de aviso dado antes a uma inundações, e isso faz do monitoramento e previsão de inundações, fundamental para minimizar o custo dos danos causados.

Na perspectiva atual de gestão do território, de acordo com Medeiros & Câmara (2001) toda ação de planejamento, ordenamento ou monitoramento do espaço deve incluir a análise dos diferentes componentes do ambiente, incluindo o meio físico-biótico, a ocupação humana, e seu inter-relacionamento. Neste caso, é válido afirmar que essa análise depende essencialmente das geotecnologias, que integram dados alfanuméricos e dados espaciais.

Tucci (1993), afirma que os fenômenos naturais não podem ser reproduzidos, pelo menos na escala em que ocorrem. O processo hidrológico, dito estocástico, trata com variáveis aleatórias hidrológicas. Tal processo possui parâmetros obtidos a partir dos dados observados e que, apesar de não ser possível prever precisamente os valores que assumirá a precipitação no futuro, existe a possibilidade de fazer avaliações das probabilidades associadas aos valores futuros (CALGARO et. al., 2009).

Um modelo hidrológico pode ser definido como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre (RENNÓ & SOARES, 2003). Saliendam que a bacia pode constituir a unidade espacial para modelos agregados que consideram as propriedades médias para toda a bacia, ou então, pode ser subdividida segundo diversas abordagens a fim de considerar suas características espacialmente distribuídas.

Hossain e Davies (2004) afirmam que o impacto de inundação pode ser modelado, visualizado, quantificado e avaliado através do desenvolvimento de um SIG sofisticado. Além disso, os caminhos para a redução do impacto de inundação sobre os sistemas de transporte rodoviário pode ser demonstrada através dos GIS. Esses autores consideram que o SIG poderia ser usado para avaliar o impacto de inundações sobre vários objetos, além de redes de rotas de um modo interativo e de fácil utilização e, por conseguinte, pode ser utilizado como uma ferramenta espacial de decisão e suporte.

Os Sistemas de Informação Geográfica, como cita o *United States Army Corps Of Engineers* (USACE, 1996, p.139) são uma poderosa ferramenta de gerenciamento de dados espaciais (isto é, geograficamente orientados). Tais sistemas armazenam e retornam as informações que são associadas a elementos espaciais como retângulos, triângulos, ou polígonos de formas irregulares. Esses sistemas permitem o armazenamento e recuperação de informações que estão associadas a elementos espaciais como retângulos, triângulos ou polígonos de formas irregulares. Variáveis como: declividade, orientação, altitude, tipo de solo, uso da terra, precipitação média anual, etc., podem ser armazenadas para cada elemento. Os dados podem ser recuperados e tabulados, apresentados graficamente, ou usados diretamente pelos programas aplicativos.

Oliveira, Saldanha e Guasselli (2010, p. 414) mencionam que o geoprocessamento e os Sistemas de Informações Geográficas surgem como recursos dinâmicos que ampliam a capacidade de mapeamento e de análise dos fenômenos geográficos, em virtude da capacidade de armazenamento e análise desse tipo de informação.

Sobre a importância dos SIG's, Miranda (2005, p. 29) descreve que:

Sistemas de informações geográficas podem auxiliar na avaliação de impactos ambientais e fazer simulações de cenários alternativos. Estes sistemas são aplicados com sucesso no monitoramento e na detecção de condições de mudanças em áreas urbanas ou no campo, previsão de potencial de uso de recursos naturais e solos, avaliação de causa-e-efeito, modelagem na interação de vários componentes do ambiente terrestre para predição dos efeitos de mudanças, entre outros.

Moura (2003) cita que os SIG's, ao buscarem formas de trabalhar com as relações espaciais ou lógicas, tendem a evoluir de descritivo para o prognóstico; em lugar de simplesmente descrever elementos ou fatos, podem traçar cenários, simulações de fenômenos, com base em tendências observadas ou julgamentos de condições estabelecidas.

A relação entre planejamento territorial e tecnologias de geoinformação foi bem descrita por Silveira et al. (2005) ao afirmarem que a implementação de sistemas de apoio à tomada de decisões, embasados em Sistemas de Informações Geográficas, ocorre em diversas situações, buscando automatizar e racionalizar tais processos quanto à avaliação dos impactos ambientais.

Conforme Hipólito (2011) o desenvolvimento atingido pelos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), constatável pela diversidade e qualidade do software comercial atualmente disponível, de que são exemplos o Idrisi da Universidade de Clark; o Grass do *United States Army Construction Engineering Research Laboratory*; o ArcInfo do *Environmental Systems Research Institute (ESRI)*; o Microstation da Intergraph e o AutoCAD Map da *AutoDesk*; não vem acompanhado pelo desenvolvimento de modelos hidrológicos distribuídos espacialmente, que tirem partido das potencialidades desses sistemas.

Segundo Andriotti (2003, p.84) os softwares mais comumente utilizados para a geração de mapas disponibilizam vários métodos de geração de *grids*, para os usuários, sendo a escolha do método uma etapa importante no processo de geração de mapas. Esse autor destaca que a geoestatística tem vantagens sobre outras técnicas convencionais de predição, como o estudo da variabilidade espacial.

Ainda, referindo Andriotti (2003, p. 95), podem-se citar como exemplos de variáveis regionalizadas, entre outros, a precipitação anual de chuva em determinada região. Quase todas as variáveis quantitativas com que se trabalha em ciências da Terra podem ser consideradas variáveis regionalizadas.

Outro recurso fundamental para os estudos relacionados às feições geomorfológicas terrestres, influentes nos processos formadores de enchentes, são os Modelos Digitais de Elevação (MDE), ou em inglês, *Digital Elevation Models (DEMs)* ou *Digital Terrain Models (DTMs)*. De acordo com EL-SHEIMY (2005), em relação ao DEM a palavra 'elevação' enfatiza a medição da altura sobre um datum¹⁹ e a altitude absoluta ou elevação dos pontos sobre esse modelo. De forma generalizada refere-se a um arranjo regular de elevações, normalmente de padrão quadrado ou hexagonal ao longo do terreno.

Os modelos digitais de elevação (MDE) estimam as interações entre o balanço hídrico, erosão do solo, superfícies meteorológicas, e adequação da vegetação ao longo da paisagem (YANG et al., 2005). Segundo esses autores ter acesso a um MDE hidrologicamente correto de alta qualidade é muito importante para a geração de modelos precisos que servem para tomar decisões de gestão e determinar a política ambiental de um país.

Nogueira e Amaral (2009) compararam dois métodos de interpolação (*Krigagem* e *Topo to Raster*) para geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT), no processo de modelagem batimétrica de uma área costeira no Rio Grande do Norte (RN). Os resultados obtidos pelos autores mostraram que o método *Topo to Raster* apresentou resultados com mais informações para elaboração de superfícies batimétricas e os canais foram bem delimitados pela interpolação do método. Conforme esses autores a função *Topo to Raster* foi baseada nos trabalhos desenvolvidos por Michael Hutchinson em 1998 e 1999, em seu programa ANUDEM (*Australian National University Digital Elevation Model*). O êxito dessa técnica se dá por permitir que arquivos, como curvas de níveis, cursos de rios e delimitações de bacias, possam ser utilizados durante a interpolação, diminuindo os possíveis erros que venham a ser cometidos pelo método.

Segundo Nogueira e Amaral (2009, p. 4119), a técnica *Topo to Raster* foi desenhada com o objetivo específico de converter dados vetoriais em modelos

¹⁹ Elipsóide de referência geodésico.

hidrológicos de elevação de terreno exatos, sendo que esse método se utiliza da eficiência computacional da interpolação local, como ponderação do inverso da distância, sem perder a continuidade superficial dos métodos globais de interpolação *Krigagem e Spline*.

A água é a principal força erosiva a determinar a forma geral da maioria das paisagens. Por este motivo, a maioria das paisagens têm muitos locais de máximas elevações e poucos locais de mínimas elevações, resultando em um padrão de drenagem ligado. *Topo to Raster* usa esse conhecimento sobre superfícies e impõe restrições sobre o processo de interpolação, que resultam em uma estrutura de drenagem conectada e correta representação de cordilheiras e riachos. Esta condição de drenagem imposta produz superfícies de maior precisão com menos dados de entrada. A condição de drenagem global também praticamente elimina qualquer necessidade de edição ou pós-processamento para remover sumidouros espúrios na superfície gerada (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, 2007)

Com a evolução dos modelos digitais da superfície terrestre a análise de diversos tipos de fenômenos – ambientais, socioeconômicos, políticos – produziu novas técnicas de obtenção de dados geográficos. De acordo com Alves e Nazareno (2009, p. 1723) uma das geotecnologias bastante difundida atualmente é o *Google Earth*. Este programa computacional desenvolvido e distribuído pela Google permite ao usuário visualizar e ter acesso a informações geoespaciais através da internet.

Conforme Brandalize (2007, p. 4 e 7):

[...] o Google Earth mostra a Terra como se o observador estivesse em uma plataforma elevada da superfície como um avião ou um satélite. A projeção usada para alcançar este objetivo é chamada de Perspectiva Geral. O ponto perspectivo para a projeção Perspectiva Geral está localizado a uma distância finita. Assim esta projeção representa a Terra como se o observador estivesse situado acima da superfície, normalmente de centenas a milhares de quilômetros acima dela. A Projeção Perspectiva é semelhante à Projeção Ortográfica com exceção de que o ponto perspectivo está a uma distância finita da superfície (perto da Terra) em vez do infinito (espaço).

O sistema de coordenadas (*default*) do *Google Earth* é o Geográfico (latitude/longitude) no Datum WGS – 84 (BRANDALIZE, 2007, p. 4 e 7). Vários autores – Diniz et al. (2007, p. 1256); Carvalho et al. (2007, p. 1416); Adami et al. (2009, p. 8); Oliveira et al. (2009, p. 1842); Alves e Nazareno (2009, p. 1730) – confirmam a aplicabilidade de seus dados geográficos em escalas de 1:10.000, 1:15.000, 1:25.000 ou menores.

Importante consideração sobre modelos hidrológicos integrados a SIG é a citação de Sui e Maggio (1999, p.33), como segue:

As conceituações de espaço e tempo incorporados na atual geração de SIG não são conceitualmente compatíveis com as dos modelos hidrológicos. Esta incompatibilidade implicitamente impõe restrições sobre o tipo de modelos hidrológicos que podem ser desenvolvidos. Ao reformular a agenda de pesquisas futuras a partir da perspectiva emergente da ciência da informação geográfica (*G/Science*), os autores afirmam que a integração da modelagem hidrológica com SIG deve prosseguir com o desenvolvimento de uma ontologia de alto nível comum, que seja compatível com os SIG e os modelos hidrológicos. O novo esquema ontológico deve incorporar concepções alternativas de espaço e tempo, capazes de lidar com ligações de processos hidrológicos em escala cruzada. O paradigma emergente interoperável deve ser a estratégia principal para a implementação do novo quadro. [...]

Geoinformação baseada em modelagem hidrológica não só defende novos modelos computacionais e estratégias de implementação que são de computação independente de plataforma, mas também nos liberta das limitações dos atuais modelos hidrológicos e do rígido quadro espaço-temporal, incorporado na atual geração de SIG, e permite-nos desenvolver tecnologias de SIG mais versáteis para o progresso das ciências hidrológicas, e procurar aplicações inovadoras relevantes para as preocupações da sociedade.

Um modelo de dados geográfico é uma abstração do mundo real que emprega um conjunto de dados de objetos que possibilitam a exibição de consultas, edição e análise de mapas (ZEILER, 1999, p. 4). Existem softwares desenvolvidos especialmente com a finalidade de integrar os modelos geométricos, que descrevem o terreno, e os modelos hidrológicos que simulam as condições de escoamento em nível de bacia hidrográfica.

O *Hydrologic Engineering Centers – River Analysis System* (HEC-RAS), desenvolvido pelo *United States Army Corps of Engineers* (USACE) é um exemplo de programa computacional que realiza modelagens hidrológicas e integra-se à interface de um SIG, no caso o ArcGIS Desktop[®], através de uma extensão de ferramentas, disponibilizadas pela interface do módulo ArcMap do ArcGIS.

O HEC-RAS tem tido naturalmente bastante utilização nos Estados Unidos da América, país onde foi desenvolvido, tanto é que a FEMA (*Federal Emergency Management Agency*) utiliza este programa na produção de cartografia de áreas inundáveis (SANTOS, 2009). O autor menciona ainda a utilização do programa na delimitação de áreas inundáveis do Timor Leste e no guia metodológico do Instituto Geológico y Minero de España (IGME) para elaboração de mapas de periculosidade de cheias e inundações.

Conforme o Manual de Referência Hidráulica (Brunner, 2008) o software HEC-RAS permite executar modelagens de fluxo unidimensional constante, fluxo instável, cálculos computacionais de transporte/movimentação de sedimentos, e modelagem de temperatura da água.

Conforme os manuais dos softwares HEC-RAS e HEC-GeoRAS, produzidos por Brunner (2008), Nanía e Molero (2007) e Ackerman (2011), HEC-GeoRAS são ferramentas de sistemas de informações geográficas para suporte ao HEC-RAS, utilizando o ArcGIS®.

Segundo Nanía e Molero (2007), para facilitar e complementar o trabalho realizado pelo software HEC-RAS, o Centro de Engenharia Hidrológica (*Hydrologic Engineering Center*), do USACE, e o Instituto de Pesquisas em Sistemas Ambientais (*Environment System Research Institute – ESRI*) desenvolveram o HEC-GeoRAS – uma extensão de ferramentas, procedimentos e utilidades, especialmente projetadas para processar dados hidrológicos georreferenciados. Os mesmo autores descrevem que a importância do HEC-GeoRAS dá-se pelas aplicabilidades do programa em importar para o HEC-RAS os dados da geometria do terreno (MDT), incluindo o leito do rio, seções transversais, etc.; que posteriormente são exportados para o ArcGIS e geoprocessados, gerando os mapas de inundação.

As informações observadas sobre os locais inundados são essenciais para calibrar modelos de aplicação, válidos para bacias hidrográficas ou regiões especiais. Um suplemento valioso de registros de dados fluviais, para informações de enchentes históricas, pode ser fornecido por notícias de jornais velhos, moradores antigos, órgãos locais municipais, e por autoridades rodoviárias e ferroviárias, que, normalmente, mantêm registros dos danos causados pelas cheias às suas instalações (PILGRIM e CORDERY, 1992).

Com base nas referências mencionadas fica evidente que a utilização de técnicas de geoprocessamento é fundamental para a modelagem das características influentes no processo formador das enchentes e inundações, principalmente por integrarem dados geomorfológicos, hidrológicos e climáticos em uma só base, independentemente das escalas variáveis desses fenômenos.

Ficou claro também, que a elaboração de um SIG, orientado para prover informações sobre locais atingidos por enchentes, passa pela avaliação detalhada de suas causas, baseada em estudos *in loco*, investigações e pesquisas, que vão além do uso dos modelos hidrológicos e/ou hidrodinâmicos. Especialmente em

relação às inundações, como pode ser lido, os modelos baseados na determinação da vazão, não atendem completamente à necessidade de se terem informações relacionadas ao desenvolvimento espacial desse problema.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

Ao pesquisar alternativas à falta de mobilidade rural decorrente de cheias e inundações, o primeiro passo foi selecionar uma área de pesquisas, que viabilizasse o desenvolvimento de um método científico, cujas etapas fossem focadas na espacialização dos problemas causados pelas enchentes, na forma de mapas de áreas alagáveis (AAs). A metodologia inclui a criação de meios para quantificar o grau de fragilidade da mobilidade rural submetida às situações de enchentes e, com isso, definir onde se localizam os pontos ou trechos viários com maior risco de inundação ou obstrução.

Assim, para tornar exequível o método proposto, foi definida uma unidade de pesquisas, constituída pela bacia hidrográfica do Arroio Grande até sua confluência com o Rio Vacacaí-Mirim e pelo polígono rodoviário que a circunda, localizado na Região Central do Rio Grande do Sul.

O estudo proposto para um sistema de alerta parte desta realidade, de ausência de monitoramento fluviométrico, de forma a produzir informações de apoio às comunidades em períodos de cheias tendo como referência a situação dos países desenvolvidos.

3.1.1 Caracterização da bacia hidrográfica da pesquisa

Primeiramente, caracterizou-se a área em estudo – a bacia hidrográfica do Arroio Grande e a fração da bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim até sua confluência com o Arroio Grande – que recobre parte dos municípios de Itaára, Santa Maria, Júlio de Castilhos e Silveira Martins. Essa área situa-se entre as coordenadas Norte (N) 6.734.232 e 6.708.548 metros, e Leste (E) de 226.477 e 251.796 metros, no fuso 22 do sistema de projeção Universal Transverso de Mercator (UTM), georreferenciadas ao datum SIRGAS 2000. Essa área totaliza 374,87 km², dos quais 298,91 km² correspondem à bacia do Arroio Grande e 75,96 km² formam a fração da bacia do Rio Vacacaí-Mirim, até sua confluência com o Arroio Grande.

Na figura 26 apresenta-se o mapa da bacia do Arroio Grande (área maior) e da fração da bacia do Rio Vacacaí-Mirim (área menor), no trecho que se estende até a confluência com o Arroio Grande.



Figura 26 – Imagem em perspectiva tridimensional da bacia na região do estudo.
Fonte: Google Earth® - adaptado pelo autor.

A hidrografia é abundante, constituída por inúmeros arroios, que nascem nas coxilhas de altitude do Planalto Meridional. A formação do relevo também possui características específicas compondo-se de microbacias de relevos íngremes que deságuam em planícies de inundação cultivadas, predominantemente com arroz. Há que se considerar, também, a abundância de biodiversidade que recobre os rebordos dos morros nesta região. As formações florestais são originárias da Mata Atlântica Brasileira, reconhecidas conforme Lei Federal 11148/2006.

Segundo Sutili, Durlo e Bressan (2009), considerando os aspectos topográficos, vegetacional e de comportamento hidrológico o Arroio Grande pode ser dividido em três seções distintas, típico do padrão de cursos fluviais de montanha. Na primeira seção o curso apresenta grande declividade, pouca atividade agrícola e florestas nativas. Nestes trechos os cursos de água adquirem grande velocidade e força com o aumento das precipitações, a ponto de transportarem materiais de

grandes dimensões, mas não causam grandes problemas, devido ao substrato basáltico (SUTILI, DURLO e BRESSAN, 2009). As águas, também segundo esses autores, provêm de pequenas bacias de grande declividade, determinando o rápido acúmulo nos canais drenantes e escoamento imediato para as regiões mais baixas.

As nascentes desta bacia situam-se no último patamar intermediário da Serra Geral desembocando com seu exutório na Depressão Central do Estado. O trecho correspondente à descida do Arroio Grande pela Serra Geral possui forte declividade até os sopés dos morros, onde ocorre o surgimento de atividades pecuárias e agrícolas, mesclando-se com as florestas.

As matas densas formam a Floresta Estacional Decidual e Semidecidual de Encosta e são compostas por diversas espécies de árvores de médio e grande porte. As matas ciliares foram gradativamente suprimidas, pelo avanço dos espaços agrícolas para o cultivo de pequenas lavouras de fumo e hortaliças e grandes cultivos de arroz irrigado, planícies de inundação.

Como consequência da falta de mata ciliar, e com as chuvas extremas, há o desmoronamento das margens dos arroios e frequentes transbordamentos em épocas de cheias, que causam prejuízos de grandes proporções às lavouras e aos próprios agricultores. Grande quantidade de solo chega até os rios, provocando assoreamento do leito menor.

Além da derrubada das matas ciliares, das queimadas e outros tipos inadequados de manejo agrícola, as lavouras irrigadas da planície de inundação, na região do estudo, demandam elevados volumes de água e permanecem cobertas de água por longos períodos, mantendo o solo saturado de umidade e potencializando os efeitos das enxurradas e das cheias.

A região da Depressão Central ou Periférica, como descrito por Ferigolo & Valmerate (1986), é uma região que separa o Planalto Meridional Brasileiro, localizado ao norte, das Serras do Sudeste, que ficam ao sul. Apresenta terrenos que datam da era Paleozóica e Mesozóica com materiais sedimentares como arenitos, siltitos, folhelhos, argilitos, de origem eólica, fluvial e/ou lacustre, encobertos por depósitos aluvionares recentes, associados aos rios que drenam a Depressão e que descem do Planalto e do Escudo.

Como nos distritos de Santo Antão, Boca do Monte e Distrito Sede (Santa Maria), no extremo norte da Depressão Periférica, na altitude média das elevações que compõem a Serra Geral, ocorre a Formação Botucatu, constituída por arenito

eólico de cor rosa-avermelhada, granulometria fina a média, homogênea e com estratificação cruzada de grande porte, depositado em ambiente desértico. Ao norte de Camobi (porção oeste bacia do Arroio Grande) ocorrem camadas de arenito *intertrap* (interderrame). Localizada no extremo norte dos distritos Sede, Arroio Grande, Santo Antão e Boca do Monte, surge a unidade morfoescultural Serra Geral (SARTORI, 2009).

As coxilhas mais baixas, na parte central dos distritos Sede, Arroio Grande e Palma são constituídas, principalmente, pelo Membro Alemoa da Formação Santa Maria. Ainda conforme Sartori (2009) as outras formas de relevo são as planícies aluviais, que acompanham a rede hidrográfica do município de Santa Maria, constituindo as várzeas e os banhados. Os terraços fluviais constituem um tipo de relevo situado de modo descontínuo nas vertentes das coxilhas, em contato com as planícies aluviais do Arroio Grande, do Arroio do Meio e do Rio Vacacaí-Mirim, numa altitude em torno de 10 a 20 metros acima dessas planícies. A principal área de ocorrência de terraços fluviais acompanha as margens do Arroio Grande, do Arroio do Meio e do Rio Vacacaí-Mirim, descreve Sartori (2009).

De acordo com as observações de Dalmolin & Pedron (2009) sobre o mapa do levantamento de reconhecimento de solos do Estado do Rio Grande do Sul, ocorrem os seguintes tipos de solos na região de abrangência da bacia do Arroio Grande: Argissolo Vermelho Distrófico típico; Associação Neossolo-Chernossolo; Planossolo Háptico Eutrófico arênico; e Argissolo Bruno-Acinzentado Alítico úmbrico.

Segundo os autores esses solos, dentre outros existentes na área, apresentam alta suscetibilidade aos processos erosivos, devido principalmente à textura superficial muito arenosa, associada às condições do relevo. Os Argissolos caracterizam-se por possuir elevada variabilidade morfológica, química e ambiental. Sua principal característica é a textura média a arenosa no horizonte superficial e horizonte subsuperficial com incremento de argila iluvial. De acordo com Streck et al. (2008) os Argissolos possuem baixa fertilidade natural. Apresentam limitações agrícolas decorrentes dessa baixa fertilidade e também de uma alta suscetibilidade à erosão. O relevo característico é suave-ondulado a ondulado com declividades de 3 a 20%. Saliencia-se que isto é um fator de risco para a mobilidade rural, principalmente onde as estradas rurais estão próximas aos arroios (Figura 27).



Figura 27 – Desmoronamento de margem originado por processo erosivo causado por uma cheia, sobre a margem do Arroio Grande, tangenciando uma estrada rural. Fonte: Acervo do autor. Data da foto: 26/10/2011.

Os Planossolos, segundo a EMBRAPA (2009), apresentam horizonte B plânico (especialidade de horizonte B textural), que possui permeabilidade lenta. Ocupam o terço inferior das coxilhas com relevo suave ondulado, além das várzeas com relevo plano. Os horizontes A e E de textura arenosa mudam abruptamente para o horizonte B_{tg}, mais argiloso. São solos com elevado potencial para a lavoura do arroz irrigado, mas reduzido potencial de cultivo para as demais culturas anuais. A silvicultura e pastagens naturais também ocupam a superfície desse tipo de solo. É o tipo de solo que predomina na área potencialmente inundável.

3.1.2 Caracterização socioeconômica

Os colonizadores desta região introduziram os meios de produção e técnicas trazidos da Europa no fim do século XIX, que impulsionaram o desenvolvimento econômico até pouco tempo atrás. Desde a chegada dos imigrantes, as águas, o solo e as florestas constituíram os insumos de produção mais importantes para o desenvolvimento local. No início do século XX, os moinhos de farinha e os alambiques, movidos com rodas d'água foram as primeiras unidades de produção

econômica, mostrando desde aquela época a importância dos recursos hídricos para a sobrevivência dos imigrantes que se instalaram na Região Central do Rio Grande do Sul²⁰.

O estabelecimento das comunidades também fez surgir outras atividades como serrarias, selarias, ferrarias, etc. Apresentaram algum progresso no primeiro momento, porém desmataram grandes áreas de matas nativas que foram utilizadas para a agricultura, das quais a madeira extraída era aproveitada na construção de casas, galpões e também como energia (queima da lenha)²⁰.

Nos tempos mais recentes, a partir da década de 1970, aproximadamente, houve forte incentivo do setor industrial fumageiro, para a produção de lavouras de fumo. Uma planta, cujo cultivo exige grande dispêndio de mão de obra, com mínima mecanização e elevado aporte de produtos químicos, a maioria inseticidas e herbicidas para as pragas; que afetaram drasticamente a saúde dos trabalhadores e a água dos rios e arroios. A cultura do fumo passou a predominar a paisagem de lavouras nas áreas de sopés de encostas, e as várzeas foram tomadas pela cultura do arroz. Neste cenário, surgiram micro e pequenas propriedades rurais produtoras de fumo e de hortaliças, e propriedades com grandes áreas de arroz em várzeas irrigadas pela captação da água dos arroios, drenadas por desvios de curso e por estações de bombeamento, nem sempre licenciados pelo órgão ambiental responsável.

Tais características apenas agravam a situação de susceptibilidade das áreas mais planas quanto aos problemas decorrentes das enchentes, pois, justamente nelas ocorrem os maiores problemas. A água dos arroios das bacias vertentes é um dos principais insumos à produtividade da agricultura irrigada local, mas em situações de chuvas intensas e prolongadas ela tem causado grandes prejuízos, por conta das inundações e obstrução de estradas, deixando muitas famílias em situação de isolamento.

O que se observou *in loco* foi a constante presença de diques, construídos pelos moradores, como medida estrutural de contenção contra as enchentes dos arroios (Figura 28).

²⁰ Resumos de depoimentos colhidos com os moradores mais antigos ao longo da pesquisa da Tese.



Figura 28 – Dique construído para evitar o extravasamento do Arroio do Meio.
Fonte: Acervo do autor. Data da foto: 06/11/2010.

Os diques evitam que as enchentes menores atinjam residências e lavouras nos trechos em que foram implantados, mas produzem maior extravasamento da água em trechos a jusante e nos trechos dos arroios transpassados por pontes ou pranchadas, aumentando o risco de rompimento e a fragilidade dessas estruturas. Observou-se que os diques não se constituem em medida estrutural 100% eficaz no controle das inundações nas várzeas, pois, conforme relatos de moradores e observações *in loco*, verificou-se que essas estruturas romperam-se nas maiores enchentes ocorridas em anos anteriores.

3.1.3 As cheias na região do estudo

Considerando-se os últimos dez anos – antes disso a maior enchente que havia ocorrido no sul do Brasil deu-se em 1984 – a Região Central do Rio Grande do Sul sofreu, pelo menos, três grandes enchentes: uma no ano de 2001, em janeiro, outra em dezembro de 2003 e outra, também em janeiro, no ano de 2010. Em todos os eventos, para muitos flagelados os prejuízos representaram perdas de toda a história de vida construída num local, perdas patrimoniais, e em alguns casos, principalmente, as perdas das vidas humanas. A documentação mais fiel destas ocorrências pode ser encontrada diretamente com os moradores que permaneceram

nos locais outrora inundados, que guardam fotos e relatos pessoais de situações de pavor e isolamento.

Heldwein et al. (2009) observaram que a maior precipitação mensal já registrada foi em maio de 1941 com 615,3mm; sendo que nesse mesmo ano ocorreu, também, a máxima precipitação anual (2.953,4mm). Representa, em outras palavras, que no ano de 1941, em Santa Maria choveu o volume de 29.534 m³.ha⁻¹, e que no mês de abril do mesmo ano, choveu em média 20,5 l.m⁻² por dia. Trata-se de um volume extraordinário, que pode se repetir; o que causaria uma devastação maior do que aquela observada em 1941, porque parte dos solos da região apresenta-se com menor capacidade de infiltração de água, devido ao manejo inadequado da agricultura.

Ferigolo e Valmerate (1986), ao estudarem o comportamento das chuvas no período de 1979 a 1985 no Rio Grande do Sul, afirmam que os anos de precipitação mais abundantes foram os de 1983 e 1984. Salientam ainda que nesses dois anos registraram-se precipitações mensais bastante elevadas, acima das médias. Os valores mensais normais para a estação meteorológica de Santa Maria estão apresentados no quadro 6.

De abril a julho de 1983, segundo Ferigolo e Valmerate (1986), ocorreram nove passagens de frentes polares sobre o Rio Grande do Sul com características estacionárias e semiestacionárias. Essas últimas produziram elevados índices pluviométricos em todo Estado. As passagens frontais lentas geram elevadas precipitações e são a principal causa genética dos elevados índices de precipitação.

Neves et. al. (1984) salientam, também, que no ano de 1983, no período de outono/inverno, e no inverno de 1984 ocorreram as maiores enchentes do sul do Brasil. Comprova tal argumento a reportagem do Jornal *A Razão* da terça-feira, 17 de abril de 1984, que entre outros fatos registra:

Choveu muito em Santa Maria e região, na noite de domingo e segunda-feira durante o dia. [...] No Campestre do Menino Deus uma ponte foi danificada e a população ficou isolada do perímetro central, pois não havia, na manhã de ontem, condições para que trabalhadores e estudantes tivessem trânsito normal.

Variável	Mês												Ano
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Precipitação pluviométrica mensal média (mm mês ⁻¹)	148,0	134,9	137,3	143,4	150,5	155,4	143,4	126,8	159,8	159,1	120,1	133,7	1712,4
Número médio de dias com chuva	11,1	11,2	10,1	11,2	11,0	13,0	12,6	11,2	10,9	11,1	9,4	9,4	132
Maior precipitação máxima mensal e anual (mm)	471	462	342	616	471	351	359	333	363	477	514	357	2953
Ano da precipitação máxima mensal e anual	1996	1934	2003	1941	1984	1981	1987	1972	1988	1997	1919	2003	1941
Precipitação máxima em 24h (mm dia⁻¹)	123	119	175	182	153	182	105	97	108	145	98	156	182
Ano da precipitação diária máxima no mês	1996	1913	1912	1984	1984	1944	1976	1966	1979	1982	1966	2004	1984

Quadro 6 – Valores médios normais e máximos para a precipitação em Santa Maria, Rio Grande do Sul, no período 1912 - 2004.

Fonte: Heldwein, et. al. (2009), adaptado pelo autor.

No ano 2001, mais precisamente em 08 de janeiro de 2001, a chuva somou um volume de água equivalente ao considerado normal para todo o mês de janeiro, cerca de 144 milímetros (Jornal *A Razão*, 09/01/2001, pág. 6). Na mesma reportagem ainda registra-se que:

Em Arroio Grande, distrito de Santa Maria, a chuva invadiu casas, deixou famílias desabrigadas e passou por cima de pontes. A destruição de uma das cabeceiras da ponte de acesso a Três Barras fez com que moradores da região ficassem isolados.

Em comentário feito à repórter do jornal, o Secretário de Viação e Transportes do Município de Santa Maria, na época afirmou que:

É uma enchente que baixa rápido, mas traz muito estrago. Esperamos a estabilidade do tempo para ter condições de fazer um levantamento mais conclusivo do estrago. Todo o distrito sofreu bastante, em função da estrada que acabou represando a água e em parte por causa do assoreamento dos rios.²¹

Moradores do Distrito do Arroio Grande relataram, na época, situações de medo, de tristeza e incertezas quanto ao futuro, em função das severas perdas sofridas, como consta na página seis do Jornal *A Razão*, do dia 09/01/2001, o depoimento do agricultor Jonas Roseli Altíssimo, de Arroio Grande: “*A água virou freezer, virou mesa, tapou as camas. Não sei o que vou fazer sem dinheiro, sem casa*”. Conforme a reportagem, outro produtor rural perdeu todos os 800 frangos do seu aviário, e relatou que o único meio de transporte para sua família foi o trator.

Em 04 de janeiro de 2010 a mesma região foi atingida mais uma vez por uma enchente de consequências trágicas. O Jornal *Diário de Santa Maria* registrou os estragos e os relatou nas páginas 08 e 09 da edição do dia 05/01/2010:

Com o aguaceiro de mais de 90 milímetros que caiu ontem em Santa Maria até às 18h30min – cerca de 50% da média mensal -, estradas foram destruídas, barrancos desmoronaram, pessoas ficaram ilhadas [...]. Na localidade de Três Barras, no distrito de Arroio Grande, [...], na localidade da Linha dos Fernandes 150 moradores estão ilhados. A estrada de Três Barras virou curso d’água do arroio (*Diário de Santa Maria*, 05/01/2010, p. 8 e 9).

Conforme informação dada à reportagem do *Diário de Santa Maria* no dia que ocorreu a enchente, o Secretário Municipal de Infraestrutura, Habitação e Serviços de Santa Maria²² noticiou que a prioridade nos reparos feitos pelas equipes da Prefeitura era levar pedras para a estrada e dar locomoção e acesso aos moradores.

²¹ Vilmar Galvão, Sec. Municipal de Viação e Transportes de Santa Maria em 09/01/2001.

²² Eng° Civil Haroldo Pouey, Sec. Municipal de Infraestrutura, Habitação e Serviços em 04/01/2010.

Na página 10 da mesma edição do Diário de Santa Maria a manchete principal diz: “*Chuva castiga a região*”, referindo-se aos sete municípios da região da Quarta Colônia de Imigração Italiana que foram atingidos. Conforme o jornal, a cidade de Nova Palma ficou totalmente isolada por um dia, pois todos os acessos estavam alagados. A ERS-149, rodovia estadual que liga São João do Polêsine a Faxinal do Soturno, também ficou com trechos totalmente debaixo d’água.

Os fatos ocorridos foram tão importantes que ocuparam grande espaço no meio jornalístico. Ainda na edição do dia 05/01/2010 do Diário de Santa Maria, na página 11 (quarta página da edição, tratando do assunto enchentes – Anexo IV), mais registros de problemas foram relacionados à falta de acessibilidade para 40 residências, que ficaram ilhadas por causa de pontes e trechos de estradas que ficaram submersos:

Na VRS-516, um dos principais acessos a São Martinho da Serra, de acordo com a Polícia Rodoviária Estadual, havia trechos cobertos pela água no fim da tarde, mas a travessia de veículos era possível, mesmo que um tanto arriscada. Já outro acesso ao município, pela localidade de Água Negra, ficou interditado ontem à tarde. A água cobriu a ponte que liga a cidade (Diário de Santa Maria, 05/01/2010, p.11).

A mesma página ainda cita a situação do município de Ivorá, cuja única saída da cidade era a ERS-348 em direção à Santa Maria, pois as ligações com outras cidades ficaram interrompidas. A abrangência do problema de mobilidade nas comunidades atingidas pelas enchentes fica bem caracterizada pela figura 29, extraída da página 11 do Diário de Santa Maria de 05/01/2010.

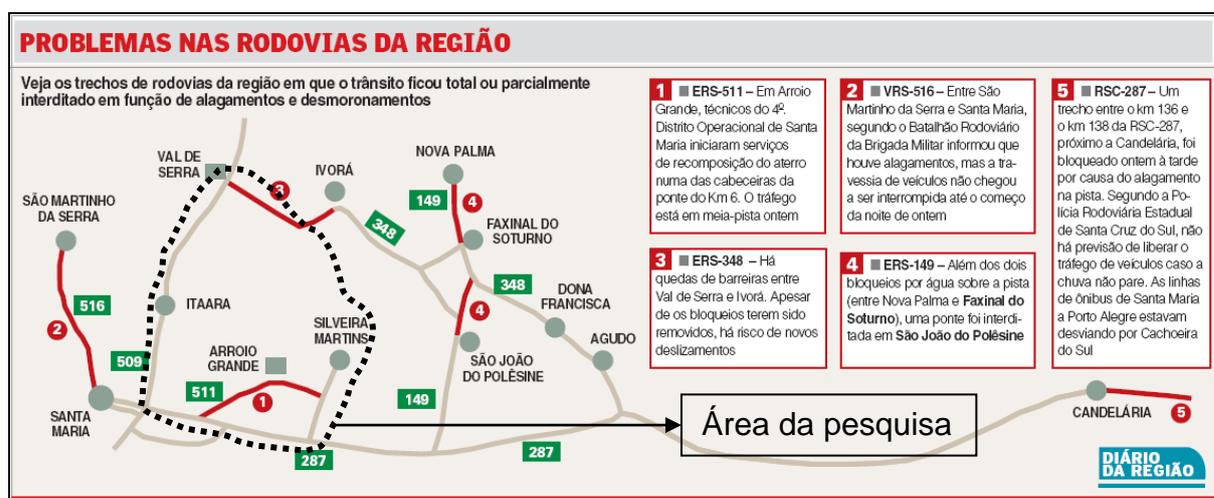


Figura 29 – Problemas de mobilidade nos municípios atingidos por enchentes.

Fonte: Jornal Diário de Santa Maria, 05/01/2010 pág. 11 (adaptado).

O dia 05 de janeiro de 2010 foi marcado pela tragédia da queda da ponte sobre o Rio Jacuí, na RSC-287 (Figura 30), rodovia estadual que liga os municípios de Agudo e Restinga Seca e um dos principais caminhos utilizados para fazer ligação entre Santa Maria e Porto Alegre. O grande volume de chuvas de caiu nas regiões a montante da ponte, nos afluentes do Rio Jacuí fez esse rio transbordar e alagar praticamente todas as várzeas que o margeiam. A edição do jornal Diário de Santa Maria, do dia 06/01/2010 registrou as ações de resgate às vítimas da queda da ponte, que resultou em sete pessoas mortas.



Figura 30 – Inundação da várzea do Rio Jacuí, na Região Centro – RS.

Fonte: Página eletrônica do Governo do Estado do Rio Grande do Sul (<http://www.estado.rs.gov.br>)

Foto: Jefferson Bernardes (05/01/2010).

Esse episódio pode ser considerado o marco representativo da calamidade do problema gerado pelas enchentes na mobilidade, principalmente porque pontes são locais susceptíveis a fortes pressões das vazões de enchentes, “afuniladas” na seção transversal das estradas ao cruzarem sobre os arroios e rios.

3.2 Métodos

Pretende-se que o sistema de apoio à mobilidade e planejamento para comunidades rurais baseie-se:

- a) na espacialização das áreas alagáveis por chuvas acumuladas em um, dois e até três dias consecutivos e;
- b) na identificação de caminhos seguros para a mobilidade rural, decorrente de possíveis obstruções no sistema viário da bacia hidrográfica na região do estudo, em função das inundações.

A área da bacia do Arroio Grande, somada à fração da bacia do Rio Vacacaí-Mirim que contribui para alagar a planície de inundação, é de 374,87Km² e possui um tempo de concentração de aproximadamente 12 horas.

Considera-se como o primeiro passo para a estruturação de um sistema de alerta para bacias pequenas, com menos de 500Km² (Tucci, 1993 p. 393), utilizar-se a realidade das informações usuais disponíveis, no caso, o monitoramento de precipitações diárias.

Inicialmente, fez-se uma análise histórica das enchentes ocorridas na região e a associou-se com a precipitação diária, dado usualmente monitorado e disponível na bacia do Arroio Grande.

A relação "*Precipitação Diária vs. Áreas Alagáveis*" foi realizada por meio de modelos hidrológico e hidráulico para delimitar a área alagável na planície aluvial da bacia. Embora não se disponha de monitoramento fluviométrico na bacia, considerou-se o resgate histórico de dados secundários, relativo às marcas de cheias, como informação útil ao processo. As marcas de cheias não são nada mais do que o registro dos picos das ondas de cheia. Desta forma, seus registros podem ser, mediante arranjo metodológico, utilizados para o mapeamento de áreas alagáveis por meio dos modelos hidrológico-hidráulicos, com apoio de geoprocessamento.

A partir da pesquisa das marcas das enchentes do passado e de um modelo de terreno, fidedigno ao relevo natural, procurou-se espacializar as áreas alagáveis por enchentes, que afetaram estradas, pontes, bueiros, galerias, lajes (pranchadas) ou pinguelas de passagem sobre os arroios, para efeito de ajuste da metodologia.

Com isso, as comunidades com maior suscetibilidade à impossibilidade de movimentação podem ser identificadas, para serem remanejadas com alguma

antecedência. Isso também pode servir de base para o (re)planejamento e (re)dimensionamento de estruturas, tanto viárias, quanto de drenagem.

O método geral fundamenta-se na organização dos dados em um ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), contendo um banco de dados espaciais integrado pelos vetores e pontos de cruzamentos entre a hidrografia e o sistema viário e por mapas temáticos das altitudes e declividades do terreno na área pesquisada. O SIG é que possibilitou correlacionar os registros pluviométricos dos períodos de ocorrência das enchentes aos atributos topográficos, hidrográficos, viários, de uso e formação do solo na área de pesquisa.

O método geral pode ser resumido nas seguintes etapas:

- a) Obter o Modelo Digital de Terreno (MDT) da área alagável, que represente fidedignamente a superfície e, com isso permita espacializar os locais mais planos e baixos, com maior fragilidade potencial aos impactos das enchentes;
- b) Realizar o zoneamento das áreas com riscos de inundações, utilizando-se de informações de cheias antigas através da relação entre a precipitação pluviométrica e a área alagada – com apoio das marcas de enchentes pesquisadas junto a substratos e comunidade;
- c) Reconhecer, mapear e atualizar o sistema viário da bacia e classificá-lo de acordo com as características técnicas de trafegabilidade, estabelecidas em Brasil (2008, p. 324), através do Manual MD33-M-02 (3ªed.), por se tratar de classificação bastante adequada às necessidades da Defesa Civil;
- d) Indicar caminhos ao deslocamento da comunidade e agregados, por meio da espacialização dos trechos de estradas que podem ser atingidos pelas enchentes;

A realização desta metodologia tornou-se possível a partir do crescimento na oferta gratuita de dados geográficos, tais como: imagens de satélite de média resolução (*Landsat 5 e 7, ResourceSat, CBERS, Alos*) mais acessíveis e frequentes; e dados vetoriais digitais de redes de drenagem, redes viárias e relevo, que viabilizaram tecnicamente a realização das pesquisas baseadas em geotecnologias e com baixo custo.

Tecnologias como o *ASTER GDEM* e o *SRTM*, que são modelos digitais de elevação (MDE) gerados pela *NASA*, e o *Google Earth*[®], com imagens de altíssima

resolução dos satélites *Ikonos II*[®] (1,0m), *Quick Bird*[®] (0,60m) e *GeoEye I*[®] (0,40m) impulsionaram o acesso a dados e análises tridimensionais da superfície terrestre, essenciais à pesquisa de fenômenos geográficos, como as enchentes, por exemplo.

Também, o acesso às séries históricas de precipitação do Portal Hidroweb, da ANA e do BDMEP, do INMET, permitiram caracterizar o comportamento das chuvas ao longo de décadas. Eles foram determinantes para os estudos sobre a mobilidade das comunidades e sobre o comportamento espacial da água nas enchentes em bacias hidrográficas, predominantemente rurais.

3.2.1 Primeira fase: “Área alagada = f (Precipitação pluviométrica)”

Os processos formadores das enchentes, desde a ocorrência das chuvas até a inundação das áreas na planície de inundação, foram inter-relacionados nesta tese a partir dos seguintes grupos de dados:

- a) Dados topográficos da bacia considerada;
- b) Espacialização detalhada da hidrografia;
- c) Modelagem Digital do Terreno (MDT);
- d) Dados pluviométricos na região do estudo; e
- e) Georreferenciamento de marcas remanescentes das enchentes antigas.

A topologia adotada para a modelagem da bacia considerou-a dividida em:

- a) Bacias Vertentes (BV) e;
- b) Áreas Alagáveis (AA).

As bacias vertentes (BV) constituem-se das áreas situadas nas regiões de encostas, consideradas como produtoras de água para inundação da região mais baixa.

As áreas alagáveis (AA), no presente estudo, são áreas que recebem a contribuição das bacias vertentes e, pela característica topográfica, não têm o escoamento rápido, produzindo maior impacto na mobilidade da bacia. Neste contexto o mapeamento do MDT deve ter a precisão e validação, necessárias para a delimitação de áreas de alagade, em regiões de pouca declividade.

Na figura 31 é apresentado o mapa da topologia adotada para a modelagem da bacia.

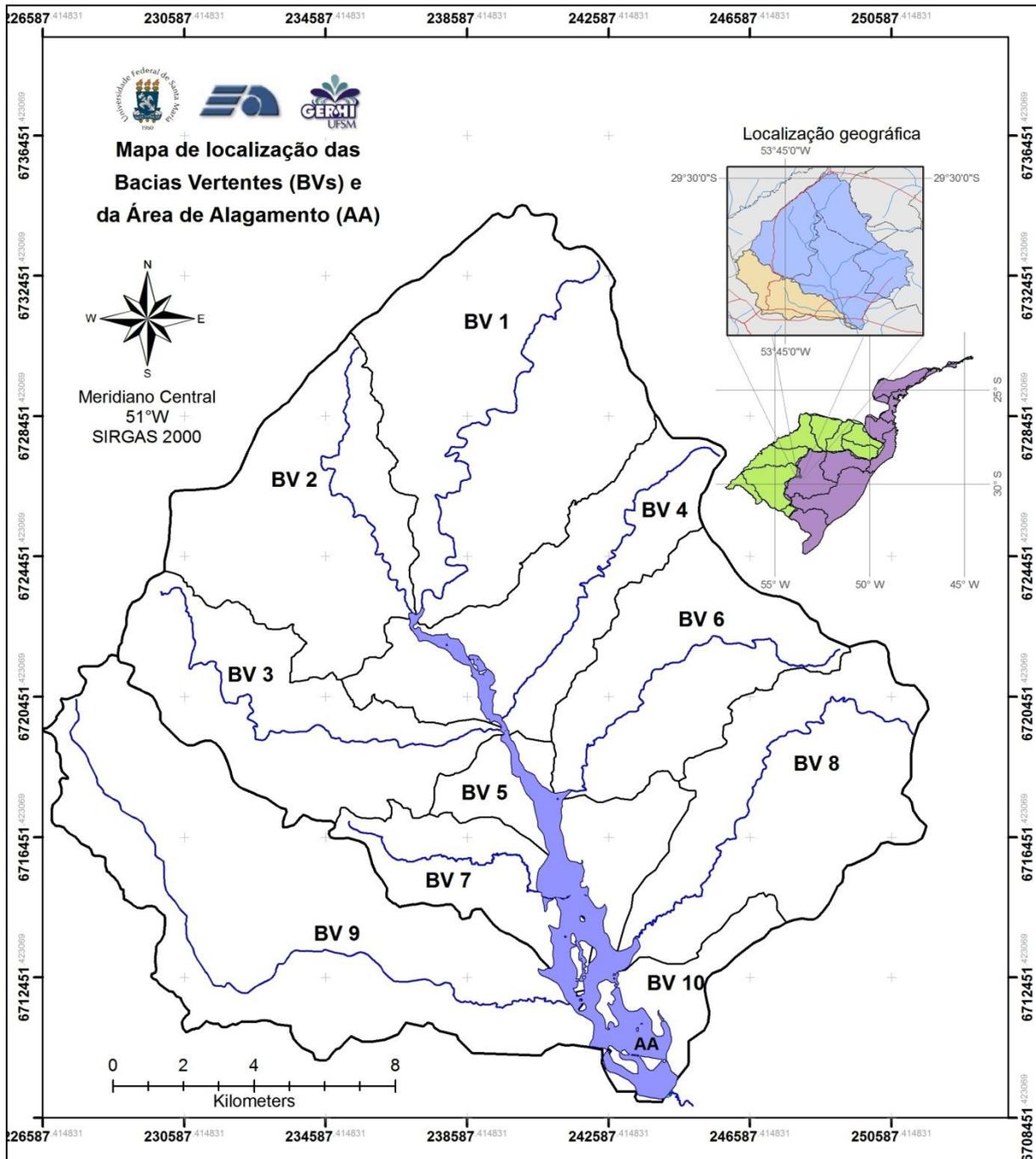


Figura 31 – Bacia estudo: subdivisão em bacias vertentes (BV) e área alagável (AA).
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2 Fluxograma metodológico

Esta primeira etapa metodológica tem por objetivo delimitar a AA em função de uma precipitação máxima diária, característica da situação real de disponibilidade de dados, quando se quer dar o “primeiro passo” em um sistema de alerta para cheias e para o planejamento de ações de minimização dos seus efeitos danosos.

