

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

**GERAÇÃO DE MODELO CARTOGRÁFICO APLICADO AO
MAPEAMENTO DAS ÁREAS SUJEITAS ÀS INUNDAÇÕES
URBANAS NA CIDADE DE LAJEADO / RS**

RAFAEL RODRIGO ECKHARDT

Porto Alegre, RS

2008

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

**GERAÇÃO DE MODELO CARTOGRÁFICO APLICADO AO
MAPEAMENTO DAS ÁREAS SUJEITAS ÀS INUNDAÇÕES
URBANAS NA CIDADE DE LAJEADO / RS**

Rafael Rodrigo Eckhardt

Orientadora: Dra. Dejanira Luderitz Saldanha

Co-Orientador: Dr. Ronaldo dos Santos da Rocha

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

Porto Alegre, RS

Março de 2008

“Toda a teoria só é boa na condição de que,
utilizando-a, se vá mais além”

ANDRE GIDE (1869-1951)

*Aos meus pais,
Waldir e Maristela Eckhardt*

*Aos meus Irmãos, companheiros de todas as horas,
Tiago, Marciane e Daniel*

*À minha namorada,
Juliana Fava e Silva, alicerce desta conquista*

AGRADECIMENTOS

Os mais sinceros e profundos agradecimentos vão para os meus orientadores, Dra. Dejanira Luderitz Saldanha e Dr. Ronaldo dos Santos da Rocha, pela oportunidade oferecida ao selecionar-me para o Programa de Mestrado e por acreditar nas minhas propostas. Além disso, agradecer pelo imensurável apoio, orientação e constante incentivo dispensados ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

Especial agradecimento à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela oportunidade da bolsa de estudos concedida.

Agradeço ao Centro Universitário UNIVATES e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul - FAPERGS, que pelo edital PROCOREDES, permitiu o financiamento deste estudo.

Ao Programa Nacional de Cooperação Acadêmica - PROCAD, por permitir intercâmbio com o Programa de Mestrado em Sensoriamento Remoto do INPE, pelo período de três meses. As disciplinas cursadas, a interação com os professores e os pesquisadores, a possibilidade de acessar a biblioteca e conhecer a dinâmica do INPE foram momentos enriquecedores.

Agradeço à Secretaria de Planejamento da Prefeitura Municipal de Lajeado, pela disponibilização da base cartográfica em escala 1:2.000, sem a qual o presente estudo não poderia ser realizado com a qualidade requerida.

Palavras de gratidão ao Ms. Everaldo Rigelo Ferreira, um dos idealizadores deste estudo e que contribuiu em vários momentos.

Sinceros agradecimentos ao Dr. Claus Haetinguer, pelo auxílio no desenvolvimento do modelo matemático de previsão de inundações.

Com muita gratidão, agradecer a minha namorada, Juliana Fava e Silva, pelo companheirismo nas campanhas de campo, sendo um dos alicerces para concretizar este estudo. Agradeço por toda a ajuda, desde a digitalização das curvas de nível, a tomada de fotografias das inundações, a marcação de pontos de controle para proceder à ortorretificação da imagem QuickBird e à validação das cotas de inundação simuladas.

Ao colega e amigo do Núcleo de Geoprocessamento da UNIVATES, Vianeí Luís Diedrich, pelo auxílio na digitalização das curvas de nível e na coleta de pontos de controle para proceder à validação das cotas de inundação simuladas.

Agradeço à Secretaria de Meio Ambiente da Prefeitura Municipal de Lajeado, pela disponibilização de fotografias aéreas, tomadas durante a inundação do dia 24 de setembro de 2007, auxiliando na validação dos resultados.

Por último, agradecer àqueles que de alguma forma contribuíram para a concretização deste estudo, em especial aos professores, funcionários, colegas e amigos do PPGSR/UFRGS.

GERAÇÃO DE MODELO CARTOGRÁFICO APLICADO AO MAPEAMENTO DAS ÁREAS SUJEITAS ÀS INUNDAÇÕES URBANAS NA CIDADE DE LAJEADO / RS ¹

Autor: Rafael Rodrigo Eckhardt

Orientadora: Dra. Dejanira Luderitz Saldanha

Co-Orientador: Dr. Ronaldo dos Santos da Rocha

RESUMO

A previsão, o mapeamento, o alerta e o diagnóstico de eventos extremos, como as inundações, são imprescindíveis, principalmente em áreas urbanas, devido à quantidade de vidas, saneamento, bens materiais e infra-estruturas envolvidas no processo. A cidade de Lajeado, localizada no nordeste do RS, historicamente e de forma periódica, é atingida por inundações decorrentes das enchentes do Rio Taquari. A presente dissertação objetiva desenvolver um modelo cartográfico para proceder à previsão e ao mapeamento da área urbana inundável da cidade de Lajeado. A utilização conjunta das geotecnologias e as técnicas de representação e análise espacial mostraram-se promissoras na previsão e fidedignas na simulação, mapeamento e caracterização do uso do solo das áreas sujeitas às inundações. O conhecimento antecipado da cota topográfica a ser atingida por determinada inundação, a respectiva área inundável e o padrão de ocupação do solo contribuem para estabelecer um eficiente plano de evacuação e antecipar a ação da Defesa Civil na remoção e realocação da população atingida.