O fluxo geral deste método foge um pouco ao escopo de um estudo hidrológico convencional, para as estimativas de vazões e áreas alagadas em uma bacia hidrográfica. No estudo convencional deve-se possuir um período concomitante de dados de precipitação e de vazões em seções de interesse do rio, mediante o monitoramento fluviométrico. Este processo envolve basicamente o inventário/escolha de uma seção adequada do rio, o monitoramento continuado de níveis do rio por alguns anos, medições de descargas para a definição de uma curva-chave e a geração de séries de vazões. Estas vazões devem ser propagadas nas regiões de interesse para estimar a AA.

Porém, para o presente caso do estudo (que representa ampla recorrência em áreas de características semelhantes), esta situação não ocorre, pois não se dispõe de monitoramento fluviométrico. Por outro lado, a demanda social mostra que um sistema de alerta de cheias é imprescindível.

Baseada nessa realidade, a estratégia na primeira etapa metodológica desta tese, para delimitar AAs, foi utilizar-se da base de dados massivamente disponível em regiões como a do presente estudo, que são os dados de precipitações diárias. Além disso, utilizou informações (marcas de enchentes) remanescentes e esparsas das AAs em decorrência das cheias antigas.

Desta forma, no arranjo metodológico proposto para a primeira etapa, tem-se o seguinte fluxograma, ilustrado pelo quadro 7. Em sequência do texto, descreve-se cada um dos processos do fluxograma metodológico.

A etapa 1 do desenvolvimento do estudo consiste na localização da região de estudo e na delimitação da bacia de interesse, de forma inicial a partir de cartografia básica. Para tanto foi necessário identificar o exutório da bacia que abrangesse a totalidade da região das áreas alagáveis. Os documentos usados na delimitação foram as cartas topográficas da Diretoria do Serviço Geográfico (DSG) do Exército Brasileiro, nas escalas 1:50000 e 1:25000, cobrindo a área de estudo.

Em sequência, na etapa 2 fez-se o inventário e a pesquisa dos dados disponíveis – topográficos, pluviométricos, referências de nível ou pontos cotados, imagens de satélite (alta e média resolução) e cobertura do solo.

Etapa	Atividades	
1	Identificação da região de estudo e delimitação aproximada da bacia de interesse	
2	Inventário e pesquisa dos dados disponíveis – topográficos, pluviométricos, pontos GNSS, imagens de satélite (alta e média resolução) e cobertura do solo.	
3	Atualização e detalhamento da hidrografia/topografia. Elaboração do MDT e delimitação precisa da bacia hidrográfica.	
4	Delimitação das sub-bacias hidrográficas e seleção dos canais principais.	
5	Análise estatística das chuvas extremas e definição de Tempos de Retorno (TRs) para precipitações diárias na bacia hidrográfica e suas BVs.	
6	Inventário das cheias antigas a partir da série histórica de precipitações.	
7	Associação de TRs para as cheias antigas e elaboração da curva TR x P_{max} (mm) com o Método de Gumbel.	
8	Estimativa das Q_p para as BVs pelo Método de I Pai Wu ($Q=0,278*C*I*A^{0,9}*K$) - “Método Racional Estendido” para TRs de 2, 5, 10, 25, 50, 100 e 500 anos.	
9	Levantamento de marcas de enchentes em substratos e por contato com pessoas da comunidade na região do estudo.	
10	Detalhamento do MDT na planície de inundação (AA) e levantamento topográfico de marcas de enchentes.	
11	Classificação digital dos usos do solo e mapeamento dos Coeficientes de Rugosidade de Manning na bacia.	
12	Definição das Seções Hidrológicas de Referência (SHR) com o HEC-GeoRAS para a AA através de levantamento por métodos topográficos. Estas SHRs devem conter marcas de enchentes.	
13	Propagação das vazões das BVs na planície de inundação (AA) pelo HEC-RAS.	
14	Simulação de cenários de AAs para os diferentes TRs através do HEC-RAS.	
15	Comparação da simulação das AAs com as marcas de enchentes (ME) – obter Δ . (Δ = Valor da cota da ME observada – valor da cota da ME calculada)	
	Se $\Delta \leq 0,3m$ (não requer ajustamento)	Se $\Delta > 0,3m$ (requer ajustamento)
	Valida a simulação e considera a AA simulada, em função da estimativa modelada pelo HEC-RAS. Descartam-se SHRs interpoladas, que não forem comparadas às marcas.	Intervêm na simulação redefinido o nível das SHRs a partir de marcas de enchentes inventariadas e retorna à etapa 14 para nova simulação.
16	Gera os mapas das Áreas Alagáveis (AAs) para a mobilidade rural.	

Quadro 7 – Fluxograma metodológico da tese.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O método da primeira fase partiu da necessidade de geoprocessar os dados em única base, constituindo um SIG estruturado, especificamente, para abastecer de informações a modelagem de um sistema de apoio à gestão da mobilidade rural em situação de enchente. Para efetuar a estruturação do SIG optou-se pelo uso do software ArcGIS[®] da *Environmental Systems Research Institute (ESRI)*, versão 9.2, licenciado para o Colégio Politécnico da UFSM.

Na etapa 3, para efetuar a atualização e o detalhamento da hidrografia e da topografia, o mapeamento da área de pesquisa foi sucedido pela vetorização da rede de drenagem, na cartografia com escala 1:25000. De posse dos dados vetoriais da rede de drenagem digitalizados a partir das cartas topográficas, fez-se o ajustamento dos vértices dos vetores, atualizados a partir de um mosaico georreferenciado de imagens do Google Earth[®], para que os traçados coincidisse com os cursos atuais dos arroios. Além de ajustar o posicionamento, essa etapa possibilitou atualizar e detalhar a hidrografia vetorizada.

A elaboração do MDT e a delimitação precisa da bacia hidrográfica, também foram realizadas na etapa 3, pois a espacialização de áreas alagáveis demanda um MDT fidedigno às pequenas variações topográficas das várzeas inundáveis. Assim, para obter o detalhamento do relevo fez-se a modelagem digital do terreno interpolando dados da hidrografia topologicamente orientada e atualizada, de curvas de nível, pontos cotados de cartas topográficas, limites de açudes e da área de pesquisa. Os dados foram extraídos de cartas topográficas, obtidas de Hasenack (2010) e pela coleta de pontos nas áreas alagáveis da planície de inundação.

A coleta de amostras de pontos *in loco*, nos locais de baixas declividades e, principalmente, nos talwegues de seções do canal, foi feita por levantamentos geodésicos com uso de receptores GNSS, cujas coordenadas UTM (E, N, e h) foram obtidas através de receptores de dupla frequência. Em ocasiões diferentes, foram usados os seguintes modelos de receptores GNSS: (i) Topcon Hiper Lite +[®] (Base e Rover) – RTK com rádio interno (Figura 32a); e (ii) Leica 1200[®] (receptor base) e CS09[®] (móvel) – RTK com rádio externo *Pacifi Crest*[®] para 15,0Km (Figura 32b).



Figura 32 – Equipamentos GNSS utilizados na coleta de pontos do terreno e de pontos de marcas de enchentes.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A seleção dos locais para amostragem dos pontos de terreno seguiu uma ordem aleatória e fundamentou-se na ocorrência das marcas de enchentes em suas proximidades. Em todas as seções transversais, definidas pelos cruzamentos entre estradas e o canal principal da bacia – o Arroio Grande, coletaram-se as cotas da pista das estradas, do fundo do leito e do nível da água na data (Figura 33).

A escolha também considerou aspectos como: locais abertos – livres de obstruções físicas próximas (sob árvores, telhados ou perto de paredes) e situarem-se preferencialmente em propriedades particulares (garantia de preservação).



Figura 33 – Mosaico de fotos de alguns dos pontos no leito dos arroios onde foram coletadas e georreferenciadas as cotas de terreno.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram implantados marcos que depois de georreferenciados constituíram referências de nível (bases), tanto para levantar outros pontos de terreno, quanto para nivelar marcas de enchentes.

A coleta de pontos de terreno destinou-se, especificamente a dois procedimentos subsequentes:

- 1º. Ao adensamento da amostra de pontos cotados, necessários à modelagem digital de terreno, para obter um bom detalhamento da superfície nas áreas potencialmente alagáveis, pois somente o uso de curvas de nível, equidistantes 20 metros entre si, e de pontos cotados cartográficos gera MDTs imprecisos para este fim;
- 2º. À determinação de cotas altimétricas e georreferenciamento de marcas de enchentes que ocorreram no passado, preservadas em paredes de casas, pontes, postes e outros substratos.

Cada marco de referência de nível implantado foi rastreado durante 30 minutos, tempo suficiente para a fixação das frequências e resolução das ambiguidades das ondas portadoras dos sinais GNSS.

A partir da modelagem digital do terreno foi possível espacializar as altimetrias e as declividades, fundamentais para o estudo do problema, visto que as inundações ocorrem exatamente nas áreas menos declivosas, mais próximas dos cursos de água e nas “baixadas” (planícies de inundação). Desta análise obteve-se o MDT e as áreas com maior risco ao alagamento, conseqüentemente, pode-se delimitar a zona de potencial obstrução da mobilidade rural, na bacia considerada na pesquisa, por meio da modelagem hidrológico-hidráulica. O detalhamento técnico da modelagem digital do terreno encontra-se no Apêndice 1.

Todavia, na etapa 4, antes de avançar para a modelagem hidrológica, foi necessário subdividir a bacia do Arroio Grande em bacias vertentes (BVs) ou áreas de propagação e acumulação da vazão total (AAs), no deflúvio do canal principal, que foi mapeado do exutório da bacia do Arroio Grande até seu ponto mais distante.

A etapa 5 consistiu na análise estatística da série de dados pluviométricos disponíveis na bacia. Com base no conhecimento das chuvas máximas diárias causadoras de enchentes, obteve-se uma equação para geração da precipitação estimada, em função de qualquer TR.

Existe na região central gaúcha, conforme pesquisa no sítio do INMET²³, uma estação meteorológica convencional e uma automática, ambas sediadas na UFSM, além de outra estação convencional localizada na Base Aérea de Santa Maria (BASM), mantida pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA).

²³ http://www.inmet.gov.br/html/rede_obs.php Acessado em: 24/05/2011.

Em Santa Maria, as chuvas são registradas desde 1912 na estação meteorológica pertencente ao 8º Distrito de Meteorologia (8º DISME) do Ministério da Agricultura (INMET). Desde 1968 encontra-se localizada no Campo Experimental do Departamento de Fitotecnia da UFSM (latitude: 29°43'S, longitude: 53°48'O e altitude: 95m), a aproximadamente dez quilômetros a leste do primeiro local, no centro da cidade. Os registros constituem uma série histórica de eventos que possibilitam analisar a ocorrência de chuvas na região em vários aspectos, segundo o interesse da sua aplicação (Buriol et al., 2006), entre os quais, estudos de eventos extremos que causam as enchentes.

Os estudos de Buriol et. al. (2006) mostraram que os totais mensais de chuva registrados no período 1912 – 2004, na estação meteorológica de Santa Maria podem ser considerados homogêneos.

A metodologia buscou juntar o maior número possível de dados hidrológicos e pluviométricos das estações de medição, com a maior proximidade possível da área de pesquisas. Para a tese pesquisou-se dados pluviométricos por meio do Portal do BDMEP do INMET²⁴. Os dados são diários e relativos ao período 1961 a 2012, das estações para as quais se dispõe em forma digital de pelo menos 80% dos dados que deveriam ter sido registrados nesse período (INMET, 2010).

Registros de outros dois pluviômetros foram utilizados na obtenção da chuva média (especialmente homogênea) sobre a área de pesquisas. Um deles localizado no município de Itaára e outro em Silveira Martins. Ambos os pluviômetros são monitorados por particulares, e suas medidas não têm caráter oficial, mesmo assim, a EMATER-RS faz uso desses dados para publicação dos seus boletins técnicos.

Para aproximar a chuva da média sobre toda a bacia, a precipitação de cada pluviômetro foi multiplicada pelo peso do seu polígono de Thiessen ($W_{Thiessen}$) correspondente. Os produtos das medidas pluviométricas ponderadas das três estações foram somados, para obter a precipitação máxima homogênea.

O cálculo da precipitação média sobre a bacia deu-se pela fórmula da equação 1:

$$Pp_{med} = (Pp_{Itaára} \times W_{Itaára}) + (Pp_{Silv.Martins} \times W_{Silv.Martins}) + (Pp_{SM} \times W_{SM}) \quad (1)$$

²⁴ <http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>

As datas e os valores de precipitações máximas ponderadas pelos pesos do Método de Thiessen são apresentados na seção 4 – Resultados e Discussão. Para avaliar os períodos de retorno e as probabilidades (P) de não ocorrência de eventos de mesma proporção ou maiores, fez-se a análise das frequências de precipitações diárias máximas anuais ($P_{p_{máx}}$) da série histórica do BDMEP – Estação Meteorológica de Santa Maria, cuja série contém registros desde 1961. Para esta análise aplicou-se o Método de Gumbel, cujo desenvolvimento matemático encontra-se no Apêndice 2.

Daí em diante, na etapa 6 da primeira fase, foi possível selecionar as chuvas máximas diárias, (com marcas de enchentes mapeadas), e calcular as estimativas ($P_{max\ est}$) dessas chuvas, para qualquer TR.

As precipitações máximas que causaram enchentes no passado foram extraídas a partir das médias das três séries históricas. Os registros tabulados foram classificados em ordem decrescente de precipitação diária acumulada. Desse ordenamento foi possível selecionar os registros referentes às datas de ocorrência de enchentes que deixaram marcas em casas, pontes, cercas e outros substratos.

Foram pesquisadas as datas de enchentes, para as quais foram encontradas marcas, que foram niveladas. Essa amostra de datas foi definida para comparar, posteriormente, o tempo de retorno desses eventos com o nível atingido pelas águas de suas inundações passadas, cujas marcas remanescentes nos substratos ou na memória das pessoas, permitissem o georreferenciamento e o nivelamento topográfico.

A etapa 7 consistiu da determinação das $P_{max.est.}$ para TRs de 2 a 500 anos, aplicando-se a equação da curva “TR vs. $P_{max.est.}$ ”, desenvolvida através do Método da Distribuição de Gumbel.

Ingressando na etapa 8, na modelagem hidrológico-hidráulica propriamente dita, para analisar os impactos das enchentes e seus desencadeamentos na mobilidade rural necessitou-se saber a duração e a intensidade das chuvas que caíram e, também, a acumulação delas em um, dois ou mais dias consecutivos.

Esses dados foram usados como precipitações máximas de referência, produtoras de vazões associadas às medidas altimétricas das marcas das cheias, na modelagem de cenários futuros desses eventos, através do software HEC-RAS e HEC-GeoRAS (*plugin* para ArcGIS Desktop®) do USACE.

A primeira aproximação da relação entre as chuvas causadoras de enchentes e suas áreas de alagamento (AA) levou em consideração que os fatores ambientais e antrópicos afetaram e seguem mudando a dinâmica da água na bacia. As alterações desses fatores, com o passar do tempo, podem produzir maior grau de incerteza nos cenários de futuras cheias, gerados a partir da modelagem do problema. Tal incerteza decorre, essencialmente, da alteração nos usos do solo, que modificam as condições de rugosidade do canal e suas margens, fazendo que o escoamento superficial seja diretamente afetado.

Por meio da literatura consultada: Chow (1964); Tubelis e Nascimento (1980); Krebs, Tucci e Silveira (1985); Chow, Maidment e Mays (1994); Tucci (2000); Nishijima (2004); entre outros, admite-se que a chuva possui grande variabilidade espaço-temporal e, em função disso, sua previsibilidade com dias de antecedência pode conter elevado grau de incerteza, crescente em função do tempo prévio ao evento esperado.

Quanto ao método aplicado na determinação das probabilidades de não ocorrerem chuvas extremas, causadoras de enchentes e, por consequência, do tempo de retorno dessas chuvas, cabe mencionar a citação de Krebs, Tucci e Silveira (1985, p. 14):

As incertezas na estimativa da vazão, para uma probabilidade escolhida, dependem essencialmente, da qualidade e quantidade dos dados amostrados. Com o aumento do tamanho da amostra de vazões máximas, essas incertezas diminuem. Por exemplo, valores experimentais médios indicam que, para estimativas correspondentes a períodos de retorno de 100 anos, com $\pm 10\%$ de precisão, em geral são necessários 115 anos de registro, enquanto que, para uma precisão de $\pm 25\%$, são necessários 48 anos de registro. Normalmente, utiliza-se como indicador que a estimativa é razoável para tempo de retorno igual a $2N$, onde N é o tamanho da amostra.

Considerando a afirmação de Krebs, Tucci e Silveira (1985, p. 14) e observando o tamanho da amostra de precipitações máximas diárias da série histórica de maior tempo, verifica-se que as estimativas de vazão têm precisão em torno de 25%, pois o valor de “ N ” dessa amostra é de 52 anos. Com base na afirmação desses autores, pode-se estimar vazões de projeto para até 104 anos de tempo de retorno.

Verificou-se também, que a altura do nível de água na seção do rio é a medida mais fácil de ser obtida para quantificar as inundações; e sua variação com o tempo, pode caracterizar situações críticas, em função de medidas do passado e estimativas calculadas.

Para equacionar a resposta na forma de área alagada ($AA_{(Km^2)}$) obtida em função de uma precipitação pluviométrica de entrada ($Pp_{(mm/dia)}$), determinaram-se as características topográficas e de cobertura do solo, que influenciam o movimento da água, tanto no sentido da infiltração, quanto no deflúvio superficial e subterrâneo.

A partir do MDT obtiveram-se os parâmetros para o equacionamento das vazões de cheias (Qp), que foram estimadas através do **Método “I Pai Wu”** (GENOVEZ, 1991). A seleção do Método de I Pai Wu seguiu a recomendação extraída da Documentação Técnica DP-H06 – Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos – Método de “I Pai Wu”, da Superintendência de Projetos e Obras (Prefeitura Municipal de São Paulo, 1999). Segundo prescreve essa documentação o Departamento de Águas e Energia Elétrica da Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras do Governo do Estado de São Paulo recomenda o Método “I Pai Wu” por constituir-se em um **aprimoramento do Método Racional, podendo ser aplicado para bacias com área de drenagem de 2 Km² até 200 Km²**.

O propósito do estudo de I Pai Wu em 1963 foi, segundo Genovez (1991), a análise dos dados observados em 21 pequenas bacias hidrográficas do Estado de Indiana (USA) e a obtenção de relações entre a forma dos hidrogramas e algumas características das bacias. Um hidrograma de projeto pode ser obtido para áreas sem dados de vazão, a partir da precipitação de projeto e de certas características da bacia, que podem ser determinadas a partir de mapas topográficos. O mesmo autor, também menciona que o termo “bacias pequenas”, de I Pai Wu, corresponde às bacias com áreas menores que 260,0Km², área da maior bacia do seu estudo.

Para cada uma das bacias vertentes (BVs) determinou-se: área de drenagem (A); declividade equivalente (S); fator de forma (F); comprimento do canal principal (L); coeficiente de forma (C_1); intensidade média (I_m) e distribuição das chuvas máximas (C_2); e tempo de concentração (t_c).

Com base nos valores dos índices fisiográficos, obtidos por geoprocessamento, e nos tempos de concentração calculados para cada BV, foram estimadas as vazões de cheias, relativas às precipitações máximas diárias (P_{max}) com TRs predefinidos (2, 5, 10, 25, 50, 100 e 500 anos), para as quais se obtiveram marcas de enchentes, testemunhas para posterior validação.

Considerando que as áreas das BVs que formam a bacia do Arroio Grande não têm, individualmente, mais do que 76 km² [25], o Método “I Pai Wu” ajustou-se adequadamente à estimação das vazões de cheias para essas áreas. Destaca-se que o método desconsidera o efeito da redução no tempo de concentração, devido à canalização dos cursos d’água da bacia (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 1999), efeito maximizado nas áreas urbanizadas e que, ao ser desconsiderado, ajusta-se adequadamente à transformação chuva-vazão para áreas agrícolas e rurais.

Genovez (1991), ao estudar a aplicação de cinco métodos de obtenção de vazões, baseados em dados de precipitação diários, demonstrou que o Método de I Pai Wu, juntamente com o método do Hidrograma Sintético Regionalizado para Bacias Rurais do Estado de São Paulo, desenvolvido por Reda (1985)²⁶, produziram resultados menos superestimados que os métodos Racional, de Ven Te Chow e do *Soil Conservation Service* (SCS). Genovez (1991) concluiu que os métodos que deram menores valores de vazão de pico (I Pai Wu e Reda) foram superiores aos demais, pois se aproximaram mais aos valores de vazões máximas observadas, ajustados pelo Método de Gumbel, para as mesmas bacias que foram pesquisadas.

O cálculo das vazões máximas estimadas foi uma etapa intermediária no processo de modelagem da inundação sobre o relevo do MDT. Essa determinação foi feita para se obter valores de referência, que subsequentemente foram incluídos na modelagem de inundação, a partir dos dados geoprocessados com o **HEC-GeoRAS** (extensão para ArcGIS Desktop[®]), que interopera dados hidromorfológicos georreferenciados com o software HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*) do USACE.

O cálculo da vazão de cheia pelo Método de I Pai Wu é feito pela equação 2.

$$Q = 0,278 \times C \times i \times A^{0,9} \times K \quad (2)$$

Na qual:

Q = vazão de cheia ($m^3 \cdot s^{-1}$);

C = coeficiente de escoamento superficial (adimensional);

i = intensidade da chuva crítica ($mm \cdot h^{-1}$);

A = área da bacia de contribuição; (Km^2);

K = coeficiente de distribuição espacial da chuva (adimensional).

²⁵ Área da maior bacia vertente da bacia hidrográfica do Arroio Grande.

²⁶ Descrito em GENOVEZ (1991, p. 89).

Para determinar cada variável da equação de I Pai Wu, utilizou-se o MDT previamente elaborado. Primeiro, delimitou-se a área das sub-bacias, o comprimento do canal principal e seus desníveis totais, que são diferenças altimétricas entre o ponto mais alto do canal principal e seu respectivo exutório.

A diferença de nível e o comprimento do canal principal foram as variáveis que determinaram o tempo de concentração (t_c) de cada sub-bacia. O t_c foi obtido por meio dos índices fisiográficos, aplicando-se a Equação de Kirpich (Equação 3) modificada pelo "California Culverts Practice, California Highways and Public Works" (GENOVEZ, 1991).

$$t_c = 57 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (3)$$

Sendo:

t_c = tempo de concentração (min.);

L = Comprimento do canal principal (Km);

H = Diferença altimétrica entre o ponto mais alto e mais baixo da bacia (m).

A partir da determinação do t_c e da área para cada sub-bacia foi possível definir o valor do coeficiente de distribuição espacial da chuva, através do gráfico " $K_{\%} \times \text{Área (Km}^2\text{)}$ ", ilustrado na figura 34.

Outro parâmetro utilizado na determinação da vazão, que foi calculado em função das medidas geométricas da bacia (área e comprimento do canal principal) foi o fator de forma (F). Esse indicador fisiográfico foi empregado na obtenção do coeficiente de forma (C1), como mostram as equações 4 e 5.

$$F = \left[\frac{L}{2 \left(\frac{A}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (4)$$

Na qual:

F = Fator de forma da bacia (adimensional);

L = Comprimento do canal principal (km);

A = Área da bacia (km²).

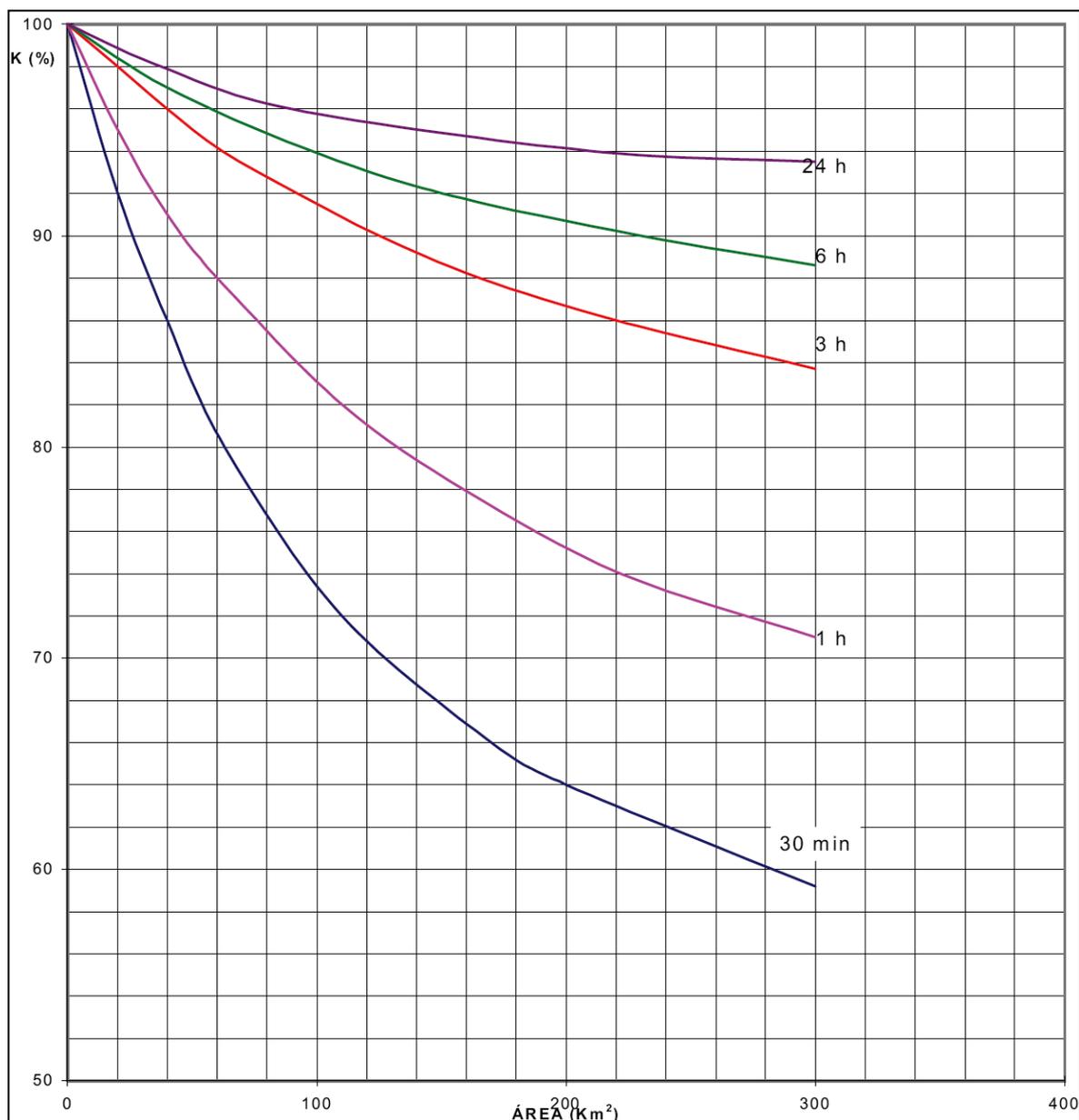


Figura 34 – Gráfico do coeficiente de distribuição espacial da chuva (K%).
 Fonte: Documentação Técnica DP-H06, Prefeitura do Município de São Paulo (1999).

O fator de forma (F) foi aplicado no cálculo do Coeficiente de Forma (C_1), por meio da fórmula mostrada na equação 5.

$$C_1 = \left[\frac{4}{(2+F)} \right] \quad (5)$$

Outro coeficiente necessário para obter os parâmetros da equação das vazões de cheias foi o Coeficiente Volumétrico de escoamento (C_2), que consiste de uma ponderação entre os diferentes coeficientes das partes da bacia, classificados

pelo grau de impermeabilidade do solo. Ele pode ser determinado matematicamente, porém, para a determinação de vazões de cheias em bacias rurais, esse coeficiente foi admitido a partir da recomendação de Morano (2006), que propõe um coeficiente **C₂ igual a 0,3**; indicado para zonas rurais, caracteristicamente agrícolas, com vegetações ralas ou esparsas e um grau de utilização do solo livre de urbanização nas zonas verdes.

Com os coeficientes de forma e de distribuição espacial da chuva foi possível calcular o Coeficiente de Escoamento Superficial (C), parâmetro de cálculo do Método de I Pai Wu, pela equação 6:

$$C = \left(\frac{2}{1+F} \right) \times \frac{C_2}{C_1} \quad (6)$$

Para calcular a vazão de cheias foi fundamental conhecer a altura máxima média de chuva por unidade de tempo (I). Para calcular a intensidade média de chuvas máximas (mm.h⁻¹), aplicou-se o método concebido por Beltrame, Lanna e Louzada (1991), que nesta tese foi chamado de Método do IPH-UFRGS, já que seus autores atuam no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A aplicação do Método do IPH-UFRGS requer a definição da chuva média máxima, para a duração a ser considerada. Como os dados pluviométricos disponíveis em regiões formadas por pequenas bacias são os totais de precipitação acumulada em um dia, utilizou-se o valor da precipitação diária máxima média anual, que é de 95,6 mm.dia⁻¹.

Apesar do Método do IPH-UFRGS referir-se às chuvas de 24 horas, e durações menores; é possível aperfeiçoar o cálculo da intensidade média para uma chuva de um dia. Segundo seus autores, a diferença entre a chuva de 24 horas e a chuva de um dia é o fato da primeira ser o valor máximo precipitado no período contínuo de 24 horas, independente do horário de início da chuva, e a segunda referir-se ao valor máximo ocorrido entre duas leituras sucessivas, normalmente realizadas às 9h00min. Beltrame, Lanna e Louzada (1991, p.57) mencionam, também, a verificação do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo, na qual a média das chuvas intensas de um e dois dias, pode ser

considerada como uma medida bastante representativa da chuva intensa de 24 horas.

Aplicando o método do IPH-UFRGS o primeiro passo foi a obtenção da média da chuva intensa com duração de 24 horas. Conforme os autores publicaram, esse valor para Santa Maria é de 99,9mm. Entretanto, esse dado não é procedente da estação meteorológica localizada na UFSM e, sim, da estação localizada na Fundação de Estudos e Pesquisas Agropecuárias (FEPAGRO), distante aproximadamente 30,0Km da área de pesquisas. Por isso, utilizou-se para os cálculos seguintes o valor de **95,6mm**, que é a média da chuva intensa, mesmo sendo um valor que se refere à precipitação máxima (média) de um dia.

Como recomendam Beltrame, Lanna e Louzada (1991) para obter os valores de $P_{p_{\text{máx méd.}}}$ aplicam-se as equações 7, 8, 9, 10 e 11, apresentadas o quadro 8:

Duração (d)	Para TR < 10 anos	Para TR ≥ 10 anos
>35min a 3h	$X = 84,9 + 24,4 \times y$ (7)	$X = 104,6 + 16,2 \times y$ (8)
de 3h a 5h	$X = 84,1 + 27,1 \times y$ (9)	$X = 105,7 + 17,4 \times y$ (10)
>5h	$X = 84,1 + 27,1 \times y$	$X = 90,4 + 24,3 \times y$ (11)

Quadro 8 - Equações de chuvas intensas: altura de precipitação com duração “d” e tempo de retorno “TR” em percentagem do valor médio.

Fonte: Beltrame, Lanna e Louzada (1991, p.23).

Nas quais:

$X =$ Relação percentual entre a precipitação intensa com tempo de retorno “TR” e duração “d” ($X(TR,d)$) e o valor médio da chuva intensa de mesma duração ($Xm(d)$);
 $y = -\ln [-\ln (1-1/TR)]$.

A duração da chuva intensa foi assumida como sendo igual ao tempo de concentração de cada sub-bacia vertente da bacia do Arroio Grande, para fins de cálculo da intensidade média. Para calcular a chuva intensa média a ser considerada na determinação da vazão de projeto, tem-se ainda que aplicar a equação 12.

$$X = \frac{X(TR,d)}{Xm(d)} \quad (12)$$

Na qual:

X = Relação percentual entre a precipitação intensa com tempo de retorno “TR” e duração “d” ($X(TR,d)$) e o valor médio da chuva intensa de mesma duração ($Xm(d)$);

$X(TR,d)$ = Ocorrência de chuva intensa para o tempo de retorno “TR” com uma duração “d”;

$Xm(d)$ = Chuva intensa média para uma duração “d”.

A intensidade média de uma chuva intensa para o tempo de retorno “TR” com uma duração “d” é obtida pelo Método do IPH-UFRGS, calculando-se o valor de $X(TR, d)$, pela equação 13, que se origina da equação 12.

$$X(TR, d) = \frac{X}{100} \times Xm(d) \quad (13)$$

Sendo:

$X(TR,d)$ = Ocorrência de chuva intensa para o tempo de retorno “TR” com uma duração “d”;

$Xm(d)$ = Chuva intensa média para uma duração “d”, assumida como o valor da média de precipitações máximas diárias anuais da série histórica.

A intensidade de chuva, calculada para obter a vazão de cheia em cada sub-bacia, foi determinada por meio da equação 14.

$$i(TR, d) = \frac{X(TR,d)}{d} \quad (14)$$

Sendo:

$i(TR,d)$ = é a intensidade de chuva para o tempo de retorno “TR” com uma duração “d” igual ao tempo de concentração da sub-bacia;

d = duração da chuva igual ao tempo de concentração da sub-bacia.

Com a aplicação destas equações foi possível calcular a chuva intensa média para duração de um dia, conforme segue a tabela 4, em tempos de retorno de 2; 5; 10; 25; 50; 100 e 500 anos. Posteriormente, estes valores foram aplicados na equação de I Pai Wu para determinação das vazões de projeto em cada BV.

Tabela 4 – Chuvas intensas calculadas médias para os tempos de concentração das BVs na área de pesquisas.

BV	Sub-bacia	tc (min)	tc (h)	Intensidade média da chuva de 1 dia (mm.h ⁻¹)						
				TR 2	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100	TR 500
1	Arroio Grande Alto	173,4	2,9	30,9	40,1	46,5	51,6	55,3	59,0	67,7
2	Arroio Taboão	95,0	1,6	56,6	73,4	85,2	94,5	101,3	108,2	123,8
3	Arroio Manoel Alves	143,6	2,4	37,4	48,5	56,3	62,5	67,0	71,5	81,9
4	Lajeado do Salto	111,4	1,9	48,2	62,5	72,6	80,5	86,4	92,2	105,5
5	Arroio Grande (condução)	131,0	2,2	41,0	53,2	61,8	68,5	73,5	78,4	89,8
6	Arroio Lobato	109,5	1,8	49,1	63,6	73,9	81,9	87,9	93,8	107,4
7	Arroio do Meio	128,1	2,1	42,0	54,4	63,2	70,0	75,1	80,2	91,8
8	Arroio do Veado	151,7	2,5	35,4	45,9	53,3	59,1	63,5	67,7	77,5
9	Rio Vacacaí-Mirim	273,2	4,6	19,7	26,2	30,4	33,9	36,4	39,0	44,8
10	Arroio Grande Baixo	405,3	6,8	13,3	17,7	20,5	23,8	26,2	28,6	34,1

Fonte: Aplicação do Método do IPH-UFRGS para cálculo das chuvas intensas.

As vazões de projeto, obtidas em função da aplicação do Método de I Pai Wu, formam o principal parâmetro de entrada na modelagem hidrológico-hidráulica das áreas de inundação. Os valores calculados são apresentados no item e subitens que tratam da validação das áreas de alagamento na planície de inundação pesquisada. É importante dizer que foi estabelecido uma vazão de base em 10% da vazão máxima, obtida pelo Método de I Pai Wu, que foi somada aos valores calculados, como recomenda a literatura (GENOVEZ, 1991; TUCCI, 1993; PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 1999; BRASIL, 2005).

Um dos importantes dados para a pesquisa foram as marcas deixadas pelas enchentes nas paredes de casas, galpões, postes, cercas, sapatas e pilares de pontes, troncos de árvores, entre outros obstáculos naturais e/ou artificiais nas proximidades dos arroios. Conhecer essas marcas e as datas em que ocorreram foi fundamental para simular situações de isolamento e falta de mobilidade. Essas marcas, na etapa 9 do fluxograma, foram fotografadas, cadastradas, georreferenciadas e niveladas em relação ao relevo no seu entorno, constituindo-se em parâmetros comparativos para as situações semelhantes, possíveis de acontecer novamente.

Na etapa 10, as marcas de enchentes foram georreferenciadas e niveladas. Conforme Cordero, Medeiros e Teran (2010) o nivelamento das marcas de enchentes fornece a declividade da linha de água, sendo necessário à elaboração dos mapas de inundação. Além desses, o nivelamento das marcas das cheias subsidia a elaboração dos mapas de planejamento e definitivo para o alerta.

Entretanto, esses procedimentos demandaram tempo e equipamentos de boa precisão para obterem resultado fidedigno ao fenômeno em estudo. Além disso, foi necessário dispor dos planos de informação de características geomorfológicas locais, bem como das topologias existentes na área pesquisada, como: cursos de água, relevo e sistema viário.

Na demarcação das marcas de enchentes, a primeira atividade realizada foi reconhecer o terreno em estudo, por meio de carta imagem georreferenciada de alta resolução espacial, mapa das declividades, das altitudes, da rede de drenagem e do sistema viário.

O reconhecimento da área de ocorrência de enchentes fez-se percorrendo as estradas rurais da região do estudo, com GPS de navegação marca Garmin® modelo *E-Trex Vista*® e máquina fotográfica digital. Coletaram-se dados dos cruzamentos entre os arroios e as estradas onde as enchentes deixaram marcas ou causaram obstruções.

Subsequentemente iniciou-se o cadastramento e o registro das marcas de enchentes nos lugares previamente visitados (na etapa 9). Cada marca cadastrada foi demarcada com uma linha vermelha com a data de ocorrência, sinalizando o nível da inundação, decorrente das chuvas acumuladas até aquele dia (Figura 35).

Para cadastrar as marcas editou-se uma ficha de cadastro, na qual foram apontados os dados gerais de cada marca, tais como: (i) data da marca; (ii) proprietário rural; (iii) microbacia; (iv) altura até o chão; (v) coordenadas UTM de posicionamento GPS da localização e (vi) cota de nível da água. Ao ser identificado o proprietário da área onde a marca foi localizada, fez-se uma entrevista para reunir dados complementares.

Em campo, no local de cada marca de cheia, efetuou-se o nivelamento e o georreferenciamento de precisão. Nas imediações da marca, preferencialmente com céu descoberto e livre de obstáculos próximos, instalou-se um marco de referência, confeccionado com tubo de PVC ($\varnothing=100\text{mm}$) e enterrado 40 a 50 cm no solo. Sobre o marco instalou-se um receptor GNSS de precisão geodésica.



Figura 35 – Mosaico de fotos com exemplos de marcas de enchentes: (a) e (b) – Ponte da ERS511 no Arroio do Meio (14/09/2010 e 15/04/2011); (c) e (d) – Residência na várzea do Arroio do Veado (07/01/2001 e 04/01/2010); (e) e (f) – Ponte da Estrada de Três Barras no Arroio Manoel Alves (04/01/2010 e 15/04/2011). Fonte: Fotos ‘a’, ‘b’, ‘d’ e ‘f’ de Alessandro C. Miola; Foto ‘c’ de Júlio Noal; e Foto ‘e’ de Rafael Dalla Lana.

O método que foi utilizado para levantamento das coordenadas das marcas de enchentes foi o de Posicionamento Relativo Estático Rápido. Segundo Monico (2008) esse método segue o princípio do método relativo estático, com uma diferença fundamental quanto ao tempo de ocupação na estação de interesse, nas

quais, pelo posicionamento relativo estático rápido, as ocupações simultâneas não excedem 20 minutos.

Os receptores GNSS utilizados no georreferenciamento das marcas de enchentes foram os mesmos usados na coleta de pontos de terreno. Os marcos georreferenciados por este método constituem a Rede Georreferenciada de Marcas de Enchentes (RGME) da área de pesquisas.

Para nivelar as marcas que não foram medidas por GNSS (p. ex.: embaixo de árvores, dentro de casas, nos talvegues dos canais, etc.), instalou-se um nível laser, marca Leica[®], modelo *Sprinter 100*, em local próximo ao marco georreferenciado, que forneceu as diferenças de nível (DN). O campo de visada do nível até a mira, posicionada na marca; e do nível até a mira, posicionada sobre um marco de referência, define a diferença de nível (DN) entre a cota do marco e a marca de enchente, obtendo dessa maneira a cota de enchente no local. As figuras 36 e 37 mostram em esquema e em fotos os procedimentos para nivelamento de uma marca de enchente, a partir de marco georreferenciado com receptor GNSS.

A cada nova marca de enchente encontrada e cadastrada este procedimento foi repetido e um novo marco foi agregado à RGME. Os dados das cotas altimétricas das marcas de enchentes cadastradas, georreferenciadas e niveladas entraram no banco de dados do respectivo plano de informação (PIs) do SIG, para serem correlacionados aos outros PIs, principalmente, na validação dos mapas áreas de alagamento.

No Apêndice 3 apresenta-se o mapa de localização das marcas de enchentes inventariadas.

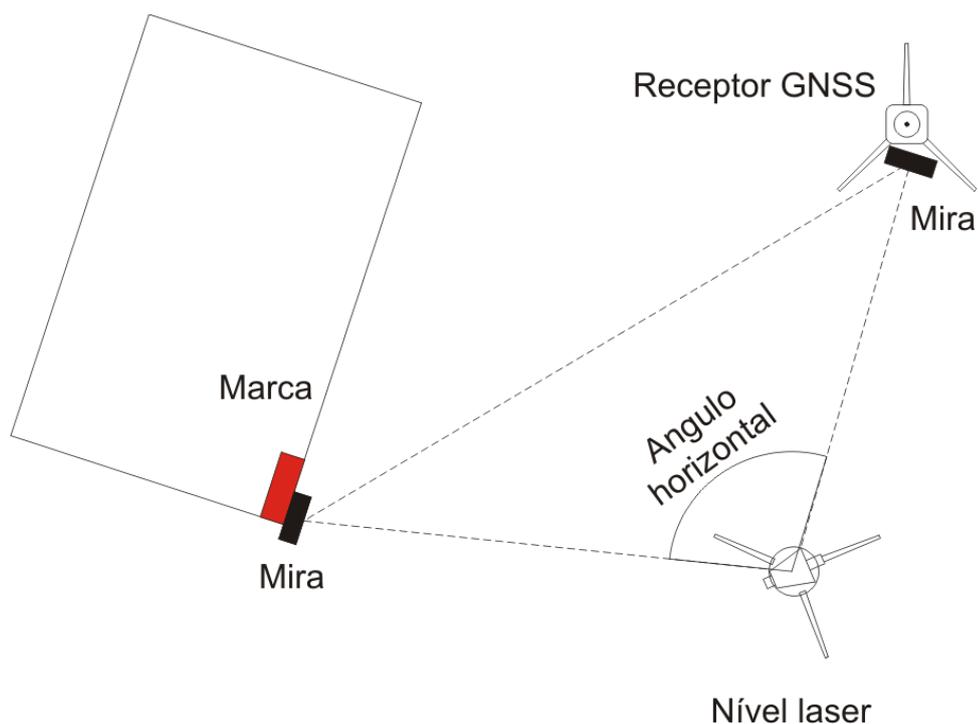


Figura 36 – Croqui de um nivelamento georreferenciado de marca de enchente.
Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 37 – Procedimento de nivelamento georreferenciado: a) marco de georreferenciamento; b) Nível laser; c) Receptor GNSS sobre o marco; d) Receptor GNSS e Nível; e) Mira, Nível e ao fundo o receptor GNSS.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro “input” da modelagem hidrológico-hidráulica foi obtido por classificação digital supervisionada de imagem de satélite de media resolução (etapa 11). O mapa dos tipos de coberturas do terreno foi obtido pela classificação de uma imagem do satélite Indiano ResourceSat 1, de fevereiro de 2010, logo, os coeficientes “n” correspondem àquela realidade na paisagem da bacia. O conhecimento de alterações na cobertura do terreno, existentes em épocas precedentes ou posteriores a esta data, podem contribuir no refinamento do modelo, possibilitando novas simulações.

Através dessa classificação determinaram-se, de forma georreferenciada, os Coeficientes de Rugosidade de Manning “n”, que representam a rugosidade enfrentada pela água no deflúvio, ao escoar sobre terreno coberto por florestas, cultivos agrícolas ou pastagens, entre outros (Vilella e Mattos, 1975).

Avaliaram-se os tipos de rugosidade predominantes no canal principal da hidrografia na bacia, em função de sua distribuição espacial. A classificação concentrou-se em seis classes de cobertura do terreno: (i) lâmina de água; (ii) florestas; (iii) campos e pastos; (iv) solo exposto; (v) cultivos altos; e (vi) arroz irrigado. Esta classificação proporcionou condições para produzir novos mapas, agrupando os tipos de cobertura do terreno com rugosidades semelhantes.

Os valores para os Coeficientes de Manning (“n”) foram obtidos de Porto (1999, p.273), sendo um tipo de rugosidade o das florestas ($n=0,12$), outro dado pelo agrupamento entre cultivos altos, cultivos de várzea, campos, pastos e solo exposto ($n=0,03$), e o terceiro o das lâminas de água ($n=0,01$).

Antes de associar as vazões de projeto aos TRs, foi necessário, previamente, introduzir os valores dos Coeficientes de Rugosidade de Manning “n” através do HEC-GeoRAS, no ArcMAP do ArcGIS Desktop®.

Na figura 38 ilustra-se a tela do HEC-RAS, que contém a interpolação dos Coeficientes de Manning, para cada trecho de seção transversal usada na modelagem.

	River	Reach	River Station	Frctn (n/K)	n #1	n #2	n #3
1	ArroioGrande	Inteiro	24441.21	n	0.03	0.12	
2	ArroioGrande	Inteiro	24267.6*	n	0.12	0.033	0.12
3	ArroioGrande	Inteiro	24094.1*	n	0.12	0.031	0.12
4	ArroioGrande	Inteiro	23920.57	n	0.03	0.12	
5	ArroioGrande	Inteiro	23684.0*	n	0.12	0.032	0.12
6	ArroioGrande	Inteiro	23447.6*	n	0.12	0.035	0.12
7	ArroioGrande	Inteiro	23211.1*	n	0.12	0.037	0.12
8	ArroioGrande	Inteiro	22974.6*	n	0.12	0.04	0.12
9	ArroioGrande	Inteiro	22738.1*	n	0.12	0.042	0.12
10	ArroioGrande	Inteiro	22501.7*	n	0.12	0.045	0.12
11	ArroioGrande	Inteiro	22265.2*	n	0.12	0.047	0.12
12	ArroioGrande	Inteiro	22028.7*	n	0.12	0.05	0.12
13	ArroioGrande	Inteiro	21792.2*	n	0.12	0.052	0.12
14	ArroioGrande	Inteiro	21555.8*	n	0.12	0.055	0.12
15	ArroioGrande	Inteiro	21319.3*	n	0.12	0.057	0.12
16	ArroioGrande	Inteiro	21082.8*	n	0.12	0.059	0.12
17	ArroioGrande	Inteiro	20846.38	n	0.03	0.12	
18	ArroioGrande	Inteiro	20604.2*	n	0.116	0.031	0.12
19	ArroioGrande	Inteiro	20362.2*	n	0.112	0.032	0.12
20	ArroioGrande	Inteiro	20120.1*	n	0.109	0.033	0.12
21	ArroioGrande	Inteiro	19878.0*	n	0.105	0.034	0.12
22	ArroioGrande	Inteiro	19635.9*	n	0.101	0.035	0.12
23	ArroioGrande	Inteiro	19393.8*	n	0.097	0.036	0.12
24	ArroioGrande	Inteiro	19151.7*	n	0.094	0.037	0.12
25	ArroioGrande	Inteiro	18909.6*	n	0.09	0.039	0.12
26	ArroioGrande	Inteiro	18667.5*	n	0.086	0.04	0.12
27	ArroioGrande	Inteiro	18425.4*	n	0.082	0.041	0.12
28	ArroioGrande	Inteiro	18183.4*	n	0.079	0.042	0.12
29	ArroioGrande	Inteiro	17941.3*	n	0.075	0.043	0.12
30	ArroioGrande	Inteiro	17699.2*	n	0.071	0.044	0.12
31	ArroioGrande	Inteiro	17457.1*	n	0.067	0.045	0.12
32	ArroioGrande	Inteiro	17215.0*	n	0.064	0.046	0.12
33	ArroioGrande	Inteiro	16972.9*	n	0.06	0.047	0.12
34	ArroioGrande	Inteiro	16730.8*	n	0.056	0.048	0.12
35	ArroioGrande	Inteiro	16488.7*	n	0.052	0.049	0.12
36	ArroioGrande	Inteiro	16246.6*	n	0.049	0.05	0.12

Figura 38 – Tela do HEC-RAS que mostra os valores do Coeficiente de Rugosidade de Manning para cada trecho das seções transversais (n#1 – margem direita; n#2 – canal principal; e n#3 – margem esquerda).

Fonte: Elaborado pelo autor.

As áreas de alagamento foram obtidas por meio da modelagem hidráulico-hidrológica, realizada com o programa HEC-RAS. Como já foi mencionado, este software necessita de parâmetros de entrada relativos à bacia hidrográfica, cujos processos hidrológico-hidráulicos devam ser modelados.

A modelagem, na etapa 12, parte da importação de uma base de dados geométricos, georreferenciados, que caracterizam tridimensionalmente o escoamento superficial da bacia. Esses dados são produzidos através do programa ArcGIS Desktop®, utilizando-se a extensão HEC-GeoRAS. Eles se constituem de vetores topologicamente orientados do canal principal e das **Seções Hidrológicas de Referência (SHR)**, que cruzam o rio em pontos estrategicamente selecionados. As seções foram mapeadas considerando-se três critérios de posicionamento:

1. Existência de marcas de enchentes;
2. A jusante das confluências dos canais, definidores das sub-bacias delimitadas através do MDT e;

3. Nos locais onde o canal principal é transposto por vias de tráfego, onde possa existir alguma estrutura para o cruzamento da água sob (ou sobre) a via, por exemplo: pontes, galerias, lajes, etc.

Para cada transecto introduzido no HEC-RAS foram ajustadas as cotas e posições das margens, bem como as cotas de fundo do canal principal, através do editor de seções transversais do programa. As medidas aplicadas nesse ajustamento provêm de levantamentos topográficos feitos nas áreas de alagamento da planície de inundação. Logo após essa etapa, foram interpolados os transectos introduzidos, dois a dois, gerando-se novos transectos, aproximadamente a cada 100 metros de intervalo.

Na etapa 13, foi feita a acumulação das vazões, das nascentes para o exutório, propagando-se as cheias sobre toda a planície de inundação. Os cálculos foram baseados na seguinte subdivisão da bacia área de pesquisas (Figura 39).

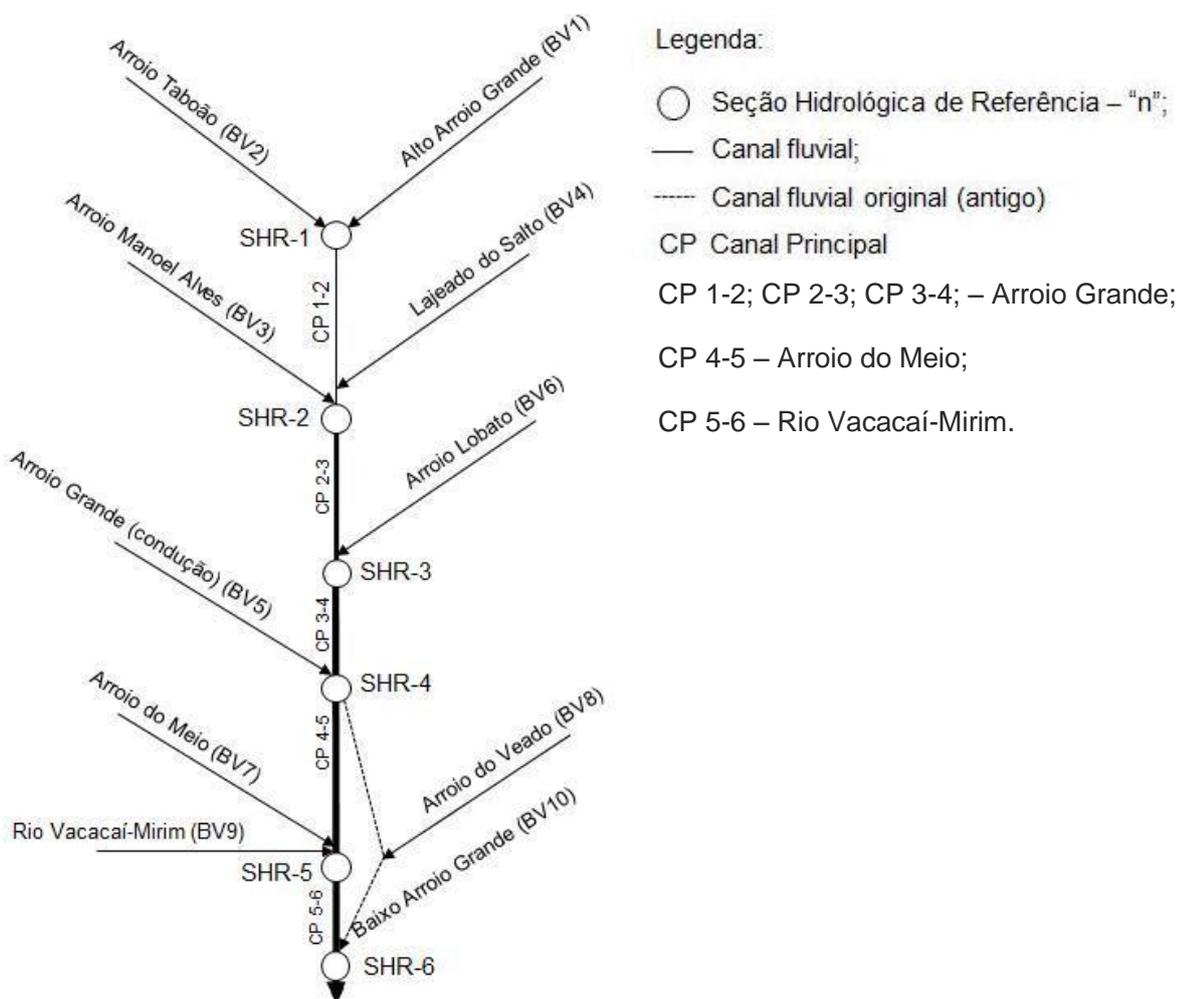


Figura 39 – Diagrama unifilar da propagação das vazões na bacia do Arroio Grande. Fonte: Elaborado pelo autor.

A SHR-1 situa-se em local a jusante da confluência da BV1 com a BV2. A SHR-2 situa-se a jusante da confluência das BVs 3 e 4 com o canal principal, acumulando a propagação das BVs 1, 2, 3 e 4. A SHR-3 foi definida na jusante da confluência da BV 6 (Arroio Lobato) com o canal principal.

Cabe mencionar que o Arroio Grande, na jusante de seu trecho médio possui uma bifurcação dividindo-o em dois arroios: o Baixo Arroio Grande e o Arroio do Meio. Este tipo de derivação fluvial é incomum em regiões com as características semelhantes às da região do estudo, que têm um padrão dendrítico na drenagem. Também, observou-se que o canal bifurcado (Arroio Grande (condução)) segue uma trajetória que o conecta ao Rio Vacacaí-Mirim, alguns quilômetros a jusante da bifurcação, formando novamente um único canal.

Diante disso, selecionou-se a SHR-4 a montante dessa bifurcação, para propagar a cheia no canal principal, acumulando-se nessa seção as vazões das BVs 1, 2, 3, 4, 5 e 6. A SHR 5 foi selecionada onde se acumulam as vazões da BV 7 e das BVs a montante desse ponto, mais a vazão da BV9. No local onde o Baixo Arroio Grande une-se ao Rio Vacacaí-Mirim, acumulando a vazão da BV8 a montante, selecionou-se a SHR-6, como ilustrou a figura 39.

A propagação das cheias sobre a bacia do Arroio Grande, desde sua seção mais a montante, até o exutório deu-se considerando a seguinte acumulação das vazões calculadas, como consta no quadro 9:

Seção Hidrológica de Referência	Propagação das cheias
SHR-1	$Q_{p\ SHR-1} = Q_p\ BV_1 + Q_p\ BV_2$
SHR-2	$Q_{p\ SHR-2} = Q_{p\ SHR-1} + Q_p\ BV_3 + Q_p\ BV_4$
SHR-3	$Q_{p\ SHR-3} = Q_{p\ SHR-2} + Q_p\ BV_6$
SHR-4	$Q_{p\ SHR-4} = Q_{p\ SHR-3} + Q_p\ BV_5$
SHR-5	$Q_{p\ SHR-5} = Q_{p\ SHR-4} + Q_p\ BV_7 + Q_p\ BV_9$
SHR-6	$Q_{p\ SHR-6} = Q_{p\ SHR-5} + Q_p\ BV_8 + Q_p\ BV_{10}$

Quadro 9 - Distribuição da propagação das cheias na bacia do Arroio Grande, conforme o Diagrama Unifilar da figura 39.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na etapa 14 do fluxograma metodológico, a modelagem hidrológico-hidráulica seguiu introduzindo-se no HEC-RAS os valores correspondentes às vazões de cheias (Q_p), que foram estimadas pelo Método I Pai Wu e posteriormente

propagadas sobre as BVs e a AA. Para atribuir os valores de Q_p às SHRs, consideraram-se as vazões acumuladas das BVs a montante de cada SHR selecionada na etapa 13.

Foram utilizados dois softwares na etapa 14:

- O ArcGIS Desktop 9.2[®]: para a produção das informações geográficas e geométricas, tais como: MDT, polígono da bacia, vetores da hidrografia e do sistema viário, altimetria, imagens de satélite e arquivos raster de fenômenos espaciais não discretizáveis;
- O HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*), aplicado no tratamento dos dados hidrológicos e hidráulicos da bacia.

O HEC-RAS é um sistema que foi desenvolvido pelo *United States Army Corp of Engineers* (USACE), e realiza diversos tipos de simulação hidrológica e hidráulica, como dimensionamento da drenagem em bacias e a geração de áreas de alagamento (AAs) em planícies de inundação, para mapeamento em SIG. É um sistema de uso livre e foi aplicado nesta metodologia por permitir dimensionar o comportamento do excesso de escoamento superficial em nível de bacia hidrográfica. Seus recursos permitiram correlacionar vazões diárias máximas estimadas em sete tempos de retorno (2, 5, 10, 25, 50, 100 e 500 anos), aos dados geográficos hidrológicamente orientados.

A integração dos dados geográficos aos dados hidrológicos deu-se através da extensão HEC-GeoRAS, que integra ao ArcMap do ArcGIS Desktop[®] as ferramentas de edição e gerenciamento de bases de dados geográficos (*geodatabases*) utilizadas pelo processamento dos dados no HEC-RAS.

Efetuuou-se um procedimento simplificado para a determinação da área de inundação, já que as ferramentas de edição do HEC-RAS permitem editar estruturas como pontes, galerias, bueiros, diques, vertedouros e represamentos. Porém, para o tipo de análise desta metodologia, o ajuste na posição das margens e dos talvegues nas SHRs, a delimitação da AA e das cotas de nível da água foi suficiente.

Os procedimentos aplicados no mapeamento das áreas de inundação seguiram uma sequência de etapas ilustrada no esquema da figura 40.

Inicialmente, editou-se o MDT hidrológicamente consistente (etapa 10). A partir desse MDT efetuou-se a edição do canal principal da bacia (“*Stream Center Line*” no HEC-GeoRAS). Transversalmente a esse fluxo editaram-se as linhas de corte das seções.

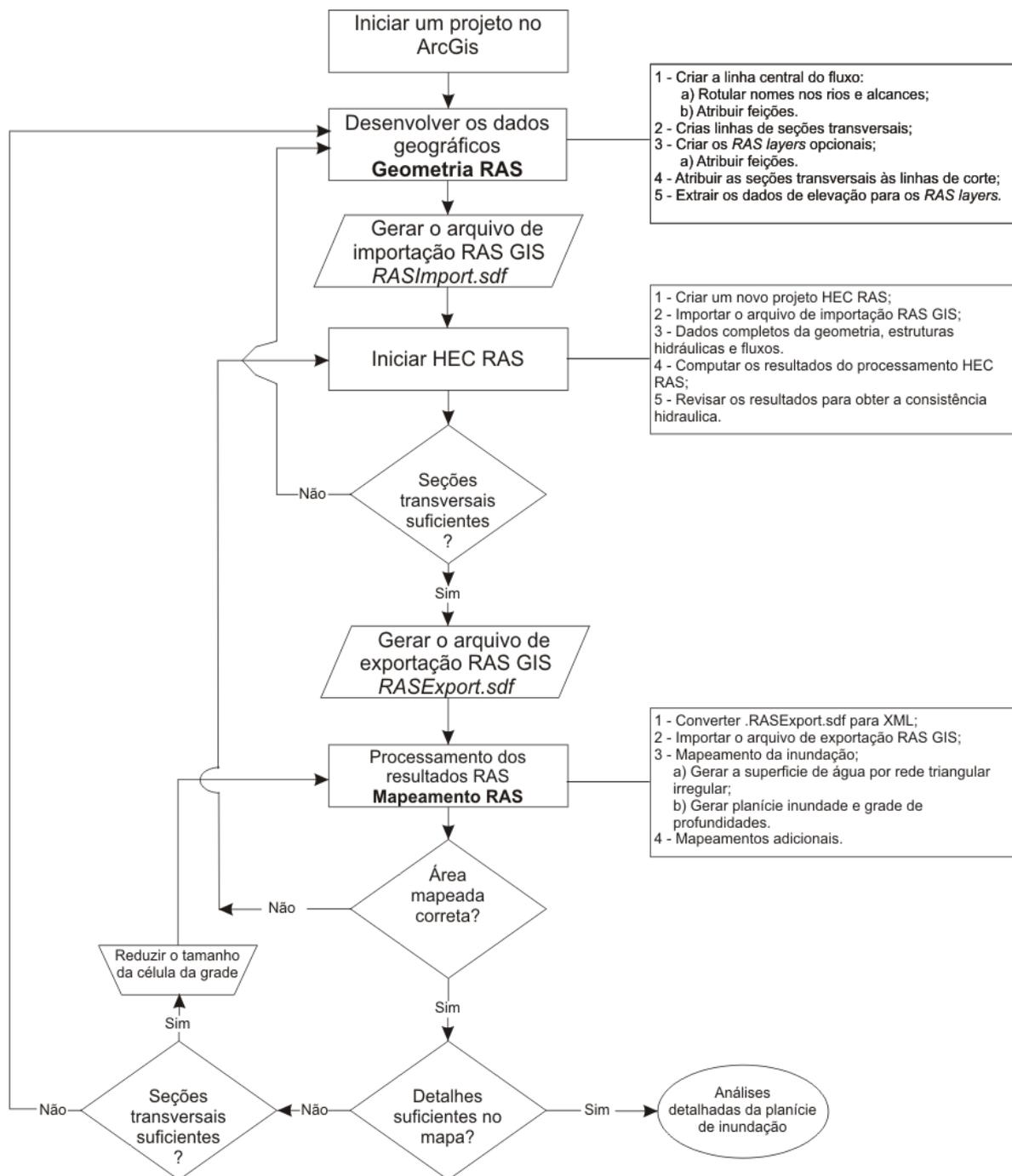


Figura 40 – Diagrama de fluxos de geoprocessamento do HEC-GeoRAS.

Fonte: HEC-GeoRAS GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS®. User's manual, Version 4.3.93, February, 2011. US Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center.

Depois de esses dados estarem hidrológicamente ajustados, através do HEC-GeoRAS, via ArcGIS Desktop®, o processo seguiu realizando-se a modelagem hidrológico-hidráulica no HEC-RAS. Primeiramente o processamento dos dados exigiu a plotagem e o ajuste da geometria, com os dados do canal principal e suas seções transversais (etapa 12).

A fase seguinte foi a de inserção das vazões calculadas na etapa 13. Nesta etapa é que ingressaram os valores das vazões de projeto (Q_p), estimadas pelo Método de I Pai Wu, para os TRs selecionados. Os TRs definiram os perfis verticais dos níveis de água sendo que, quanto maior o TR, teoricamente, mais alto o nível da água no perfil de inundação, pois maior é a Q_p propagada.

Os TRs definidos para formar cenários simulados de AAs foram selecionados em função da existência de chuvas com marcas observadas, que pudessem, adiante, comprovar os resultados. Os TRs (2, 5 e 10 anos) correspondem a valores representativos das ocorrências, para as quais, durante a pesquisa, foram mapeadas marcas de enchentes. Os valores de TR de 25, 50, 100 e 500 anos também foram analisados, por serem referências para projetos de engenharia, tais como pontes, estradas, barragens etc.

Para modelar as áreas de inundação no HEC-RAS, fez-se a interpolação geométrica de 17 seções transversais, previamente ajustadas. Essa interpolação gerou 207 novas seções transversais que foram, posteriormente, usadas na modelagem da AA. A figura 41 ilustra a distribuição das seções transversais no editor de geometrias do programa HEC-RAS. As linhas em verde escuro mostram as seções editadas no HEC-GeoRAS e em verde claro as seções interpoladas com o HEC-RAS; a linha vermelha mostra as margens do canal principal.

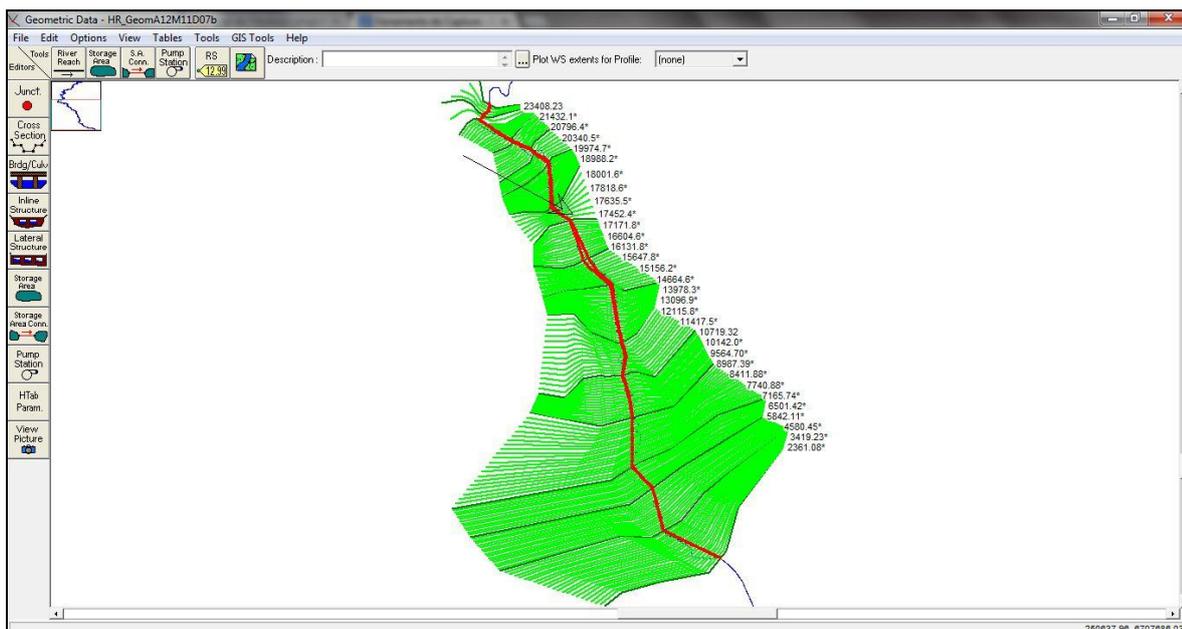


Figura 41 – Geometria das feições hidrológicas usadas na modelagem das áreas de alagamento através do HEC-RAS.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Subsequentemente à interpolação de seções transversais, modelou-se a propagação das cheias de projeto (Q_p). Para isso inseriram-se os valores de vazão para SHRs previamente selecionadas.

Também, na etapa 14, foi necessário definir as condições de limite do sistema fluvial. Uma superfície de água de “partida” é necessária para que o programa inicie os cálculos. A soma das Q_{ps} das BVs 1 e 2, atribuída à SHR-1, corresponderá à superfície de água gerada nessa seção, seguindo a mesma lógica para as outras SHRs definidas para o início da modelagem.

Avaliando-se a disponibilidade de dados de observação das cheias antigas, para os TRs 2 e 5 anos, as condições de limite foram definidas a partir do nível conhecido da água, visto que o programa disponibiliza esta opção (“*Known W.S.*”). Para TRs de 10 anos ou mais, as condições de partida do sistema foram definidas pela profundidade normal. Entretanto, neste caso deve-se conhecer a declividade da linha de energia da água entre as seções de montante e de jusante, uma vez que o programa assume essa informação como base para o cálculo da profundidade normal em cada seção, através da equação de Manning.

Para inserir a declividade da linha de energia da água, o valor aceito pode ser equivalente ao caimento do fundo do canal, expresso numericamente em m/m. Note-se que a seção de montante corresponde à SHR-1 e a seção de jusante, à SHR-6, que é o exutório da bacia do Arroio Grande na confluência com o Rio Vacacaí-Mirim.

Satisfeitas essas condições para o programa proceder aos cálculos, fez-se a primeira simulação das cheias propagadas pelas BVs. A figura 42 mostra os parâmetros de calibração para as condições limite do sistema fluvial, atribuídas aos perfis de TR. Os valores atribuídos à jusante, nos TRs 2 e 5 anos, são cotas de nível procedentes de marcas de enchentes, levantadas topograficamente na SHR-1.

River	Reach	Profile	Upstream	Downstream
Arroio Grande	Inteiro	TR 2	Known WS = 129.5	Normal Depth S = 0.0005
Arroio Grande	Inteiro	TR 5	Known WS = 131.5	Normal Depth S = 0.0005
Arroio Grande	Inteiro	TR 10	Normal Depth S = 0.008	Normal Depth S = 0.0005
Arroio Grande	Inteiro	TR 25	Normal Depth S = 0.008	Normal Depth S = 0.0005
Arroio Grande	Inteiro	TR 50	Normal Depth S = 0.008	Normal Depth S = 0.0005
Arroio Grande	Inteiro	TR 100	Normal Depth S = 0.008	Normal Depth S = 0.0005
Arroio Grande	Inteiro	TR 500	Normal Depth S = 0.008	Normal Depth S = 0.0005

Figura 42 – Calibração das condições de limite do sistema fluvial na bacia.
Fonte: Processamento via HEC-RAS, elaborado pelo autor.

Na etapa 15 realizou-se a validação dos cenários de enchentes. Foram comparados os níveis de água das SHRs resultantes da simulação, aos níveis observados das marcas de enchentes. As cotas dessas marcas serviram de base para a validação dos cenários de AAs. No processamento dos dados, as AAs foram determinadas em função de vazões (Q_p) para TRs, que foram definidos em função de precipitações diárias, equivalentes às acumuladas nas datas das marcas de enchentes niveladas.

A figura 43 ilustra a definição dos níveis de superfície de água, que foram coletados no inventário das marcas de enchentes, na área da pesquisa. Não foram introduzidos valores para TRs maiores que 10 anos por não existirem.

	River	Reach	RS	Dn Dist	TR 2	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100	TR 500
1	Arroio Grande	Inteiro	23019.35	9.8	129.5	131.5					
2	Arroio Grande	Inteiro	22833.98			128.68					
3	Arroio Grande	Inteiro	22646.6*	19		128.3					
4	Arroio Grande	Inteiro	21522.93			118.2					
5	Arroio Grande	Inteiro	20705.6*	12		113.67					
6	Arroio Grande	Inteiro	20614.88	7		113.3					
7	Arroio Grande	Inteiro	20523.4*			112.64					
8	Arroio Grande	Inteiro	19883.33			107.5					
9	Arroio Grande	Inteiro	19386.0*			104.18					
10	Arroio Grande	Inteiro	18491.0*	14.3		100.52					
11	Arroio Grande	Inteiro	17360.94	29		93.03					
12	Arroio Grande	Inteiro	11517.3*			76					
13	Arroio Grande	Inteiro	11417.5*			74					
14	Arroio Grande	Inteiro	11218.0*	40		74.34					
15	Arroio Grande	Inteiro	10918.8*		73.6	74.7	74.66				
16	Arroio Grande	Inteiro	10819.0*		74.72	73.84	74.62				
17	Arroio Grande	Inteiro	10719.32		74.12	74.2					
18	Arroio Grande	Inteiro	6124.67*	20		67.82					
19	Arroio Grande	Inteiro	6030.49*	32		67.97					
20	Arroio Grande	Inteiro	5936.30*	9		67.85					
21	Arroio Grande	Inteiro	5842.11*			67.86					

Figura 43 – Atribuição dos níveis observados das marcas de enchentes às respectivas SHRs.

Fonte: Processamento via HEC-RAS, elaborado pelo autor.

Em cada SHR observou-se o nível modelado para um TR qualquer (5 anos, por exemplo), que foi comparado ao nível da marca de enchente. Dessa comparação foram determinadas as diferenças entre as medidas observadas e as simuladas (Δ =Valor da cota da ME observada – valor da cota da ME calculada).

O HEC-RAS possibilita visualizar a linha e a cota observada da água (“*Observed WS*”) sobre um perfil de inundação, em uma SHR qualquer. A partir

dessa informação, avaliou-se o ajustamento (“aderência”) do cenário simulado ao cenário real, do passado.

Na etapa 15 existem dois caminhos possíveis para a confirmação da simulação das AAs. No primeiro, quando uma medida simulada resultar igual ou menor que 0,3m do valor da medida de campo – “solução direta”, mantem-se a simulação e valida-se a área de alagamento (AA). No segundo, se a medida simulada for maior que 0,3m da medida de campo, é necessário ajustar o nível simulado nessa seção e retornar à etapa 14, para o programa redistribuir a propagação das vazões entre as seções com níveis ajustados e seções sem ajuste. O critério de 0,3m refere-se à máxima tolerância admitida na parametrização do modelo, para calcular os níveis de água (N_{HR}), gerados por iterações nas SHRs de jusante e montante (reciprocamente), a partir dos níveis obtidos em função da vazão informada (Q_p).

Considerando a condição de ajuste dos perfis transversais das SHRs, isso foi realizado introduzindo-se em campo específico do programa HEC-RAS (“*Set Changes in WS and EG*”) a cota observada do nível da água. As mudanças na superfície da água e no grau de energia podem ser definidas para um perfil específico em um modelo de perfil múltiplo.

A modelagem hidrológica de vazões de enchentes, estimadas a partir dos dados pluviométricos diários; a propagação das cheias de projeto sobre as seções hidrológicas de referência (SHRs), juntamente com o MDT e as cotas das marcas das enchentes foram os principais instrumentos utilizados na determinação das áreas de alagamento (AAs).

Do processamento realizado pelo HEC-RAS, posteriormente, editado no ArcMap do ArcGIS 9.2 Desktop[®], resultaram os mapas das áreas alagadas pelas chuvas causadoras de cheias na área de pesquisas. No capítulo 4 – Resultados e Discussão são apresentados os mapas de áreas de alagamento para os cenários que foram ajustados e validados por meio do uso de marcas de enchentes.

3.2.4 Segunda fase: “*Mobilidade viária rural = f (Pp, Aa)*”

Pelas reincidências de inundações em trechos de estradas, observadas *in loco* na região do estudo, viu-se a necessidade de desenvolver um meio que informasse à Defesa Civil e às comunidades sobre deslocamentos desobstruídos, ou

que não foram inundados, para serem utilizados como meio de fuga com antecedência durante as cheias.

Em condições sem enchente, pressupôs-se haver normalidade no nível topográfico do rio. Em situações de enchentes as seções de referência dos cursos de água, formadas nos cruzamentos da rede de drenagem com a rede viária, forneceram importantes registros dos níveis que as águas atingiram durante os picos das enchentes. Outras medidas de cotas de enchentes em adjacências do canal fluvial também foram representativas para a delimitação da área de alagamento (AA), quando alguma enchente ocorreu.

Em termos metodológicos, para a estruturação de um sistema de apoio à gestão em situação de calamidade por enchentes, deve-se dispor de uma régua no rio que sinalize a respeito da área alagada. A cada nível do rio – em seção fluvial tomada como referência – estará sempre associada uma área inundada. Tais seções fluviais de referência foram definidas por cruzamentos da hidrografia com a rede viária.

Para a estruturação de um sistema de apoio em calamidades de enchentes, necessita-se dispor de um parâmetro de entrada (nível da água em seção a montante) que indique o grau do risco iminente. Para o caso da bacia do Arroio Grande, inventariou-se não haver monitoramento fluviométrico de rotina ao longo do tempo, que permitisse desenvolver modelagem chuva-vazão. As únicas seções de referência encontradas foram nas pontes, cujos pilares conservavam importantes marcas dos picos de cheias.

O estudo da mobilidade rural, na área da pesquisa, considerou o sistema viário como um elemento da paisagem que não se restringe aos limites das bacias. Então, a estrutura viária adotada para o planejamento da mobilidade rural, consistiu de um polígono e seus acessos a qualquer lugar no interior da bacia.

A estratégia aplicada foi definir o menor polígono possível de ser percorrido durante uma enchente. Georreferenciando, avaliando e percorrendo *in loco*, nos trajetos realizados durante o período da pesquisa, foi avaliada a capacidade do tráfego estar submetido a riscos de obstrução da mobilidade rural, durante eventos de chuvas extremas, com diferentes períodos de retorno.

O mapeamento desse polígono pode ser descrito a partir do divisor de águas entre as Regiões Hidrográficas do Lago Guaíba e do Rio Uruguai – a BR-158, que delimita a bacia do Arroio Grande, na sua porção noroeste. Essa rodovia também

atravessa a região de estudo no sentido Norte-Sul, estendendo-se por toda a área urbana do município de Itaára, na porção mais alta da bacia, situada na Região do Planalto e percorre o rebordo da Serra Geral até encontrar a RS-509, já na Depressão Central do RS. O polígono segue pela RS-509 até a junção com a Avenida João Machado Soares, no bairro Camobi, e vai até encontrar a estrada Norberto José Kipper (ERS-511), que cruza a planície de inundação do Rio Vacacaí-Mirim, em direção ao Distrito de Arroio Grande. Estende-se até o trevo da junção com a Rodovia do Imigrante (VRS-804), que liga a RS-509 ao Município de Silveira Martins. Ao passar pela área urbana de Silveira Martins o delineamento do polígono viário segue em direção a nordeste e inflexiona em rumo noroeste, seguindo em direção ao Município de Ivorá. No trevo de ligação entre as estradas que unem Silveira Martins, Ivorá e Val de Serra (Distrito de Júlio de Castilhos) o polígono, fechando-se no ponto de origem – o trevo da localidade de Val de Serra, na BR-158.

Para mapear esse polígono viário e classificá-lo foram utilizados diferentes tipos de veículos e equipamentos, e considerou-se factível, num primeiro momento, o georreferenciamento da rede viária a partir de receptor GPS de navegação embarcado em automóvel, motocicleta ou bicicleta.

Os estudos de Emmerich et al. (2005 p. 1-6), mostraram ser viável a utilização de receptores GPS de navegação, de simples manuseio, para coletar dados espaciais. Os testes feitos pelos autores foram realizados com um GPS de baixo custo e indicaram que o mesmo, em levantamento cinemático, resultou em erros absolutos de 11 metros e relativos de 2 metros (*essa referência fundamentou a escolha pelo georreferenciamento e classificação de estradas, usando um receptor GPS de navegação*²⁷).

Ao sistema viário foram atribuídas cotas altimétricas, oriundas do MDT, de maneira que fosse possível ter os trajetos das estradas com a espacialização planialtimétrica e, com isso, determinar as declividades dos trechos.

Nas estradas que permitiram o tráfego de automóvel os percursos foram realizados com esse tipo de veículo, com um receptor GPS de navegação da marca Garmin® modelo *E-trex Vista*, embarcado. Nas estradas da várzea de inundação foram utilizados receptores GNSS de dupla frequência, um da marca Topcon® modelo *Hiper Lite* (base e móvel) e outro da marca Leica (receptor base Leica 1200

²⁷ Nota do autor.

com radio externo *Pacifi Crest* para 15 km RTK e o receptor móvel modelo CS09). Ambos os equipamentos foram usados coletando dados no modo RTK. Os pontos de trajeto obtidos nos diversos percursos realizados foram pós-processados, referenciando-se à base Santa Maria (SMAR) da RBMC, o que garantiu maior precisão e acurácia posicional planialtimétrica.

Os dados coletados com receptores GNSS, além de permitir mapear trechos de vias, também serviram para adensar a amostragem de pontos 3D, no processo de construção do MDT, na planície de inundação. Em outras vias, cujos percursos eram intrafegáveis de carro, fez-se o mapeamento de bicicleta ou a pé.

3.2.4.1 Mobilidade rural durante as cheias

Em condição potencial de enchente, com solos saturados nas regiões ribeirinhas; leitos de arroios obstruídos por troncos de árvores e taquareiras; e ausência de matas ciliares, rapidamente o nível das águas sobe e extravasa o leito, inundando as margens e arredores.

À medida que a duração da chuva vai prolongando-se, o nível dos arroios vai subindo e, conseqüentemente, a área de alagamento progressivamente vai aumentando. Por causa desse efeito, considerando-se as vazões de projeto (Q_p) e relacionando os índices de precipitação com os níveis atingidos pelas águas, obteve-se uma curva: *Precipitação diária máxima x Área de Alagamento (AA)*.

Por meio do SIG essa AA foi espacializada e foi possível operar algebricamente a relação com a rede de linhas (trechos) e pontos (elos) do sistema viário. Dessa relação obteve-se a quantidade de quilômetros e a localização das estradas circunscritas pelo polígono de alagamento, modelado para uma determinada chuva diária máxima, que pode também ser expressa por seu TR.

A partir dessas predefinições elaborou-se para o período de cheia um sistema de apoio ou subsídio às ações da Defesa Civil, cujo desenvolvimento objetivou gerar mapas temáticos da rede viária potencialmente inundável. Esses mapas foram estruturados por trechos e elos que ficam circunscritos pelo polígono da AA.

Os elos viários (pontos) foram constituídos pelos cruzamentos entre estradas (encruzilhadas) e de estradas com arroios (seções). Os trechos de estradas (linhas) caracterizaram-se por ser cada segmento de linha entre os nós. É importante considerar que pela análise topológica observa-se que um nó obstruído inviabiliza o

tráfego pelo arco, porém um segmento parcialmente obstruído não inviabiliza um nó desobstruído.

Para obter esse quantitativo fez-se a interseção entre os vetores do sistema viário e o polígono das AAs, simuladas com o HEC-RAS. A partir do estabelecimento deste atributo pode-se dispor de um mapa do sistema viário com maior fragilidade natural de obstrução, em função de uma calamidade (AA) simulada.

O produto desse cruzamento foi obtido utilizando-se a ferramenta “Clip” do menu de ferramentas “Spatial Analyst” do ArcGIS 9.2[®]. O mapa temático dessa relação é apresentado no capítulo dos resultados. A figura 44 ilustra como se fez a circunscrição do polígono de inundação sobre as linhas do sistema viário.

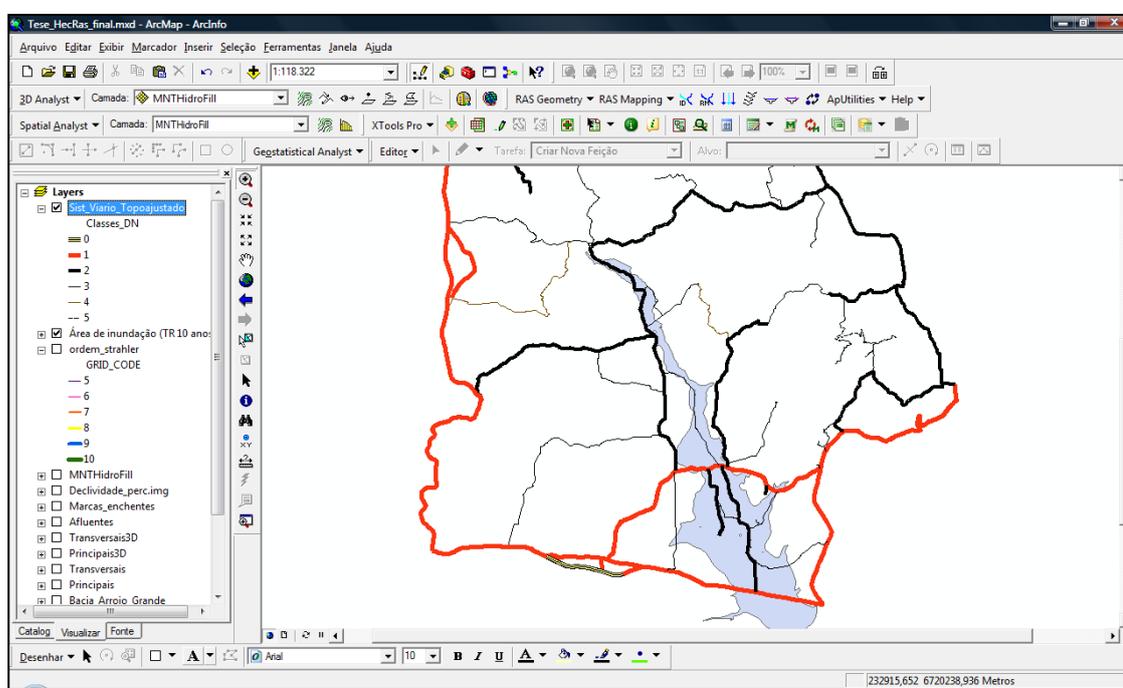


Figura 44 – Polígono da área de inundação (azul) circunscrevendo as linhas que formam o sistema viário na bacia hidrográfica – área de pesquisas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao simular a relação entre a precipitação e a área de alagamento buscou-se simplificar a relação de causa/efeito entre as chuvas e as enchentes. Os objetivos do estudo buscaram desenvolver mecanismos de prevenção e superação destas calamidades, como, por exemplo, a possibilidade de planejar rotas de fuga contornando as AAs, ou a manutenção periódica e sistemática dos locais com fluxos cruzados (viário e hidrográfico) considerando sua fragilidade, em caso de cheias.

Ocorre que os fatores de maior influência para a inundação de estradas são a proximidade de cursos de água, a altitude e a declividade do leito menor e de regiões ribeirinhas. Tais fatores potencializam a fragilidade natural dos locais submetidos às inundações, de tal maneira que se realizou uma análise da fragilidade sistema viário em períodos fora de cheias, em função dessas condições topográficas.

3.2.4.2 Mobilidade rural fora das cheias

Para obter indicadores da mobilidade rural durante os períodos em que as cheias não ocorrem, necessitou-se caracterizar o sistema viário por meio de critérios definidores da condição de fragilidade do sistema sofrer, em maior ou menor grau, o impacto das enchentes e inundações.

A relação direta obtida pelo cruzamento entre uma estrada e um arroio foi dada pelo produto da classe de mobilidade da estrada *versus* a ordem fluvial do curso de água, no ponto de interseção. Os nós de seções transversais foram então categorizados a partir do produto dessa multiplicação, definindo o grau de fragilidade natural para a mobilidade, em cada local.

Foi necessário mapear, atualizar e classificar todo o sistema viário, cuja logística mantém as relações sociais e econômicas das comunidades rurais da região do estudo.

Sobre os dados dos levantamentos para reconhecimento, georreferenciamento e atualização do sistema viário foi realizada a classificação da trafegabilidade nas estradas percorridas, que se baseou, primordialmente, na condição das pessoas locomoverem-se de um local de risco para um local seguro, assim como poderem ser resgatadas, em casos de isolamento.

Conforme citado na literatura revisada, a classificação usada fundamentou-se no “*Manual de abreviaturas, siglas, símbolos e convenções cartográficas das Forças Armadas*”, do Ministério da Defesa do Brasil, (MD33-M-02, 3ª edição) publicado em 26/03/2008, que no item 7.2.1.2, na página 322, define que: “o número de faixas de uma rodovia é determinado pelo menor múltiplo de 3m, abrangido pela largura do leito”.

As definições de cada classe seguiram o item 7.2.1.3 do manual MD33-M-02, e foram complementadas em algumas características observadas *in loco*. Atribuiu-se

um índice dado em função de cada classificação, chamado de **Índice de Resistência à Mobilidade (IRM)**, que parte do valor 0 (zero), classe de mínima resistência e máxima fluidez, e vai até 5 para a classe de máxima resistência e mínima fluidez de tráfego, como mostra o quadro 10.

Classe de mobilidade viária	Tipificação	IRM
Autoestradas (Classe especial)	Rodovias de asfalto, concreto ou calçamento, com um número de 4 faixas, isto é, no mínimo 12 metros de largura, apresentando separação física entre pistas de tráfego (muretas ou canteiro central);	-
Rodovias pavimentadas (Classe 1)	Rodovias de asfalto, concreto ou calçamento, com um número variado de faixas, inferior a 4 pistas sem separação física entre as pistas de tráfego;	1
Rodovias não pavimentadas (Classe 2)	Rodovias transitáveis durante o ano com revestimento solto ou leve (<i>estradas de chão entre povoados</i>), que permite o tráfego mesmo em época de chuvas, com um número variável de faixas;	2
Rodovias de tráfego periódico (Classe 3)	Rodovias transitáveis somente em tempo bom e seco, com revestimento solto ou sem revestimento e largura mínima de 3,0m (<i>estradas de chão que ligam os lugarejos entre si e aos povoados</i>); são estradas com pouca ou nenhuma conservação e de traçado irregular;	3
Caminhos (Classe 4)	Vias transitáveis somente em tempo bom e seco, sem revestimento, caracterizado pela inexistência de conservação permanente, com piso e traçado irregulares; geralmente impraticáveis ao tráfego de veículos a motor, com largura média inferior a 3,0m;	4
Trilhas (Classe 5)	Vias sem revestimento ou conservação, com pisos e traçados irregulares, só permitindo o tráfego a pé ou de animais.	5

Quadro 10 – Classificação do sistema viário e do índice IRM.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O IRM foi definido como um índice aplicado à topologia de linha (estradas) e possibilitou a geração de outro índice, elaborado para determinar o grau de risco de uma estrada ser usada quando toda a bacia hidrográfica estiver submetida a um evento de enchente. Esse segundo índice categorizou a fraqueza do sistema viário e teve por objetivo espacializar os locais (pontuais) de risco de uma enchente produzir situações de falta de mobilidade às comunidades da bacia. Ele foi denominado de **Índice de Fragilidade Pontual (IFP)**, e foi definido para os cruzamentos do sistema viário com a rede de drenagem.

Os trechos viários podem ser obstruídos em parte ou no todo pelas cheias, que atingem as estradas de forma diferenciada, conforme sua topografia, seu tipo de pavimento e seu escoamento lateral. Já os cruzamentos entre o sistema viário e a

hidrografia caracterizam-se por maior suscetibilidade à obstrução, quanto maior for o fluxo acumulado na rede hidrográfica, a montante da seção do arroio com a estrada.

Para categorizar os cruzamentos, para relacioná-los ao grau de risco à obstrução viária, em função da magnitude do fluxo a montante, fez-se o ordenamento fluvial segundo o **Método de Strahler**. Esse método considera a magnitude do escoamento fluvial como acumulativa da montante para a jusante, como ilustra o esquema da figura 45.

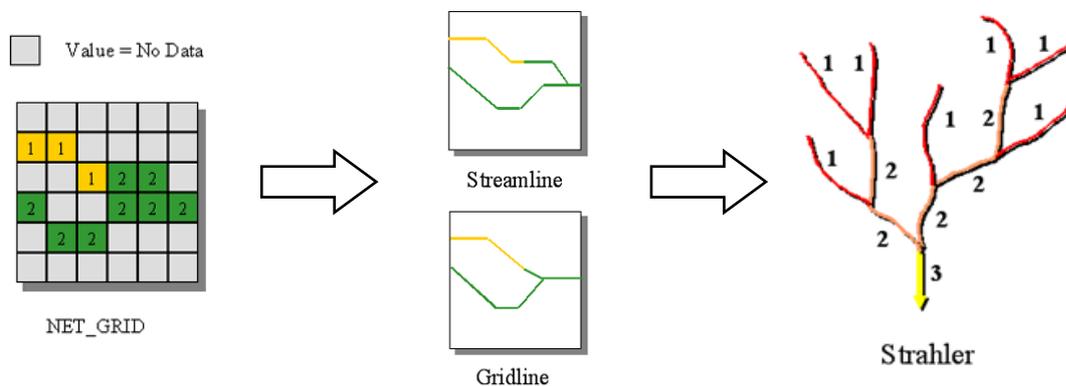


Figura 45 – Ordenamento fluvial realizado a partir do MDT no software ArcGIS 9.2.
Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado do manual de ajuda do ArcGIS 9.2.