Palavras-Chave: SIG, Sensoriamento Remoto, Inundações, Previsão, Simulação.

¹ Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM), Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS, Março de 2008, 116p.

GENERATION OF A CARTOGRAPHIC MODEL FOR THE MAPPING OF URBAN AREAS REACHED BY FLOODS IN LAJEADO / RS ¹

Author: Rafael Rodrigo Eckhardt

Advisor: PhD. Dejanira Luderitz Saldanha

Co-Advisor: PhD. Ronaldo dos Santos da Rocha

ABSTRACT

Predicting, mapping, warning, and diagnosing significant climate events, such as floods, is crucially relevant due to the number of lives, sanitation, material assets, and the infrastructure involved in such process. The city of Lajeado, in the northeastern region of Rio Grande do Sul, historically and periodically undergoes inundation due to the overflowing of Taquari River. This dissertation aims at developing a cartographic model for predicting and mapping the urban areas of Lajeado reached by floods. The combined use of geotechnologies and spatial analysis and representation techniques proves to be successful in predicting and faithful in simulating, mapping and characterizing land use in areas reached by floods. The anticipated awareness about the topographic portion that undergoes a specific flood, the respective area reached by the flood and the pattern of land use in that area contribute to establishing an efficient evacuation plan and to anticipating intervention of the Civil Defense in removing and reallocating the affected population.

Keywords: GIS, Remote Sensing, Floods, Prediction, Simulation.

¹ Masters Degree Dissertation in Remote Sensing, State Center of Researches in Remote Sensing and Meteorology (CEPSRM), Post-Graduation Course in Remote Sensing of Federal University of Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS, March 2008, 116p.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	iv
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE GRÁFICOS.....	xiv
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivo Geral.....	17
1.2 Objetivos Específicos	17
1.3 Justificativa	17
1.4 Estrutura da Dissertação.....	20
CAPÍTULO II - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 Eventos Naturais Extremos.....	21
2.1.1 Enchentes e Inundações Urbanas	23
2.1.2 Inundações no Vale do Taquari.....	28
2.1.2.1 Sistema de Previsão e Alerta de Enchentes (SPAÉ)	30
2.1.2.2 Inundações na Cidade de Lajeado	32
2.2 Geoprocessamento em Recursos Hídricos	36
2.2.1 Mapeamento das Áreas Inundáveis	37
2.3 Sistemas de Informação Geográfica (SIG).....	40

2.3.1 Dados Espaciais	41
2.3.2 Modelo Cartográfico	43
2.4 Sensoriamento Remoto	44
2.4.1 Imagens do Satélite QuickBird	45
2.4.2 Correção Geométrica	47
2.4.2.1 Ortorretificação	49
2.4.2.1.1 Construção dos <i>Rational Polynomial Coefficients</i> (RPC)	51
2.4.2.1.2 GCP e GPS em Modo Diferencial	53
2.5 Modelos Numéricos do Terreno	55
2.5.1 Amostragem	56
2.5.2 Interpolação e Modelagem do MDE	57
2.5.3 Declividade do Terreno	60
CAPÍTULO III - MATERAIS E MÉTODOS.....	62
3.1 Área de Estudo	62
3.2 Materiais e Equipamentos	63
3.2.1 Dados Cartográficos	63
3.2.2 Dados de Sensoriamento Remoto	63
3.2.3 GPS Diferencial GTR-A e GTR-A BT	64
3.2.4 Softwares	65
3.3 Procedimentos Metodológicos	65
3.3.1 Modelo Matemático de Previsão das Cotas de Inundação	65
3.3.2 Simulação e Mapeamento das Áreas Sujeitas às Inundações	67
3.3.2.1 Coleta dos Pontos de Controle com DGPS	68
3.3.2.2 Georreferenciamento da Base Cartográfica.....	72
3.3.2.3 Geração do MDE	73
3.3.2.4 Construção dos RPC e Ortorretificação da Imagem QuickBird.....	74
3.3.2.5 Simulação das Inundações	76
3.3.2.6 Declividade	77
3.3.2.7 Uso e Cobertura da Terra	77
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	79
4.1 Probabilidade de Ocorrência e Período de Retorno das Inundações	79
4.2 Previsão das Cotas de Inundações para Lajeado	81
4.3 Ortorretificação da Imagem QuickBird.....	85

4.4 Modelo Digital de Elevação	86
4.5 Simulação e Mapeamento das Cotas de Inundação	87
4.5.1 Validação das Cotas de Inundação Simuladas	92
4.5.2 Inundação X Declividade	96
4.5.3 Uso e Cobertura da Terra.....	99
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES	103
5.1 Considerações Finais	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106
ANEXO 1	112
ANEXO 2	113
ANEXO 3	114
ANEXO 4	115
ANEXO 5	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Distribuição de desastres naturais por país na América do Sul entre os anos de 1975 a 1999.....	22
Figura 02 - Municípios atingidos por inundações ou enchentes no Brasil entre os anos de 1998 e 1999.....	26
Figura 03 - Representação das inundações em ambiente urbano.....	27
Figura 04 - Localização da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas.....	29
Figura 05 - Organograma ideal apresentando, de forma esquemática, a estrutura e o funcionamento do SPAE do Vale do Taquari	30
Figura 06 - Localização do município de Lajeado	32
Figura 07 - Vista panorâmica da inundação ocorrida em 03 outubro de 2001	34
Figura 08 - Marca do nível alcançado pela inundação de 03 outubro de 2001	35
Figura 09 - Interrupção do tráfego pela inundação de 24 de setembro de 2007 ..	35
Figura 10 - Zonas de inundação de Blumenau.....	39
Figura 11 - Esquematização do processo de aquisição de dados por sensoriamento remoto.....	45
Figura 12 - Esquematização do processo de ortorretificação.....	49
Figura 13 - Projeção de linha central das imagens do sensor orbital QuickBird...51	
Figura 14 - Sistema de rotação angular de Omega, Phi, Kappa	52
Figura 15 - Relação entre o sistema de coordenadas no solo e o sistema de coordenadas da imagem	53
Figura 16 - Método de Posicionamento com GPS Diferencial	55
Figura 17 - Representação gráfica da altitude do terreno por curvas de nível	56
Figura 18 - Modelo de grade regular retangular: poliedro de faces retangulares.	58

Figura 19 - Modelo de malha irregular triangular: poliedros de faces triangulares	58
Figura 20 - Estrutura da Rede Irregular de Triângulos	59
Figura 21 - Curvas de nível obtidas por interpolação	59
Figura 22 - Equação de mapeamento da altitude para nível de cinza.....	60
Figura 23 - Representação da altitude do relevo na forma de uma matriz.....	60
Figura 24 - Localização da área de estudo	62
Figura 25 - Equipamento DGPS GTR-A BT	64
Figura 26 - Fluxograma do modelo matemático de previsão das cotas de inundação para Lajeado	67
Figura 27 - Fluxograma metodológico detalhado do modelo cartográfico de mapeamento das áreas sujeitas às inundações.....	68
Figura 28 - Distribuição dos GCP e localização da estação-base.....	69
Figura 29 - Coleta do GCP16 com o DGPS GTR-A BT	70
Figura 30 - Localização do GCP 16 na imagem QuickBird	70
Figura 31 - Esquematisação da relação entre o elipsóide e do geóide da Terra .	71
Figura 32 - Carta topográfica original georreferenciada 1:2.000	72
Figura 33 - Digitalização das curvas de nível georreferenciadas	72
Figura 34 - Janela de construção dos RPC.....	74
Figura 35 - Matriz de rotação associada com XS, YS e ZS	75
Figura 36 - RMS dos GCP utilizados na construção dos RPC	75
Figura 37 - Exemplos dos resultados obtidos na ortorretificação	86
Figura 38 - Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo.....	87
Figura 39 - Simulação das áreas sujeitas às inundações na cidade de Lajeado .	88
Figura 40 - Carta de inundação da cidade de Lajeado.....	90
Figura 41 - Vista área da inundação de 24 de setembro de 2007 ao longo do Arroio Saraquá	92
Figura 42 - Validação altimétrica da cota de inundação simulada de 25,97 m.....	93
Figura 43 - Validação horizontal da cota de inundação simulada de 25,97 m	93

Figura 44 - Validação da cota de inundação simulada de 25,97 m com GCP obtidos com DGPS	95
Figura 45 - Validação da cota de inundação simulada de 25,97 m com GCP obtidos com GPS.....	95
Figura 46 - Validação da cota de inundação simulada de 25,97 m com GCP obtidos com fotografias aéreas e tomadas ao solo	95
Figura 47 - Vista área da inundação de 24 de setembro de 2007, ao longo do Arroio do Engenho.....	96
Figura 48 - Vista área em detalhe da inundação de 24 de setembro de 2007, ao longo do Arroio do Engenho.....	96
Figura 49 - Mapa da declividade da área de estudo	97
Figura 50 - Uso e cobertura da terra das áreas sujeitas às inundações	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Principais características do satélite Quickbird II.....	46
Tabela 02 - Principais instrumentos sensores do satélite Quickbird II.....	46
Tabela 03 - Principais fontes de distorções geométricas das imagens de satélite.....	47
Tabela 04 - Características da imagem QuickBird utilizada.....	64
Tabela 05 - Softwares utilizados e respectivas aplicações.....	65
Tabela 06 - Classes de declividade ou classes clinográficas.....	77
Tabela 07 - Probabilidade e Período de Retorno calculado para diversos níveis de inundação na cidade de Lajeado.....	79
Tabela 08 - Ajuste do modelo matemático para a previsão das cotas de inundação da cidade de Lajeado em função da cota de inundação de Encantado.....	83
Tabela 09 - Previsão da cota de inundação de Lajeado em função de Encantado.....	85
Tabela 10 - Área inundada por cada cota de inundação na área de estudo.....	91
Tabela 11 - Medida das discrepâncias altimétricas (ϵ_a) e horizontais (ϵ_d) da cota de inundação simulada de 25,97 metros, em função da inundação de 24 de setembro de 2007, registrada na área de estudo.....	94
Tabela 12 - Área inundada em função da declividade.....	97
Tabela 13 - Uso e cobertura da terra das áreas sujeitas às inundações.....	99
Tabela 14 - Uso e cobertura da terra em função da cota de inundação.....	100