O estabelecimento dos critérios de vulnerabilidade das estradas, em função da ordem do canal de drenagem relaciona-se diretamente com o potencial de inundação desse canal. Dos critérios de fragilidade (tangência ou cruzamento com a hidrografia; altitude e declividade) o cruzamento é o que possui, teoricamente, a maior influência para a falta de mobilidade, pois os tipos de cruzamentos entre rios e estradas rurais, frequentemente caracterizam-se por pontes de madeira ou por lajes (pranchadas), que facilmente ficam submersas.

Classificar os canais da rede de drenagem foi importante, pois assim foi possível categorizar-se o grau de influência que o curso de água pode ter sobre uma determinada estrada que o perpassa ou tangencia. Também permitiu inferir sobre os locais de mais concentração do escoamento superficial, em função da ordem do curso de água, definida pela classificação de Strahler. Essa classificação possibilitou identificar para cada cruzamento “*estrada x arroio*”, qual a ordem de Strahler (arroios) cruza o IRM (estradas), resultando no valor do IFP.

Para classificar os arroios da bacia do Arroio Grande quanto suas ordens de fluxo, utilizou-se o mesmo MDT que originou as áreas de inundação. No ArcMap, a

partir da ferramenta “*Hidrology*” foi possível categorizar o modelo hidrográfico de escoamento, gerado automaticamente pelo software. Esse modelo hidrográfico desconsidera todos os demais fatores relacionados ao movimento da água na superfície, tomando como referência apenas as diferenças de nível existentes entre o pixel mais baixo da bacia – pixel do exutório – e seus pixels adjacentes, até os pixels delimitadores do divisor de águas.

Na classificação de Strahler obteve-se uma hierarquização das bacias em estudo em dez ordens. Os canais de 1ª à 4ª ordem não foram tratados como possíveis causadores de obstruções sobre o sistema viário. Isso foi definido a partir da verificação na escala de representação desses vetores, quando considerados no ambiente natural, onde representam ravinas ou canais de fluxo intermitente, confirmados por reambulação de campo. As ordens acima da 4ª foram mapeadas.

Para atribuir uma característica da existência física do IFP, correlacionaram-se os intervalos de valores do IFP aos tipos de estruturas existentes na bacia da área de pesquisas. O mapa temático da classificação da rede de drenagem pelo Método de Strahler, na área de pesquisas e os resultados dos cruzamentos do IRM com a Ordem de Strahler são apresentados no capítulo 4.

3.2.4.3 Condicionantes de vulnerabilidades das estradas na bacia

Na determinação das fragilidades das estradas rurais em bacias hidrográficas, consideraram-se também, como aspectos chave, aqueles que caracterizam o grau de vulnerabilidade do local quanto à formação do relevo, segundo suas altitudes e declividades. Essa avaliação baseou-se na susceptibilidade que o solo tem à erosão, especialmente quando a limitação do uso é imposta pelo relevo, como define Ramalho Filho e Beek (1995, p.31).

Desta forma foi elaborada uma categorização da bacia, de acordo com suas características geomorfométricas, mapeadas e manipuladas no SIG. As altitudes foram espacializadas pelas cotas de cada pixel do MDT, sendo obtidas diretamente. Podem ser representadas por meio de classes, no entanto optou-se por relacionar o valor nominal de cada pixel do MDT ao pixel do trecho de estrada. A influência da altitude sobre o sistema viário é expressa pelo maior grau de fragilidade, quanto mais baixo for o relevo no trecho da estrada, sendo inversamente proporcional.

Para espacializar as declividades, a classificação adotada pela EMBRAPA (2009, p.287) foi adaptada à metodologia desta tese. Nela, têm-se seis classes, variando de 0% até acima de 75% de inclinação. A atribuição de valores para a fragilidade considerou a combinação do fator “declividade” com o fator “altitude”, pois as chuvas extremas produzem consequências diferentes na mobilidade, conforme essa variação.

Atribuiu-se uma classe de declividade para cada segmento de via, que contém vértices com cotas conhecidas. Com as cotas dos vértices, cada segmento assumiu uma declividade definida para uma determinada altitude. O quadro 11 mostra esta classificação.

Classes de declividade	Grau de fragilidade
Plano (0 a 3%)	Alto (na planície) e Baixo (no planalto)
Suave ondulado (3 a 8%)	Moderado (na planície)
Ondulado (8 a 20%)	Baixo
Forte ondulado (20 a 45%)	Moderado (na encosta)
Montanhoso (45 a 75%)	Alto (na encosta)
Escarpado (> 75%)	Máximo

Quadro 11 – Classificação das declividades e do grau de fragilidade das estradas.

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Embrapa (2009, p.287).

As definições das fragilidades, para as classes de declividades, foram caracterizadas considerando o potencial de obstrução de algum trecho de estrada, dado pela condição de existência desse trecho sobre uma determinada declividade, sobre uma altitude conhecida. Essa influência pode ser momentânea, como em uma estrada submersa, por exemplo; até duradoura (ou permanente) como em um trecho de estrada rompido por um deslizamento de terra, em uma encosta íngreme.

Há que se considerar que a combinação dos fatores declividade e altitude possuem um comportamento não linear. As mais baixas declividades podem ocorrer nas baixas e nas elevadas altitudes, sendo inexistente a condição de uma elevada declividade em baixas altitudes, pois esses locais formam a planície de inundação, que contém as áreas de alagamento da bacia.

Desta forma os critérios de vulnerabilidade associados à declividade foram assim estabelecidos:

- a) **Alto (na planície)** – A classe de declividades de 0% a 3%, nas altitudes baixas (planícies de inundação) concentra um dos maiores graus de vulnerabilidade para o sistema viário, pois, nessas áreas, as estradas

estão permanentemente submetidas ao empoçamento da água, que pode levar à obstrução da passagem de veículos e pessoas (Figura 46). Esses locais também são predominantemente cultivados com arroz irrigado e, como já foi mencionado, esse manejo agrícola agrava a vulnerabilidade de toda a planície ribeirinha;



Figura 46 – Estrada (IRM=3) em área ribeirinha plana, obstruída pelo transbordamento de arroio (esquerda). Data: 13/09/2010. Foto: Alessandro Miola.

Fonte: Acervo do autor.

- b) **Moderado (na planície)** – locais próximos às várzeas aluviais e regiões ribeirinhas, nos quais a declividade varia de 3% a 8%, com inclinação do terreno variando de 1°43' até 4°34'. Nessas rampas, principalmente nos locais mais planos, a concentração da água nas pequenas depressões do relevo pode gerar acúmulos, que potencializam o efeito das chuvas extremas, quando reincidentem em dias sucessivos. Os terrenos com esse grau de inclinação são predominantemente ocupados com lavouras de arroz, cujos espaços cultivados foram manejados por nivelamento e terraplanagem, para a retenção proposital da água; assumem um grau

moderado na fragilidade, pois, conforme a época do ano, as áreas sistematizadas ficam inundadas com uma lâmina de água, própria do manejo agrícola do arroz;

- c) **Baixo** – locais com declividades que vão de 8% a 20% em áreas com rampas de inclinações entre 4°34' a 11°18', onde o ângulo do terreno que assegura o escoamento superficial livre de empoçamentos, salvo pela existência de pequenos diques ou represamentos localizados, por deposição de entulhos, por exemplo;
- d) **Moderado (na encosta)** – nesses locais as estradas dificilmente sofrem empoçamentos. Porém, pela declividade estar na faixa de 20 a 45%, essas áreas apresentam forte susceptibilidade à erosão, aspecto impróprio para a manutenção da trafegabilidade das estradas rurais. É o grau de vulnerabilidade decorrente do relevo forte ondulado, encontrado em áreas de sopés de morros e transições entre planícies e planaltos. Essas áreas possuem ocupação maior com a pecuária, porém é comum observar pequenas lavouras de subsistência e reflorestamentos. A influência dessa declividade na trafegabilidade se dá no sentido do aumento da inclinação das rampas, à medida que esse ângulo tende para 25°, pois o escoamento superficial turbulento gerado por essa declividade pode ocasionar sulcos no leito das estradas, caso as mesmas não tenham drenagens eficientes nas laterais (canalização em valetas);
- e) **Alto (na encosta)** – eleva-se o grau de vulnerabilidade do sistema viário, à medida que a declividade também aumenta, já que os processos erosivos são acentuados em função do aumento na inclinação das rampas no relevo, como nas declividades entre 45% e 75%. Explicação para esse critério é dada pela Equação Universal da Perda de Solo (USLE), na qual o fator declividade afeta proporcional e diretamente a perda de solo;
- f) **Máximo** – nas áreas com relevos escarpados, além de 75% de inclinação, a susceptibilidade do terreno aos deslizamentos de terras é tão maior, quanto maior for a supressão das florestas que sustentam o solo inclinado. Ao considerar as estradas como uma intervenção antrópica no ambiente natural, o estabelecimento de uma estrada em locais com essas características tem o máximo grau de vulnerabilidade, que é associado

aos deslizamentos de encostas e, que no caso das enchentes, ocorrem somente nos pontos onde as estradas cruzam as drenagens naturais.

Os fatores que condicionam a mobilidade são manipulados computacionalmente na forma imagens (*raster* ou *grid*) com o atributo de interferência atrelado ao valor digital de cada pixel. Assim, a imagem do sistema viário, por exemplo, é formada pelos pixels de cada classe de trafegabilidade, numerados de acordo com o valor do IRM, cada classe com uma cor (qualquer) para a distinção visual. Onde não existe o alinhamento viário o valor digital do pixel é 0 (zero). Isso é essencial para que as operações algébricas entre planos de feições sejam válidas somente entre os pixels com valores inteiros diferentes de zero.

Com base nos critérios qualitativos e quantitativos dos fatores condicionantes da trafegabilidade das estradas, utilizou-se o software ArcGIS 9.2[®] para manipular as relações de interferência que os fatores condicionantes têm sobre a mobilidade viária da área de pesquisa.

A partir destas classificações estruturaram-se as relações, que formam a análise dos efeitos das enchentes sobre a mobilidade rural da bacia. Ao serem cruzados os graus de fragilidade estabeleceu-se qual é a condição de estabilidade em que se encontra um trecho ou um determinado ponto da estrada, potencialmente alagável. Esta informação pode ser útil aos gestores municipais e aos membros das comunidades, como forma de adotar medidas preventivas sobre os locais mais frágeis, para a manutenção permanente da mobilidade, melhorando as estruturas de transposição das estradas sobre os arroios e indicando vias alternativas para deslocamentos da população atingida pelas enchentes, como também, pelos agentes de defesa civil, bombeiros e outros que atuam nos salvamentos dos flagelados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desenvolvimento desta pesquisa, segundo o plano de trabalho que foi organizado, produziu resultados que atendem aos objetivos, estabelecidos para validar sua hipótese. As considerações iniciais sobre os resultados demonstram que há a necessidade de desenvolver para escalas maiores, ou seja, áreas menos abrangentes, mecanismos mais eficientes de apoio às comunidades de áreas agrícolas e rurais, para mobilizarem-se antecipadamente às calamidades causadas pelas enchentes e inundações.

O Brasil, pela sua extensão territorial continental, é um país pouco estruturado para o enfrentamento de situações de calamidades causadas por chuvas extremas, quando comparado com outras nações de mesmo porte e nível de desenvolvimento. São escassas as estruturas oficiais de medição pluviométrica e fluviométrica, que transmitem dados, automaticamente, para sistemas de alertas de enchentes.

Para o Rio Grande do Sul, a pesquisa básica feita ainda na concepção da hipótese de tese, mostrou haver somente 794 estações fluviométricas (ANA, 2012)²⁸ distribuídas nos 281.730,223 km² (IBGE, 2012²⁹) de área total do Estado, o que representa a razão de uma estação por área de 354,824 km². Se forem consideradas as estações telemétricas, que enviam automaticamente os dados medidos, esse resultado decresce para 132 estações, em uma proporção de 2.134,32 km² de área coberta por estação fluviométrica-telemétrica. Tal proporção é seis vezes maior que a área da pesquisa (374,87 km²), refletindo que existem muitas áreas drenadas em bacias hidrográficas pequenas (< 500 km²) que não possuem nenhum tipo de monitoramento das vazões, conseqüentemente, não existem informações suficientes para agir em situações de precipitações pluviométricas extremas.

A maioria das instalações registram os dados na forma de séries pluviométricas e/ou linimétricas, porém sem comunicar o efeito dessas medidas sobre as bacias onde estão instaladas. Esses dados podem ser utilizados na forma de estudos diagnósticos, porém não permitem realizar previsões em tempo real,

²⁸ Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acessado em: 29/11/2012.

²⁹ Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=rs>. Acessado em: 29/11/2012.

principalmente em áreas menores, como bacias hidrográficas que abrangem comunidades localizadas nas zonas agrícolas e rurais.

Em contrapartida, os investimentos públicos em sistemas de previsão e alerta de enchentes ainda são mínimos e limitam-se à manutenção das atuais estruturas. Bacias hidrográficas de escala microrregional têm, instalados e em operação, poucos (ou nenhum) recursos tecnológicos de prevenção contra os efeitos das cheias e inundações.

Especificamente, em relação à mobilidade das comunidades rurais, submetidas às calamidades das enchentes, as administrações estaduais e municipais não dispõem de mapeamentos das áreas, com a localização dos pontos frágeis no sistema viário.

As estradas são as estruturas fundamentais para a saída dos flagelados e seus pertences dos locais de risco e, ao mesmo tempo, para os agentes de Defesa Civil levarem socorro aos que necessitam de condições especiais de locomoção, como no caso mostrado na figura 47, em que crianças e senhoras – uma delas idosa – são transportadas de barco por onde, normalmente, seria a estrada.



Figura 47 – Moradores da localidade rural na Estrada da Invernadinha, Distrito de Arroio Grande em Santa Maria-RS, durante a enchente de 16/01/2010.

Obs.: Data impressa em amarelo refere-se à data em que a foto original foi fotografada.

Fonte: Acervo do Sr. Eder Petine.

Para a concepção de um método de apoio ao planejamento de comunidades rurais, submetidas à falta de mobilidade durante e após as enchentes, a cobertura e a densidade das redes de estações de monitoramento necessita ser ampliada e, principalmente, integrar-se a sistemas eficientes de transmissão de dados.

Outra condição a ser considerada refere-se às bases cartográficas brasileiras, que possuem, aproximadamente, quatro décadas de desatualização. A grande maioria dos municípios brasileiros têm mapas viários desatualizados, principalmente nas áreas rurais. Além disso, pouco se sabe sobre as condições de trafegabilidade das estradas rurais brasileiras. Como a grande concentração da população encontra-se nas regiões urbanizadas, as localidades rurais ficam em segundo plano nos investimentos para manutenção de suas estruturas viárias, especialmente porque, na grande maioria, são de jurisdição municipal.

Os resultados obtidos nesta tese apresentam critérios de planejamento e apoio às comunidades rurais, potencialmente submetidas à falta de mobilidade viária, por consequências das enchentes e inundações. Mesmo em bacias que não possuem monitoramento fluviométrico, os estudos demonstraram que a construção de cenários de inundações, a partir de modelos matemáticos da relação chuva-vazão, apoiados nos níveis das marcas de cheias, produziram resultados aceitáveis para o delineamento das áreas de alagamento (AAs).

As estimativas de AAs podem ser obtidas, desde que atendidos pelo menos três pressupostos para a modelagem. O primeiro assume que um modelo digital do terreno (MDT) é o fator condicionante para as direções do escoamento fluvial e, por causa disso, pode-se subdividir a bacia hidrográfica em áreas de contribuição – bacias vertentes (BVs), e áreas de acumulação (AAs), possibilitando propagar as vazões ao longo do canal principal. O segundo exige que se tenha na área de pesquisas ou em sua região de abrangência, registros diários de chuvas, na forma de séries contínuas, decenais, preferencialmente pelo período mínimo de uma normal climatológica (30 anos). O terceiro requisito refere-se à seleção de um método de transformação da chuva em vazão, adequado ao tamanho das BVs e que não dependa de monitoramento fluviométrico, visto que essa é a condição “*sine qua non*” do método geral.

A seguir são comentados os resultados de cada etapa da metodologia.

4.1 Área Alagável (AA) na bacia

Os resultados desta seção respondem aos objetivos específicos que são: (a) propor um método de estimativa de áreas alagáveis (AAs), baseado somente em precipitações diárias máximas e, com base nesse processo; (b) gerar mapas de AAs válidos para diferentes Tempos de Retorno (TRs).

4.1.1 Resultados da modelagem digital do terreno

Os resultados referentes ao primeiro objetivo específico partiram do processo de modelagem digital do terreno (MDT), essencial para mapear as características geomorfométricas que constituem os elementos do relevo (altitudes e as declividades) condicionantes da ocorrência das enchentes.

Como foi mencionado no capítulo 3 – MATERIAL E MÉTODOS, o processo de modelagem iniciou pela atualização dos dados altimétricos extraídos das cartas topográficas, seguindo a metodologia já descrita. O MDT hidrologicamente consistente foi obtido a partir das amostras de pontos 3D (latitude, longitude e altitude), procedentes desses documentos e de levantamentos topográficos e geodésicos, combinados.

No total o processo de modelagem digital de terreno totalizou uma amostra de 144678 pontos de controle com coordenadas e cotas conhecidas. Desses, 143.343 foram os vértices de curvas de nível, 717 pontos coletados in loco por GNSS, 618 pontos cotados (cartográficos) e 2 pontos de exutórios (Arroio do Meio e Arroio Grande) também coletados por GNSS, foram usados para modelar o relevo da superfície com área de 612,0Km², que constituiu a área de pesquisas. O modelo digital de terreno resultante é mostrado no capítulo dos resultados e discussão.

Para validar o MDT a análise visual direta sobre a imagem (fotoleitura), não se mostrou a melhor técnica, pois a variação altimétrica dos pixels estimados, com as cotas de terreno, é imperceptível na imagem do modelo digital. Entretanto, nota-se que as drenagens naturais são, nitidamente, bem delineadas e que as tonalidades escuras representam as depressões do terreno (talwegues e áreas ribeirinhas). Nas tonalidades claras aparecem as elevações maiores e, nas tonalidades intermediárias, as áreas de transição entre Depressão Central e Serra Geral. (Figura 48).

Para validar o MDT fez-se a análise estatística dos valores de altimetria dos pontos amostrados e os desvios produzidos nos valores digitais de altitude, estimados em seus pixels homólogos – do mesmo lugar, gerados pelo processo de modelagem. Para essa validação utilizou-se como amostra dois conjuntos de pontos, sendo um formado pelas 717 cotas de terreno medidas por GNSS e outro pelos 618 pontos das cartas topográficas. Os pontos de terreno, na área de alague, foram coletados no período de 21 meses (novembro de 2010 a julho de 2012).

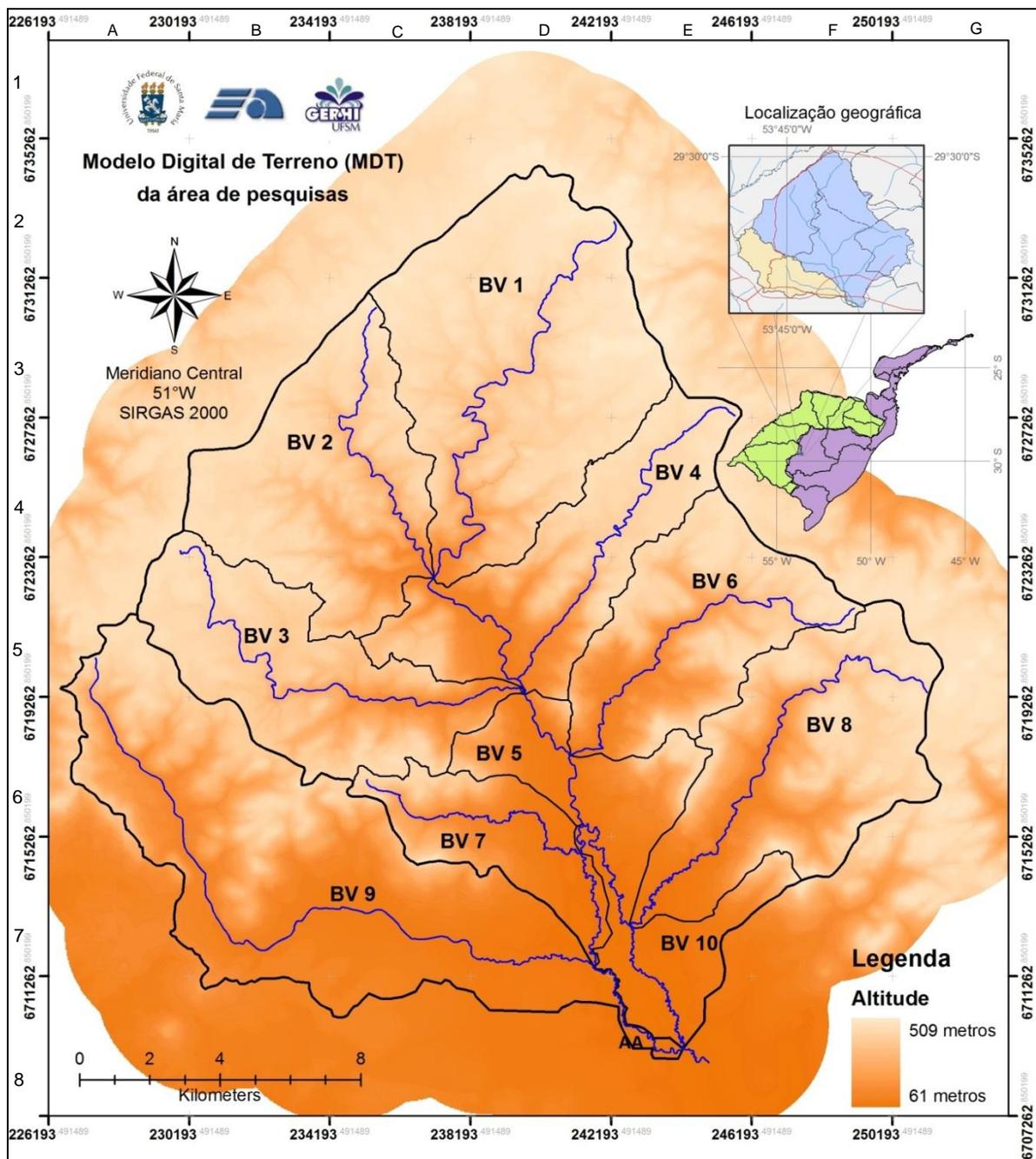


Figura 48 – Modelo Digital de Terreno (MDT) hidrológicamente consistente.
Fonte: Elaborado pelo autor.

A validação, feita por meio das estatísticas descritivas e de dispersão, calculadas para as diferenças métricas entre pontos coletados na bacia (por GNSS) e valores digitais, obtidos do MDT, resultou em média de 0,07 metros, com desvio padrão (σ) igual a 0,6 metros e um coeficiente de variação (CV%) de 11,67%.

O histograma da figura 49 mostra o resultado da distribuição dos desvios entre as cotas medidas por GNSS e as cotas estimadas pelo MDT. Dos 717 pontos amostrais, 657 ou 91,63% resultaram em diferenças inferiores a $\pm 0,6$ metros, isto é, contidas em 1σ (*um sigma*), sendo que este intervalo de pontos contém o valor da média. Se forem considerados 2σ (*dois sigma*) o percentual em torno da média sobe para 95,38% (684 pontos). E, considerando-se 3σ (*três sigma*), o percentual aumenta para 96,51% de cotas de terreno, com diferenças métricas entre de estimativas modeladas e cotas verdadeiras, em torno da média.

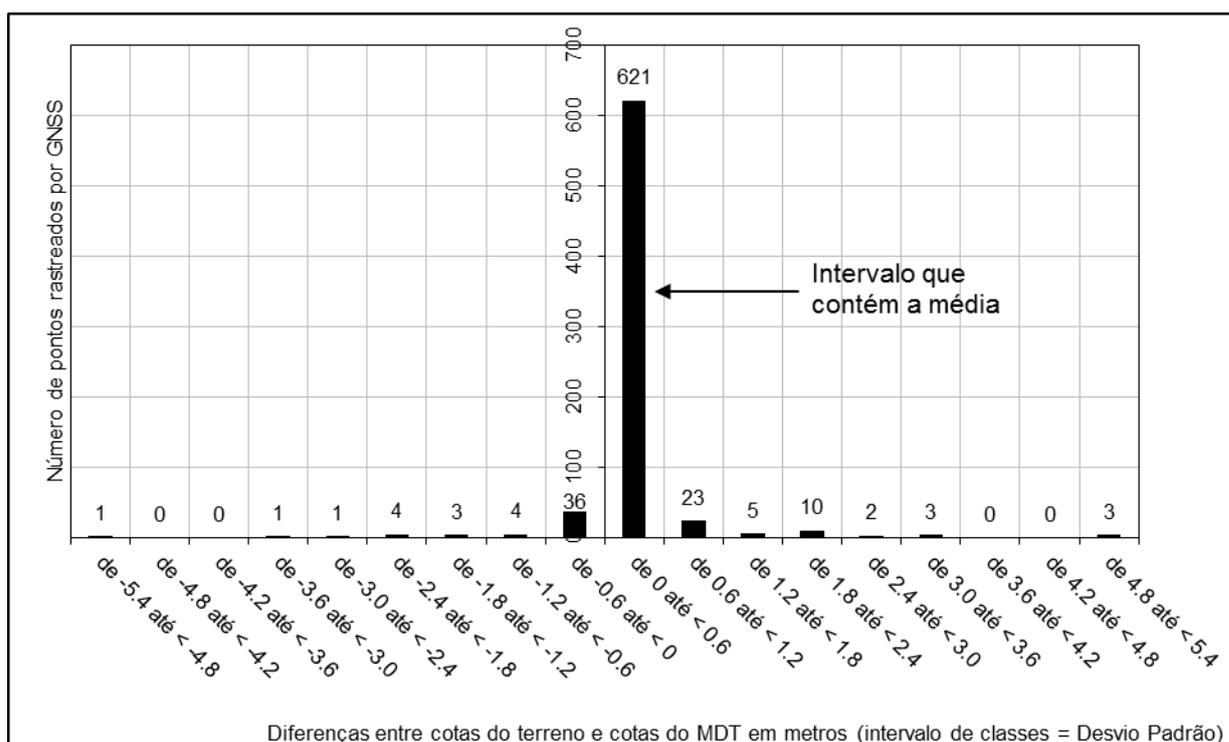


Figura 49 – Histograma das diferenças entre cotas medidas no terreno por GNSS e cotas obtidas do MDT.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Determinações dessas medidas estatísticas, também, foram realizadas para o conjunto de pontos amostrais oriundos das cartas topográficas. Para essa amostra de 618 pontos, os valores da média das diferenças (Desvios Médios) entre cotas cartográficas e cotas de pontos do MDT foi de 0,75 metros, sendo considerado

bastante alto. Entende-se que a média para essa amostra foi fortemente afetada pelos extremos. Ao se obter o desvio padrão (σ) de 3,59 metros, o resultado mostrou haver grande dispersão nas estimativas, com elevadas diferenças entre o valor da cota cartográfica e o valor do MDT. Conseqüentemente o CV% dessa amostra resultou em um valor expressivo de 20,89%. Essas medidas, juntas, representam menor aderência do MDT em relação ao relevo verdadeiro.

Explicações para essas diferenças terem desvios maiores para a relação **valor amostrado versus valor estimado** podem ser atribuídas aos erros nas cotas dos pontos cotados cartográficos, geradas por métodos fotogramétricos baseados em instrumentos ótico-mecânicos usados no passado, com precisão bem menor que a dos equipamentos eletrônicos e digitais atuais. Também, outra razão que explica as diferenças, é porque tais cotas consistem de valores inteiros, que desconsideram as variações submétricas no terreno.

Como se observa na tabela 5, as maiores diferenças ocorrem para as cotas de altitudes mais elevadas, o que não interfere diretamente na modelagem hidrológico-hidráulica, que se processa nas seções transversais, que cortam as áreas nas planícies de inundação, situadas nas altitudes abaixo de 150 metros.

Tabela 5 – Demonstrativo das maiores diferenças entre as cotas dos pontos cartográficos e cotas obtidas do MDT.

Cota (cartográfica)	Cota (MDT)	Maiores # (+)	Cota (cartográfica)	Cota (MDT)	Maiores # (+)	Cota (cartográfica)	Cota (MDT)	Maiores # (-)
313	268,28	44,72	476	466,26	9,74	458	458,29	-0,29
439	408,61	30,39	358	349,24	8,76	402	402,29	-0,29
442	412,53	29,47	308	300,22	7,78	469	469,30	-0,30
376	353,43	22,57	426	419,15	6,85	447	447,46	-0,46
446	424,62	21,38	378	371,40	6,60	376	376,48	-0,48
318	296,94	21,06	511	504,46	6,54	454	454,56	-0,56
492	475,55	16,45	356	349,57	6,43	410	411,28	-1,28
305	289,22	15,78	473	466,91	6,09	414	415,34	-1,34
456	440,47	15,53	315	308,92	6,08	412	414,38	-2,38
424	408,72	15,28	198	192,45	5,55	464	466,49	-2,49
516	501,03	14,97	246	240,78	5,22	378	382,78	-4,78
458	444,27	13,73	458	452,96	5,04	465	470,86	-5,86
314	300,73	13,27	458	453,01	4,99	395	401,10	-6,10
511	500,32	10,68	446	441,41	4,59	427	440,29	-13,29
439	429,05	9,95	449	444,76	4,24	392	405,68	-13,68

Fonte: Elaborado pelo autor.

Da comparação entre as medidas estatísticas descritivas das duas amostras (pontos 3D GNSS e pontos cotados cartográficos) verificou-se que não é

recomendável realizar a modelagem do terreno somente a partir de dados obtidos em cartas topográficas. Faz-se necessário o adensamento de pontos amostrais através de outros meios (topografia e/ou levantamentos por GNSS), principalmente onde a equidistância das curvas de nível e a numeração das cotas em valores inteiros impede o detalhamento de seções hidrológicas.

Para esta tese, cabe relatar que a grande maioria dos pontos rastreados por GNSS foram coletados nas áreas ribeirinhas, estradas, várzeas e seções transversais, logo, em locais com as altitudes mais baixas, onde se verificou a ocorrência de cheias e inundações com maiores estragos. Por isso, nesses locais, a modelagem do terreno resultou em um relevo digital mais próximo do relevo verdadeiro, o que é fundamental para a modelagem hidrológico-hidráulica. Nas áreas de transição geomorfológica, onde não foram coletados pontos por GNSS, a modelagem de terreno englobou apenas os dados cartográficos (pontos de curvas de nível e pontos 3D), gerando maior discrepância entre o relevo real e o relevo digital, como ilustra a figura 50.

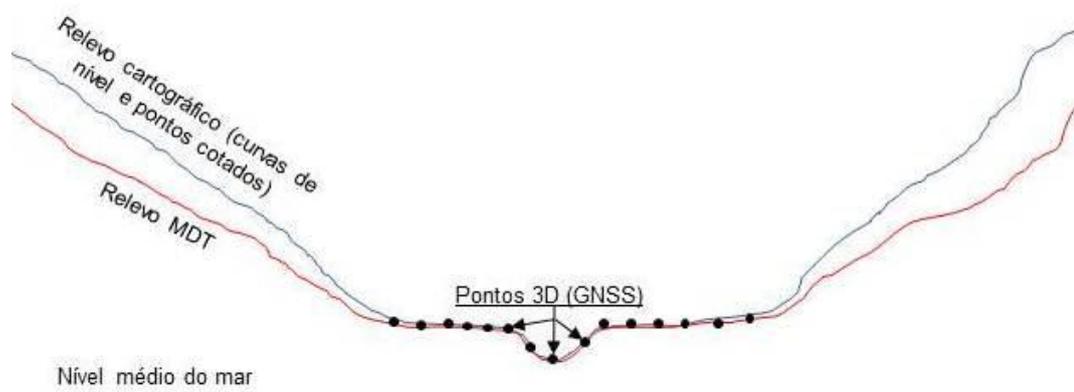


Figura 50 – Representação de uma seção hidrológica comparando o relevo a partir dos dados de entrada (pontos cartográficos e GNSS) e relevo do MDT (saída).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Essas diferenças, em áreas com altitudes mais elevadas, não afetaram diretamente o processo de estimação da área de inundação, pois os transectos extraídos do MDT são representativos para as áreas de menores altitudes e menores declividades, nos quais houve o adensamento da amostragem pela coleta via GNSS.

Ao assumir como referência o intervalo de $\pm 0,6$ metros (σ), definido para a amostragem de pontos coletados por GNSS, verificou-se que, para a amostra de

pontos cartográficos, o percentual incluído entre -0,6 e +0,6 metros é de 84,8%, ou 524 pontos dos 628 da amostra extraída da carta, refletindo que as diferenças altimétricas da maioria desses valores estimados, não compromete o uso do MDT que foi gerado.

Com base nas validações feitas pela análise estatística dos desvios pode-se afirmar que o MDT é fidedigno ao relevo da bacia considerada na pesquisa. Isso conferiu confiabilidade nos resultados derivados do modelo, tais como: altitudes, declividades e, principalmente, o mapeamento das áreas de inundação.

Todavia, cabe salientar o desvio padrão de 0,6 metros nas cotas do MDT, pode afetar a espacialização das profundidades das áreas inundáveis, pois o nível de inundação modelado é referenciado na cota do MDT, logo essas cotas de inundação modeladas, conseqüentemente, terão intrínsecas em seus resultados, uma precisão vertical de $\pm 0,6$ metros.

Outro aspecto importante a ser abordado é que esse MDT permitiu gerar um modelo hidrográfico para o escoamento superficial, canalizado nos arroios da bacia hidrográfica. Tal modelo de escoamento serviu aos propósitos da pesquisa na segunda etapa metodológica, a qual se refere ao planejamento da mobilidade rural em épocas sem enchentes.

4.1.2 Análise estatística das chuvas extremas

A primeira análise sobre os dados de precipitações pluviométricas focou avaliar a distribuição das ocorrências máximas diárias anuais em função do tempo. Considerou-se importante avaliar o comportamento dessas chuvas, para verificar se, realmente, houve redução no intervalo de tempo de retorno (TR) dos eventos extremos, nos últimos cinquenta anos, condizendo com os prognósticos de cenários futuros, contidos no relatório do IPCC (2007). Essa análise foi realizada pela plotagem em gráfico dos totais máximos diários de chuvas da estação meteorológica da UFSM, pois a mesma tem série histórica mais extensa.

Pode ser observado, no gráfico da figura 51, o comportamento das chuvas diárias máximas anuais da região do estudo, comparado aos episódios de alterações da temperatura da superfície do mar (TSM) no Oceano Pacífico, cujas variações entre El Niño (vermelho), La Niña (azul) e anos neutros (cinza), têm causado anomalias climáticas em nível global e, também, na região do estudo.

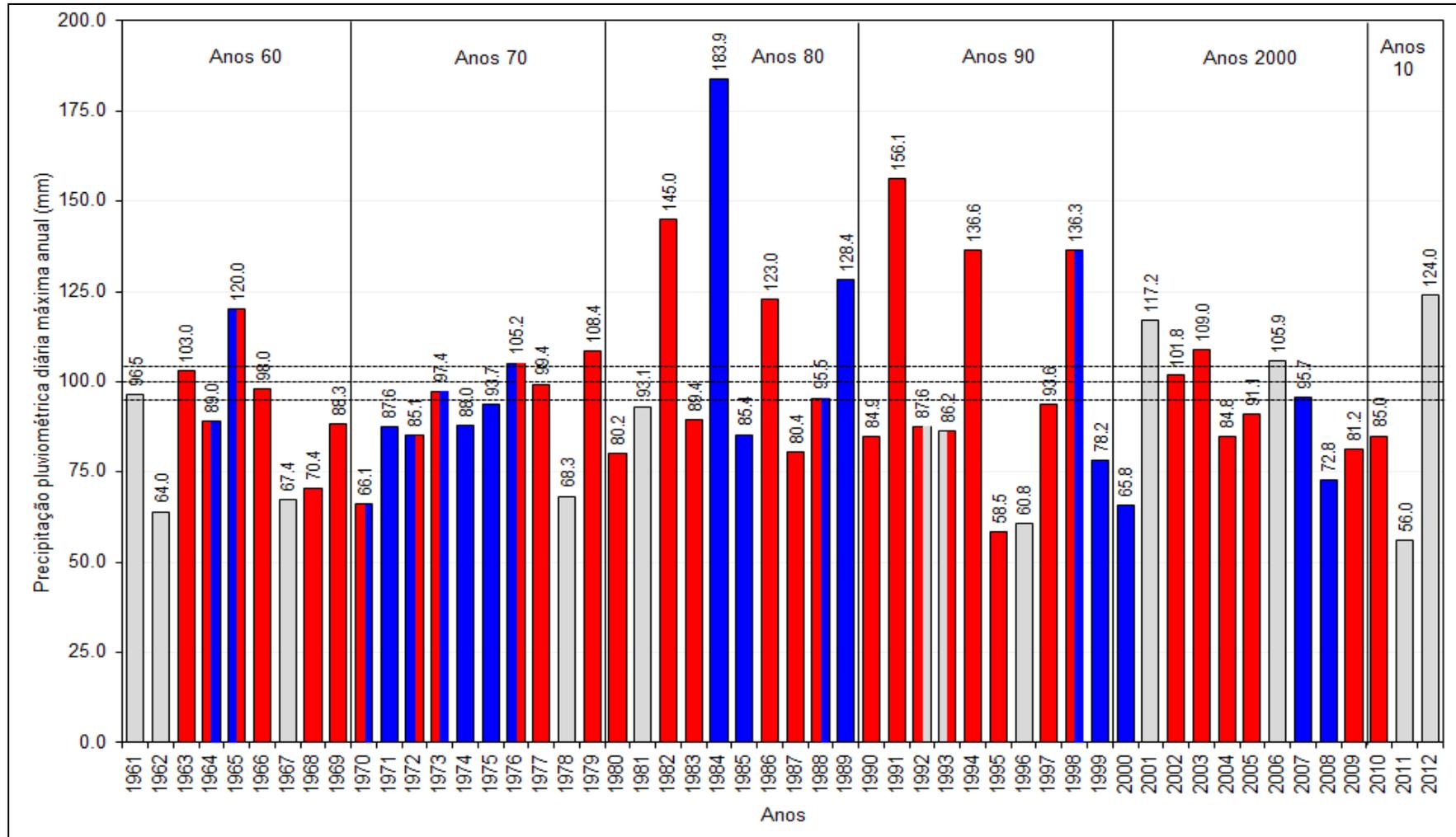


Figura 51 – Gráfico da distribuição das precipitações diárias máximas anuais, comparadas com as variações do fenômeno ENOS.
 Fonte: Elaborado pelo autor, fundamentado no trabalho de Gerólamo e Kayano (2010) para o período de 1961 até 2006 e, de 2007 até 2012, nas informações do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do INPE. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acessado em 10/12/2012.

No gráfico, percebe-se que as variações nos TRs de chuvas extremas têm sofrido redução nos volumes precipitados, ao longo das últimas três décadas, o que é confirmado pela maior chuva diária máxima dos últimos 28 anos, registrada na estação da UFSM no dia 16/04/1984, que totalizou 182,2 mm.dia⁻¹. Traçando uma linha de referência em 100,0 mm/dia (com variação de $\pm 5,0$ mm.dia⁻¹ (5%)), para avaliar a quantidade de precipitações diárias máximas anuais que foram recorrentes nos últimos 52 anos, obteve-se um resultado de 22 chuvas acima de 95,0 mm/dia, perfazendo um TR de aproximadamente 2,4 anos, para chuvas dessa magnitude.

Analisando o que foi visto sobre a relação das precipitações diárias máximas anuais sendo influenciadas pelas variações do ENOS verificou-se que a intensidade desse fenômeno afeta diretamente a pluviosidade na área de pesquisas, confirmando os estudos de Gerólamo e Kayano (2010). Ao consultar Gerólamo e Kayano (2010, p.238) verificou-se que, no Brasil, existem duas áreas nas quais as anomalias de precipitação são coerentes com o ciclo do ENOS: a Região Nordeste, com secas influenciadas pelo El Niño e as chuvas excessivas pelo La Niña; e a Região Sul, onde ocorre o inverso, ou seja, El Niño influencia as chuvas extremas e La Niña influencia as secas. Os dados plotados no gráfico têm o primeiro ano como o de surgimento do fenômeno e o segundo ano com o decaimento, sendo possível ocorrer no mesmo ano ambos os fenômenos, El Niño e La Niña.

Especificamente, para a região de estudo da tese, observa-se que quase a metade (22 anos) dos registros diários máximos anuais de chuvas foram influenciados pelo El Niño, enquanto que o La Niña influenciou apenas 10 anos do período total da análise. Também, ocorreram eventos extremos em 10 anos, considerados neutros para o ENOS, dos 52 analisados, incluindo-se 2011 e 2012. Salienta-se que para esses os anos os estudos do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do INPE publicaram, no Boletim de Informações Climáticas n° 11³⁰, indicativos de neutralidade para o fenômeno ENOS.

A análise estatística das séries históricas de chuvas foi determinante para a simulação das áreas alagamento, pois os resultados orientaram a seleção da amostra, formada pelas precipitações diárias máximas anuais, cujas marcas de enchentes puderam ser mapeadas. Dessa amostragem selecionaram-se os TRs para a simulação de cenários de inundações. Os TRs foram calculados em função

³⁰ Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>.

das probabilidades de não excedência (P), considerando um número infinito de anos, segundo o Método de Gumbel.

Os dados amostrais foram organizados do maior para o menor valor. Desse ordenamento resultou a atribuição das magnitudes das precipitações diárias máximas anuais e, subsequentemente, os cálculos de P e TR dos eventos extremos. Assim, fez-se a análise das frequências das precipitações diárias máximas anuais da série histórica do pluviômetro da UFSM, para se obter uma equação que determinasse o TR, equivalente à chuva que causou o dano mapeado. Os cálculos da análise das frequências são apresentados no Apêndice 2.

Para a pesquisa desta tese foram selecionados três pluviômetros na região do estudo. O primeiro pluviômetro que contém a série de chuvas mais longa integra a rede do BDMEP. A série de dados do BDMEP inicia em 01/01/1961 e estende-se até os dias atuais, sendo atualizada mensalmente.

Os outros dois pluviômetros foram selecionados em posição geográfica estratégica na região dos estudos – um deles no lado leste da bacia (em Silveira Martins-RS) e o outro no lado oeste (em Itaára). Em ambos os municípios os proprietários dos pluviômetros há mais de 20 anos dedicam-se a registrar diariamente as chuvas. Os dados foram tabulados e comparados aos do BDMEP.

A coleta das séries pluviométricas de particulares serviu para melhorar a precisão da estimativa da precipitação pluviométrica máxima média, que cobre toda a bacia do Arroio Grande. A estação do INMET situa-se ao sul da área de pesquisas, cobrindo em maior proximidade o exutório da bacia, distanciando-se em média 8 km das cabeceiras das bacias vertentes (BVs).

Para obter a precipitação máxima média ($P_{m\acute{a}x}$) sobre a bacia obteve-se a média das precipitações que causaram enchentes no passado, a partir ponderação pelos pesos do Método de Thiessen ($W_{Thiessen}$) sobre a área de pesquisas, através do software ArcGIS 9.2®. Os pesos obtidos referem-se às proporções individuais de cada pluviômetro e sua área de cobertura e resultaram da seguinte fórmula:

$$W_{Thiessen} = \frac{\text{Área}_{Thiessen}}{\text{Área total}} \quad (15)$$

Os resultados obtidos para a ponderação das chuvas registradas nos pluviômetros da bacia são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Ponderação pelo Método de Thiessen das precipitações acumuladas causadoras de enchentes (datas das marcas).

Data	Estação Pluviométrica*	Pp 1dia	Pp x W	Pp 2dias	Pp x W	Pp 3dias	Pp x W	Pp 4dias	Pp x W	Pp 5dias	Pp x W	W**
07/01/2001	Santa Maria ⁽¹⁾	126,5	25,4	135,0	27,1	239,5	48,1	259,8	52,2	259,8	52,2	0,2
	Silveira Martins ⁽²⁾	128,0	37,9	139,0	41,1	235,0	69,5	250,0	73,9	250,0	73,9	0,3
	Itaára ⁽³⁾	125,0	62,9	131,0	65,9	244,0	122,8	269,5	135,6	269,5	135,6	0,5
07/01/2001	Chuva média da bacia	126,2		134,2		240,4		261,8		261,8		1,0
15/12/2003	Santa Maria	109,0	21,9	143,7	28,9	143,7	28,9	143,7	28,9	207,9	41,8	0,2
	Silveira Martins	153,0	45,3	190,0	56,2	190,0	56,2	190,0	56,2	260,0	76,9	0,3
	Itaára	135,0	67,9	165,0	83,0	165,0	83,0	165,0	83,0	203,5	102,4	0,5
15/12/2003	Chuva média da bacia	135,1		168,1		168,1		168,1		221,1		1,0
04/01/2010	Santa Maria	47,8	9,6	108,8	21,9	108,8	21,9	108,8	21,9	108,8	21,9	0,2
	Silveira Martins	89,0	26,3	169,0	50,0	169,0	50,0	169,0	50,0	169,0	50,0	0,3
	Itaára	150,0	75,5	170,0	85,5	170,0	85,5	170,0	85,5	170,0	85,5	0,5
04/01/2010	Chuva média da bacia	111,4		157,4		157,4		157,4		157,4		1,0
16/01/2010	Santa Maria	85,0	17,1	125,2	25,2	125,2	25,2	125,2	25,2	128,5	25,8	0,2
	Silveira Martins	123,0	36,4	123,0	36,4	123,0	36,4	123,0	36,4	126,0	37,3	0,3
	Itaára	107,0	53,8	107,0	53,8	107,0	53,8	107,0	53,8	107,0	53,8	0,5
16/01/2010	Chuva média da bacia	107,3		115,4		115,4		115,4		116,9		1,0
19/01/2010	Santa Maria	79,6	16,0	79,6	16,0	164,6	33,1	204,8	41,2	204,8	41,2	0,2
	Silveira Martins	58,0	17,2	128,0	37,9	128,0	37,9	251,0	74,2	251,0	74,2	0,3
	Itaára	56,0	28,2	124,0	62,4	124,0	62,4	231,0	116,2	231,0	116,2	0,5
19/01/2010	Chuva média da bacia	61,3		116,3		133,3		231,6		231,6		1,0
13/09/2010	Santa Maria	47,4	9,5	92,4	18,6	122,4	24,6	125,7	25,3	125,7	25,3	0,2
	Silveira Martins	42,0	12,4	73,0	21,6	103,0	30,5	103,0	30,5	103,0	30,5	0,3
	Itaára	59,5	29,9	95,0	47,8	121,0	60,9	121,0	60,9	121,0	60,9	0,5
13/09/2010	Chuva média da bacia	51,9		88,0		116,0		116,6		116,6		1,0

* Fonte dos dados: ⁽¹⁾ Pluviômetro da UFSM; ⁽²⁾ Pluviômetro de Antônio Tondolo; ⁽³⁾ Pluviômetro de Alberto P. da Rosa Santos (Continua na página seguinte).

** W = Fator de ponderação da média, correspondente à área de contribuição do polígono de Thiessen de cada pluviômetro.

Tabela 6 – Ponderação pelo método de Thiessen das precipitações acumuladas causadoras de enchentes (continuação).

Data	Estação Pluviométrica	Pp 1dia	Pp x W	Pp 2dias	Pp x W	Pp 3dias	Pp x W	Pp 4dias	Pp x W	Pp 5dias	Pp x W	W**
15/04/2011	Santa Maria ⁽¹⁾	40,6	8,2	96,6	19,4	102,8	20,7	102,8	20,7	102,8	20,7	0,2
	Silveira Martins ⁽²⁾	0,0	0,0	130,0	38,4	130,0	38,4	130,0	38,4	130,0	38,4	0,3
	Itaára ⁽³⁾	151,0	76,0	151,0	76,0	152,5	76,7	152,5	76,7	152,5	76,7	0,5
15/04/2011	Chuva média da bacia	84,1		133,9		135,9		135,9		135,9		1,0
20/06/2011	Santa Maria	33,4	6,7	33,4	6,7	33,4	6,7	50,2	10,1	61,9	12,4	0,2
	Silveira Martins	27,0	8,0	27,0	8,0	27,0	8,0	58,0	17,2	58,0	17,2	0,3
	Itaára	43,0	21,6	43,0	21,6	43,0	21,6	70,0	35,2	70,0	35,2	0,5
20/06/2011	Chuva média da bacia	36,3		36,3		36,3		62,5		64,8		1,0
29/07/2011	Santa Maria	34,0	6,8	35,7	7,2	59,4	11,9	59,4	11,9	59,4	11,9	0,2
	Silveira Martins	32,0	9,5	33,0	9,8	68,0	20,1	84,0	24,8	84,0	24,8	0,3
	Itaára	34,0	17,1	34,0	17,1	58,0	29,2	72,0	36,2	72,0	36,2	0,5
29/07/2011	Chuva média da bacia	33,4		34,0		61,2		73,0		73,0		1,0
25/10/2011	Santa Maria	8,5	1,7	44,2	8,9	57,7	11,6	57,7	11,6	57,7	11,6	0,2
	Silveira Martins	60,0	17,7	100,0	29,6	100,0	29,6	100,0	29,6	100,0	29,6	0,3
	Itaára	56,0	28,2	56,0	28,2	90,5	45,5	90,5	45,5	90,5	45,5	0,5
25/10/2011	Chuva média da bacia	47,6		66,6		86,7		86,7		86,7		1,0
30/05/2012	Santa Maria	124,0	24,9	124,0	24,9	124,4	25,0	124,4	25,0	124,4	25,0	0,2
	Silveira Martins	70,0	20,7	140,0	41,4	140,0	41,4	140,0	41,4	140,0	41,4	0,3
	Itaára	98,0	49,3	98,0	49,3	98,0	49,3	98,0	49,3	98,0	49,3	0,5
30/05/2012	Chuva média da bacia	94,9		115,6		115,7		115,7		115,7		1,0

* Fonte dos dados: ⁽¹⁾ Pluviômetro da UFSM; ⁽²⁾ Pluviômetro de Antônio Tondolo; ⁽³⁾ Pluviômetro de Alberto P. da Rosa Santos.

** W = Fator de ponderação da média, correspondente à área de contribuição do polígono de Thiessen de cada pluviômetro.

Comparando os resultados da tabela 6 ao gráfico da figura 51 verificou-se que 49% das chuvas diárias máximas anuais ocorrem em um TR de até 2 anos e que, para TR de até 5 anos, esse percentual supera 80%, evidenciando a alta frequência desses eventos na região do estudo.

A constatação observada no comportamento das chuvas extremas sobre a área de pesquisas, entretanto, considerou que a informação determinante para a segurança e planejamento da mobilidade rural é a probabilidade (P) da não excedência do evento, em função do TR esperado. Se a probabilidade da magnitude do evento extremo não ser superada for alta, no TR observado na série histórica; logo, maior será a segurança em utilizar um determinado espaço por, pelo menos, o tempo desse evento voltar a ocorrer.

Em termos numéricos, significa afirmar com segurança que em 50 anos, por exemplo, possivelmente não ocorrerão precipitações pluviométricas em torno de 170,0 mm/dia, sendo essa medida uma estimativa resultante da aplicação do Método de Gumbel, para TR igual a 50 e P igual a 98%.

Para agregar confiabilidade nessa estimativa fez-se a análise de regressão dos valores observados e estimados, das precipitações diárias máximas anuais. A partir da relação entre a precipitação e o tempo de retorno, elaboraram-se regressões lineares entre precipitações observadas " $y_{obs\ i}$ " e estimadas " $y_{est\ i}$ ", para TRs " x_i ", e calcularam-se os coeficientes de determinação R^2 para a equação que melhor expressasse essa relação.

Foi ajustado um modelo de regressão logarítmico, para a obtenção dos coeficientes da equação que melhor ajustassem a relação " $y=f(x)$ ". As equações, coeficientes e valores de R^2 são apresentados no quadro 12, no qual se verificou que os modelos logarítmicos para as precipitações diárias máximas anuais, estimadas e observadas, apresentaram elevados coeficientes de determinação R^2 (~0,97). Considerando o maior valor de R^2 , para a equação que melhor ajusta o valor de P_{max} , em um TR qualquer, o modelo obtido a partir das estimativas ajustou-se melhor à série, podendo ser usado para estimar TRs em função de P_{max} quaisquer.

Dados de entrada	Coef. angular (a)	Coef. de intercepto (b)	Coef. de determ. (R ²)	Equação
Observados	28,16	68,434	0,969	$y=28,16\ln(x)+68,434$
Estimados	28,406	68,197	0,967	$y=28,406\ln(x)+68,197$

Quadro 12 - Modelos matemáticos para estimar P_{\max} (y) em função de TR (x).

Fonte: Elaborado pelo autor.

A relação entre as precipitações diárias máximas anuais observadas e estimadas, bem como as curvas dos modelos de regressão calculados são ilustrados pelo gráfico da figura 52. Da mesma forma, pode-se observar que a equação modificada, a partir da Fórmula de Ven Te Chow (Brasil, 2005) pode ser substituída com segurança por um modelo de regressão logarítmico.

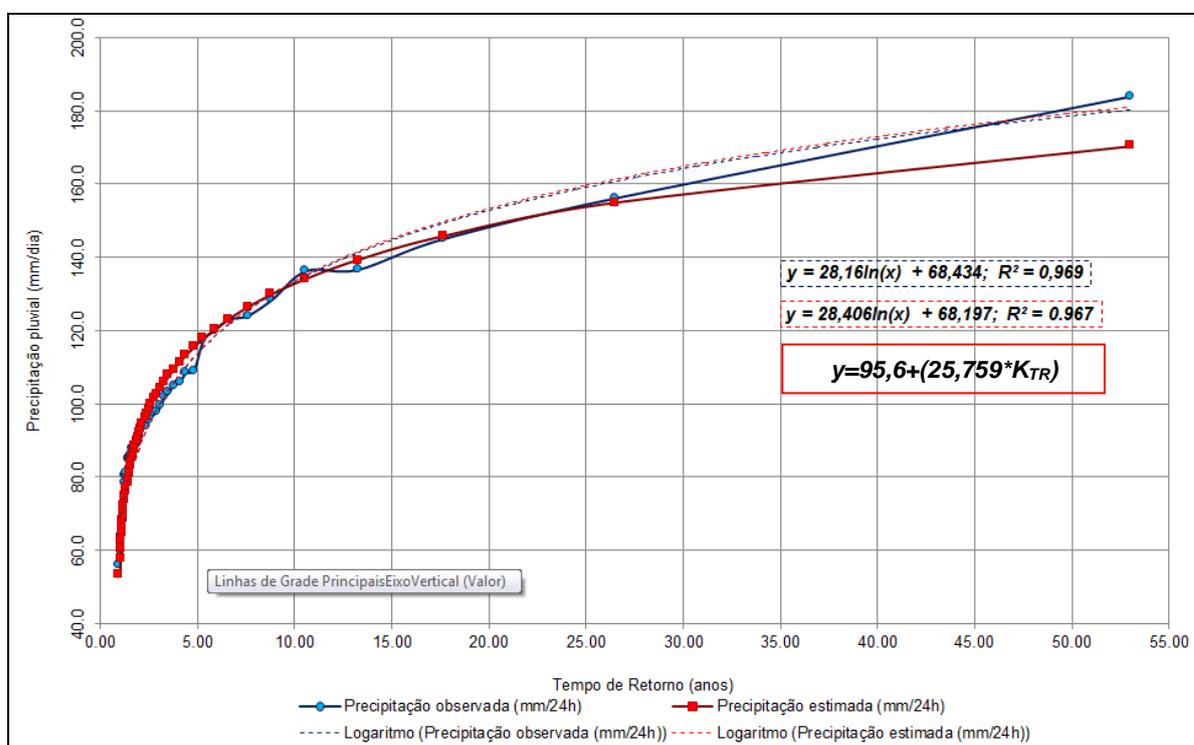


Figura 52 – Gráfico das distribuições de precipitações diárias máximas anuais e modelos matemáticos de determinação.

Pode-se afirmar que o modelo que melhor ajustou-se à determinação de precipitações diárias máximas anuais foi o da Equação $y = 28,16 \times \ln(x) + 68,434$

(16).

$$y = 28,16 \times \ln(x) + 68,434 \quad (16)$$

Por meio desta equação foi possível admitir em “x” qualquer valor para TR, resultando em “y” o valor da precipitação diária máxima anual estimada ($P_{\text{max.est.}}$). Invertendo essa equação, para determinar “x”, isolando-o em função de “y”, foi possível obter um TR, a partir de uma P_{max} arbitrada ou conhecida (Equação 17), tal como uma chuva com marcas de enchentes mapeadas, por exemplo.

$$x = e^{\left(\frac{y-68,434}{28,16}\right)} \quad (17)$$

Onde:

x = Tempo de Retorno em anos;

y = Precipitação acumulada no dia do evento de enchente com marcas mapeadas em mm/dia.

Desta forma, foi possível confirmar o TR de cada chuva que causou as marcas de enchentes niveladas e, assim, estimaram-se as vazões de projeto (Q_p) equivalentes, resultantes da aplicação do Método de I Pai Wu, usadas na modelagem hidrológico-hidráulica através do programa HEC-RAS. A tabela 7 mostra a comparação entre os TRs de eventos com de marcas de enchentes mapeadas e os TRs aplicados na modelagem com o HEC-RAS.

Tabela 7 – Tempos de retorno calculados para uso na modelagem com HEC-RAS.

Data da enchente	$P_{p\text{máx.dia}}$ (média de Thiessen) observada (mm.dia^{-1})	TR (anos) calculado (equação 17)	TR (anos) "Profiles" HEC-RAS
07/01/2001	126,2	7,8	8
15/12/2003	135,1	10,7	10
04/01/2010*	111,4	4,6	5
16/01/2010	107,3	4,0	4
19/01/2010	61,3	0,8	1
13/09/2010	51,9	0,6	1
15/04/2011	84,1	1,7	2
30/05/2012	94,9	2,6	3

Fonte: Dados da Tabela 5 e aplicação da Equação 26.

*Obs.: Data de enchente com maior número de marcas inventariadas.

4.1.3 Simulação das Áreas Alagáveis (AAs)

Em situações de enchentes o nível das águas em córregos, sangas, arroios ou rios pode transbordar o canal (leito menor), quando o volume vazante excede sua capacidade de escoamento. Nesses casos as regiões ribeirinhas no leito menor de

cursos de água na bacia (e microbacias), ficam submersas por horas ou dias, principalmente nas planícies de inundação, mesmo após o pico da enchente.

Para casos semelhantes ao da área de pesquisas, onde **não se dispõe de monitoramento fluviométrico**, a espacialização da calamidade pode ser simulada e categorizada conforme os totais diários máximos precipitados e suas consequentes cheias, estimadas pela integração de métodos como o de Gumbel, do IPH-UFRGS (“Equações de Chuvas Intensas”) e de I Pai Wu (“Método Racional Estendido”) ou aquele de melhor calibração para a bacia.

Ao modelar espacialmente as AAs sobre o MDT, observou-se que a seleção do método de transformação de chuva em vazão é uma etapa determinante para alcançar resultados aceitáveis para os mapas de áreas de alagamento. Respeitando as recomendações da literatura (Chow, 1964; Ramos et al., 1989; Genovez, 1991; BRASIL, 2005; entre outros) a seleção do Método I Pai Wu considerou, para a obtenção das vazões de projeto estimadas, especialmente os critérios de:

- a) Adequação às áreas das bacias vertentes (BVs); e
- b) Simplicidade para obtenção dos parâmetros do modelo.

Esses parâmetros, resultantes dos geoprocessamento e do MDT, são expressos na tabela 8.

Tabela 8 – Resultados dos indicadores fisiográficos para as bacias vertentes (BVs).

BV	Sub-bacia	A (km ²)	L canal (km)	H (m)	Fator Forma	t _c (h)	C	K
1	Alto Arroio Grande	61,976	18,845	371,87	2,121	2,9	0,20	0,94
2	Arroio Taboão	40,267	11,055	358,64	1,544	1,6	0,21	0,93
3	Arroio Manoel Alves	36,168	16,002	371,70	2,358	2,4	0,19	0,95
4	Lajeado do Salto	34,919	13,021	386,87	1,953	1,9	0,20	0,96
5	Arroio Grande (condução)	7,586	5,264	16,80	1,694	2,2	0,21	0,99
6	Arroio Lobato	33,101	12,982	401,00	2,000	1,8	0,20	0,95
7	Arroio do Meio	17,554	14,265	354,21	3,017	2,1	0,19	0,97
8	Arroio do Veado	43,851	17,247	403,40	2,308	2,5	0,20	0,96
9	Rio Vacacaí-Mirim	77,460	28,101	378,67	2,830	4,6	0,19	0,94
10	Baixo Arroio Grande	23,490	11,618	9,61	2,124	6,8	0,20	0,99

Fonte: Elaborado pelo autor.

Sendo:

A = Área da BV; L = Comprimento do canal principal; H = Diferença de nível do canal principal; F = Fator de forma; t_c = Tempo de concentração; C = Coeficiente de escoamento superficial; K = Coeficiente de distribuição espacial da chuva (cfme. Método de I Pai Wu).

Com esses parâmetros procederam-se os cálculos das vazões de projeto (Q_p) para cada BV. Os resultados da estimação das Q_p , pelo Método de I Pai Wu, obtidos para os TRs de eventos semelhantes aos que produziram as marcas mapeadas e, também, para TRs de projetos de drenagem viária, são mostrados na tabela 9. Para a propagação das Q_{ps} nas BVs fez-se a acumulação de montante para jusante, até o exutório (SHR-6). Esses resultados são mostrados na tabela 10.

Tabela 9 – Resultados da estimação das vazões de projeto (Q_p) para as BVs.

BV	Sub-bacia	Método de I Pai Wu (Q_p em $m^3.s^{-1}$)						
		TR 2	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100	TR 500
1	Arroio Grande Alto	72,25	93,54	108,59	120,42	129,19	137,90	158,02
2	Arroio Taboão	93,72	121,33	140,87	156,21	167,58	178,88	204,98
3	Arroio Manoel Alves	53,55	69,33	80,50	89,26	95,76	102,22	117,14
4	Lajeado do Salto	69,69	90,23	104,75	116,16	124,62	133,02	152,43
5	Arroio Grande (condução)	15,85	20,52	23,82	26,42	28,34	30,25	34,67
6	Arroio Lobato	66,60	86,23	100,11	111,01	119,10	127,13	145,68
7	Arroio do Meio	30,78	39,85	46,26	51,30	55,04	58,75	67,32
8	Arroio do Veado	61,14	79,16	91,90	101,90	109,33	116,70	133,73
9	Rio Vacacai-Mirim	53,83	71,41	82,92	92,36	99,37	106,32	122,39
10	Arroio Grande Baixo	13,67	18,13	21,09	24,44	26,92	29,39	35,08

Fonte: Aplicação do Método I Pai Wu, elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Valores de vazão propagados nas SHRs, aplicados no modelo hidrológico-hidráulico.

SHR	Propagação das cheias	Q_p ($m^3.s^{-1}$)						
		TR 2	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100	TR 500
1	$Q_p\ SHR-1 = Q_p\ BV1 + Q_p\ BV2$	166,0	214,9	249,5	276,6	296,8	316,8	363,0
2	$Q_p\ SHR-2 = Q_p\ SHR-1 + Q_p\ BV3 + Q_p\ BV4$	289,2	374,4	434,7	482,0	517,2	552,0	632,6
3	$Q_p\ SHR-3 = Q_p\ SHR-2 + Q_p\ BV6$	355,8	460,7	534,8	593,1	636,3	679,1	778,2
4	$Q_p\ SHR-4 = Q_p\ SHR-3 + Q_p\ BV5$	371,7	481,2	558,6	619,5	664,6	709,4	812,9
5	$Q_p\ SHR-5 = Q_p\ SHR-4 + Q_p\ BV7 + Q_p\ BV9$	456,3	592,4	687,8	763,1	819,0	874,5	1002,6
6	$Q_p\ SHR-6 = Q_p\ SHR-5 + Q_p\ BV8 + Q_p\ BV10$	531,1	689,7	800,8	889,5	955,3	1020,6	1171,4

Fonte: Dados da tabela 9, conforme o diagrama unifilar da figura 39.

O MDT foi seccionado em 17 transectos, entre os quais as 6 SHRs selecionadas na propagação das vazões (Q_p), a jusante das confluências das BVs. Desses 17 transectos, o processamento através do HEC-RAS gerou, por

interpolação, 207 novas seções totalizando 224 seções hidrológicas. Salienta-se que o leito menor dos 17 transectos foi pré-ajustado geometricamente, pelo editor de seções transversais do HEC-RAS, tomando por base as cotas das margens e do fundo do canal principal, medidas em campo.

Constataram-se, por reambulação em várias seções interpoladas, diferenças na posição planimétrica e no nível do canal principal, em relação a que foi mapeada. Fez-se uma triagem e posterior descarte dessas seções, mantendo-se apenas as que resultaram no nível de água modelado mais próximo das cotas das marcas nas seções verdadeiras, resultando em 33 SHRs para a modelagem.

Para resolver a simulação dos níveis de água nas SHRs, através do HEC-RAS, pressupôs-se haver os seguintes pré-requisitos contemplados:

1. O fluxo é constante ou gradualmente variado;
2. É unidimensional – desconsideraram-se os componentes da velocidade que diferem da direção do fluxo; e
3. Os canais dos cursos de água têm pequenas declividades (1:10).

Na associação das vazões de projeto (Q_p) às SHRs selecionadas, estabeleceram-se quais as condições de limite têm-se nos extremos (a montante e a jusante) do sistema fluvial. Essas condições podem ser definidas pelo nível de água; pelo desnível (m/m) no canal; pela profundidade crítica; ou por uma equação curva-chave. A curva-chave ou o nível da água pressupõem o monitoramento nas seções de interesse, situação inexistente na bacia, assim, optou-se por condições de nível normal, obtido em função da declividade do canal na seção.

A propagação das cheias sobre a superfície modelada com o HEC-RAS obedece à relação existente entre a vazão (Q_p) e as características físicas e geométricas do canal, nas seções de montante e jusante, em cada trecho considerado. Naturalmente, essas características se modificam de seção para seção, influenciando as condições do escoamento.

Surgem, assim, condições localizadas ao longo do canal, decorrentes das variações de rugosidade na superfície (“n” de Manning) e de estreitamentos ou alargamentos do canal (raio hidráulico). Tais condições promovem alterações na velocidade do escoamento, alterando o nível da cheia. Situações assim são encontradas em pontes e galerias, nos cruzamentos de estradas sobre canais fluviais, onde ocorrem os efeitos de contração, em que velocidade à jusante é maior

que a montante, ou de expansão, no qual a velocidade é maior a montante do que a jusante.

Os cálculos da transferência de energia, em fluxos unidimensionais constantes como assumido para o Arroio Grande, partem da determinação de sua perda de carga, na seção de jusante (exutório) a partir de sua seção imediata a montante, no canal principal (Figura 53). Os perfis com os níveis de água são calculados entre seções, reciprocamente, resolvendo a Equação da Energia

$$(Equação 18) \quad Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2g} + h_e \quad (18) \quad \text{com}$$

um procedimento iterativo chamado Método de Passo Padrão.

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2g} + h_e \quad (18)$$

Onde:

Z_1, Z_2 = Elevação do fundo do canal principal (m);

Y_1, Y_2 = Profundidade da água na seção transversal (m);

V_1, V_2 = Velocidades médias [vazão total/área total do fluxo], (m^3/s);

α_1, α_2 = Coeficientes de ponderação da velocidade;

g = Aceleração da gravidade (m/s^2);

h_e = Perda de carga da energia (m).

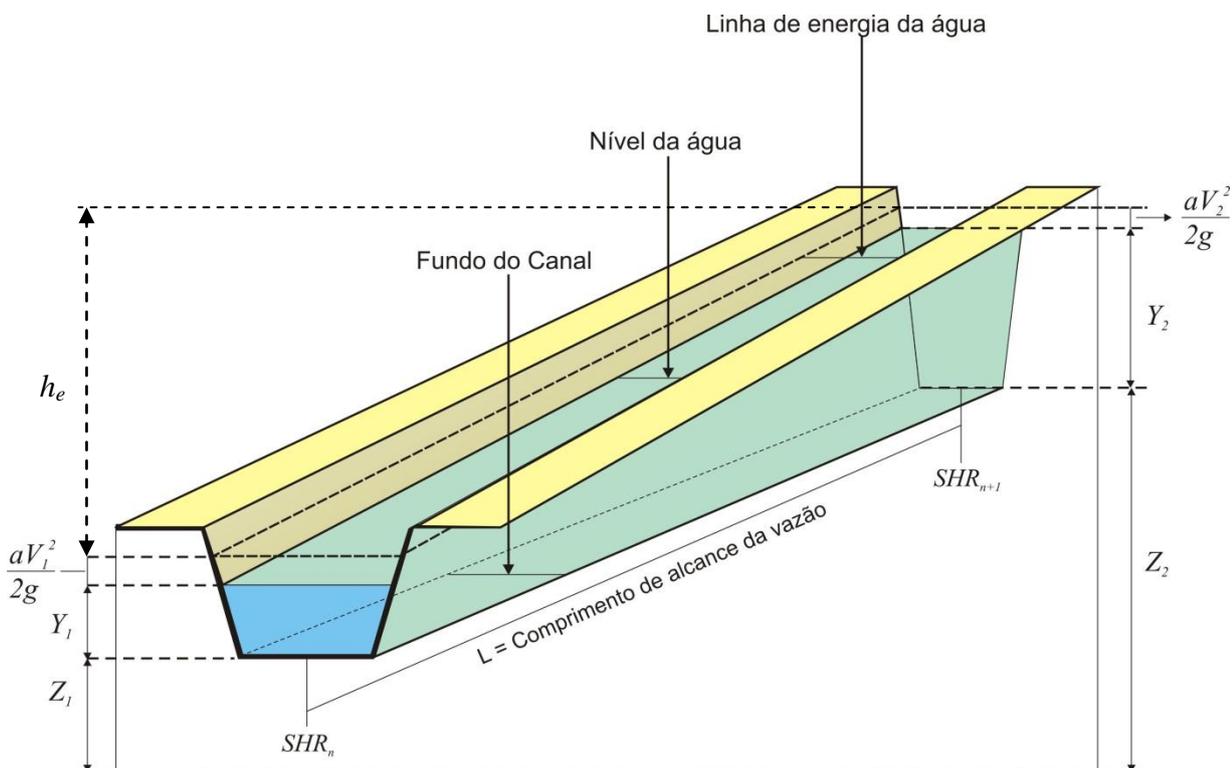


Figura 53 – Representação esquemática de seções para os termos da equação 18.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Da figura 53 depreende-se que a diferença no nível da cheia, entre duas seções quaisquer do Arroio Grande, é consequência da transferência de energia (h_e) na vazão, composta de perdas por atrito na declividade do canal, por contração e por expansão. Essa perda de carga é diretamente proporcional ao comprimento (L) de alcance da vazão, cuja medida é ponderada pela média da vazão no canal e suas margens.

A perda de carga da energia entre duas SHRs obtém-se pela equação 19.

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left[\left(\frac{a_2 V_2^2}{2g} \right) - \left(\frac{a_1 V_1^2}{2g} \right) \right] \quad (19)$$

Onde:

L = Distância ponderada do alcance da vazão;

\bar{S}_f = Coeficiente de atrito;

C = Coeficiente de perdas por expansão ou contração.

Analisando os termos da equação 19, tem-se o comprimento (L) e o coeficiente de atrito (\bar{S}_f) como elementos geométricos e a velocidade da vazão (V) como elemento hidráulico, ambos determinantes da perda de carga na energia “ h_e ” do escoamento e, por consequência, da modificação no nível da água na SHR.

O atrito (\bar{S}_f) é inerente à declividade (condição inalterável (MDT)) e o comprimento ponderado (L) de alcance da vazão resulta do local definido pelo modelador para a SHR de interesse (condição alterável).

A velocidade da vazão (V) é modificada, sempre que se alteram as condições impostas ao escoamento nas seções, montante e jusante, e suas frações de margem esquerda (ME), canal principal (CP) e margem direita (MD). Por essa razão a transferência de energia é maior nas seções com maior área e perímetro de molhamento, pois o raio hidráulico também é maior, resultando maior “ h_e ”.

O “n” de Manning, que ingressa no processamento via mapeamento digital da cobertura do terreno, é inversamente proporcional à vazão. Aumentando a rugosidade no canal, a transferência de energia é mais lenta e a vazão é menor. Essa regra aplica-se, igualmente, na ME, CP e MD, distribuindo a vazão total em

cada fração da SHR. O programa HEC-RAS computa um valor médio de vazão, gerado a partir da contribuição individual da ME, CP e MD de uma SHR_n e, também, de SHR_{n+1} .

A perda de carga da energia entre seções resulta das modificações em “V”, do coeficiente de atrito “ $\overline{S_f}$ ” na SHR e do Coeficiente de contração e expansão (C_{ce}). O valor do atrito ao longo de um trecho do canal é dado pela média entre os atritos de cada seção. O Coeficiente (C_{ce}) é tabelado para casos típicos de pontes em 0,3 para contração e 0,5 para expansão.

A relação entre vazão e a transferência de energia do escoamento entre SHRs, resultando em perda de carga, produz uma elevação (ou rebaixamento) no nível da água. Se a vazão média é informada para duas, ou mais SHRs de interesse, o programa pondera a distribuição da velocidade de escoamento em cada SHR, entre ME, CP e MD.

Em um trecho qualquer, entre duas SHRs, suas respectivas áreas (“n” de Manning e raio hidráulico) e seus coeficientes $\overline{S_f}$ e C_{ce} modificam a perda de carga. Uma vazão é computada para a seção subsequente, resultando no nível modelado da água, que é comparado com o nível obtido em função da Q_p informada. Esse “passo padrão” itera até atingir o equilíbrio.

Pelas iterações do Método do Passo Padrão, usado pelo HEC-RAS, primeiramente obtém-se a perda de carga em função das características do canal (equação 19), verificando-se a resultante “ h_e ” pela transferência de energia entre seções consecutivas. A iteração, passo a passo, ocorre como segue:

1. Um nível de água é assumido na seção transversal a montante (ou a jusante) em função da vazão de entrada (Q_p do Método I Pai Wu);
2. Baseando-se nesse nível determina-se a transferência total e a velocidade correspondente à carga hidráulica, na seção definida e sua subsequente;
3. A partir do passo “2” determina-se o coeficiente de atrito “ $\overline{S_f}$ ” e resolve-se a equação 19 para esse valor;
4. Com os produtos dos passos 2 e 3, resolve-se a equação 18 resultando no nível da água modelado – HEC-RAS (N_{HR});
5. O nível simulado (N_{HR}) é comparado com o nível assumido no passo “1” (oriundo de Q_p) e o processo itera, até que ambos sejam

concordantes, no limite da tolerância estabelecida pelo modelador, definida em 0,3m, que é a máxima tolerância admitida pelo programa.

Ao produzirem-se os cenários de inundação pelo HEC-RAS, constatou-se que o processo de modelagem pode, ao longo do canal principal, tanto subestimar, quanto superestimar os níveis da água nas SHR. Tal situação pode ser analisada observando-se as cotas das marcas da enchente de 04/01/2010 (TR 5 anos), no perfil longitudinal do Arroio Grande, do exutório até o ponto da SHR mais distante, representadas pelos pontos em vermelho, pela figura 54.

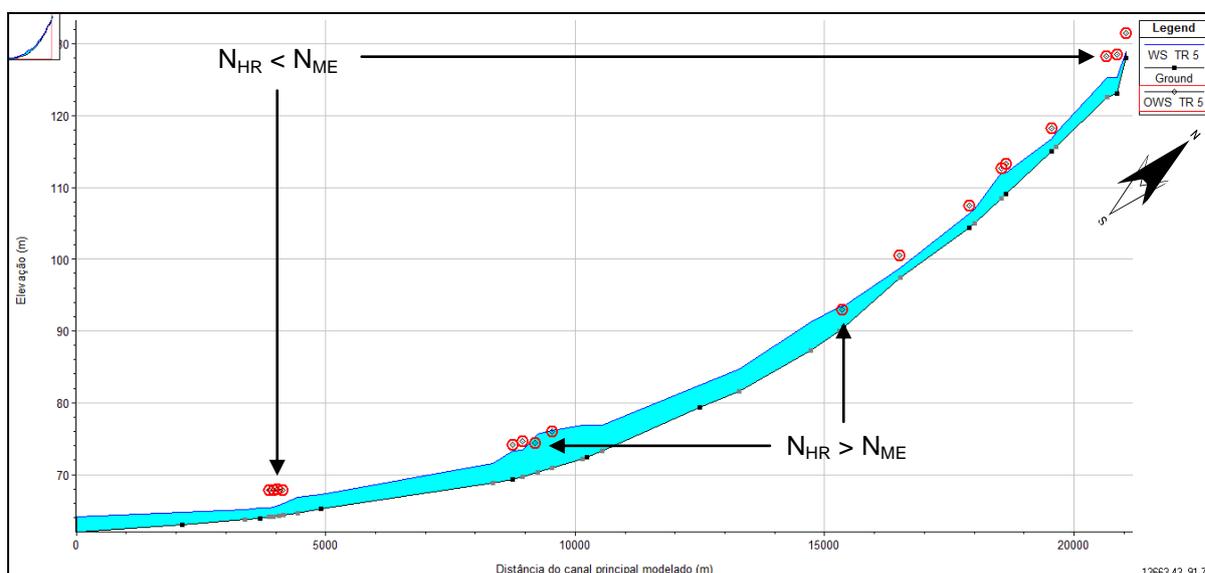


Figura 54 – Perfil longitudinal do Arroio Grande, contendo os níveis de inundação modelados (N_{HR}) para TR de 5 anos e as marcas de enchentes mapeadas (N_{ME}).
Fonte: Elaborado pelo autor.

Numericamente, as diferenças resultantes do processamento pelo HEC-RAS, entre os níveis de cheia calculados (N_{HR}), para o TR de 5 anos, e os níveis das marcas de enchentes (N_{ME}) causadas por chuvas diárias, equivalentes à do modelo, demonstraram que o Método de I Pai Wu tende a subestimar as vazões ocorridas. Mediante essa constatação, analisaram-se as diferenças entre N_{HR} e N_{ME} para confirmar a possibilidade de “solução direta” da modelagem e proceder à geração dos Mapas de Áreas Alagáveis (AA).

Para isso foi gerado um mapa preliminar da AA para o TR de 5 anos, pelo qual se compararam os valores modelados com os valores medidos. As medidas modeladas com o HEC-RAS (N_{HR}) resultaram das cotas do MDT (Z) somadas às profundidades (Y), exatamente no local da marca de enchente mapeada. A

comparação de N_{HR} (modelado) e N_{ME} (campo) resultou em amplitude total de -3,6m a 2,37m. Os desvios (\neq) entre N_{HR} e N_{ME} , bem como os valores calculados e medidos em campo são apresentados na tabela 11a seguir:

Tabela 11 – Resultados comparativos entre níveis de enchentes modelados, níveis mapeados (marcas de enchentes) e respectivas diferenças.

Marca de Enchente	Z_i (MDT) (m)	" Y_i " (Prof) (m)	N_{HR} (m)	N_{ME} (m)	\neq (m)
Margem esquerda da pranchada Pozzobom	128,38	1,71	130,09	131,50	-1,41
Marco georreferenciado no Balneário Ouro Verde	124,81	0,27	125,08	128,68	-3,60
Árvore no Balneário Ouro Verde	123,11	2,21	125,32	128,50	-3,18
Ponto no campo de futebol (1)	124,62	0,70	125,32	128,30	-2,98
Ponto no campo de futebol (1)	125,08	0,24	125,32	128,30	-2,98
Porta da casa da Sra. Scremin	117,35	0,13	117,48	118,20	-0,72
Estrada de Três Barras - Localidade do Bona	112,92	0,00	112,92	113,67	-0,75
Casa da Sra. Neiva Rossi	111,94	0,41	112,35	112,64	-0,29
Casa da Sra. Neiva Rossi	111,49	0,51	112,00	112,64	-0,64
Cerca da casa de Airton Fernandes	111,62	0,43	112,05	113,30	-1,25
Marca na Estrada 3Barras	111,71	0,28	111,99	112,30	-0,31
Casa do Sr. Fernandes (1)	107,63	0,00	107,63	108,30	-0,67
Casa do Sr. Fernandes (2)	107,01	0,00	107,01	107,50	-0,49
Cerca do trevo da paineira	106,67	0,00	106,67	107,30	-0,63
Parede da casa de HÉlvio Zimmermann	103,26	0,50	103,75	104,18	-0,42
Cerca do Zimmermann - janeiro/2010	103,52	0,30	103,81	104,10	-0,29
Marca na Estrada 3Barras	100,00	0,00	100,00	100,52	-0,52
Marca na estradinha da pinguela	98,96	0,00	98,96	98,92	0,04
Fundos da roça do Sr. Dari Dala Lana	95,27	0,00	95,27	95,50	-0,23
Confluência Arroio Grande-Arroio Manoel Alves	91,02	2,39	93,41	94,10	-0,69
Pilar da ponte de Arroio Manoel Alves	94,61	0,00	94,61	96,47	-1,86
Ponte da Est. Invernadinha no Arroio do Meio	74,01	2,12	76,13	76,00	0,13
Marca em casa da Est. da Invernadinha	72,52	3,85	76,37	74,00	2,37
Marca na casa de Eder Petine	71,95	3,66	75,61	74,34	1,27
Moirão de cerca na casa da Sra. Petine	73,34	1,79	75,13	74,50	0,63
Marca na parede da casa da família Budel	72,99	0,80	73,78	74,38	-0,60
Acesso à propriedade da família Budel	72,47	0,90	73,37	73,84	-0,47
Transposição da água sobre a ERS-511	73,91	0,00	73,91	74,20	-0,29
Ponte do Arroio do Meio	75,30	0,00	75,30	75,77	-0,47
Ponte do Arroio do Meio	75,63	0,00	75,63	75,77	-0,14
Parede do galpão família Guidolin	73,10	0,22	73,32	74,98	-1,66
Gramado em casa na Estrada Fighera	65,33	0,58	65,90	67,82	-1,92
Marca na Estrada Fighera (1)	66,90	0,00	66,90	67,85	-0,95
Marca na Estrada Fighera (2)	67,59	0,00	67,59	67,97	-0,38
Fundos da casa Estrada Fighera	65,72	0,00	65,72	67,86	-2,14
Terreno de casa na parada Fighera (RS-509)	63,67	1,09	64,76	63,67	1,09

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dos 36 N_{ME} usados na comparação, 30 N_{HR} resultaram negativos, ou seja, $N_{HR} < N_{ME}$. Isso é observado através do Gráfico “A” da figura 55. Já pelo Gráfico “B” observa-se que N_{HR} e N_{ME} são proporcionalmente equivalentes, demonstrando que os resultados modelados são coerentes com o fenômeno observado.

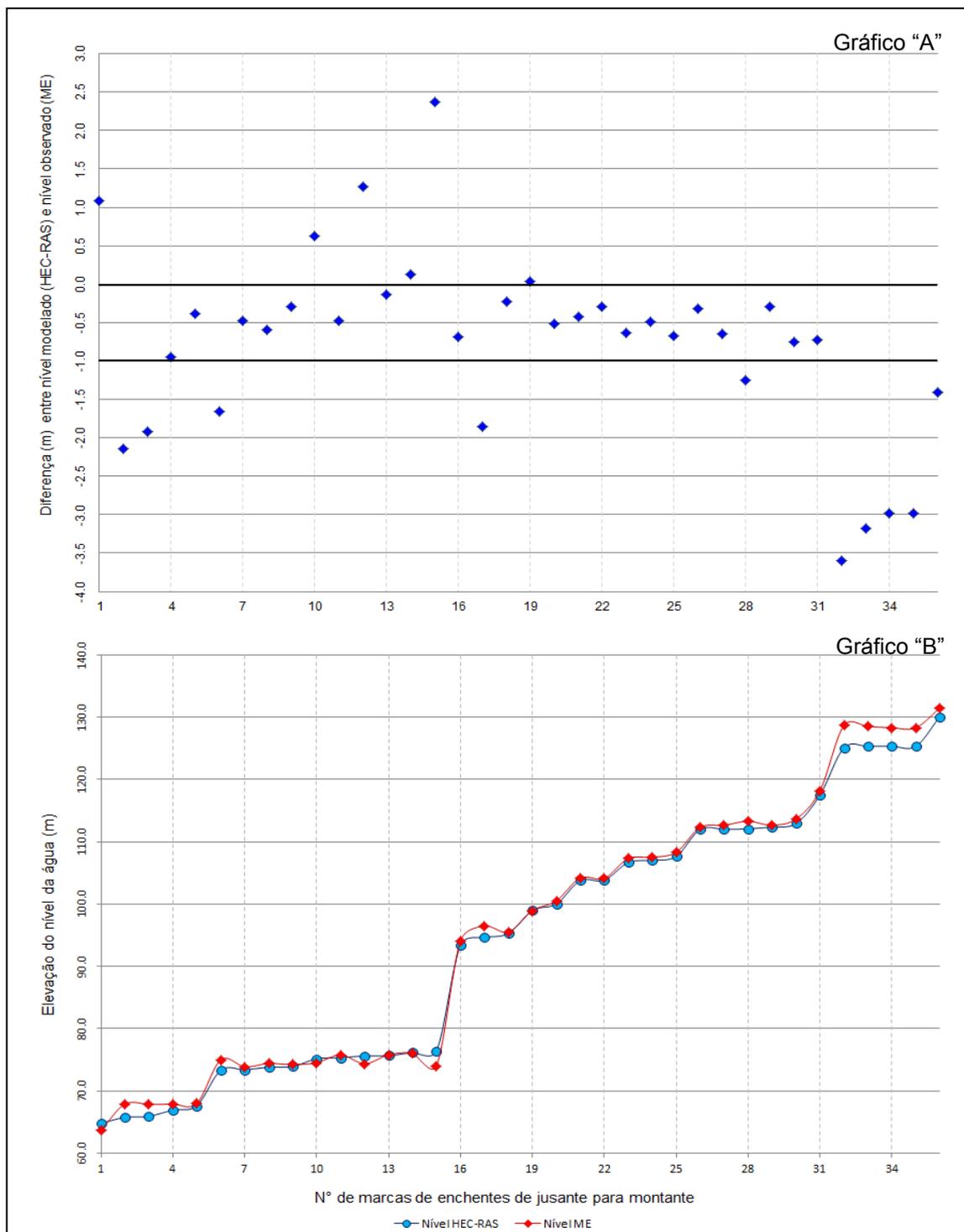


Figura 55 – Comparativos entre N_{HR} e N_{ME} . Gráfico “A” – Diferença ($N_{HR} - N_{ME}$). Gráfico “B” – Perfis das elevações de N_{HR} (azul) e N_{ME} (vermelho).
Fonte: Elaborado pelo autor.

As diferenças encontradas nos níveis de cheias simulados pelo programa HEC-RAS, em relação às cotas mapeadas, podem ser explicadas por, pelo menos, três fatores intervenientes nos processos que formam as enchentes e nos cálculos da modelagem. Muitos fatores são dinâmicos em curtos intervalos de tempo, momentâneos, como ocorre com troncos de árvores tombadas no leito menor, pela energia erosiva da água das cheias. Esses efeitos dificilmente têm condições de ser representados, tanto pelos MDTs, quanto pela modelagem hidrológico-hidráulica.

O primeiro fator que interfere nas diferenças “ N_{HR} vs. N_{ME} ” é topográfico, preponderante na determinação da área de alagamento (AA). Por isso, ao gerar o MDT e aplicá-lo como base para a obtenção de índices fisiográficos das sub-bacias, incluem-se condições que influenciam o escoamento superficial, relacionadas ao solo e contempladas pelos coeficientes “C” e “K” do Método de I Pai Wu. Desses cálculos as vazões de cheias (Q_p) resultantes são introduzidas como valores de partida (“start”) da modelagem hidrológico-hidráulica, realizada pelo HEC-RAS.

O segundo componente das diferenças entre N_{HR} e N_{ME} encontra-se nos termos da equação da transferência de energia entre as SHRs, na qual o valor “ Z_i ” é proveniente do valor digital do pixel do MDT. Diante dessa constatação, deve-se respeitar a variação altimétrica admissível do MDT, cujo Desvio Padrão (σ) entre pontos amostrais de terreno e valores digitais, resultou $\pm 0,6m$. Isso significa aceitar que os valores de “ Z_i ”, e por consequência de “ Y_i ”, na modelagem hidrológico-hidráulica, também sofrerão variações da mesma ordem, cuja tendência é para medidas de “ Z_i ” subestimadas, visto no Gráfico A da figura 55.

O terceiro fator de influência nos níveis modelados resulta da cobertura do terreno, que representa um dos principais fatores relacionados ao movimento da água na superfície e fornece o “n” de Manning, obtido por classificação digital de imagem de satélite, para toda a área da bacia do Arroio Grande. A rugosidade do canal e das margens afeta a velocidade do escoamento e sua influência é direta na modelagem hidrológico-hidráulica. Ao mesmo tempo em que a vazão é afetada pela rugosidade do canal, os níveis alcançados pelas cheias, também sofrem alterações localizadas, principalmente, em áreas onde a vegetação arbórea nas margens é mais densa.

A resistência ao escoamento, imposta pelos troncos de árvores, substratos diversos no sub-bosque e resíduos florestais nas margens e dentro dos canais, dificulta a passagem da enchente, o que produz nesses locais uma elevação no

nível da cheia no leito menor. Tal característica comprova a importância da conservação das áreas de preservação permanente em beiras de rios, também com o intuito de proteção das áreas em planícies de inundação, que formam leito maior dos rios. Essa constatação tem respaldo em recente pesquisa da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), a qual concluiu que a vegetação das margens dos cursos d'água evita enchentes, e que a vazão dos rios em áreas cultivadas é sete vezes maior que em áreas florestadas³¹.

A falta de monitoramento fluviométrico em bacias com características semelhantes às da área de pesquisa da tese, limita a possibilidade de aferição e calibração dos resultados obtidos pela modelagem. As observações visualizadas no perfil longitudinal do canal principal, referentes aos níveis das “Q_p” modeladas, assumem desta forma um caráter empírico – aproximado, pois a transformação de chuva em vazão, por modelos matemáticos, não contempla a total complexidade de fatores intervenientes na formação das enchentes.

Relembrando o objetivo geral desta tese, de desenvolver um método para geração de informações espaciais de áreas de alagamento, destinadas à organização da mobilidade agrícola e rural, assumiu-se que o método proposto resultou em um cenário de área de alagamento (AA) que subestima os níveis observados e, por consequência, as AAs em enchentes com TR de 5 anos e P_{pmax.dia.} em torno de 115,0mm.

Mesmo resultando em diferenças significativas entre as cotas mapeadas e os níveis modelados, a relação entre as chuvas máximas diárias e as AAs mapeadas sobre a bacia, foco principal desta metodologia, foi mapeada.

4.1.4 Ajuste e validação das AAs através de marcas de enchentes

Esta seção apresenta os resultados do ajuste e da validação dos mapas, gerados a partir da modelagem hidrológico-hidráulica das AAs da bacia, com base nas marcas das enchentes deixadas por precipitações diárias ocorridas, equivalentes às estimadas para diferentes TRs.

³¹ Disponível em:

http://www.ufpe.br/agencia/index.php?option=com_content&view=article&id=40140:cidades--mata-ciliar-e-solucao-para-as-inundacoes&catid=9&Itemid=73. Acessado em: 03/01/2013.

Os resultados da simulação direta de cenários de AAs necessitaram ser ajustados por meio das cotas niveladas das marcas de enchentes, introduzindo o verdadeiro nível assumido pela água na SHR e, com isso, modificando-se as condições locais que afetam o fluxo da água e, conseqüentemente, a vazão.

O perfil de nível da água foi construído a partir da realidade topográfica do MDT (Z_i), combinada a um modelo de transformação chuva-vazão (Método de I Pai Wu), que forneceu às SHRs as “medidas de partida” (Q_p), na simulação direta pelo HEC-RAS, através de um processo iterativo já comentado. Entretanto, quando a “ Q_p ” resulta em valores subestimados, ou quando o MDT possui uma precisão relativa, é possível que os níveis modelados (N_{HR}) não se equiparem às cotas de marcas de enchentes (N_{ME}).

Para corrigir o desvio do modelo de AA em relação às medidas de ocorrências passadas, o HEC-RAS possibilita definir parâmetros da Equação de Energia (Equação 18), para que, em nova simulação, esses valores sejam tomados como referência nos cálculos. Entre os parâmetros possíveis de ser ajustados estão o “n” de Manning, a perda de carga da energia (h_e) e a elevação de nível da superfície da água, na seção de interesse ($Y_i + Z_i$). Desses parâmetros o que foi considerado mais simples de ser obtido foi o nível de marcas de enchentes, visto que o “n” de Manning foi fixado em função da cobertura do terreno. Já o cálculo da perda de carga na energia demandaria conhecer variáveis como a velocidade do escoamento e, também a vazão real.