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 - Panorama dos desastres naturais no Brasil entre 2000 e 2007.....	23
Gráfico 02 - Evolução da urbanização no Brasil e no Mundo.....	24
Gráfico 03 - Série histórica de inundações registradas na cidade de Lajeado.....	33
Gráfico 04 - Série histórica dos níveis máximos de inundação acoplada ao período de retorno (PR) calculado para Lajeado.....	80
Gráfico 05 - Série histórica pareada de inundações de Encantado e Lajeado.....	81
Gráfico 06 - Ajuste do modelo matemático de previsão das cotas de inundação para Lajeado em função das cotas de inundação de Encantado.....	82
Gráfico 07 - Modelagem da cota de inundação de Lajeado (y) em função da cota de inundação de Encantado (x).....	82
Gráfico 08 - Ajuste das cotas de inundação modeladas para Lajeado em relação aos valores observados em Lajeado e Encantado.....	84
Gráfico 09 - Ajuste dos valores modelados em relação aos valores esperados..	84
Gráfico 10 - Área inundada em função da cota de inundação.....	91
Gráfico 11 - Evolução da área inundada em função da declividade.....	98
Gráfico 12 - Uso e cobertura da terra em função da cota de inundação.....	101

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

O processo de crescimento dos centros urbanos nos países do Terceiro Mundo possui uma dinâmica própria, marcada por desajustes estruturais que influenciam decisivamente na qualidade de vida da população. O reflexo da falta de planejamento territorial é apresentado de vários modos, como, por exemplo, através da utilização de áreas potencialmente interessantes para determinados empreendimentos (turismo, agricultura, pecuária etc.) invadidas pela expansão urbana desordenada (inchaço das cidades) ou então áreas com sérios riscos ambientais (inundações, deslizamentos, etc.) usadas como moradias (SILVA & Z Aidam, 2004). A tendência atual do limitado planejamento urbano integrado está levando as cidades a um caos ambiental urbano com custo extremamente alto para a sociedade (GUERRA & CUNHA, 2004).

De acordo com SANTOS (2007), no Brasil, há uma relação muito estreita entre o avanço da degradação ambiental, a intensidade do impacto dos desastres e o aumento da vulnerabilidade humana. A dificuldade do acesso à terra e à moradia em áreas urbanas, associada a baixa atuação do poder público levou a uma intensificação da ocupação indiscriminada de zonas impróprias, tais como áreas de várzeas, terrenos com elevadas declividades e áreas com alta suscetibilidade aos processos erosivos, potencializando a ocorrência de desastres naturais.

Os desastres naturais e os impactos ambientais atingem muito mais os espaços físicos de ocupação das classes sociais menos favorecidas do que os das classes mais elevadas, fato que agrava ainda mais a situação (GUERRA & CUNHA, 2004). As inundações e os desabamentos de encostas não seriam tão calamitosos nas cidades se a população não fosse induzida a ocupar essas áreas de risco. O fato destes fenômenos serem registrados no Brasil com intensidade e

freqüência, particularmente na Região Centro-Sul, e nas metrópoles em especial, não deixa dúvidas que a participação humana tende a agravá-los (MONTEIRO, 1991).

Na cidade de Lajeado / RS, as inundações são fenômenos que ocorrem freqüentemente, causando grandes impactos ao meio ambiente e ao meio antrópico. Como a maioria das cidades brasileiras, Lajeado não teve a evolução da ocupação humana planejada no ambiente urbano. A cidade desenvolveu-se de forma espontânea à margem direita do Rio Taquari, de modo que os principais problemas ambientais que a cidade enfrenta são inundações, passivos ambientais decorrentes das inundações e a liberação de resíduos domésticos e industriais nesse curso de água. Além disso, a ocupação indevida nas áreas que periodicamente são atingidas pelas inundações torna necessária a interferência do poder público municipal no sentido de readequar essa ocupação.

Lajeado constitui, em conjunto com outros 36 municípios, o Conselho Regional de Desenvolvimento do Vale do Taquari (CODEVAT). As principais inundações nesta região estão relacionadas com o extravasamento das águas do Rio Taquari em períodos de elevada precipitação pluviométrica.

A análise de eventos dinâmicos e complexos, como as inundações, é realizada através do entendimento de processos físicos, econômicos e/ou sociais que interagem no mesmo. Estes processos são então simulados, através de modelos, com o propósito de se verificar cenários, realizar previsões, organizar estratégias de planejamento para o desenvolvimento de regiões (MENDES & CIRILO, 2001). De acordo com MOURA (2003), a partir da construção de modelos devidamente calibrados, estes estudos podem chegar bem próximos da representação da realidade.

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são usualmente aceitos como sendo uma tecnologia que possui o ferramental necessário para realizar análises com dados espaciais e, portanto, oferece, ao ser implementada, alternativas para o entendimento da ocupação e utilização do meio físico, compondo o chamando universo da Geotecnologia, ao lado do Processamento de Imagens Digitais e da Geoestatística (SILVA, 1999).

Segundo MENDES & CIRILO (2001), um dos grandes ganhos da integração dos SIG nos estudos de recursos hídricos diz respeito ao suporte que os mesmos podem proporcionar na obtenção e análise de informações espaciais, suprimento de dados para ferramentas como modelos de simulação e sistemas de suporte à decisão. Uma interação bastante desenvolvida, diz respeito à simulação hidrodinâmica do escoamento fluvial. A simulação do que poderá ocorrer ao longo de um rio durante uma enchente, com os impactos sobre a região de entorno, é prática corrente em diversos países.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta dissertação é desenvolver um modelo cartográfico para proceder à previsão e à simulação da área urbana inundável da cidade de Lajeado, decorrente das enchentes do Rio Taquari.