A partir do inventário das marcas de enchentes, que se fez ao longo do período da pesquisa (agosto de 2008 a janeiro de 2013), obteve-se o maior número de registros para a enchente de 04 de janeiro de 2010, que corresponde a uma chuva diária total com TR de 5 anos.

Ao todo foram inventariadas, niveladas e georreferenciadas 66 marcas de diversas enchentes (Tabela 12). Desse total, foram usadas 36 níveis na avaliação da simulação direta, referente às enchentes com TR de 5 anos. Das 66 marcas, aplicaram-se 29 delas nas cotas de ajustamento para cenários de cheias, das quais a maior parcela (19 cotas) refere-se a eventos com TR de 5 anos. As cotas de marcas de cheias que não foram utilizadas constituem níveis da água em diferentes pontos de mesmas seções.

O programa HEC-RAS permite que se faça o ajuste geométrico nas SHRs, inserindo apenas uma cota para cada perfil. Nos casos em que foram inventariadas

mais de uma marca em uma mesma SHR para um mesmo TR, selecionou-se a cota com o melhor ajuste e as demais marcas foram descartadas na etapa de validação.

Tabela 12 – Datas, localizações, coordenadas, cotas e TR's das marcas de enchentes niveladas e georreferenciadas.

N°	Data	Tipo de marca ou dano	UTM N (m)	UTM E (m)	Cota (m)	TR	SHR
1	04/01/2010	Laje da Est. SM-Itaára submersa	6722645,201	237135,658	131,20	5	23019,35
2	15/04/2011	Laje da Est. SM-Itaára submersa	6722645,201	237135,658	129,46	2	23019,35
3	25/10/2011	Laje da Est. SM-Itaára submersa	6722645,201	237135,658	128,87	1,1	23019,35
4	04/01/2010	Campo do Balneário Ouro Verde	6722467,213	237106,735	128,70	5	22833,98
5	04/01/2010	Árvore do Balneário Ouro Verde	6722453,900	237036,300	128,50	5	22646,60
6	04/01/2010	Parede de casa (Sra. Scremin)	6721914,896	238005,188	118,20	5	21522,93
7	04/01/2010	Porteira de propriedade (Sr. Ailton Fernandes)	6721515,313	238642,055	113,30	5	20614,88
8	04/01/2010	Parede de casa (Sra. Neiva Rossi)	6721622,239	238646,551	112,64	5	20523,40
9	04/01/2010	Ponte da Linha Fernandes	6721158,532	239079,003	107,50	5	19883,33
10	04/01/2010	Tronco de árvore (casa Sr. Hélivio Zimmermann)	6720632,705	238976,939	104,10	5	19386,00
11	04/01/2010	Margem de estrada	6720004,564	239045,026	100,50	5	18491,00
12	04/01/2010	Marca na estradinha da pinguela (Loc. Fernandes)	6719788,450	239122,954	98,92	5	18093,21
13	04/01/2010	Fundos da roça do Sr. Dari Dala Lana	6719552,999	239527,784	95,50	5	17544,00
14	04/01/2010	Marca na confluência Arr. Gde c/ Arr. Man. Alves	6719434,424	239758,500	94,10	5	17360,94
15	04/01/2010	Ponte da Est. Invernadinha	6715333,540	241317,663	75,70	5	11517,30
16	04/01/2010	Pátio da casa amarela	6715275,641	241322,245	74,30	5	11417,50
17	04/01/2010	Parede da casa do Sr. Eder Petine	6715148,140	241456,998	74,30	5	11218,00
18	16/01/2010	Moirão da porteira na propr. da Sra. Petine	6715092,746	241511,397	74,40	4	11118,30
19	04/01/2010	Moirão da porteira na propr. da Sra. Petine	6714959,997	241661,348	74,50	5	11118,30
20	15/04/2011	Moirão de cerca	6715092,670	241511,419	73,50	2	11118,30
21	15/12/2003	Parede de casa	6714959,997	241661,348	74,70	10	10918,80
22	04/01/2010	Parede da casa da família Budel	6715092,820	241511,405	74,50	5	10918,80
23	16/01/2010	Poste de luz na entrada da propr. Família Budel	6714959,997	241661,348	73,84	4	10819,00
24	04/01/2010	Rodovia ERS-511 submersa	6714708,339	241351,102	74,40	5	10719,32
25	15/04/2011	Pilar da ponte da ERS-511 s/ Arr. do Meio	6714710,704	241354,632	74,12	2	10719,32
26	13/09/2010	Pilar de ponte	6714710,704	241354,632	73,86	1,1	10719,32
27	30/05/2012	Cerca perto de galeria na ERS-511	6714744,462	241143,477	73,02	3	10719,32
28	04/01/2010	Pátio de casa	6711769,760	242731,665	67,85	5	5936,30
29	15/12/2003	Poste de luz	6714959,997	241661,348	74,62	10	10819,00
30	04/01/2010	Fundos da casa na parada Fighera	6710285,463	243168,623	63,67	5	NA
31	04/01/2010	Campo de futebol submerso	6722413,001	237102,307	128,30	5	NA
32	04/01/2010	Campo de futebol submerso	6722418,779	237126,075	128,30	5	NA
33	04/01/2010	Margem de estrada	6721603,710	238593,180	113,67	5	NA
34	04/01/2010	Moirão de cerca	6721515,313	238642,055	113,30	5	NA
35	04/01/2010	Margem de estrada	6721492,625	238652,948	112,30	5	NA
36	04/01/2010	Parede de casa	6721180,112	239081,920	108,30	5	NA
37	04/01/2010	Arame de cerca	6721092,959	239041,500	107,30	5	NA
38	04/01/2010	Parede de casa	6720632,705	238976,939	104,18	5	NA
39	04/01/2010	Arame de cerca	6720636,788	238968,726	104,10	5	NA
40	30/05/2012	Pilar de ponte	6719513,997	239400,020	95,20	3	NA
41	15/04/2011	Pilar de ponte	6719513,997	239400,020	95,10	2	NA
42	16/01/2010	Parede de galpão	6715964,146	239575,753	85,96	4	NA
43	04/01/2010	Pilar de ponte	6713952,474	243656,800	77,22	5	NA

(continua na próxima página)

Tabela 12 – Datas, localizações, coordenadas, cotas e TR's das marcas de enchentes niveladas e georreferenciadas (continuação).

Nº	Data	Tipo de marca ou dano	UTM N (m)	UTM E (m)	Cota (m)	TR	SHR
44	07/01/2001	Pilar de ponte	6713952,474	243656,800	76,00	10	NA
45	04/01/2010	Rodovia ERS-511 submersa	6714717,536	241376,628	75,77	5	NA
46	30/05/2012	Arame de cerca	6714748,101	241020,515	75,70	3	NA
47	04/01/2010	Parede de casa	6713980,502	244007,891	75,62	5	NA
48	07/01/2001	Parede de casa	6713935,363	243719,856	75,30	10	NA
49	19/01/2010	Pilar de ponte	6715333,540	241317,663	75,20	3	NA
50	04/01/2010	Parede de casa	6713935,363	243719,856	75,16	5	NA
51	04/01/2010	Parede de galpão	6714738,662	241004,886	74,98	5	NA
52	04/01/2010	Parede de galpão	6714743,372	241011,353	74,98	5	NA
53	13/09/2010	Pilar de ponte	6715333,540	241317,663	74,88	1,1	NA
54	30/05/2012	Várzea submersa	6714924,541	241013,059	74,30	3	NA
55	19/01/2010	Parede da casa da família Budel	6714930,900	241690,000	74,30	3	NA
56	19/01/2010	Poste de luz	6714959,997	241661,348	74,24	3	NA
57	30/05/2012	Bueiro/galeria	6714744,462	241143,477	74,00	3	NA
58	13/09/2010	Pilar de ponte	6714712,170	241353,094	73,97	1,1	NA
59	15/04/2011	Pilar de ponte	6714717,254	241180,685	73,20	2	NA
60	13/09/2010	Pilar de ponte	6714717,254	241180,685	73,04	1,1	NA
61	13/09/2010	Pilar de ponte	6714730,792	241212,490	73,00	1,1	NA
62	13/09/2010	Pilar de ponte	6714710,520	241200,985	72,70	1,1	NA
63	16/01/2010	Poste de luz	6714898,448	241678,141	71,24	4	NA
64	04/01/2010	Margem de estrada	6711852,552	242726,085	67,97	5	NA
65	04/01/2010	Margem de estrada	6711835,634	242755,807	67,85	5	NA
66	04/01/2010	Pátio de casa	6711934,332	242729,324	67,82	5	NA
67	04/01/2010	Pilar da ponte do Arroio do Meio				5	

Observação: NA = Não Atribuída

Fonte: Dados de campo pesquisados pelo autor.

Sobre os dados da tabela 12 é importante comentar que a vida útil de uma marca de enchente é relativamente efêmera. A chuva, o vento e outros agentes intempéricos desgastam essas marcas que, com o passar do tempo, desaparecem naturalmente. Em residências e prédios particulares, os proprietários limpam os locais atingidos, tão logo o nível da água diminui, fazendo com que as marcas desapareçam dos locais de referência.

Por causa dessa particularidade, muitas marcas, das enchentes que ocorreram na região de estudo, não puderam ser mapeadas. Em alguns casos buscou-se a medição do nível da água pela indicação do morador, baseando-se na lembrança do fato ocorrido. Porém, isso gerou medidas que foram consideradas imprecisas, pois a verdadeira medida (testemunha) do nível da inundação deixou de existir no local que foi inundado.

Outra consideração importante a ser feita refere-se às características dos ambientes rurais. As edificações e os elementos físicos implantados no solo têm localização esparsa. As ruas não obedecem a uma geometria bem definida e regular

e, também, são escassos os cruzamentos. Todos esses locais são muito frequentes em áreas urbanas e constituem-se nos principais pontos de medição e validação para a espacialização das inundações. Como as áreas rurais são predominantemente ocupadas por lavouras, pastagens e florestas, espacialmente, os pontos de marcas de enchentes ficam muito distanciados uns dos outros.

Diante da escassez de dados de níveis de enchentes para ajustar e validar todos os TRs predefinidos e suas áreas alagamento modeladas, selecionou-se o TR de 5 anos para a validação. Porém, antes de ajustá-lo, ainda na simulação direta, calcularam-se as diferenças entre os níveis (N_{HR}) de água dos perfis de TR, nas SHRs com marcas de enchentes. Essas diferenças foram aplicadas no ajustamento dos perfis de TR de 10, 25, 50, 100 e 500 anos, sem marcas de enchentes, tomando por referência o nível ajustado do TR de 5 anos.

Desta forma, as diferenças provenientes dos N_{HR} modelados na simulação direta foram somadas ao nível do TR ajustado, gerando-se com isso “falsas cotas” de inundação para os TRs sem marcas verdadeiras, proporcionais ao perfil ajustado. Para o TR de 2 anos, as diferenças de nível foram subtraídas dos níveis ajustados do perfil de TR de 5 anos.

Definindo as cotas de marcas de cheias com TR de 5 anos, como medidas de referência para simular níveis de alagamento ajustados nas SHRs, a modelagem assume que o nível da água informado seja o parâmetro determinante para as demais variáveis envolvidas na simulação.

Recordando a descrição do método iterativo, que gera os níveis de alagamento através da modelagem (N_{HR}), quando o nível da água no exutório não é conhecido (caso de bacias sem monitoramento fluviométrico), necessita-se de uma vazão de entrada (Q_p) estimada, que permita “rodar” o modelo. Se, por meio dessa Q_p , obtida por meios indiretos (modelos matemáticos), os N_{HR} resultantes nos perfis de alagamento não alcançarem a tolerância admitida, o processamento pode ser “recalibrado” a partir de informações de níveis de enchentes, observados em quaisquer seções.

Como resultado desse trabalho de intervenção na modelagem hidrológico-hidráulica, um novo perfil longitudinal do Arroio Grande foi gerado, orientado pela inserção de elevações de níveis da água na superfície. Esses níveis (N_{ME}), para o modelo, compõem-se dos níveis de terreno “Z”, somados aos níveis de profundidade (Y) da água na SHR de interesse. “Z” é dependente do MDT, portanto, dado

Pelo ajuste realizado para os TR's menores e maiores que 5 anos, um novo perfil do leito menor do Arroio Grande foi gerado, sobre o qual ficaram dispostos os níveis proporcionais das cheias, em relação à cheia do TR que foi validado. Esse perfil longitudinal é ilustrado pela figura 57.

Da mesma forma que para o perfil do Arroio Grande, uma nova distribuição espacial da área de alagamento foi gerada. Através dessa modelagem, foi possível cruzar o modelo espacial da superfície de inundação com o MDT e, com isso, produzir os mapas de inundação para todos os TRs que foram trabalhados.

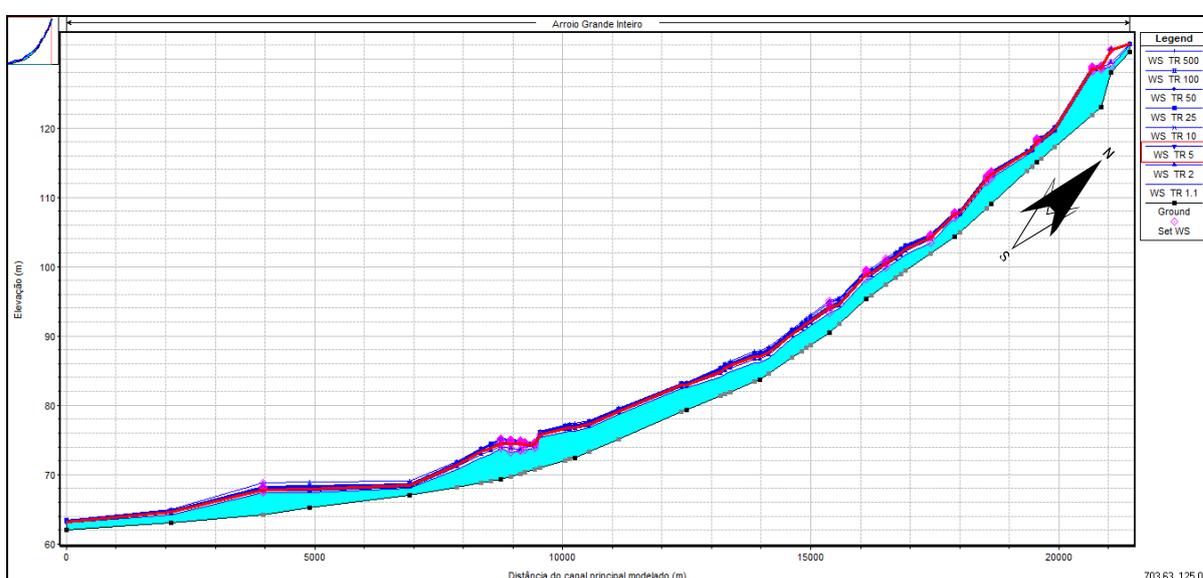


Figura 57 - Perfil longitudinal do Arroio Grande com os perfis de todos os TR's ajustados.

Fonte: Elaborado pelo autor, resultante da simulação supervisionada feita com HEC-RAS.

Ao usar as marcas de enchentes para validar o mapeamento, as áreas de alagamento foram aplicadas como critério de obstrução direta, sobre o sistema viário, cruzando os planos de informações por álgebra de mapas. Desta forma obtiveram-se os resultados da quantificação de elementos do sistema viário que podem ficar hipoteticamente submersos pelos alagamentos, cujas áreas foram modeladas.

Tabulando-se as áreas de alagamento ajustadas, pode-se verificar qual o comportamento da inundação à medida que aumenta o TR e as chuvas extremas.

Tabela 13 – Relação entre os tempos de retorno, precipitações de projeto e as áreas de inundação simuladas e ajustadas para a Bacia do Arroio Grande.

TR (anos)	Pp _{máxima} (mm.dia ⁻¹)	Área (km ²)
2	87,9	12,525
5	113,8	13,271
10	133,3	13,635
25	159,1	13,920
50	178,6	14,100
100	198,1	14,342
500	243,4	14,969

Fonte: Modelagem digital de terreno integrada à modelagem hidrológico-hidráulica (ArcGIS/HEC-GeoRAS/HEC-RAS), elaborada pelo autor.

O procedimento de supervisão da simulação, feito com as marcas de enchentes, redistribuiu da vazão ao longo do canal. Assim, algumas áreas antes modeladas como não inundáveis, pela simulação direta apareceram alagadas, e em outras ocorreu a situação inversa.

Os resultados mostraram que o comportamento da inundação na bacia, em função de precipitações diárias acumuladas, segue uma relação matemática dada por uma equação polinomial de terceiro grau, como visto pela equação 20, cujo coeficiente de determinação R^2 foi de 0,9959.

$$y = -0,000002x^3 - 0,0008x^2 + 0,1514x + 4,3355 \quad (20)$$

Pela equação 20, para cada valor de precipitação diária máxima (x) tem-se a obtenção de uma área de alague (y). A figura 58 ilustra, pelo gráfico, o comportamento das áreas de inundação, no qual se observa a curva que relaciona a área alagada à chuva de projeto causadora.

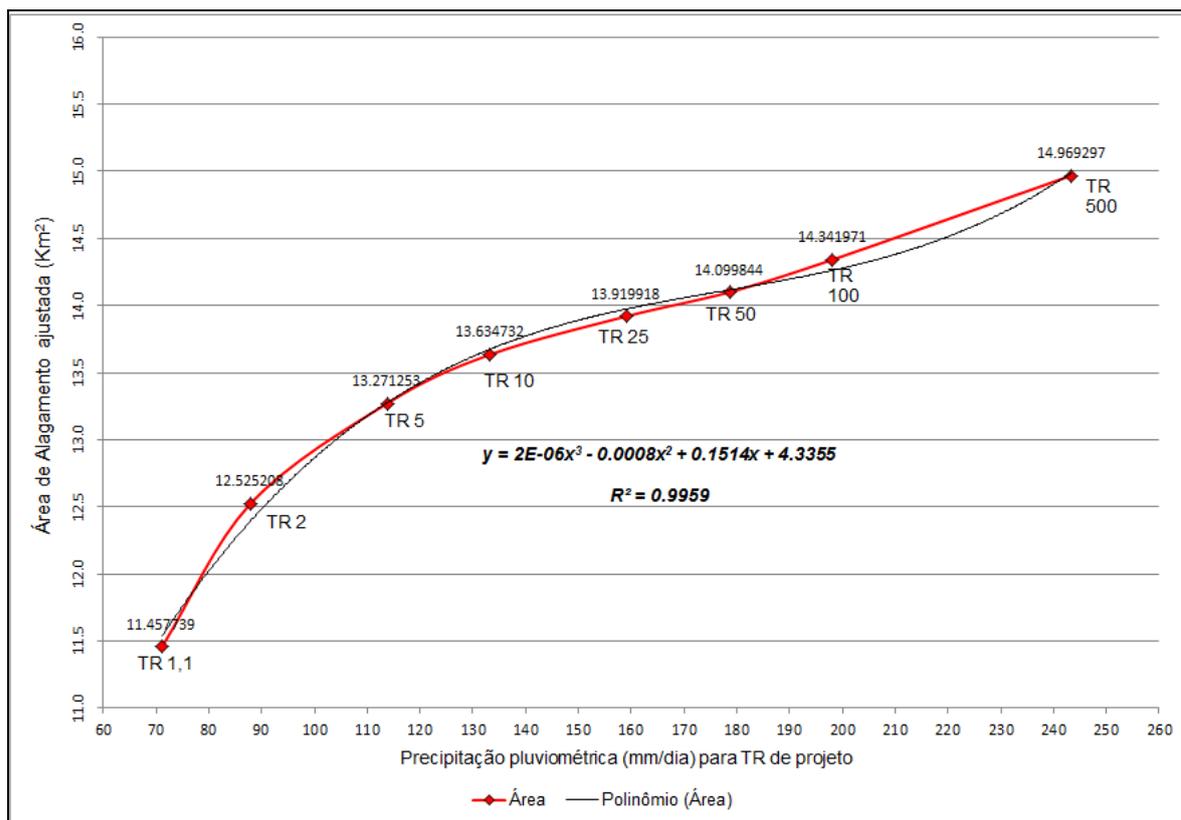


Figura 58 – Gráfico da relação entre o tempo de retorno, área inundável e a precipitação pluviométrica diária máxima calculada para a Bacia do Arroio Grande. Fonte: Dados tabulados pelo autor.

Porém a informação que mais importa para a organização e planejamento da mobilidade rural não é a quantidade de quilômetros quadrados que, potencialmente, podem ficar submersos pelas inundações. O essencial nesses casos é saber onde se localizam os trechos de estradas que cruzam áreas possivelmente inundáveis. Essa informação é obtida na forma de mapas temáticos das áreas de inundação, lançando sobre os polígonos de alagamento os vetores do sistema viário.

O mapa da figura 59 apresenta a espacialização das áreas de inundação na Bacia do Arroio Grande, mostrando, também, os trajetos das estradas que podem ficar submersas, no todo ou em parte, pelas águas das enchentes na bacia.

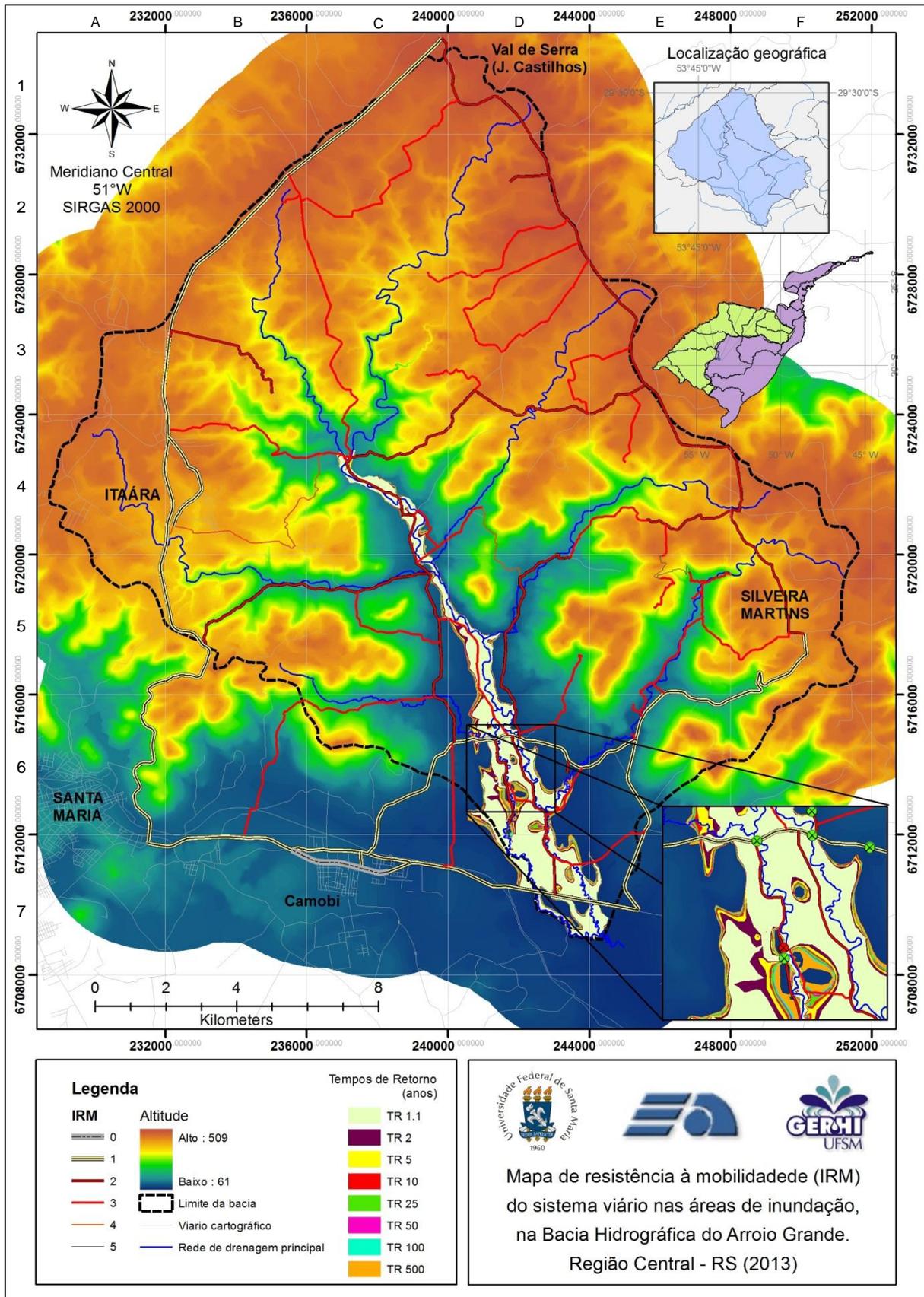


Figura 59 – Mapa das resistências à mobilidade nas áreas de inundação, na Bacia do Arroio Grande, considerando diferentes tempos de retorno.
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Fragilidades do sistema viário na planície de inundação

Para avaliar a vulnerabilidade de um sistema viário submetido às inundações, diversos autores, entre eles Cova e Conger (2003), Chaudhari (2009), Hossain e Davies (2004), Taylor e D'Este (S.I.), ressaltaram a complexidade das relações entre as estradas (com sua importância socioeconômica) e os desastres naturais, entre eles as inundações, cuja previsibilidade é incerta.

Para que um sistema viário mostre-se eficiente, os critérios de análise de suas fragilidades deveriam considerar o maior número possível de influências de cada fator existente no ambiente, como também das relações de integração entre esses fatores combinados. O ambiente mencionado não se resume ao aspecto natural, da bacia hidrográfica; ele abrange o espaço delimitado pelas estradas, que se interligam na forma de um polígono viário, pelo qual os pontos em qualquer lugar no interior do polígono podem ser acessados.

Porém, facilmente essa delimitação na forma de polígono viário encontra-se além dos limites topográficos da bacia. Com isso, o dimensionamento do escoamento superficial, abrangendo a integralidade de cruzamentos de rios, arroios ou sangas, com rodovias e estradas, necessita muitas vezes ser segmentado em sub-bacias, em alguns casos integrantes de bacias hidrográficas com deflúvios assumindo orientações geográficas para sentidos totalmente opostos.

Ao serem dimensionadas as estruturas de mobilidade, no ambiente rural, nem sempre seus construtores seguem critérios técnicos recomendáveis, para suportar inundações. Principalmente, em relação às estradas rurais de terra, existem muitos equívocos relacionados aos seus traçados e, também, às estruturas de drenagem pluvial. Desta forma, como mostra o mapa da figura 59, ocorre em muitos locais na bacia, estradas com trajetórias paralelas aos canais fluviais, sendo essa uma característica negativa para a prevenção das inundações no sistema viário. Como consequência desses percursos estarem muito próximos aos cursos de água, surgem muitos cruzamentos das vias com os arroios, ou mesmo sangas de escoamento pluvial intermitente.

O sistema viário, além disso, apresenta uma relação ambígua com o escoamento das águas das chuvas. Existem casos em que o sistema viário é um protetor para áreas ribeirinhas ou áreas a jusante, quando construído sobre diques de proteção, onde a cota da via, teoricamente, é projetada para ficar acima do nível

das inundações. Também, em estradas rurais, observa-se que o envaletamento das margens das estradas, transforma o sistema viário em parte integrante (intermitente) do sistema de drenagem da bacia.

Entretanto, quando o sistema viário é construído acima do nível normal do terreno ao redor, como ocorre, principalmente, no cruzamento de rodovias por planícies de inundação, pode ocorrer o represamento da água a montante do maciço, especialmente se as galerias e pontes não forem dimensionadas corretamente.

Como foi organizado na metodologia, o mapeamento das fragilidades do sistema viário considerou, inicialmente, a classificação da trafegabilidade viária de cada trecho de estrada, através da reambulação (reconhecimento) dessa condição *in loco*. Ao classificar as estradas, os trechos receberam um indicador, denominado **IRM (Índice de Resistência à Mobilidade)**. Esse valor, ao ser atribuído sobre os trechos, possibilitou mapear a resistência à mobilidade ao longo das estradas e nos pontos de interseção com os canais da rede de drenagem natural.

Nos trechos das estradas, fatores condicionantes, como a altitude e a declividade do terreno, além dos que modificam a superfície (naturais e antrópicos principalmente), afetam a fragilidade do sistema viário de maneiras e graus de impacto diferentes.

Entre os condicionantes da vulnerabilidade, o tipo de solo pode ser considerado um fator de influência secundário, para a mobilidade rural, pois, como se sabe, o processo construtivo de rodovias e estradas (asfaltadas ou de terra) envolve, na fase de preparação do terreno, a remoção do material de origem e sua substituição por outros tipos de materiais, como: argila, cascalho, brita, entre outros.

Os resultados obtidos para a categorização do sistema viário, segundo índices representativos de sua trafegabilidade e vulnerabilidade mostraram-se muito úteis para o planejamento e gestão da mobilidade rural, na área de pesquisas. Os mapas da classificação do sistema viário pelo IRM apresentam a condição de existência normal da mobilidade agrícola e rural em uma bacia hidrográfica. Sobre essa condição normal de ocorrência, os trajetos das vias sofrem a influência dos fatores agravantes do problema das enchentes, já mencionados.

Ao desenvolver o método proposto nesta tese considerou-se, com base nas observações de campo e inventário de marcas de enchentes, que o maior impacto possível desse fenômeno sobre a mobilidade, encontra-se nos cruzamentos entre a

drenagem natural e o sistema viário. Esses pontos são representados, na bacia em estudo, por pontes de concreto, mistas (pilares de concreto e pista de madeira), pontes somente de madeira, vaus ou lajes de passagem (pranchadas), pinguelas suspensas por cabos de aço, galerias e bueiros. Expoente máximo desta constatação pode ser encontrado no episódio de rompimento da ponte da RST-287, entre os municípios de Restinga Seca e Agudo, Região Central do RS, pela enchente de 04 e 05 de janeiro de 2010.

A partir do ordenamento hidrológico da rede de drenagem, conforme o Método de Strahler; e dos cruzamentos dessa rede com a malha viária, classificada pelo IRM, originou-se o **Índice de Fragilidade Pontual (IFP)** da mobilidade rural. Os resultados dessas classificações e da geração do IFP estão nos quadros 13 e 14 que, respectivamente, apresentam os valores dos IFPs da bacia em termos numéricos e em tipos de estruturas de transposição que podem ser encontradas.

Índice de Resistência à Mobilidade	Magnitude Fluvial de Strahler						
		5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0
1	5	6	7	8	9	10	
2	10	12	14	16	18	20	
3	15	18	21	24	27	30	
4	20	24	28	32	36	40	
5	25	30	35	40	45	50	

Quadro 13 – Classificação numérica do Índice de Fragilidade Pontual na área de pesquisas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Índice de Resistência à Mobilidade	Magnitude Fluvial de Strahler						
		5	6	7	8	9	10
0	Galeria	Galeria	Galeria	Ponte asfalto	Ponte asfalto	Ponte asfalto	
1	Galeria	Galeria	Galeria	Ponte asfalto	Ponte asfalto	Ponte asfalto	
2	Galeria	Galeria	Ponte mista	Ponte mista	Ponte mista	Ponte asfalto	
3	Vau (laje) ou galeria	Vau (laje) ou galeria	Ponte de madeira	Ponte de madeira	Ponte mista	Ponte mista	
4	Sem estrutura	Vau (laje)	Vau (laje)	Ponte de madeira	Sem estrutura	Sem estrutura	
5	Sem estrutura	Sem estrutura	Sem estrutura	Sem estrutura	Sem estrutura	Sem estrutura	

Quadro 14 - Tipificação das estruturas de transposição dos cruzamentos do sistema viário com a rede de drenagem na área de pesquisas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando as relações construídas a partir do cruzamento dos indicadores IRM e Strahler, estabeleceram-se intervalos de valores de fragilidade pontual, cuja tipificação do problema fundamentou-se na observação *in loco* das ocorrências de cheias, cujas marcas de enchentes foram mapeadas. Com essa informação foi possível estabelecer, por exemplo, que uma estrada de IRM 3 (transitável somente em tempo seco) ao cruzar por um arroio de magnitude Strahler – Ordem 8 (para um máximo de 10) há elevado risco de obstrução à mobilidade rural.

O quadro 15, a seguir, apresenta a classificação dos intervalos de IFP e seus significados práticos na forma de estruturas que ocorrem no local, bem como o grau do risco inerente ao problema da falta de mobilidade rural.

IFP	Tipo de estrutura de transposição	Risco
5 - 13	<ul style="list-style-type: none"> • Para IRM (0, 1 e 2) e Strahler (5, 6 e 7), galerias; • Para IRM (0, 1 e 2) e Strahler (8, 9 e 10), ponte de concreto e asfalto. 	Baixo
14 - 23	<ul style="list-style-type: none"> • Para IRM=4 e Strahler=5, sem estrutura; • Para IRM=3 e Strahler (5 e 6), vau (laje); • Para IRM=3 e Strahler=7, ponte de madeira; • Para IRM=2 e Strahler (7, 8 e 9), ponte mista (concreto/madeira); • Para IRM=2 e Strahler=10, ponte de concreto/asfalto. 	Médio
24 - 50	<ul style="list-style-type: none"> • Para IRM=5 e qualquer ordem Strahler, passagem sem estrutura; • Para IRM=4 e Strahler (6 e 7), vau (laje); • Para IRM=4 e Strahler=8, vau ou ponte de madeira; • Para IRM=4 e Strahler (9 e 10), sem passagem; • Para IRM=3 e Strahler=8, vau ou ponte de madeira; • Para IRM=3 e Strahler (9 e 10), ponte concreto/madeira. 	Alto

Quadro 15 – Especificações sobre as relações entre os Índices de Fragilidade Pontuais do sistema viário e os tipos de estruturas de transposição nos cursos de água da bacia do Arroio Grande.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores e correspondentes estruturas elencadas no quadro 15 referem-se aos tipos observados na bacia da área de pesquisas. Para uma aplicação em outras áreas esse relacionamento, do IFP com o tipo de estrutura, deve ser analisado especificamente para o caso, pois as bacias hidrográficas são únicas, tanto em suas características hidrográficas, densidade de drenagem e ordem fluvial, quanto aos tipos de estruturas viárias existentes.

Os mapas das figuras 60 a 63, na sequência, mostram geograficamente a localização das áreas com maior concentração de pontos com fragilidades pontuais de alto risco, e mesmo que visualmente, deduz-se que a maior incidência de IFPs com alto risco encontra-se nas áreas de alagamento da planície de inundação.

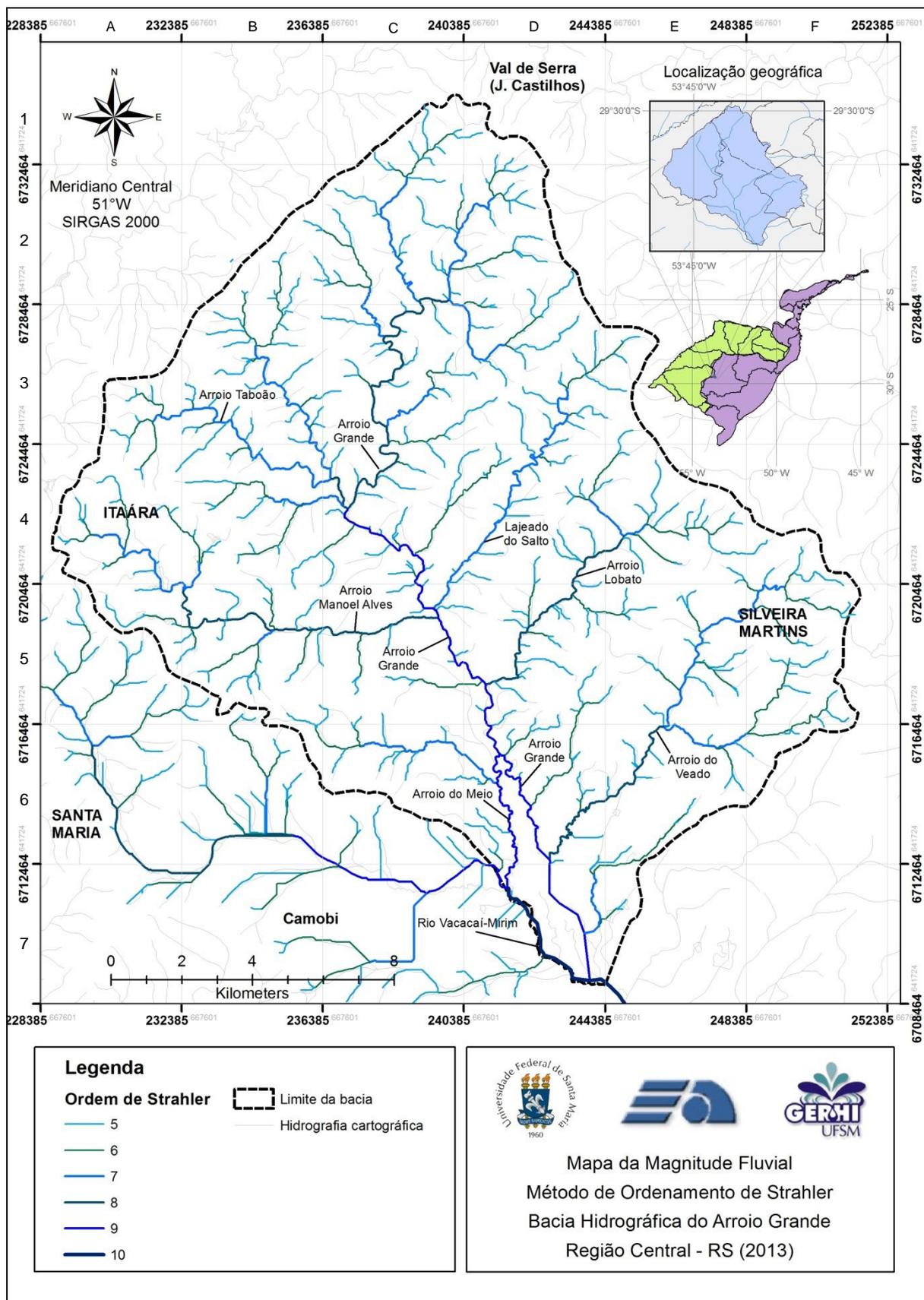


Figura 60 – Mapa do ordenamento fluvial, segundo o Método de Strahler.

Fonte: Elaborado pelo autor.

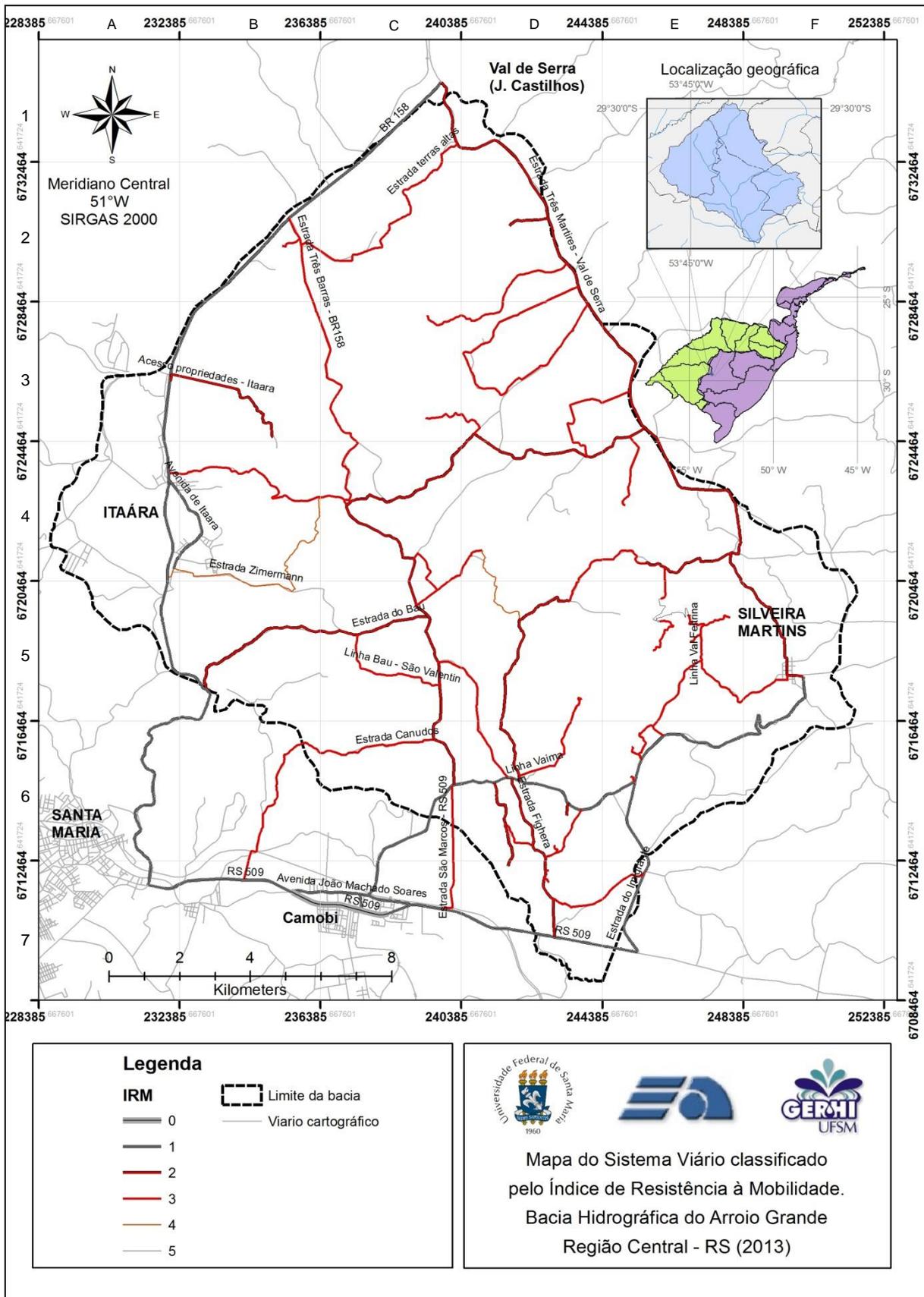


Figura 61 – Mapa do sistema viário classificado conforme o IRM.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

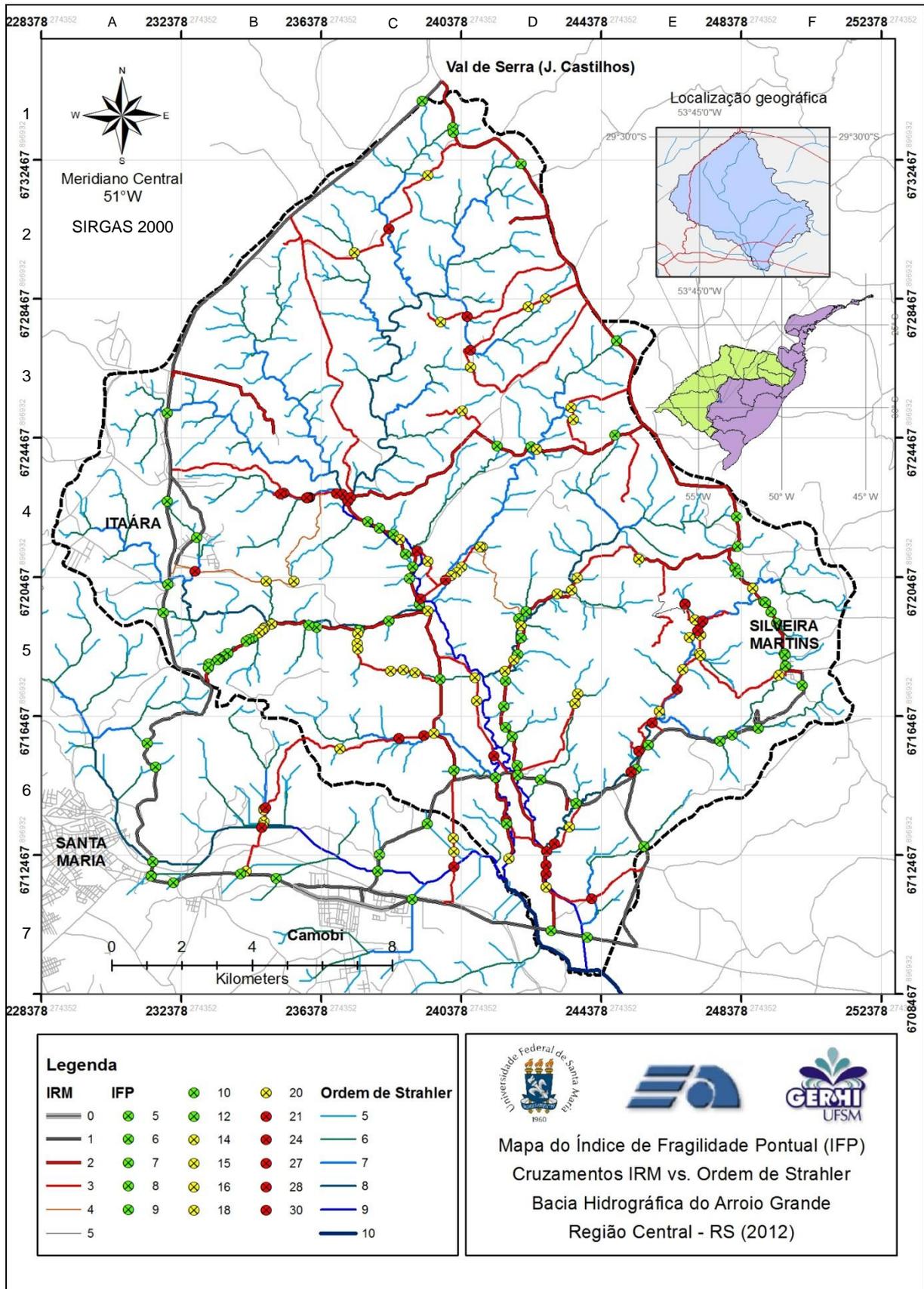


Figura 62 – Mapeamento da fragilidade pontual na bacia do Arroio Grande.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

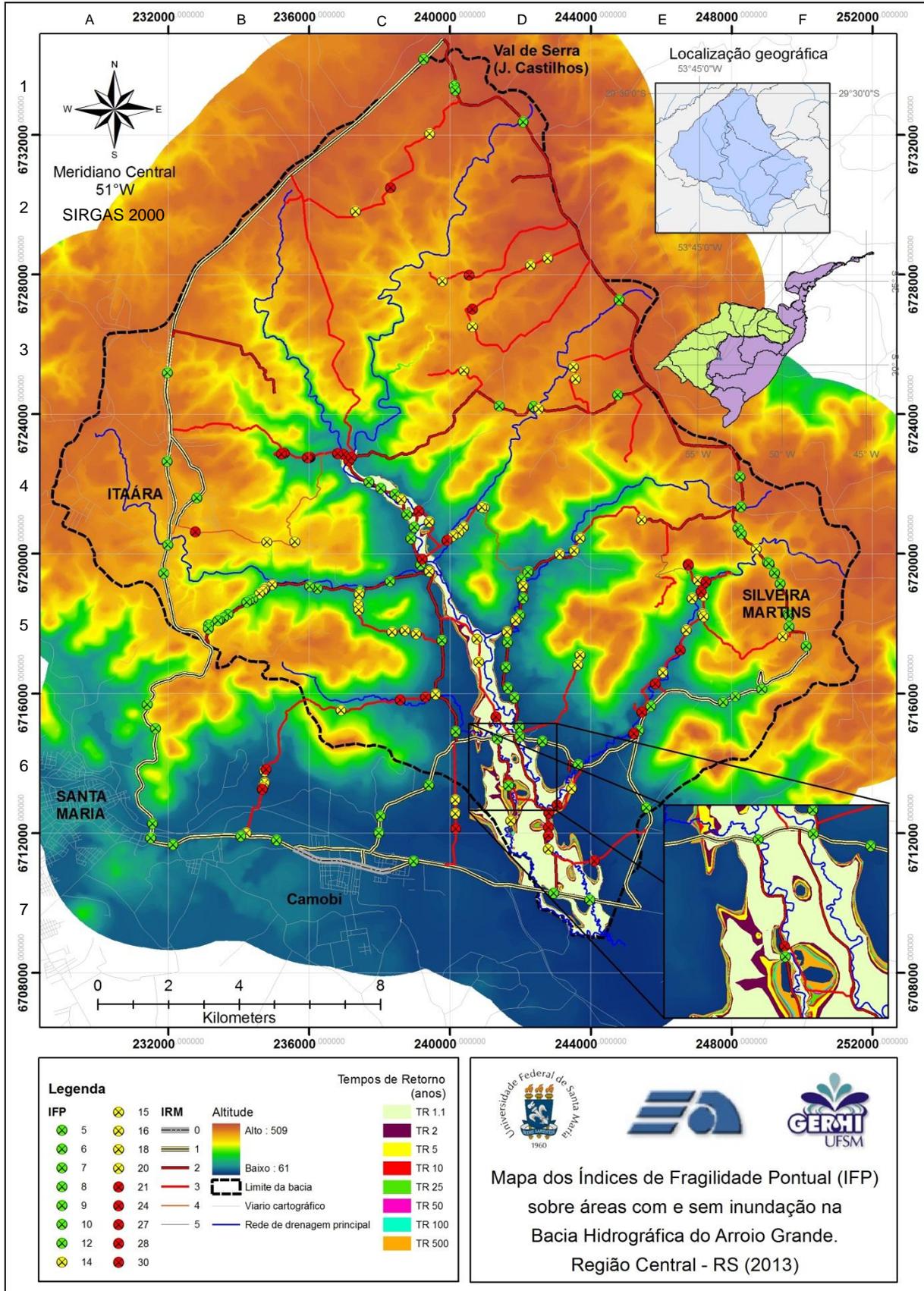


Figura 63 – Mapa das fragilidades pontuais do sistema viário, classificado pelo IRM, sobre as áreas de inundação, na Bacia Hidrográfica do Arroio Grande. Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar os mapas das figuras anteriores, observa-se que a caracterização da fragilidade pontual resultou coerente com a realidade do sistema viário, na região do estudo. Para validar esta constatação, verifica-se por meio do mapa da figura 62, que nas estradas classificadas com o IRM=1 (rodovias asfaltadas), o IFP resultou em valores abaixo de 12, o que significa que nesses locais a transposição do sistema viário sobre a drenagem natural se dá de maneira eficiente. Nesses locais têm-se estruturas como galerias e pontes de concreto, que garantem a mobilidade permanente.