1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um modelo matemático de previsão das cotas de inundação para a cidade de Lajeado;
- Obter a carta de inundação da cidade de Lajeado;
- Obter o diagnóstico do padrão de ocupação do solo das áreas sujeitas às inundações;
- Aprimorar o Sistema de Previsão e Alerta de Enchentes do Vale do Taquari (SPAEE).

1.3 Justificativa

Desde os primórdios da humanidade, a possibilidade dos rios serem utilizados como fonte de água para o consumo humano e para a agricultura, vias de transporte de cargas e fonte de energia e lazer, estimulou a instalação de assentamentos humanos ribeirinhos, os quais, de forma periódica, sofriam grandes transtornos em decorrência das enchentes.

Segundo COLLINS (2004), da Universidade das Nações Unidas - UNU, o Brasil ocupa a sétima colocação no ranking mundial em número anual de

pessoas atingidas por inundações. O estudo, que coletou dados em 97 países, entre 1980 e 2000, apontou que mais de 29 milhões de brasileiros correm o risco de serem atingidos por inundações. O mesmo relatório mostra ainda que anualmente, 100 pessoas morrem vítimas de inundações no Brasil.

A previsão e o diagnóstico de eventos extremos, como as inundações, são imprescindíveis, principalmente em regiões urbanas, devido à quantidade de vidas, edificações, bens materiais, saneamento e infra-estruturas envolvidas no processo. Uma vez estabelecida esta situação, estão sendo estudadas alternativas e implementadas ações a fim de impedir ou minimizar os efeitos decorrentes das inundações sobre meio natural e antrópico. Segundo TUCCI (2002), as ações para prevenir e controlar as inundações podem ser estruturais ou não-estruturais.

As medidas estruturais envolvem obras hidráulicas como barragens, diques e canalizações que modificam o sistema fluvial. Estas medidas visam evitar os prejuízos decorrentes das inundações. As medidas não-estruturais envolvem medidas preventivas e uma melhor convivência da população com as inundações. Estas medidas visam à redução dos prejuízos, como zoneamento das áreas de inundação, sistema de alerta de enchentes ligado a defesa civil e seguros. O zoneamento é baseado no mapeamento das áreas de inundação dentro da delimitação da cheia de 100 anos ou maior registrada. Dentro desta faixa, são definidas áreas de acordo com o risco e com a ocupação presente em cada cota de inundação. A regulamentação depende das características de escoamento, topografia e tipo de ocupação dessas faixas. Para as áreas já ocupadas, o zoneamento pode estabelecer um programa de transferência da população e/ou convivência com os eventos mais frequentes (TUCCI *et al.*, 1995).

TUCCI & BERTONI (2003) destacam a previsão e a implantação de um sistema de alerta de enchentes como umas das principais medidas para minimizar os efeitos das mesmas. Segundo estes autores, é ingenuidade do homem imaginar que poderá controlar totalmente as inundações; as medidas sempre visam minimizar as suas conseqüências.

O Centro Universitário UNIVATES, por meio do Centro de Informações Hidrometeorológicas e do Núcleo de Geoprocessamento está estruturando o Sistema de Previsão e Alerta de Enchentes (SPAÉ) do Vale do Taquari (VT). A

estrutura e o estado da arte deste sistema serão vistos em detalhe nos capítulos subseqüentes, mas em linhas gerais, o SPAE avalia desde a quantidade de água precipitada na Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas, o nível da água do rio e tributários, projeta a probabilidade de ocorrência e o alcance de determinada enchente e aciona os Conselhos Municipais de Defesa Civil.

Com o objetivo de aprimorar o referido SPAE para a cidade de Lajeado, a simulação precisa das áreas inundáveis por determinada inundação e a caracterização da ocupação do solo das áreas sujeitas às inundações serão alvo de estudo nesta dissertação.

Importante salientar que esta dissertação não terá o objetivo de caracterizar extensivamente todas as variáveis que influenciam na ocorrência e intensidade do fenômeno das inundações. Como as inundações são um fato consumado na área de estudo, em decorrência das características naturais da bacia hidrográfica, será enfoque desta dissertação o uso de geotecnologias, dados de sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento como ferramentas que auxiliam na geração de informações sobre a dinâmica do fenômeno quando da sua ocorrência e o impacto sobre a sociedade.

Os resultados a serem obtidos por esta dissertação terão uma aplicação direta em vários setores da sociedade. Com relação aos resultados diretos, o mapeamento das áreas inundáveis e o conhecimento das localidades, edificações e avenidas afetadas, permitirá agilização na remoção de pessoas e bens materiais atingidos por determinada cota de inundação. No médio e longo prazo, as mesmas informações permitirão readequação na utilização das áreas em função do risco de inundação que apresentam. Em última análise, as informações a serem obtidas por esta dissertação, se utilizadas pelos gestores públicos municipais, servirão para reduzir os efeitos negativos associados às inundações, tanto no que se refere aos prejuízos diretos, como problemas de saneamento e transtornos diversos.

Justifica-se assim a necessidade de gerar o modelo cartográfico proposto, focado em métodos matemáticos de previsão, simulação, mapeamento da área inundável e caracterização do padrão de ocupação das áreas atingidas.

1.4 Estrutura da Dissertação

A dissertação está organizada em cinco capítulos, estando apresentado na seqüência, uma breve descrição sobre a abordagem de cada capítulo. O Capítulo I apresenta a introdução dos vários temas que serão discriminados ao longo da dissertação, destacando a temática das inundações, os sistemas de informação geográfica e a integração destes. No mesmo capítulo são apresentados os objetivos e uma breve justificativa sobre as razões que levaram a escolha deste tema e que tornam a realização desta dissertação importante.

O Capítulo II apresenta a fundamentação teórica da dissertação. Integra a fundamentação teórica, uma revisão ampla sobre a temática das inundações e a integração de dados de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas em estudos envolvendo recursos hídricos, principalmente no que se refere à simulação do extravasamento da água dos rios, utilizando modelos digitais de elevação (MDE), quando da ocorrência de elevada precipitação pluviométrica.

O Capítulo III apresenta os equipamentos, materiais e softwares utilizados para a execução dos objetivos propostos e a metodologia, onde são especificados os procedimentos metodológicos e práticos executados no desenvolvimento da dissertação.

O Capítulo IV apresenta os resultados obtidos a partir do desenvolvimento dos procedimentos metodológicos propostos. Neste capítulo também serão apresentadas algumas discussões preliminares.

O Capítulo V expõe as conclusões da dissertação e apresenta as considerações finais. Ao término são relacionadas as referências bibliográficas e os anexos.

CAPÍTULO II - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Eventos Naturais Extremos

Os fenômenos atmosféricos sempre despertaram o interesse e a curiosidade do homem desde as civilizações antigas, que consideravam estes fenômenos obra da força divina. A história do ajustamento do homem às condições do meio e da transformação destas por suas atividades tem sido uma relação de conflito e harmonia, mas durante muitos séculos tais condições se mantiveram dentro dos limites sem causar danos significativos, pelo menos até o início do período da Revolução Industrial (BRANDÃO, *In* GUERRA & CUNHA, 2004).

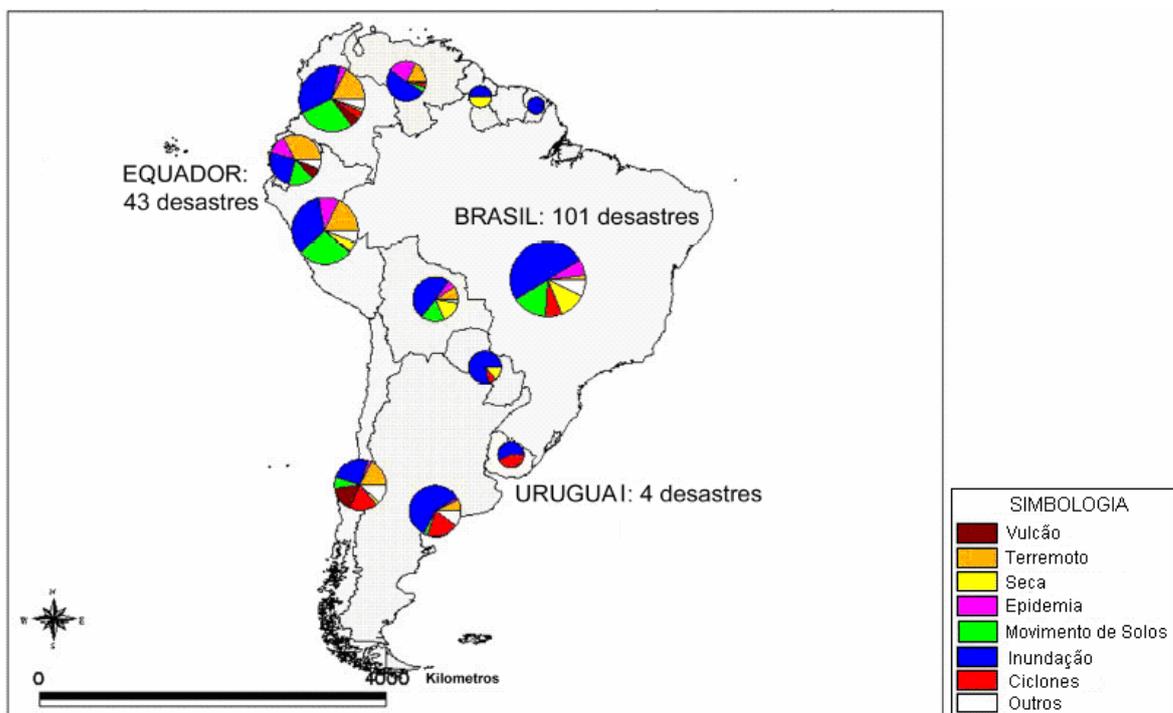
Embora pesem, favoravelmente, o grande avanço tecnológico atual e os esforços para o conhecimento das forças da natureza, a sociedade hodierna permanece, ainda, bastante vulnerável diante dos eventos naturais extremos, particularmente os de natureza meteorológica (BRANDÃO, *In* GUERRA & CUNHA, 2004).