Da mesma forma, ao observarem-se os pontos onde o IFP é simbolizado pela cor vermelha, nota-se a fragilidade pontual do sistema viário sendo influenciada pela má condição de trafegabilidade, dada pelo $IRM \geq 3$, ou pela existência de uma drenagem que cruza a estrada, com magnitude fluvial ≥ 8 .

Com base nos resultados dos modelos de inundação espacializados sobre o MDT, foi possível, também, determinar a quilometragem de vias que podem ficar submersas durante as enchentes na bacia do Arroio Grande. As estradas circunscritas pelos polígonos das áreas de inundação foram totalizadas na forma de quilômetros de vias (por classes de IRM), em função das chuvas máximas diárias e seus TR's. Esses resultados são ilustrados no gráfico da figura 64.

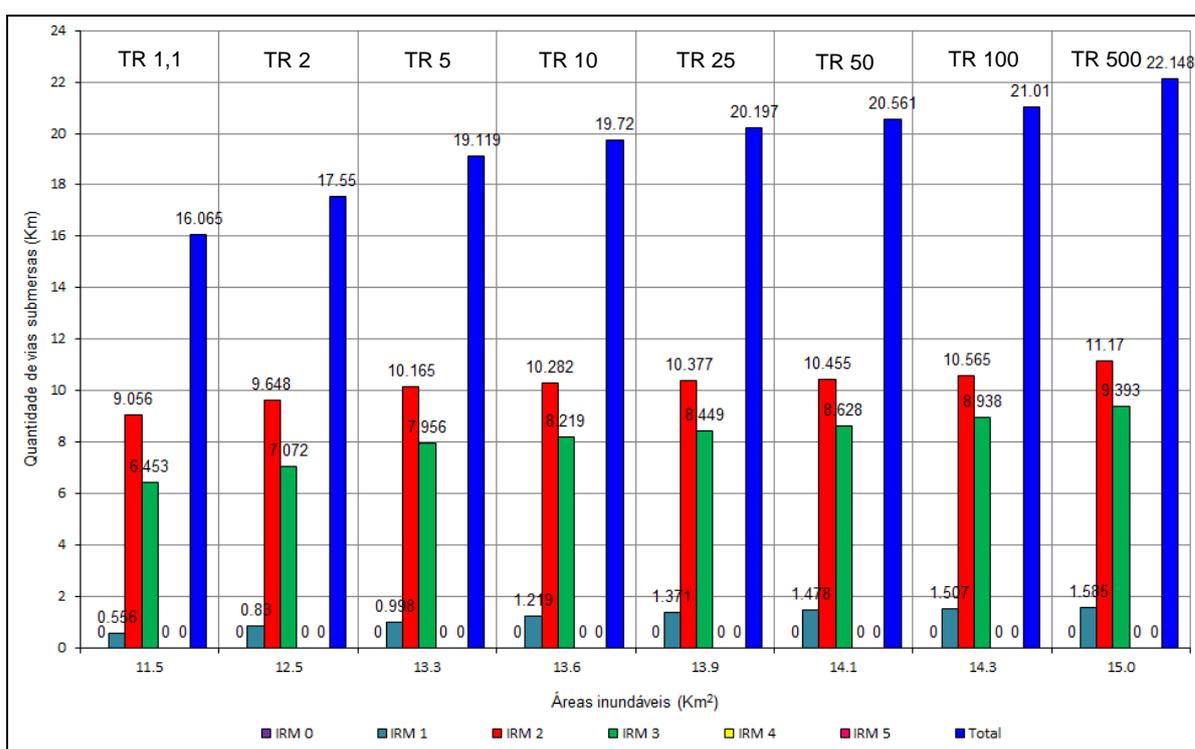


Figura 64 – Quilometragem por tipos de vias que potencialmente ficam submersas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Entre os tipos de vias na bacia da área de estudo, mais ficam susceptíveis às inundações, os resultados mostraram que as estradas de terra com tráfego permanente tanto em tempo seco, quanto em épocas chuvosas (estradas de $IRM=2$), têm a maior quilometragem que pode ser impactada pelas inundações. Tal condição é representada na simulação da área de inundação pelos trechos desse tipo de estrada, que cruzam áreas muito próximas aos arroios, em fundos de vales e em baixas declividades. Essas condições, no processo de modelagem estão conjugadas no MDT, logo, esse elemento do sistema deve ter alto grau de correlação com o relevo real da bacia em estudo.

Não há um incremento expressivo nas distâncias de estradas que podem ficar submersas, à medida que aumenta a área inundável. Observou-se também que as estradas asfaltadas, com $IRM=1$, têm trechos mapeados como inundáveis. Sobre esse resultado vale comentar que os trechos, da ERS-511, por exemplo, modelados como inundáveis, foram submersos pelas águas das cheias de janeiro de 2001, dezembro de 2003 e janeiro de 2010, confirmando o mapa de inundação de TR de 5 e 10 anos.

Porém, ao reambular o mapa de inundação para o TR de 2 anos, constatou-se que algumas dessas estradas foram mapeadas como submersas, em áreas cujas profundidades do alagamento resultaram superestimadas. Ao avaliar as possíveis causas das medidas mapeadas nesses locais não corresponderem à realidade, constatou-se que nessas áreas o levantamento por GNSS em campo não foi bem densificado. Muito disso, em função dos locais com poucos pontos serem nos fundos dos vales e beiras de rios, onde os sinais GNSS sofrem forte interferência do relevo montanhoso no entorno.

Em termos metodológicos essa diferença localizada, entre o MDT e o relevo real da bacia, pode ser ajustada fazendo-se novas coletas de pontos GNSS nesses locais. Mesmo assim, isso não compromete o resultado geral das análises sobre as áreas potencialmente inundáveis da bacia, sendo um dos objetivos considerados atingidos pela metodologia desta tese.

Os períodos de retorno de mais de 10 anos (25, 50, 100 e 500 anos) não foram reambulados, pois para chuvas com esse TR, não foram encontradas marcas de enchentes, que pudessem confirmar os níveis alcançados. Os mapas de inundação desses TRs possuem caráter empírico, aproximado, e foram ajustados a partir do mapa para o TR 5 anos, que foi validado (Figura 65).

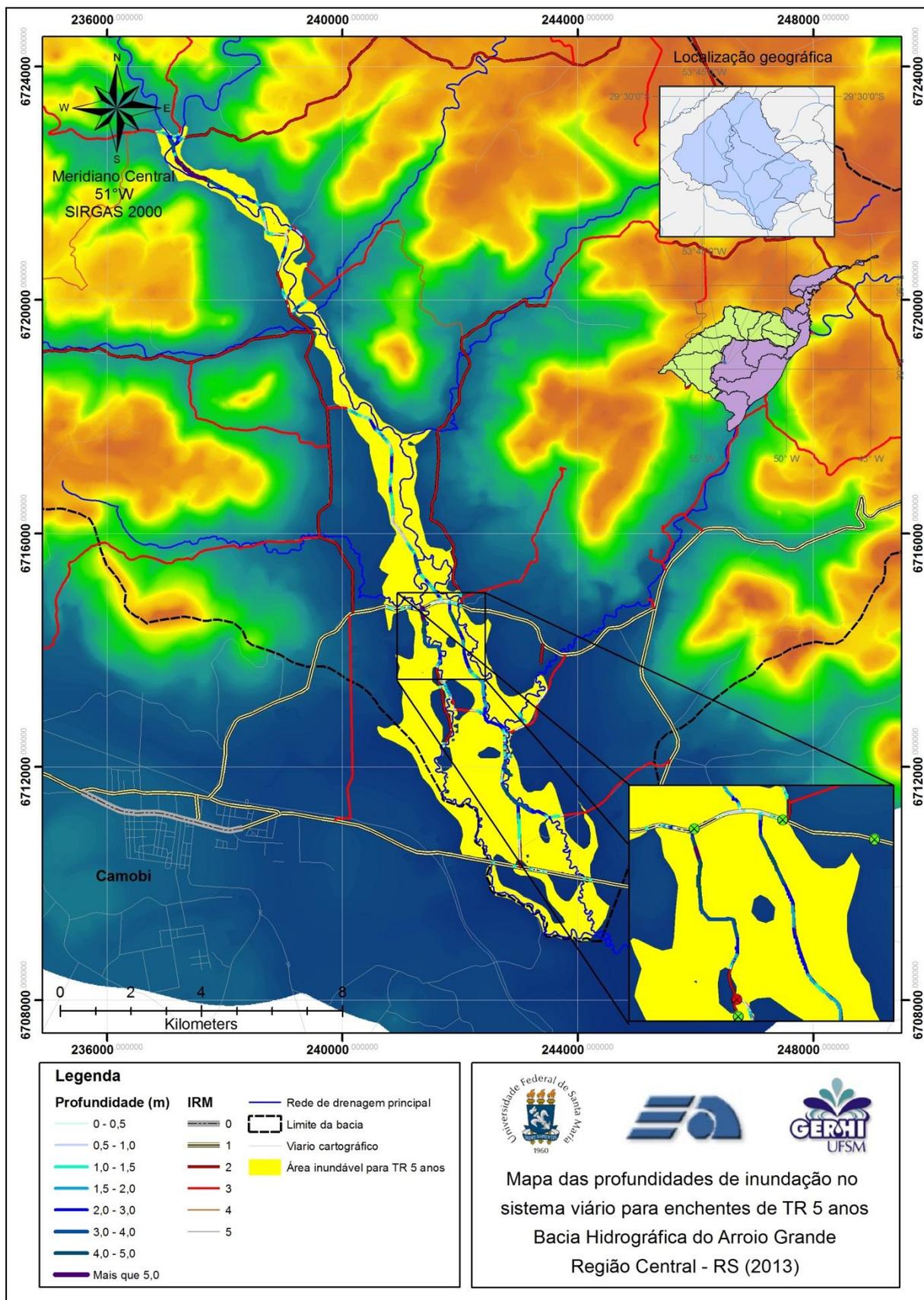


Figura 65 – Mapa das profundidades de inundação do sistema viário na Bacia do Arroio Grande, para uma cheia com Tempo de Retorno de 5 anos.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa mesma relação pode ser definida para os pontos com fragilidades decorrentes dos cruzamentos com as drenagens naturais (IFP).

Além das vulnerabilidades calculadas pelos índices IRM e IFP, o sistema viário também é submetido às condições de existência do relevo natural. As declividades, ao serem combinadas com as altitudes reproduzem diferentes graus de fragilidade para o sistema viário, de maneira que quanto mais baixo for o relevo e mais plano, tão maior é sua fraqueza em resistir às inundações.

Observa-se claramente que os maiores quantitativos quilométricos de estradas rurais, com problemas relacionados às inundações, têm sua localização nas regiões com alto grau de fragilidade natural, dado pelas baixas declividades e baixas altitudes.

Pelo mapa da figura 66, observa-se que quase a totalidade das estradas situadas internamente às áreas de inundação, têm declividades nas baixadas inferiores a 3%, caracterizando elevada fragilidade natural, que se combina com índices de resistência à mobilidade entre 2 e 3. Além disso, há vários pontos de cruzamentos, com fragilidade pontual maior que 20, significando haver elevado grau de fragilidade nas pontes e cruzamentos das vias com as drenagens naturais.

A partir dessas constatações, confirmou-se a hipótese que o sistema de informações geográficas, desenvolvido especialmente com a finalidade de prover apoio à mobilidade agrícola e rural em uma bacia hidrográfica, pode contribuir diretamente na organização da gestão dessas áreas, previamente à ocorrência de eventos com magnitudes semelhantes.

Os mapas temáticos, produzidos pelas relações espaciais entre as variáveis estudadas, mostraram ser possível reconhecer a quantidade e a localização dos trechos de estradas que têm maior susceptibilidade à inundação, seja em função da proximidade ou do cruzamento com algum curso de água. Com isso, atingem-se os objetivos propostos, de prevenir e orientar as comunidades rurais, em planícies de inundação, quanto aos riscos e perigos aos quais estão submetidas.

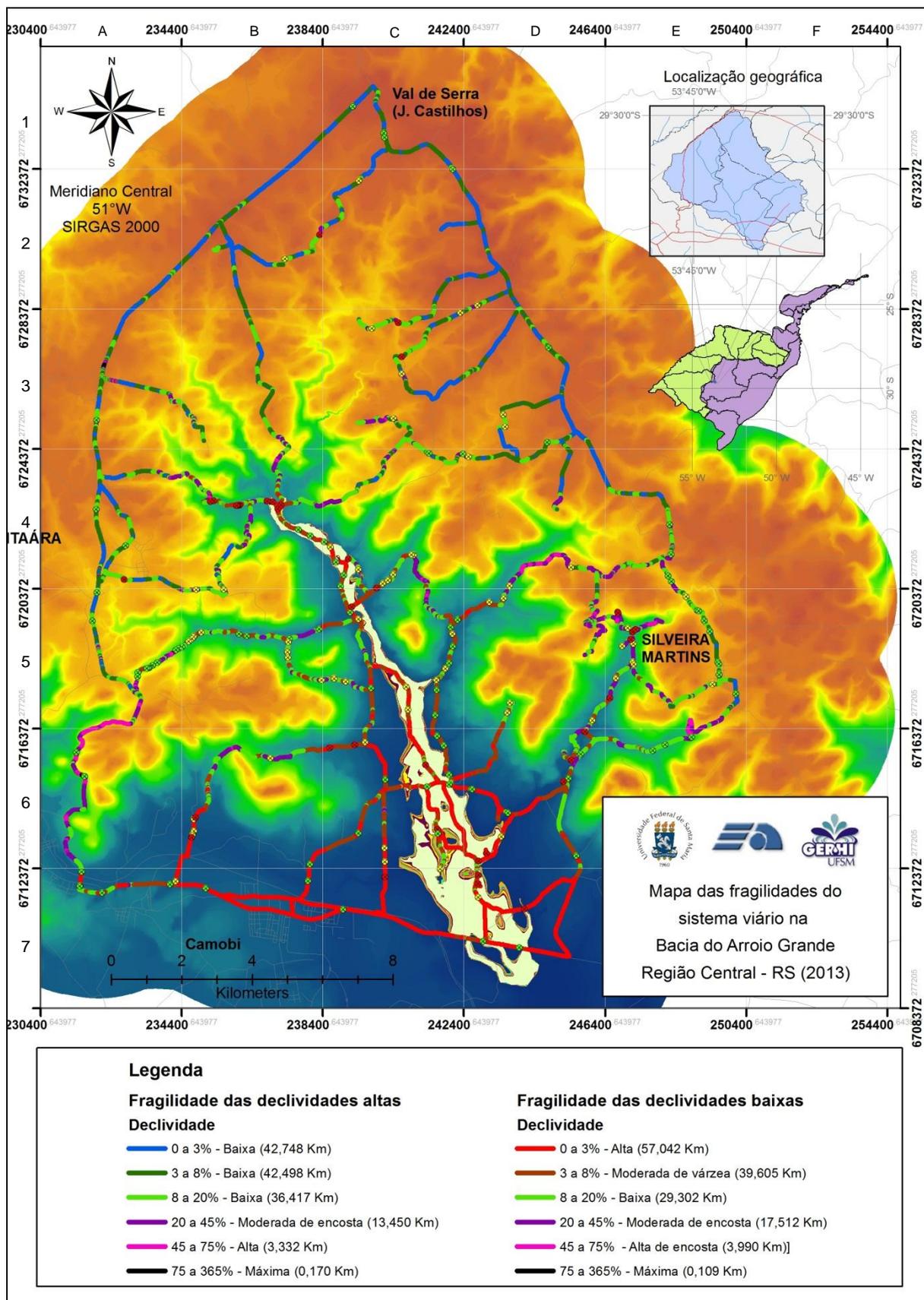


Figura 66 – Fragilidades do sistema viário decorrentes das declividades combinadas com as altitudes.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

As pesquisas que foram realizadas durante o período de elaboração desta tese focaram a possibilidade de desenvolver um método que integrasse dados físico-geográficos e climatológicos, dados geométricos e topográficos de ocorrências de enchentes, em passado recente. A hipótese proposta deu-se no sentido de gerar mapas de áreas potencialmente alagáveis em várzeas agrícolas, em uma bacia hidrográfica sem monitoramento fluviométrico, onde se pesquisou a relação espacial entre a chuva e o relevo, e seus efeitos na mobilidade dos habitantes de comunidades rurais.

Um dos maiores desafios para confirmar a hipótese, foi o fato da área de pesquisas não possuir dados monitoramento fluviométrico, apenas os registros pluviométricos diários. Contudo, a realização deste trabalho demonstrou que é possível produzir informações estratégicas para dar o “primeiro passo” na prevenção da falta de mobilidade em ambientes rurais, principalmente nas planícies de inundação.

Partindo de uma visão geral dos resultados alcançados, é possível identificar os locais mais susceptíveis às inundações, prevendo tais situações através dos mapas de áreas alagáveis (AAs). Além disso, o método de avaliação do sistema viário submetido às condições adversas das enchentes permite definir os trechos e os pontos onde ocorrem as maiores fragilidades.

Ao buscar o desenvolvimento de critérios para o planejamento da mobilidade rural nos períodos sem enchentes, esse objetivo foi atingido ao mostrar a viabilidade de mapear as áreas susceptíveis à inundação, a partir dos fatores de maior influência para o problema: a chuva, o relevo, a trafegabilidade das estradas e a ordem hidrológica dos arroios (ou rios) que as cruzam.

Ao provar a exequibilidade desse desenvolvimento, os estudos realizados demonstraram que a concepção desse sistema tem aplicabilidade generalizada, podendo ser realizado em outras bacias rurais. Sua viabilidade operacional pode apoiar a Defesa Civil e ser capaz de indicar áreas seguras com base em cenários de ocorrências semelhantes às enchentes do passado, simulados em SIG.

Há necessidade de levantar o maior número possível de pontos na bacia, principalmente nas margens próximas às estradas e nas seções transversais

formadas pelas pontes e lajes de passagem. Quanto maior for o número de pontos de terreno coletados nas áreas alagáveis das planícies de inundação, mais preciso será o MDT e, conseqüentemente, mais preciso será o resultado da modelagem hidrológico-hidráulica e da simulação das áreas e profundidades de alagamento. O MDT construído para atender o primeiro objetivo específico resultou em uma precisão de 0,6 metros (\pm). Conclui-se que essa variação afeta diretamente a determinação dos níveis de enchentes modelados (N_{HR}), sendo que a distribuição espacial das enchentes sobre o MDT resulta subestimada. Essa confirmação foi obtida quando se comparou o N_{HR} com o N_{ME} , e constatou-se que as diferenças entre essas medidas são proporcionais à variação na precisão do MDT.

Ainda, em relação ao primeiro objetivo específico, os dados pluviométricos diários são muito úteis à transformação de informações pontuais de chuvas, em informações espaciais de vazão, principalmente, quando se busca essa solução para as bacias hidrográficas sem nenhum tipo de monitoramento fluviométrico. Esses dados têm ampla distribuição espacial em nível nacional, bem como acesso facilitado às séries decenais, por meio eletrônico e gratuito. O Método de Gumbel, selecionado para analisar as chuvas diárias máximas, mostrou-se adequado ao método geral da tese, pois a Distribuição de Gumbel, estatisticamente, fundamenta-se na probabilidade de extremos ocasionais serem iguados ou superados em uma série infinita de anos, permitindo estimar chuvas de projeto para diversos tempos de retorno (TRs).

Concluindo sobre o alcance do primeiro objetivo, o método de transformação de chuva em vazão, dado por I Pai Wu, adequou-se às áreas das BVs e à disponibilidade de dados. Entretanto a aplicação desse método subestimou as vazões de cheias usadas na modelagem hidrológico-hidráulica, constatado pela comparação dos níveis modelados e os observados por marcas de enchentes.

A integração do MDT, do Método de Gumbel e do Método de I Pai Wu, possibilita estimar as AAs em bacias hidrográficas sem monitoramento fluviométrico, sendo que a precisão das estimativas tem relação direta com o MDT e com a disponibilidade de séries pluviométricas de longos períodos.

Em relação ao objetivo específico de obter mapas de AAs, para TRs predefinidos, conclui-se que as marcas de enchentes do passado constituem-se em parâmetros essenciais para validação dos mapeamentos resultantes da modelagem hidrológico-hidráulica, onde não há dados fluviométricos.

A transformação das vazões de projeto (Q_p) em nível de enchente deu-se através do modelo digital do leito do rio, no qual se modelaram as áreas de alagamento ao longo do canal principal, objetivo específico considerado atingido. Porém, o modelo espacial da inundação desconsidera as possíveis alterações localizadas, que a cheia encontra no percurso do deflúvio. As marcas de enchentes mostraram-se eficientes para o ajustamento dos níveis modelados tornando-os equivalentes aos níveis observados.

Assim, o segundo objetivo da tese foi atingido, visto que as marcas de enchentes, como parâmetros de referência para o nível da cheia em seções de interesse, ajustam espacialmente as áreas de alagamento (AAs), validando os mapas, de acordo com as enchentes de mesmo TR, ocorridas no passado. Para essa validação as marcas foram classificadas conforme o TR da enchente que as causou, de maneira que os cenários validados referem-se a TRs predefinidos. Porém, existem dificuldades em se validar mapas de AAs para cenários de TRs muito grandes (por exemplo, 25, 50, 100 ou mais anos), já que os registros das marcas de enchentes não têm essa longevidade. Quanto maior o TR, maior é a dificuldade em validá-lo, pois não se encontram marcas preservadas, restando somente as indicações fornecidas pelas vítimas, que contém maior imprecisão que as marcas inventariadas logo após as ocorrências das cheias.

Diante dessa limitação, é recomendável que exista um monitoramento permanente em planícies de inundação, para que sempre que ocorrer uma cheia, seguida de uma inundação, sejam niveladas e georreferenciadas as marcas deixadas pela água, especialmente nas seções de interesse, tais como pontes e lajes de passagem do sistema viário. Esse tipo de monitoramento serve tanto para aperfeiçoar os mapas de áreas de alagamento (AAs), quanto para subsidiar o planejamento de diversos serviços de atendimento ao cidadão, dependentes do sistema viário potencialmente inundável, tais como: coleta de resíduos sólidos; transporte escolar; manutenção das redes de distribuição elétrica e telefônica; bem como à defesa civil nos casos de ocorrência de famílias em situação de isolamento.

Quanto ao terceiro objetivo específico da tese, a proposta metodológica apresenta-se eficiente para a realidade das regiões rurais. Nesses locais, o sistema viário, elemento fundamental para a produção agrícola e para a socioeconomia rural, frequentemente apresenta condições adversas à movimentação de cargas e pessoas, impostas pelas enchentes. Ao propor uma classificação da fragilidade

viária, baseada em indicadores numéricos (IRM e IFP) o método inova a possibilidade de organizar o planejamento físico rural, através de critérios técnicos de alto nível. Os critérios aplicados têm base geométrica e hidrológica, e o método apresenta aplicabilidade prática de fácil exequibilidade, pois depende somente do reconhecimento da trafegabilidade viária e da avaliação da magnitude do escoamento fluvial. Não há dependência de monitoramento fluviométrico sistemático nas seções de pontes, galerias, lajes ou outros tipos de estruturas usadas na transposição do sistema viário sobre a drenagem natural.

Com a realização deste trabalho foi possível modelar espacialmente o fenômeno das enchentes para TRs com marcas conhecidas e, mais que isso, confirmou-se a possibilidade de identificar como a mobilidade rural pode reagir quando esses fenômenos são iminentes ou recorrentes.

Recomenda-se, a partir desta tese, que seja continuado o trabalho de inventário de marcas de enchentes na região dos estudos e, se possível, que essa atividade seja sistematizada na forma de uma equipe de projeto. A elaboração de um programa de extensão rural, que vise orientar os moradores de áreas rurais sobre a importância de cadastrar e registrar as marcas de cheias e inundações é uma ação factível, em nível local e regional. Também, recomenda-se que seja densificado o mapeamento do relevo da bacia na área dos estudos, a fim de manter o modelo de inundação em permanente aprimoramento.

Deseja-se que este trabalho sirva de instrumento e orientação para ações semelhantes em outras áreas e que a metodologia científica nele desenvolvida, apoie os agentes públicos e a sociedade, no sentido de se anteciparem aos graves problemas causados pelas as enchentes, especialmente aqueles relacionados à mobilidade no meio rural.

REFERÊNCIAS

ACKERMAN, C. T. **HEC-GeoRAS - GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS(R)**. Version 4.3.93. ed. Davis, California, USA: USACE, 2011. 244 p.

ADAMI, M.; MOREIRA, M. A.; BARROS, M. A.; MARTINS, V. A.; RUDORFF, B. F. T. Avaliação da exatidão do mapeamento da cultura do café no Estado de Minas Gerais. **XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - Natal-RN (Anais)**, 2009. ISSN ISBN 978-85-17-00044-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/10.27.19.01>>. Acesso em: 16 jun. 2011. pag. 1-8; DVD; On line.

ADERAMO, A. J.; MAGAJI, S. A. Rural transportation and the distribution of public facilities in Nigeria: A case of edu local government area of Kwara State. **Journal of Human Ecology**, 2010. ISSN 0970-9274. Disponível em: <<http://www.krepublishers.com/02-Journals/JHE/JHE-29-0-000-10-Web/JHE-29-3-000-10-Abst-PDF/JHE-29-3-171-10-2024-Aderamo-A-J/JHE-29-3-171-10-2024-Aderamo-A-J-Tt.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2011. Vol. 29, n.3, p. 171-179.

AGÊNCIA ESTADO. Sistema de alerta de enchentes falha no primeiro teste em São Paulo. **R7 Notícias**, 2010. Disponível em: <<http://noticias.r7.com/sao-paulo/noticias/sistema-de-alerta-de-enchentes-falha-no-primeiro-teste-em-sao-paulo-20101027.html>>. Acesso em: 08 Agosto 2012.

ALVES, L. S.; NAZARENO, N. R. X. Análise do padrão de exatidão cartográfico da imagem do Google Earth tendo como área de estudo a imagem da cidade de Goiânia. **XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - Natal-RN (Anais)**, 2009. ISSN ISBN 978-85-17-00044-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.14.15.58>>. Acesso em: 16 jun. 2011. pag. 1723-1730.

ANA; CPRM; IGAM. **Definição da planície de inundação da cidade de Governador Valadares**. Agência Nacional das Águas, Serviço Geológico do Brasil e Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Belo Horizonte, p. 129. 2004. il.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**. São Leopoldo, RS: Unisinos, 2003. 165 p. ISBN 85-7431-171-5.

APFM-OMM-GWP. **Gestión Integrada de Crecientes**. APFM Documento Técnico N°1, 2ª. ed. Genebra: Programa Asociado de Gestión de Crecientes, v. 1, 2004.

BARBIERI, F.; MIOLA, A. C.; WERLANG, M. **Avaliação da fragilidade de estradas rurais quanto a: declividades; tipos de solos; e tangência/interceptação de drenagens naturais**. Curso de Bacharelado em Geografia - UFSM. Santa Maria, p. 54. 2010.

BARBOSA, A. A.; MATOS, A. J. S.; RIBEIRO, J. P. **Sistema de alerta de cheias com estudo de propagação de onda.** [S.l.]. <http://www.professoralexandre.unifei.edu.br/Artigos/Cheias.PDF>.

BELTRAME, L. F. S.; LANNA, A. E. L.; LOUZADA, J. A. S. **Chuvas intensas.** Porto Alegre: IPH-UFRGS, v. il., 1991. 69 p.

BRAGA, B.; TUCCI, C. E. M.; TOZZI, M. **Drenag urbana:** gerenciamento, simulação e controle. Porto Alegre: Editora Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998.

BRANDALIZE, A.A.; **Globos digitais.** Esteio Engenharia e Aerolevntamento S.A. 2007.

BRASIL, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem.** 2. ed. Rio de Janeiro: Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2005. 133 p. IPR. Publ., 715.

BRASIL. LEI Nº 12.608, de 10 de abril de 2012. **Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos,** 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm>. Acesso em: 20 jan. 2013.

BRASIL; Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). **Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais.** Brasília-DF. 2013. Disponível em: www.cemaden.gov.br.

BRASIL, Ministério da Defesa. **Manual de abreviaturas, siglas, símbolos e convenções cartográficas das Forças Armadas.** 3ª. ed. Brasília: Estado-Maior da Defesa, v. MD33-M-02, 2008. 338 p. il.

BRUNNER, G. W. **HEC-RAS - River Analisis System Hydraulic Reference Manual.** Version 4.0. ed. Davis, California, USA: USACE, 2008. 411 p.

BUREAU OF METEOROLOGY - AUSTRALIAN GOVERNMENT. Bureau of Meteorology. **Flood Forecasting and Water services,** 2009. ISSN DOT4348/09. Disponível em: <http://www.bom.gov.au/water/about/publications/document/InfoSheet_6.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2012. INFORMATION SHEET 6 > Flood Forecasting and Warning Services.

BURIOL, G. A. et al. Homogeneidade e estatísticas descritivas dos totais mensais e anuais de chuva de Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos,** v. 11, p. 89-97, nº 4 Out/Dez 2006.

CALGARO, M.; et. al.; **Variação espaço-temporal dos parâmetros para a modelagem estocástica da precipitação pluvial diária no Rio Grande do Sul.** SciELO Brasil: Eng. Agríc. vol.29 no.2 Jaboticabal Apr./June 2009.

CALVETTI, L. et al. **Estimativa Integrada de Precipitação (SIPREC) para a Região Sul do Brasil utilizando dados obtidos por Radar, Satélite e Pluviômetros.** SIMEPAR - Tecnologia e Informações Ambientais. Curitiba, p. 18. 2010. Relatório do Projeto Previsão de Eventos Extremos no Sul do Brasil – FINEP 14 (Disponível em).

CARDOSO, C. O.; ULLMANN, M. N.; BERTOL, I. Análise de chuvas intensas a partir da desagregação das chuvas diárias de Lages e de Campos Novos (SC). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 22, p. 131-140, 1998.

CARVALHO, D. F. D.; SILVA, L. D. B. D. Hidrologia. In: CARVALHO, D. F. D.; SILVA, L. D. B. D. **Hidrologia - material didático.** Rio de Janeiro: [s.n.], 2006. p. 95-115. Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap7-ES.pdf>.

CARVALHO, M. V. A.; FREITAS JR., R. L.; CAMPOS, R. M.; SANTOS JR., W. M.; SARDENBERG JR., H. A importância do uso de imagens de satélite e cartas-imagem para a execução do trabalho de campo em Geografia. **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - Florianópolis-SC (Anais)**, 2007. ISSN ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.21.50>>. Acesso em: 16 jun. 2011. pag. 1409-1416; CD-ROM; On-line.

CEOPS-FURB. Centro de Operação do Sistema de Alerta. **CEOPS**, 2010. Disponível em: <<http://ceops.furb.br/>>. Acesso em: 07 ago. 21012.

CHAUDHARI, J. **Evacuation Preparedness of Public Transportation and School Buses In Rural Coastal Communities of the North Gulf Region.** Biloxi, Mississippi State: CENTER FOR URBAN RURAL INTERFACE STUDIES, v. Technical Memorandum 1: Literature Review, 2009. 26 p.

CHOW, V. T. **Handbook of applied hydrology. A compendium of water-resources technology.** Illinois: McGraw-Hill Book Company, 1964.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Hidrología aplicada.** Bogotá: McGraw-Hill Interamericana S.A., 1994. 584 p. il.

CONAGUA. [conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx). **Comisión Nacional del Agua**, 2010. Disponível em: <<http://www.conagua.gob.mx/Default.aspx>>. Acesso em: 02 jan. 2012.

CONAGUA/SPR. [conagua.gob.mx/spr](http://www.conagua.gob.mx/spr). **Sistema de Pronóstico en Ríos**, 2011. Disponível em: <<http://www.conagua.gob.mx/spr/index.html>>. Acesso em: 03 jan. 2012.

CORDERO, A.; MEDEIROS, P. A.; TERAN, A. L. Medidas de controle de cheias e erosões. **CEOPS-FURB**, Blumenau, SC, p. 18, 2010. Disponível em: http://ceops.furb.br/index.php?option=com_docman&task=doc_details&gid=5&Itemid=27.

COVA, T. J.; CONGER, S. Transportation hazards (A book chapter). In: KUTZ, M. **Transportation Engineers' Handbook**. Salt Lake City: Center for Natural and Technological Hazards, v. in press, 2003. p. 50.

CRED. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. **EM-DAT (The International Disaster Databases)**, 2009. Disponível em: <<http://www.emdat.be/country-profile>>. Acesso em: 18 out. 2011.

DAEE-SP. Portal do Departamento de Águas e Energia Elétrica. **Piscinões**, 2011. Disponível em: <http://www.daee.sp.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=60:piscinoes-home&catid=38:piscinoes>. Acesso em: 31 ago. 2012.

DALMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F de A.; **Solos do Município de Santa Maria**. Ciência & Ambiente – História Natural de Santa Maria. UFSM, Santa Maria. n.38, semestral (jan/jul 2009) p.59 - 79.

DINIZ, M.C.; BERNARDES, J.; BORDIN, R. G.; COELHO, A. H. Viabilidade da utilização da ferramenta Google Earth na construção de base cartográfica para ferrovia. **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - Florianópolis-SC (Anais)**, Florianópolis, p. 1251-1256, 2007. ISSN ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.16.01.03>>. Acesso em: 16 jun. 2011. pag. 1251-1256; CD-ROM; On-line.

DOD-USA - DEPARTMENT OF DEFENSE. **Unified facilities criteria (UFC). Design: Low-impact development manual**. [S.l.]: [s.n.], v. UFC 3-210-10, 2004. 105 p.

EL SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. **Digital Terrain Modeling: Aquisition, Manipulation, and Applications**. Artech House remote sensing library. Norwood, Massachusetts, USA, 2005. 257p. il.

EMBRAPA, E. B. D. P. A. Sistemas de Produção. O cultivo do arroz irrigado no Brasil. **EMBRAPA Clima Temperado - Pelotas-RS**, 2005. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrrigadoBrasil/cap03.htm>>. Acesso em: 26 set. 2011.

EMBRAPA, EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2009. 412 p. ISBN 85-85864-04-4. il. Inclui 12 apêndices.

EMMERICH, I.N.; QUEIROZ, D.N. de; PINTO, F. de A. de; **Análise da acurácia e precisão de um GPS de baixo custo para uso em agricultura de precisão**. 3º Simpósio Internacional de Agricultura de Precisão. Sete Lagoas – MG, 2005. Em: http://www.centreinar.org.br/siap2007/siap2005/artigos/SIAP3_artigo001.pdf.

ENVIRONMENT CANADA. Environment Canada, 2010a. Disponível em: <http://ec.gc.ca/default.asp?lang=En&n=FD9B0E51-1>. Acesso em: 29 nov. 2011.

ENVIRONMENT CANADA. Reducing flood damage. **Environment Canada - Water - Water Quantity - Floods**, 2010b. Disponível em: <http://ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=En&n=72FDC156-1>. Acesso em: 01 dez. 2011.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. Using the Topo to Raster tool. **ArcGis 9.2 Desktop Help**, 2007. Disponível em: <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=Using%20the%20Topo%20to%20Raster%20tool>. Acesso em: 18 julho 2012.

EUROPEAN COMMISSION. European Flood Awareness System (EFAS). **European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability**, 2012. Disponível em: <http://efas-is.jrc.ec.europa.eu/>. Acesso em: 31 ago. 2012.

FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY, F. [S.l.]: 2011.

FERIGOLO, E. F.; VALMERATE, M. M. S.; **As chuvas no Rio Grande do Sul e os episódios de secas e enchentes no período de junho de 1979 a maio de 1985**. 1986. 128f. Trabalho de Graduação II (Curso de Geógrafo). Universidade Federal de Santa Maria, 1986.

GALVÃO, C. **Processo de formação das enchentes e o método racional**. Campina Grande: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (UFCEG), 2008. 5 p. (Material didático da disciplina de Hidrologia I).

GARDINER, L. et al. **Climate change effects on the land transport network volume two: approach to risk management**. NZ Transport Agency Research Report 378. ed. Wellington: NZ Transport Agency, v. 2, 2009. 142 p. ISBN 978-0-478-34663-3.

GENOVEZ, A. M. **Avaliação dos métodos de estimação das vazões de enchente para pequenas bacias no Estado de São Paulo**. Campinas: UNICAMP, v. Tese, 1991.

GERBELLI, L. G. Sistema dará alerta de enchente 2 horas antes. **JORNAL DA TARDE - O Estado de São Paulo**, São Paulo, 14 Outubro 2010.

GERÓLAMO, R. O. P.; KAYANO, M. T. Variações no ciclo anual da temperatura da superfície do mar no Pacífico Tropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos-SP, v. 25, n. 2, p. 237-245, Outubro 2010.

GRDC. Global Runoff Data Centre. **Global Runoff Data Centre, Federal Institute of Hydrology**, 2008. Disponível em: <http://www.bafg.de/cln_033/nn_266934/GRDC/EN/Home/homepage__node.html?_nnn=true>. Acesso em: 31 ago. 2012.

HASENACK, H. (. **Base vetorial contínua do Rio Grande do Sul - Escala 1: 50000**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2010. com DVD de dados.

HELDWEIN, A.B.; BURIOL, G.A.; STRECK, N.A.; **O clima de Santa Maria**. Ciência & Ambiente – História Natural de Santa Maria. UFSM, Santa Maria. n.38, semestral (jan/jul 2009) p.43 - 58.

HOSSAIN, D. M. S.; DAVIES, D. C. G. **A GIS to reduce flood impact on road transportation systems**. Esri International User Conference, 2004. San Diego, CA: ESRI. 2004. p. 11. <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc04/docs/pap1512.pdf>.

HIPÓLITO, J.R.; PORTELA, M.M.; **Modelos Hidrológicos distribuídos utilizando Modelos Digitais do Relevo do tipo Raster e do tipo TIN**. Disponível em: <http://www.civil.ist.utl.pt/~jh/3SilusbaNecas.pdf>. Acessado em: 01/06/2011. 8p.

HUGHES, D; GREENWOOD, P; BLAIR, G; COULSON, G; **An Intelligent and Adaptable Grid-based Flood Monitoring and Warning System**. Concurrency and Computation: Practice and Experience. Vol.20. N°11, 2008. Dagstuhl, Germany. 1303-1316. Disponível em meio eletrônico em <http://citeseerx.ist.psu.edu/>. Acessado em 01/05/2011.

INEA. Sistema de Alerta de Cheias. **Instituto Estadual do Ambiente**, 2012. Disponível em: <<http://inea.infoper.net/>>. Acesso em: 08 Agosto 2012.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa - BDMEP**, 2010. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>>. Acesso em: 15 nov. 2011.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **INMET Notícias - Boletim Informativo do Instituto Nacional de Meteorologia/MAPA**, 2010. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/documentos/jornal/jornal_122010.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2011. n° 22, Ano 4. Novembro e Dezembro de 2010. 8 p.

IPCC. **Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático**. OMM - PNUMA. Ginebra, p. 104. 2007.

KELMAN, J. Evolution of Brazil's water resources management system. In: CANALI, G. V. **International Week for Studies on Water Resources (Foz do Iguaçu, 1999, Apr. 19-23) - Water resources management: Brazilian and European Trends and Approaches**. Porto Alegre: ABRH, 1999. p. 19-36.

KREBS, A. S. J.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, G. L. D. **Zoneamento de áreas inundáveis e do potencial erosivo – cartas de enchentes para cidades do Vale do Itajaí-Açu, SC**. CPRM-DNAEE. [S.I.]. 1985.

MANUSTHIPARON, C.; APIRUMANEKUL, C.; MAHAXAY, M.; **Flood forecasting and river monitoring system in the Mekong River Basin**. Second Southeast Asia Water Forum, August, 29th-September, 3rd, 2005. Bali-Indonesia, 2006. 9p. il.

MEDEIROS, J.S.; CAMARA, G. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. Cap. 10 – Geoprocessamento para projetos ambientais. São José dos Campos – SP: INPE, 2001.

MELLO, C. R.; FERREIRA, D.F.; SILVA, A. M.; LIMA, J.M.; **Análise de modelos matemáticos aplicados ao estudo de chuvas intensas**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, n. 25, 2001, p. 693-698.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas**. Brasília-DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. 425 p. ISBN 85-7383-293-2.

MONICO, J.F.G.; **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2.ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008.

MORANO, J. R. **Pequenas barragens de terra. Metodologia para projetos e obras**. São Paulo: CODASP, 2006. 103 p.

MOURA, A.C.M.; **Geoprocessamento na Gestão do Planejamento Urbano**. Belo Horizonte – MG: Ed. da autora, 2003.

NANÍA, L. S.; MOLERO, E. **Manual Básico de HEC-RAS 3.1.3 y HEC-GeoRAS 3.1.1**. Granada: Universidad de Granada, 2007. ISBN 978-84-690-5877-0.

NATIONAL FLOOD INSURANCE PROGRAM. FloodSmart.gov. **The official site of the NFIP**, 2011. Disponível em: <<http://www.floodsmart.gov/floodsmart/>>. Acesso em: 23 nov. 2011.

NATIONAL HYDROLOGIC WARNING COUNCIL. **Use and Benefits of the National Weather Service River and Flood Forecasts**. [S.I.]: EASPE, 2002.

NEVES, C.R.; PEREIRA, P. D. L.; MUELLER, R. W.; **Episódio das inundações em Santa Maria – RS**. Trabalho de Graduação II (Curso de Geógrafo). Universidade Federal de Santa Maria, 1984.

NISHIJIMA, T. **Modelagem Markoviana da precipitação pluvial diária e simulação do rendimento esperado de soja no Município de Cruz Alta (RS)**. Porto Alegre: Tese de Doutorado - UFRGS, 2004. 135 p.

NOAA - NWS. National Oceanic Atmospheric Administration - National Weather Service. **Advanced Hydrologic Prediction Service**, 2011. Disponível em: <<http://water.weather.gov/ahps/>>. Acesso em: 28 nov. 2011.

NOAA. **NOAA Partnered guidelines for the development of Advanced Hydrologic Prediction Service flood inundation mapping**. [S.l.]: National Oceanic Atmospheric Administration, 2011.

NOGUEIRA, J. D. D. L.; AMARAL, R. F. D. **Comparação entre os métodos de interpolação (Krigagem e Topo to Raster) na elaboração da batimetria na área da folha Touros - RN**. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 25-30 abril 2009. Natal, Brasil: INPE. 2009. p. 4117-4123.

OFFICE OF THE FEDERAL COORDINATOR FOR METEOROLOGICAL SERVICES AND SUPPORTING RESEARCH. **Weather information for surface transportation - National needs assessment report**. Sylver Spring, Maryland: U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE/National Oceanic and Atmospheric Administration, 2002.

OLIVEIRA, G. G. D.; SALDANHA, D. L.; GUASSELLI, L. A. Espacialização e análise das inundações na bacia hidrográfica do Rio Cai/RS. **Revista Geociências**, São Paulo, v. 29, n. 3, p. 413-417, 2010. ISSN 1980-900X.

OLIVEIRA, M. Z. DE; VERNONEZ, M. R.; TURANI, M.; REINHARDT, A. O. Imagens do Google Earth para fins de planejamento ambiental: uma análise de exatidão para o município de São Leopoldo-RS. **XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - Natal-RN (Anais)**, 2009. ISSN 978-85-17-00044-7. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.10.17.37/doc/1835-1842.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2011. pag. 1835-1842; DVD; On line.

OMM. **Aspectos sociales y participación de los interesados en la gestión integrada de crecidas**. Genebra: Organização Meteorológica Mundial, v. OMM - N° 1008, 2006. ISBN 92-63-31008-4. Documento técnico APFM N° 4, Serie "Políticas de gestión de crecidas".

PAULA, G. M. D. **O fenômeno El Niño Oscilação Sul e a erosividade das chuvas em Santa Maria, RS**. Santa Maria: UFSM - Dissertação de Mestrado, 2009. 53 p.