Sob o rótulo genérico de eventos naturais extremos encontra-se uma gama de fenômenos, variada em quantidade e complexa em intensidade. A grande maioria dos mais frequentes e intensos desses eventos está ligada, direta ou indiretamente, à atmosfera: enchentes, secas, nevoeiros, geadas, granizos, descargas elétricas, nevascas, tornados, ondas de calor, ciclones tropicais e vendavais, complementados por desmoronamentos de vertentes e ressacas, acrescidos por impactos pluviais concentrados (WHITE, 1974 apud MONTEIRO, 1991).

A Comissão Mundial sobre Meio Ambiente avaliou que o número de pessoas atingidas por catástrofes naturais dobrou na década de 70 em relação à década de 60. O ritmo de aumento se manteve na década de 80, transformando-

se em crise nos anos 90. As secas e as inundações representam cerca de 40% dos desastres naturais em todo o mundo, sendo responsáveis pelo maior número de vítimas fatais e desabrigados (CIMA, 1991 apud GUERRA & CUNHA, 2004).

Observando a distribuição dos principais desastres naturais que ocorreram na América do Sul entre 1975 - 1999 (**Figura 01**), nota-se que as inundações correspondem a cerca de 50% do total de desastres na maioria dos países. Em virtude dos países da América do Sul apresentarem precipitação pluviométrica, padrão de drenagem, fisiografia, geomorfologia, relevo e processo de urbanização semelhante, entende-se o motivo das inundações consistirem no principal desastre natural.



EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database
<http://www.cred.be>

Figura 01 - Distribuição de desastres naturais por país na América do Sul entre os anos de 1975 e 1999

No Brasil, os eventos naturais extremos de maior repercussão nas atividades humanas são de natureza climática. Embora sejam fenômenos de ordem natural ocasionados pelas disritmias dos sistemas meteorológicos, a ação humana interferindo ao longo do tempo, seja nas áreas urbanas, seja nas rurais, tem contribuído consideravelmente para sua maior frequência, agressividade e expansão areolar (BRANDÃO, *In* GUERRA & CUNHA, 2004).

SANTOS (2007) apresenta o panorama dos desastres naturais no Brasil, entre os anos de 2000 e 2007. Neste período, 1,5 milhões de pessoas foram afetadas por algum tipo de desastre natural, com prejuízos da ordem de US\$ 2,5 bilhões. Segundo a autora, as inundações representam 58% dos desastres naturais no Brasil (**Gráfico 01**).

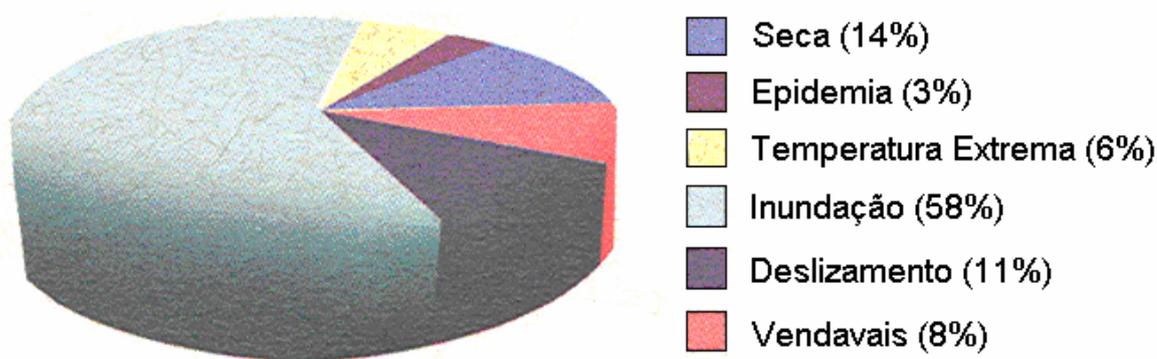


Gráfico 01 - Panorama dos desastres naturais no Brasil entre 2000 e 2007 (SANTOS, 2007)

Os eventos naturais extremos são previstos com razoável precisão, registrados e acompanhados pela sofisticada tecnologia de radares e satélites, divulgados *on-line* para todo o mundo, mas toda esta engenhosidade humana, não é ainda capaz de poupar os milhares de vidas e os danos materiais que causam com frequência e intensidade a cada ano. Cientistas e estudiosos de todo o mundo, neste início de milênio tentam compreender as causas, avaliar as repercussões e encontrar formas mais seguras de prevenção para lidar com sucesso com os danos na qualidade de vida e nas atividades econômicas (BRANDÃO, *In* GUERRA & CUNHA, 2004).

2.1.1 Enchentes e Inundações Urbanas

No início do Século XX, a população urbana compunha cerca de 15% da população mundial, enquanto que, no início do Século XXI a população urbana mundial já superou a marca de 50%. Esse processo é mais acelerado nos países em desenvolvimento. Na América Latina e no Caribe, a população urbana cresce a taxas de 3 a 5% ao ano (TUCCI *et al.*, 1995). O **Gráfico 02** apresenta a evolução da urbanização no Brasil e no Mundo.