PILGRIM, D. H.; CORDERY, I. Flood runoff. In: MAIDMENT, D. R. **Handbook of Hydrology**. Austin, Texas: McGraw-Hill, Inc., 1992. p. 9.1 - 9.42. ISBN 0-07-039732-5.

PNUD, PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. Relatórios de Desenvolvimento Humano. **PNUD Brasil**, 2006. Disponível em: <<http://www.pnud.org.br/rdh/>>. Acesso em: 22 nov. 2011.

PORTO, R. D. M. **Hidráulica Básica**. 2. ed. São Carlos: EESC-USP, 1999. 540 p. ISBN 85-85205-30-X. il.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. DP-H06 - Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos - Método de "I Pai Wu". São Paulo: Secretaria de Vias Públicas, 1999. p. 15.

PUBLIC SAFETY CANADA. **Floods, What to do?** [S.l.]: [s.n.], 2011. ISBN 978-1-100-17026-8.

QUEIROZ, A. P. **Monitoramento e previsão imediata de tempestades severas usando dados de radar**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) - Mestrado em Meteorologia, 2008. Dissertação.

RAMALHO-FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão de terras agrícolas**. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPQ, 1995. 65 p. ISBN 85-85864-01-X. il.

RAMOS, F.; OCCHIPINTI, A. G.; VILLA NOVA, N. A.; REICHARDT, K.; MAGALHÃES, P. C.; CLEARY, R. W. **Engenharia hidrológica**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ (Coleção ABRH de Recursos Hídricos), v. 2, 1989. 404 p. ISBN 85-7108-053-4.

RENNÓ, C.D., SOARES, J.V.; **Conceitos básicos de modelagem hidrológica**. Introdução à modelagem dinâmica espacial (Curso) - Cap.2. (tutorial). 2003. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap2_modelos_hidrologicos.pdf. Acessado em: 06/12/2011.

ROO, A. D.; THIEMIG, V. Floods in Africa. **Floods Portal - European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability**, 14 nov. 2010. Disponível em: <<http://floods.jrc.ec.europa.eu/flood-research-at-jrc/flood-forecasting-in-africa>>. Acesso em: 14 nov. 2011.

ROSA, A. M. F.; MIERES, L. DA S.; SALDANHA, C. B.; ALVES, R. DE C. M. Análise de chuva intensa na região de Agudo-RS em janeiro de 2011. **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - Curitiba-PR (Anais)**, 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0704.pdf>>. Acesso em: 17 nov. 2011. p. 2135 a 2142.

SAMPAIO, M. V. **Especialização dos coeficientes das equações de chuvas intensas em bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul**. Santa Maria, RS: UFSM - Tese de Doutorado, 2011. 155 p.

SANTOS, P. M. P. D. **Cartografia de áreas inundáveis a partir do método de reconstituição hidrogeomorfológica e método hidrológico-hidráulico**: Estudo comparativo da bacia hidrográfica do Rio Arunca. Coimbra: Universidade de Coimbra, v. Dissertação de Mestrado, 2009.

SARTORI, P.L.P.; **Geologia e Geomorfologia de Santa Maria**. Ciência & Ambiente – História Natural de Santa Maria. UFSM, Santa Maria. n.38, semestral (jan/jul 2009) p.19 - 42.

SEGOB. Sistema Nacional de Protección Civil. **proteccioncivil.gob.mx**, 2009. Disponível em: <<http://www.proteccioncivil.gob.mx/es/ProteccionCivil/home>>. Acesso em: 04 jan. 2012.

SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL. **smn.conagua.gob.mx**. **SMN**, 2010. Disponível em: <<http://smn.cna.gob.mx/>>. Acesso em: 03 jan. 2012.

SILVA, A.P.M.; **Elaboração de manchas de inundação para o Município de Itajubá-MG**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006. 105p. il.

SILVEIRA, G.L.; CRUZ, J.C.; (organizadores). **Seleção Ambiental de Barragens**: análise de favorabilidades ambientais em escala de bacia hidrográfica. Santa Maria – RS: Ed. UFSM, 2005. 390p. il.

SILVEIRA, G. L. Ações para minimização dos efeitos das enchentes. **Revista Tecnologia**, nº 14, Santa Maria, v. 1-2, p. 133-136, 1991.

SILVEIRA, W. N.; KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F.; BRANDENBURG, B. **História das inundações em Joinville**: 1851 - 2008. Curitiba: Organic Trading, 2009. 153 p.

SIMGE. Sistema de Alerta a Inundação. **Sistema de Meteorologia e Recursos Hídricos de Minas Gerais**, 2002. Disponível em: <<http://www.simge.mg.gov.br/alerta/sapuca/sistema/index.html>>. Acesso em: 08 ago. 2012.

SOARES, J. V. **Introdução à hidrologia de florestas**. Eletrônica. ed. [S.l.]: [s.n.], 2004. e-book. Disponível em: www.ltid.inpe.br/dsr/viane/CursoHF/docs/Capitulo1.doc.

SOUZA, C. R. D. G. **Risco a inundações, enchentes e alagamentos em regiões costeiras**. Anais do 1º Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais. Florianópolis: GEDN-UFSC. 2004. p. 231-247.

STALLINGS, E.A.; WENZEL L.A.; **Organization of the River and Flood Program in the National Weather Service**, Weather and Forecasting, Vol. 10, Nº. 3, American Meteorological Society, September 1995. Boston, MA.

STRECK, E.V.; et.al.; **Solos do Rio Grande do Sul**. 2ed. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008. 222p.

SUI, D. Z.; MAGGIO, R. C. Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems, and prospects. **Computers, Environment and Urban Systems**, Texas, p. 33-51, 1999.

SUTILI, F.; DURLO, M. A.; BRESSAN, D. Hidrografia de Santa Maria. **Ciência e Ambiente/Universidade Federal de Santa Maria**, Santa Maria, v. 1, n.38, p. 79-92, jan/jun 2009. ISSN 1676-4188.

TAYLOR, M. A. P.; D'ESTE, G. M. **Transport Network Vulnerability: a method for diagnosis of critical locations in transport infrastructure systems**. Transport Systems Centre, University of South Australia. [S.l.], p. 22.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras**. São Paulo: Nobel, 1980. 374 p. il.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 1. ed. Porto Alegre: Ed. da Universidade: ABRH, EDUSP, 1993.

TUCCI, C. E. M.; MACHADO, E. S.; **Concepção do controle de enchentes na Região Metropolitana de Curitiba**. In Braga, B.; Tucci, C. E. M.; Tozzi, M. (org.) Drenagem Urbana: gerenciamento, simulação e controle. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 27-37p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2ª ed. ed. Porto Alegre: UFRGS-ABRH, 2000. 944 p.

TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas**. Porto Alegre: ABRH/RHAMA (Coleção ABRH de Recursos Hídricos), v. 11, 2007. 393 p. ISBN 978-85-88686-21-2.

TUCCI, C. E. M. Conceitos dos Modelos Hidrológicos. **Blog do Tucci - Recursos Hídricos e Meio Ambiente**, 2009. Disponível em: <<http://rhama.net/wordpress/?p=123>>. Acesso em: 07 maio 2012.

TUCCI, C. E. M. Simulação do rio Paraguai e Pantanal. **Blog do Tucci - Recursos Hídricos e Meio Ambiente**, 21 fev. 2010. Disponível em: <<http://rhama.net/wordpress/?p=135>>. Acesso em: 17 nov. 2011.

TWIGGER-ROSS, C.; **The impact of flooding on urban and rural communities**. Environmenta Agency-Department for Environment Food and Rural Affairs. Joint DEFRA/Environment Agency Flood and Coastal Erosion Risk Management R&D Programme. ISBN 1844325172. London. 45p.

USACE - UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Flood-runoff analysis. Technical engineering and design guides as adapted from the U.S. Army Corps of Engineers**. New York: [s.n.], v. 19, 1996. 176 p. il.

VALERIANO, M. D. M. **TOPODATA: guia para utilização de dados geomorfométricos locais**. São José dos Campos: INPE, 2008.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Versão digital 2. ed. Recife: [s.n.], 2006. Disponível em: http://www.agritempo.gov.br/publish/publicacoes/livros/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf.

VARELLA, J. USP desenvolve rede que faz alerta de enchente por mensagem de celular. **R7 Notícias**, 2010. Disponível em: <<http://noticias.r7.com/sao-paulo/noticias/usp-desenvolve-rede-que-faz-alerta-de-enchente-por-mensagem-de-celular-20100629.html>>. Acesso em: 08 Agosto 2012.

VILELLA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: Mcgraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.

WATANABE, R. M. Chove chuva. **Homepage do Prof. Roberto Massaru Watanabe**, 2011. Disponível em: <<http://www.ebanataw.com.br/roberto/chuvas/chuva6.htm>>. Acesso em: 22 maio 2011.

WINKLER, A. S.; TEIXEIRA, C. F. A.; DAMÉ, R. C. F., WINKE, L. O. D.; **Estimativa do tempo de concentração de uma bacia hidrográfica: comparação entre metodologias**. Anais do XVIII Congresso de Iniciação Científica (XVIII CIC). Universidade Federal de Pelotas (UFPel). Pelotas, 2009.

YANG, Q. et al. **Developing a Digital Elevation Model using ANUDEM for the Coarse Sandy Hilly Catchments of the Loess Plateau, China**. Canberra, Australia: CSIRO Land and Water Technical Report 7/05, 2005. 74 p. ISBN 0 643 09236 6. A PDF version is available at: <http://www.clw.csiro.au/publications/technical2005/tr7-05>.

ZEILER, M. **Modeling our world - The ESRI Guide to Geodatabases Design**. Redlands: Environmental Systems Research Institute, Inc., 1999. ISBN 1-879102-62-5.

APÊNDICES

Apêndice 1 – MDT e delimitação da bacia e sub-bacias hidrográficas

No arranjo da metodologia proposta utilizaram-se técnicas de sensoriamento remoto, geoprocessamento e levantamentos topográficos e hidrológicos “*in loco*”, para trechos de interesse do rio, com levantamento de seções ou de transectos de alague e marcas de enchentes.

A primeira abordagem na relação entre chuvas e enchentes baseou-se na distribuição espacial das áreas inundadas, determinadas a partir das cotas georreferenciadas de marcas deixadas pelas inundações. Para conhecer essas áreas fez-se o levantamento da superfície topográfica de toda a bacia, modelando-se tridimensionalmente o relevo.

O método da primeira etapa partiu da necessidade de geoprocessar os dados em única base, constituindo um SIG estruturado especificamente para abastecer de informações a modelagem de um sistema de apoio à gestão da mobilidade rural em situação de enchente. Para efetuar a estruturação do SIG optou-se pelo uso do software ArcGIS® da *Environmental Systems Research Institute (ESRI)*, versão 9.2, licenciado para o Colégio Politécnico da UFSM.

A partir da escolha do software de geoprocessamento foi necessário definir uma área de referência para as fases seguintes do projeto. Para que fosse obtida essa área foi necessário fazer previamente uma delimitação aproximada da bacia do Arroio Grande, com base em documentos cartográficos. Por meio da análise do relevo e das feições hidrológicas em cartas topográficas foi desenhado um polígono delineando a área aproximada da bacia onde a pesquisa foi realizada.

Para a delimitação da área efetiva e dos elementos de estudo foram reunidos documentos cartográficos que descrevem a hidrografia, o sistema viário, a altimetria, os tipos de solo e outros elementos que formam o relevo da bacia do Arroio Grande e suas circunvizinhanças. Quaisquer que fossem os sistemas de referência geodésica das fontes de dados geográficos, todos foram convertidos para o datum SIRGAS2000, que é o Sistema de Referência Geodésica oficial no Brasil.

As cartas topográficas em meio digital foram adquiridas pelo Colégio Politécnico da UFSM, obtidas de Hasenack (2010). As cartas em meio papel foram cedidas pela 1ª Divisão de Levantamentos da DSG, digitalizadas através de scanner para grandes formatos e salvas em formato TIFF (*Tagged Image File Format*).

As cartas que abrangem a área da pesquisa são as seguintes folhas:

- Camobi-SE – Folha SH.22-V-C-IV/2-SE; MI 2965/2-SE;
- Camobi-NE – Folha SH.22-V-C-IV/2-NE; MI 2965/2-NE;
- Camobi-SO – Folha SH.22-V-C-IV/2-SO; MI 2965/2-SO;
- Camobi-NO – Folha SH.22-V-C-IV/2-NO; MI 2965/2-NO;
- Santa Maria-SE – Folha SH.22-V-C-IV/1-SE; MI 2965/1-SE;
- Santa Maria-NE – Folha SH.22-V-C-IV/1-NE; MI 2965/1-NE.

Depois de convertidos para o formato *raster* (TIFF) as imagens das cartas foram georreferenciadas e suas áreas de mapa formaram o mosaico cartográfico da área, pois, para recobrir toda a bacia e suas adjacências, foi necessário juntar as seis cartas topográficas na escala 1:25.000.

As cartas topográficas 1:50.000 vetorizadas, em arquivos *shapfile*³² por Hasenack (2010) contêm dados vetorizados separadamente, de acordo com o tipo de feição topológica existente. Os planos de informação utilizados foram: (i) *hidrografia* (cursos de rios e arroios); (ii) *sistema viário* (caminhos, estradas, rodovias); e (iii) *altimetria* (curvas de nível de 20 em 20 m de equidistância vertical e pontos cotados no terreno). De posse deste conjunto estruturado de dados cartográficos digitalizados foi possível determinar o primeiro parâmetro de influência na formação da enchente – o limite topográfico da bacia, dado pelos divisores de águas (linha azul na figura 67).

Para que se recobrissem também as áreas de influência dos traçados viários, além da bacia, foi necessário sobrepor as áreas – do polígono viário e da bacia do Arroio Grande – em uma só cobertura. Ao redor deste novo polígono, para garantir a continuidade na cobertura das áreas próximas delimitou-se uma borda com 3 km de largura (linha tracejada na figura 67), usando para isso a ferramenta *Buffer* do menu *Editor* do módulo ArcMAP do ArcGIS 9.2[®].

Esse trabalho destinou-se a produzir dados que constituíssem a primeira aproximação na determinação fisiográfica da estrutura fluvial da bacia. Os dados foram gerados pelo trabalho de Barbieri, Miola e Werlang (2010), porém atenderam parcialmente à necessidade da pesquisa, pois a hidrografia cartografada não corresponde ao estado atual dos corpos hídricos na bacia, tanto no traçado dos arroios, quanto no número e tamanho dos açudes. Os dados cartográficos possuem (em 2012) uma obsolescência de aproximadamente 37 anos.

³² *Shapfile* é o formato de arquivo nativo do ArcGIS[®] e corresponde à representação gráfica georreferenciada de feições topológicas.

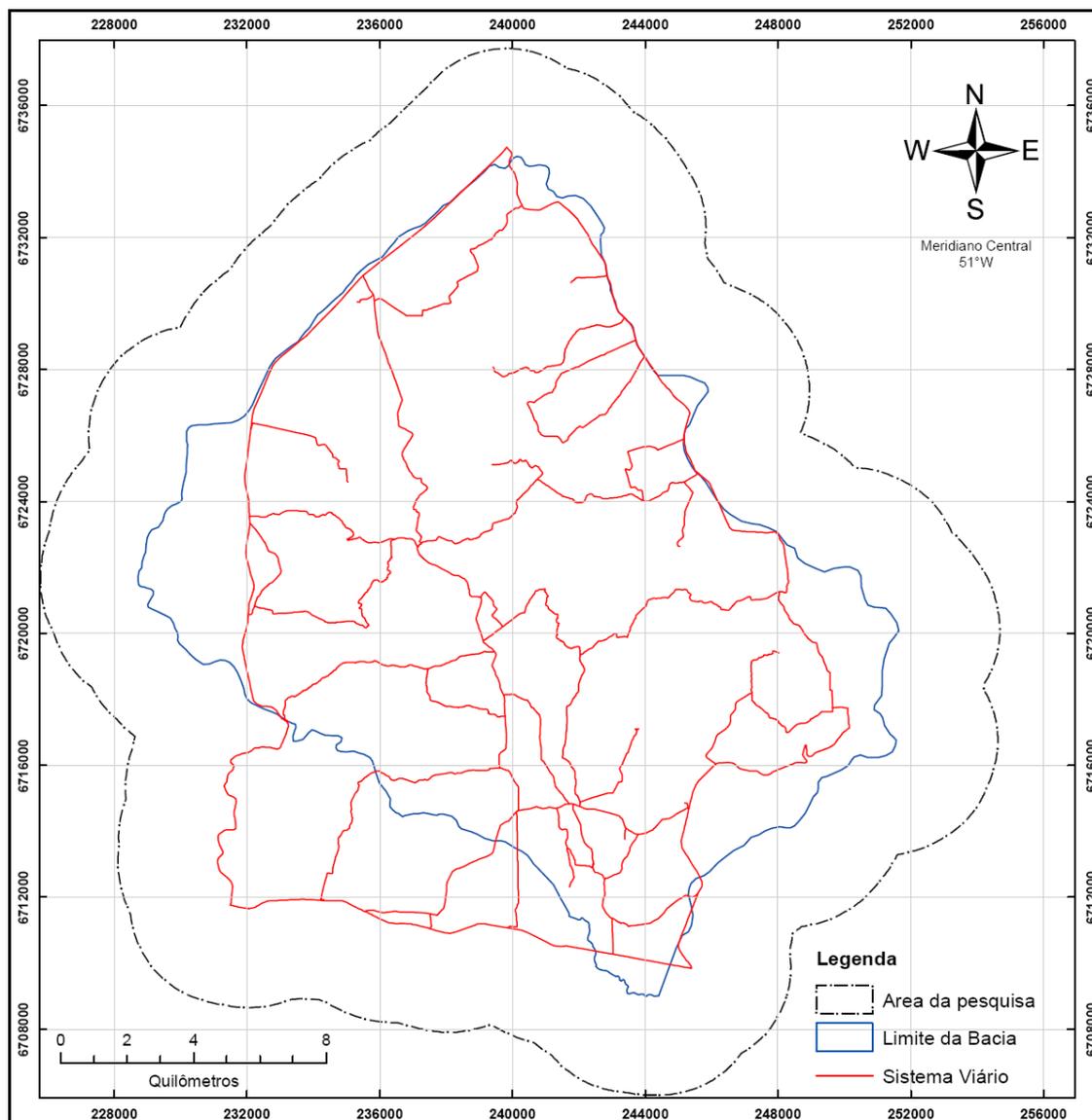


Figura 67 – Área efetiva de pesquisa (linha tracejada) - polígono viário (em vermelho) e da bacia do Arroio Grande (em azul).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para caracterizar fidedignamente a realidade do sistema fluvial da bacia, como, também, mapear o número e o tamanho dos açudes, foi necessário desenvolver uma metodologia especificamente destinada ao trabalho desta tese, de maneira a obter-se uma base de dados georreferenciados atualizada.

Esse trabalho constituiu-se da captura de imagens de satélite de alta resolução, obtidas através do Google Earth Pro[®]. Fez-se uso de uma versão de demonstração do referido software, disponibilizada gratuitamente para testes.

A captura das imagens seguiu uma sistemática análoga a um plano de voo aerofotogramétrico, com recobrimentos longitudinais entre cenas sucessivas da mesma faixa de imageamento, e, também, recobrimentos laterais entre cenas de

faixas subsequentes. Para manter uma relação constante na escala do imageamento fixou-se uma única altitude para o ponto de visão, que representa a altitude que o observador está acima do nível do mar no modelo digital do globo terrestre do Google Earth®.

Em cada cena capturada do Google Earth Pro® foi fixada uma coordenada de georreferenciamento em projeção UTM. Essa informação ficou gravada em cada cena capturada (Figura 68). Para a montagem das faixas de imageamento utilizou-se o software Adobe Photoshop CS2.

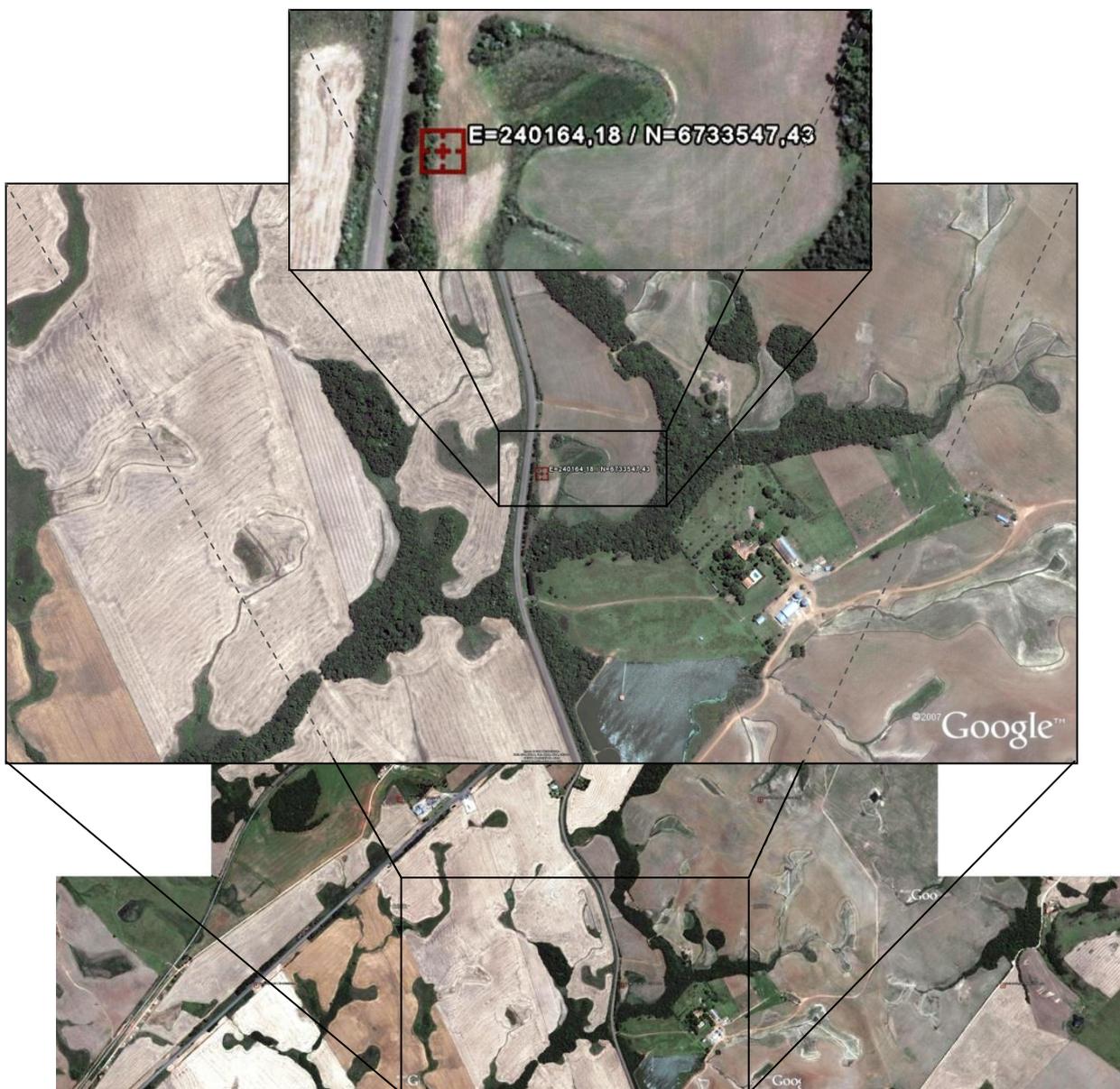


Figura 68 – Construção de mosaico georreferenciado com imagens do Google Earth.
Fonte: Elaborado pelo autor.

No módulo ArcMap® do ArcGIS Desktop 9.2® fez-se o georreferenciamento de cada faixa de imageamento previamente mosaificada, culminando, ao final do procedimento, com a cobertura da totalidade da área da bacia e seus arredores, com imagens de alta resolução e excelente definição das feições atuais da paisagem, especialmente os canais fluviais, a localização dos açudes, das pontes e passagens de nível de água, e, também, com a visualização da rede viária atual.

A vetorização dessas feições foi feita por meio da ferramenta *ArcScan* combinada com as ferramentas do menu *Editor* do software ArcGIS Desktop 9.2®, módulo ArcMap®. Ao ajustarem-se os vértices e os vetores das drenagens, fez-se também a denominação da toponímia dos arroios.

O ajustamento vetorial realizado sobre a rede de drenagem concentrou-se nas áreas de ocorrência das enchentes, ou seja, as áreas com baixas declividades e abaixo da cota 200 metros. Fez-se assim, para que as possíveis deformações cartográficas, no rearranjo vetorial da hidrografia nos gradientes abruptos das encostas da bacia, não sofressem significativas distorções geométricas. Essas distorções são menores em regiões mais planas do que em regiões com relevos mais acidentados. A figura 69 ilustra detalhamento da hidrografia.

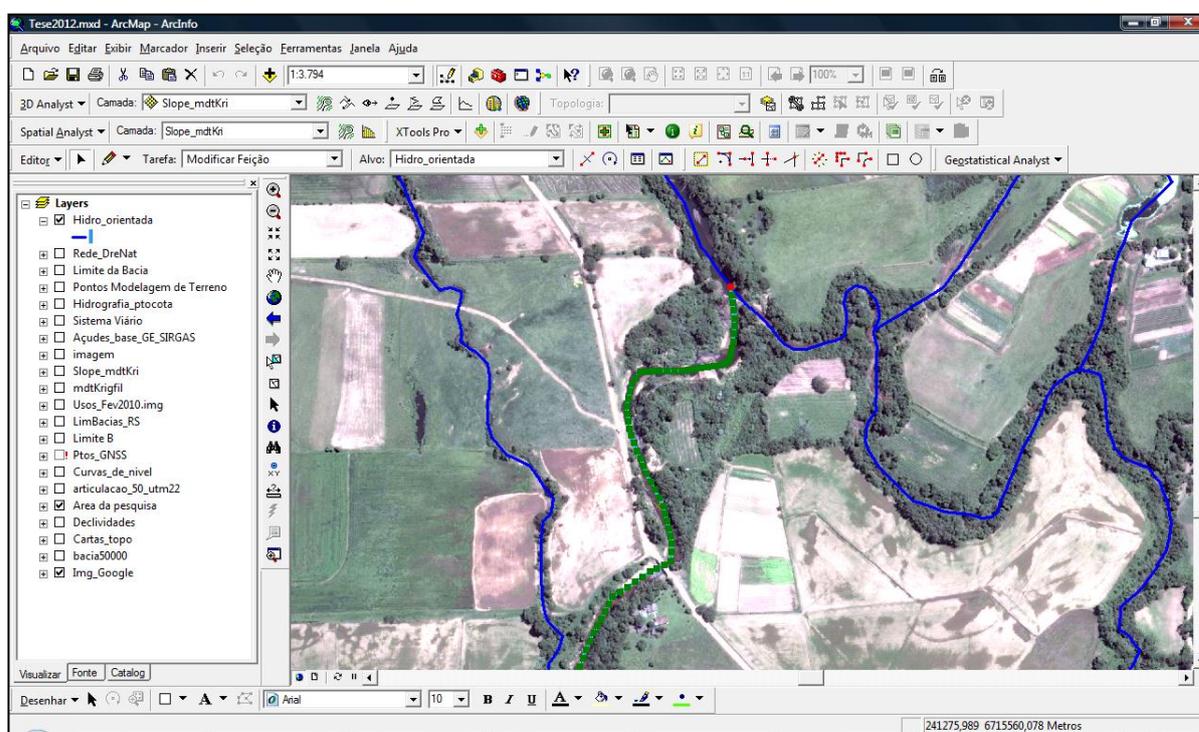


Figura 69 – Tela do ArcGIS durante a edição da hidrografia sobre a carta-imagem.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para modelar digitalmente o relevo da bacia usou-se a ferramenta “*Topo to Raster*” do menu *3D Analyst* do ArcMAP, que, como mencionado na literatura revisada, é um método que produz resultados melhores que o Krigagem em terrenos baixos e planos, nos quais é necessário evidenciar a presença da rede de drenagem. O processo de modelagem realizado pelo algoritmo *Topo to Raster* baseia-se na condição de que todos os dados armazenados tenham o mesmo sistema de projeção cartográfica e de unidades altimétricas.

O modelo de terreno gera uma grade regular na forma de imagem digital, cujos pixels têm uma resolução espacial correspondendo a um quadrado no terreno. Para a modelagem do terreno na bacia considerada nesta pesquisa definiu-se esse quadrado com lados de 10 metros no terreno.

Apêndice 2 – Estatísticas das chuvas – Método e Resultados

Conforme Cardoso, Ullmann e Bertol (1998, p.132) o conhecimento das características das chuvas de curta duração pressupõe estabelecer as relações intensidade-duração-frequência dessas chuvas, obtidas em pluviômetros. Nas regiões não cobertas por pluviógrafos, podem-se avaliar chuvas de 24 horas de determinada frequência e, a partir daí, chuvas de menor duração com a mesma frequência.

Selecionaram-se as precipitações pluviométricas diárias máximas em cada ano da série do BDMEP, classificando-as em ordem decrescente. Para cada $P_{p_{\max}}$ foi atribuído um índice “ m_i ” de magnitude da chuva, sendo o “ m_i ”=1 para a maior $P_{p_{\max}}$. Depois do ordenamento das magnitudes de chuvas máximas anuais, procederam-se os cálculos de probabilidades (P) de ocorrência de chuvas maiores e, também os tempos de retorno (TR) através da Distribuição de Gumbel, como feito por Cardoso, Ullmann e Bertol (1998, p.133). Para isso foi calculada a média e o desvio padrão dessa amostra, respectivamente por meio das equações 21 e 22.

$$Pp_{m\acute{a}x. \acute{m}ed.} = \frac{\sum Pp_{m\acute{a}x i}}{n} \quad (21)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (Pp_{m\acute{a}x i} - Pp_{m\acute{a}x \acute{m}ed.})^2}{n-1}} \quad (22)$$

Com “n” igual ao número de anos da série.

A probabilidade percentual de um evento extremo não ser excedido (P_i) e o tempo de retorno (TR) foram calculados pelas equações 23 e 24, obtidas do Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem, do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), (BRASIL, 2005):

$$P_i = \left[1 - \left(\frac{m_i}{n+1} \right) \right] \times 100 \quad (23)$$

$$TR_i = \frac{100}{100 - P_i} \quad (24)$$

Sendo:

m_i = magnitude da chuva;

n = anos da série.

Pelo Método de Gumbel, segundo Brasil (2005) a probabilidade “P”, de uma dada descarga ser superada por algum valor da variável aleatória, para um número infinito de elementos, é dada pela seguinte equação:

$$P = e^{-e^{-Y}} \quad (25)$$

Onde:

P = probabilidade de não ocorrerem descargas maiores;

E = base do logaritmo natural;

Y = Variável reduzida de Gumbel (VILELLA e MATTOS, 1975).

O Método de Gumbel aplica-se na análise de vazões, mas tratando-se de um tipo de análise estatística de probabilidades, baseado na teoria dos extremos ocasionais, utilizou-se esse método para estimar a probabilidade (P) das chuvas diárias máximas anuais serem igualadas ou superadas, em uma estimativa de infinitos anos. Na prática, considerou-se o número real de anos de observação da série pluviométrica, e aplicou-se o Modelo Geral de Ven Te Chow (Brasil, 2005; Mello et al., 2001), que demonstrou que a maioria das funções de frequência aplicáveis em hidrologia pode ser resolvida pela equação geral:

$$Q_{(t)} = Q_{med.} + \sigma K_{(t)} \quad (26)$$

Em que:

$Q_{(t)}$ = Vazão estimada no tempo de recorrência (t);

$K_{(t)}$ = Fator de frequência, obtido em função do número de amostras (anos série histórica) e do tempo de recorrência (t).

Da equação 26 aplicou-se a equação 27:

$$Pp_{máx.(TR)} = Pp_{med.} + \sigma K_{(TR)} \quad (27)$$

Na qual:

$Pp_{máx.}$ = Precipitação diária máxima anual estimada para o tempo de retorno (TR);

$Pp_{med.}$ = Precipitação diária máxima anual média (Equação 21);

σ = Desvio padrão do universo (Equação 22);

$K_{(TR)}$ = Fator de frequência, que depende do número de amostras e do Tempo de Retorno (Equação 24).

Ao verificar que o tempo de retorno (TR) é o inverso da probabilidade (P) e considerando a equação 25, que resulta em P, encontrou-se a expressão linearizada para o cálculo da variável reduzida de Gumbel (y), que é calculado para um TR_i qualquer, como na equação 28:

$$Y_i = -L_n[L_n TR_i - L_n(TR_i - 1)] \quad (28)$$

Onde:

L_n = Base dos logaritmos neperianos; e

TR_i = Tempo de Retorno qualquer.

Daí em diante, calcularam-se as estatísticas descritivas para a variável reduzida a partir de cada valor de (Y_i) em função do tempo de retorno (TR_i), equivalente a cada precipitação diária máxima anual (Pp_{máx. (i)}) observada. Determinou-se a média e o desvio padrão do universo para a variável reduzida de Gumbel, e em função dessas medidas foi possível calcular o fator de frequência K_{TR} para cada TR_i. O cálculo desse parâmetro foi dado pela equação:

$$K_{TR} = \frac{Y_{TR} - Y_{médio}}{\sigma_Y} \quad (29)$$

Sendo:

K_{TR} = fator de frequência das precipitações diárias máximas anuais, para o tempo de retorno requerido;

Y_{TR} = variável reduzida de Gumbel, para o tempo de retorno requerido;

$Y_{médio}$ = Média aritmética das variáveis reduzidas de todos os TR da série histórica;

σ_n = Desvio padrão da variável reduzida.

Obtendo-se o K_{TR} da equação 27, modificada para a Fórmula de Ven Te Chow (Brasil, 2005), foi possível estimar as precipitações diárias máximas anuais para todos os anos da série histórica e anos posteriores.

Para estabelecer uma relação entre os TR's e as prováveis chuvas geradoras de enchentes, fez-se uma distribuição em classes, de maneira que, para todos os TR selecionados, têm-se valores aproximados de precipitações máximas diárias (estimadas), possíveis de ocorrer. Essa distribuição segue na tabela 15 e baseia-se nos dados apresentados na tabela 14.

Tabela 14 – Resultados da análise das frequências de precipitações diárias máximas anuais e seus respectivos tempos de retorno (TR).

Ano	Pp _{máx} (mm/dia)	Ordem "m _i "	P _i (%)	TR _(i) (anos)	Y _(TR)	K _{TR}	Pp _{máx.esp.} (mm/dia)
2011	56.0	52	1.9	1.0	-1.379	-1.641	53.3
1995	58.5	51	3.8	1.0	-1.187	-1.478	57.5
1996	60.8	50	5.7	1.1	-1.055	-1.365	60.4
1962	64.0	49	7.5	1.1	-0.949	-1.275	62.7
2000	65.8	48	9.4	1.1	-0.859	-1.198	64.7
1970	66.1	47	11.3	1.1	-0.779	-1.130	66.5
1967	67.4	46	13.2	1.2	-0.705	-1.068	68.1
1978	68.3	45	15.1	1.2	-0.637	-1.010	69.6
1968	70.4	44	17.0	1.2	-0.573	-0.955	71.0
2008	72.8	43	18.9	1.2	-0.511	-0.903	72.3
1999	78.2	42	20.8	1.3	-0.453	-0.853	73.6
1980	80.2	41	22.6	1.3	-0.396	-0.804	74.8
1987	80.4	40	24.5	1.3	-0.340	-0.757	76.1
2009	81.2	39	26.4	1.4	-0.286	-0.711	77.2
2004	84.8	38	28.3	1.4	-0.233	-0.666	78.4
1990	84.9	37	30.2	1.4	-0.180	-0.621	79.6
2010	85.0	36	32.1	1.5	-0.128	-0.577	80.7
1972	85.1	35	34.0	1.5	-0.077	-0.533	81.8
1985	85.4	34	35.8	1.6	-0.026	-0.489	83.0
1993	86.2	33	37.7	1.6	0.026	-0.446	84.1
1971	87.6	32	39.6	1.7	0.077	-0.402	85.2
1992	87.6	31	41.5	1.7	0.129	-0.358	86.3
1974	88.0	30	43.4	1.8	0.181	-0.314	87.5
1969	88.3	29	45.3	1.8	0.233	-0.269	88.6
1964	89.0	28	47.2	1.9	0.286	-0.224	89.8
1983	89.4	27	49.1	2.0	0.339	-0.179	91.0
2005	91.1	26	50.9	2.0	0.394	-0.132	92.2
1981	93.1	25	52.8	2.1	0.449	-0.085	93.4
1997	93.6	24	54.7	2.2	0.506	-0.037	94.6
1975	93.7	23	56.6	2.3	0.564	0.012	95.9
1988	95.5	22	58.5	2.4	0.623	0.063	97.2
2007	95.7	21	60.4	2.5	0.684	0.115	98.5
1961	96.5	20	62.3	2.7	0.747	0.168	99.9
1973	97.4	19	64.2	2.8	0.812	0.224	101.3
1966	98.0	18	66.0	2.9	0.880	0.281	102.8
1977	99.4	17	67.9	3.1	0.950	0.341	104.3
2002	101.8	16	69.8	3.3	1.023	0.403	106.0
1963	103.0	15	71.7	3.5	1.100	0.469	107.6
1976	105.2	14	73.6	3.8	1.182	0.538	109.4
2006	105.9	13	75.5	4.1	1.268	0.611	111.3
1979	108.4	12	77.4	4.4	1.360	0.690	113.3
2003	109.0	11	79.2	4.8	1.458	0.774	115.5
2001	117.2	10	81.1	5.3	1.565	0.864	117.8
1965	120.0	9	83.0	5.9	1.681	0.963	120.4
1986	123.0	8	84.9	6.6	1.810	1.073	123.2
2012	124.0	7	86.8	7.6	1.954	1.196	126.4
1989	128.4	6	88.7	8.8	2.119	1.336	130.0
1998	136.3	5	90.6	10.6	2.312	1.500	134.2
1994	136.6	4	92.5	13.3	2.545	1.698	139.3
1982	145.0	3	94.3	17.7	2.843	1.952	145.8
1991	156.1	2	96.2	26.5	3.258	2.305	154.9
1984	183.9	1	98.1	53.0	3.961	2.903	170.3

* Fonte: Dados de precipitação diária máxima anual, oriundos do BDMEP (INMET).

Tabela 15 – Relação entre tempos de retorno e prováveis chuvas máximas diárias, estimadas para a região do estudo.

Tempo de Retorno (TR em anos)	Precipitação máxima (estim.) em mm/dia
>1	> 60
2	≈ 91
3	≈ 104
4	≈ 111
5	≈ 116
10	≈ 134
25	≈ 154
50	≈ 170

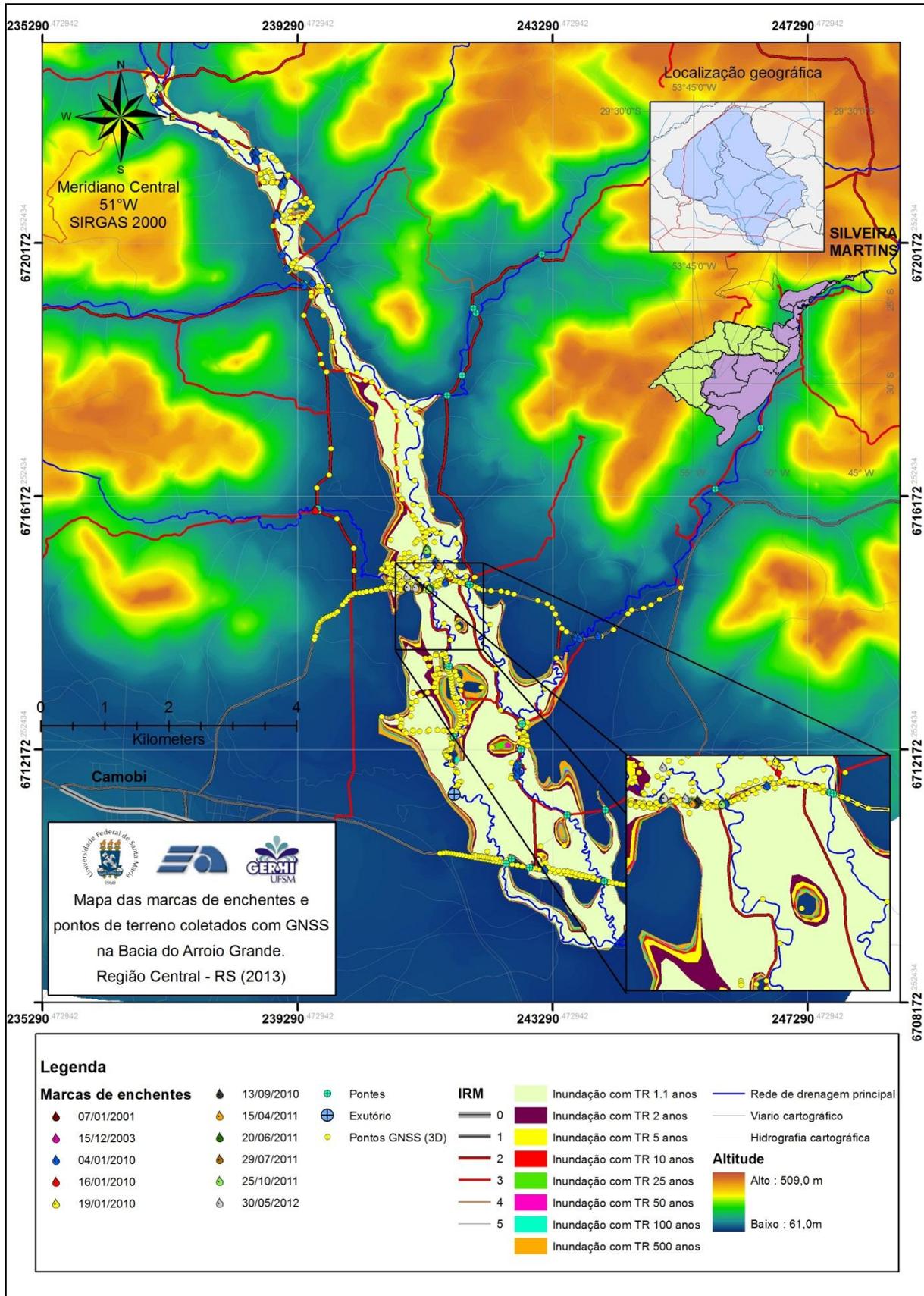
Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado da Tabela 14.

Objetivando analisar se existe alguma influência de fenômenos causadores da mudança climática, relatada pelo IPCC (2007), fez-se, a partir dos dados da tabela 14, uma classificação das precipitações diárias máximas anuais, distribuindo o período conforme os anos de ocorrência dos fenômenos El Niño e La Niña. Essa comparação encontra-se plotada na forma de gráfico, comentado na seção 4.1.2.

Com a determinação das precipitações diárias máximas anuais, em função do coeficiente K_{TR} , pelo qual se obtém estimativas dessas chuvas para qualquer TR, foi possível determinar chuvas de um dia para TRs maiores que o período da série histórica. Ao consultar Porto (1999), verificou-se que, além dos TRs da série de 52 anos, os TRs de 100 e 500 anos são bastante usados como parâmetros para o dimensionamento de obras de engenharia agrícola e civil, tais como: barragens, pontes, diques, taludes em seções transversais, entre outras aplicações da Engenharia de Água e Solo.

Desta forma, aplicando-se as equações do Método de Gumbel foi possível obter os valores estimados para as precipitações diárias máximas anuais para TR igual a 100 e 500 sendo, respectivamente, 184,4mm/dia e 219,7mm/dia, que permitiram estimar a vazão de projeto para esses TRs.

Apêndice 3 – Mapa das marcas de enchentes e pontos GNSS.



Apêndice 4 – Álbum de fotos das enchentes na área da pesquisa.

Caracterização geral da região.



Planície de inundação do Arroio Grande-Vavacaí-Mirim. Foto: Alessandro Miola (14/09/2010).



Sistema de produção agrícola na planície de inundação. Foto: Alessandro Miola (17/04/2012).



Planície de inundação do Baixo Arroio Grande-Aroio do Veado. Foto: Alessandro Miola (26/10/2011).



Alagamento em lavoura de arroz na várzea do Arroio do Meio. Foto: Alessandro Miola (14/09/2010).



Planície de inundação do Médio Arroio Grande. Foto: Alessandro Miola (29/09/2011).



Produção agrícola da zona de transição Planalto-Planície na bacia. Foto: Alessandro Miola (23/10/2005).

O problema da (falta de) mobilidade rural.



Ponte sobre o Arroio do Meio. (IRM 3 x O.S. 9; IFP 27 = Alto Risco). Foto: Alessandro Miola (18/09/2010).



Galeria na ERS-511 (IRM 1), obstruída para reter a água à montante. Foto: Alessandro Miola (23/07/2010).



Estrada (IRM 3) tangenciando o Médio Arroio Grande. Foto: Alessandro Miola (04/07/2010).



Est. do Baú (IRM 2) em afluente do Arr. Man.Alves (O.S.6; IFP12=Baixo Risco). Foto: Alessandro Miola (28/07/2010).



Estrada (IRM 3) sobre o Médio Arr. Grande (O.S. 8; IFP 24 = Alto Risco). Foto: Alessandro Miola (26/05/2012).



Estrada (IRM 3) sobre o Baixo Arr. Grande (O.S. 9; IFP 27 = Alto Risco). Foto: Alessandro Miola (02/05/2012).



Estrada (IRM 3) sobre o Médio Arr. Grande (O.S. 9; IFP 27 = Alto Risco). Foto: Alessandro Miola (16/12/2010).



Estrada (IRM 3) sobre o Médio Arr. Grande (O.S. 9; IFP 27 = Alto Risco). Foto: Alessandro Miola (29/07/2011).



Estrada (IRM 3) sobre o Médio Arr. Grande (O.S. 9; IFP 27 = Alto Risco). Foto: Alessandro Miola (13/09/2010).



Estrada (IRM 3) sobre o Rio Vacacai-Mirim (O.S. 9; IFP 27 = Alto Risco). Foto: Alessandro Miola (28/07/2010).



Estrada (IRM 2) sobre o Arr. Manoel Alves (O.S. 9; IFP 18 = Médio Risco). Foto: Rafael Dala Lana (04/01/2010).



Estrada (IRM 3) sobre o Médio Arr. Grande (O.S. 9; IFP 27 = Alto Risco). Foto: Alessandro Miola (24/02/2011).

As enchentes na região do estudo



Estrada submersa na várzea do Arroio do Meio. Foto: Éder Petine (04/01/2010).



Estrada submersa na várzea do Arroio do Meio. Foto: João Budel (19/01/2010).



Estrada submersa na ponte do Arroio do Meio-Linha Canudos. Foto: Luís da Rosa Lucion (16/01/2010).



Área alagada no Arroio do Meio. Foto: BASM (04/01/2010).



Área alagada no Baixo Arroio Grande. Foto: BASM (04/01/2010).



Área alagada no Rio Vacacaí-Mirim, Arroio do Meio e Baixo Arroio Grande. Foto: BASM (04/01/2010).