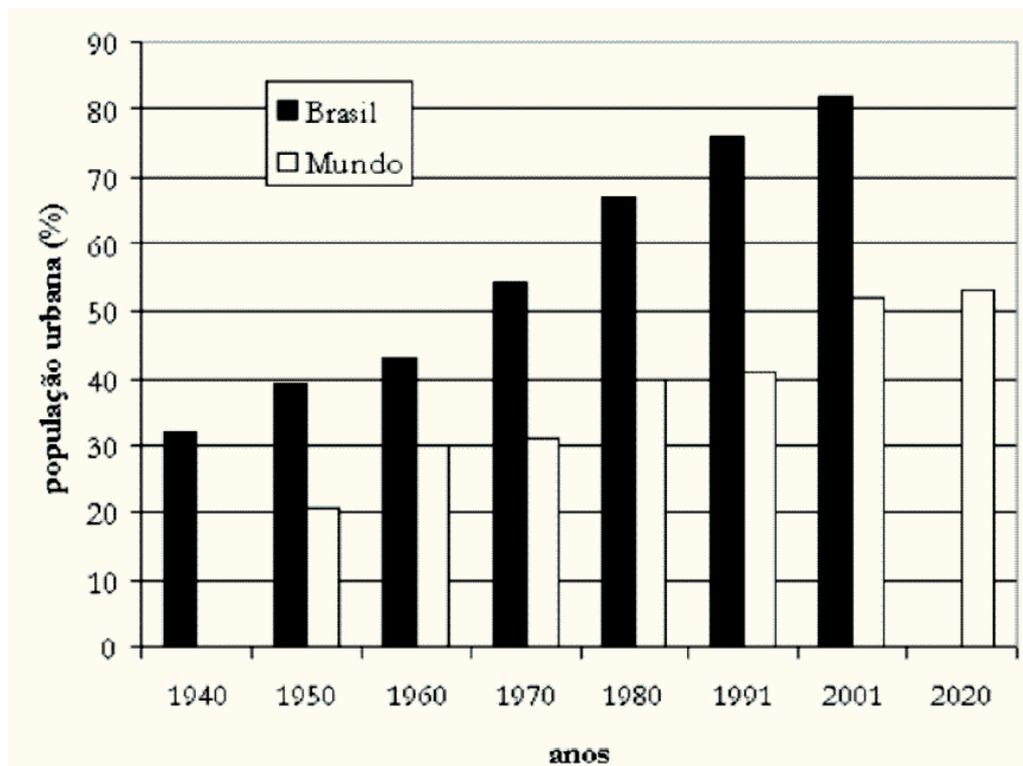


Gráfico 02 - Evolução da urbanização no Brasil e no Mundo (TUCCI & BERTONI, 2003)

O Brasil apresentou, ao longo das últimas décadas, um crescimento significativo da população urbana, criando-se as chamadas regiões metropolitanas. A taxa atual da população urbana brasileira é de 81%, próxima à saturação. Somente nas nove regiões metropolitanas (São Paulo, Rio de Janeiro, Salvador, Recife, Belo Horizonte, Fortaleza, Curitiba, Porto Alegre e Belém) residem, aproximadamente, 30% da população brasileira (MONTEIRO, 1992). O processo de urbanização acelerado ocorreu depois da década de 60, gerando uma população urbana praticamente sem infra-estrutura, principalmente na década de 80, quando os investimentos foram reduzidos (TUCCI *et al.*, 1995).

O crescimento populacional acelerado traz consigo uma urgente preocupação com os níveis de ocupação do solo urbano. A pressão social decorrente desse crescimento, que tem caráter regional e mundial, faz com que o planejamento urbano seja atropelado (TUCCI & MARQUES, 2000). Além de problemas generalizados de degradação ambiental e potencializar os danos pelos desastres naturais, os efeitos desse processo fazem-se sentir sobre todo o aparelho urbano relativo a recursos hídricos: abastecimento de água, transporte e tratamento de esgotos cloacais e drenagem pluvial (TUCCI *et al.*, 1995).

As inundações são mais antigas que a existência do homem na terra. As cidades, no passado, localizavam-se próximas a rios de médio e grande porte, para uso do transporte fluvial, obter água para seu consumo e mesmo dispor seus dejetos (TUCCI *et al.*, 1995).

A parcela do leito maior ocupada pela população sempre dependeu da memória dos habitantes e da frequência com que as enchentes ocorriam. Uma seqüência de anos sem inundação é motivo para que a sociedade pressione para que haja ocupação do leito maior do rio. Geralmente, os Planos Diretores Urbanos, da quase totalidade das cidades brasileiras, não restringem o loteamento em áreas de risco de inundação. Associado a isto, as áreas ribeirinhas pertencentes ao poder público ou desprezadas economicamente pelo poder privado, são invadidas por subabitações e que periodicamente acionam a defesa civil para transferir esta população para áreas seguras (TUCCI *et al.*, 1995).

Independente da forma de ocupação urbana, em geral há uma tendência de ocupação da planície de inundação por moradias, edificações comerciais, vias de circulação e até prédios públicos. Dependendo do grau de ocupação das áreas ribeirinhas, quando se dá uma enchente de média e grande magnitude, os efeitos e prejuízos são significativos. Geralmente ocorre inundação de moradias, perda de bens materiais, perda de veículos, bloqueio de estradas e avenidas, problemas de saneamento e até perda de vidas.

As inundações, que nos anos 60 fizeram 5,2 milhões de vítimas no Mundo, tiveram na década de 70 esta cifra aumentada para 15,4 milhões (CIMA, 1991 apud GUERRA & CUNHA, 2004). Segundo informações obtidas na ANA, na década de 1990, entre as pessoas atingidas por algum tipo de desastre natural no Mundo, 75% foram vítimas de inundações.

No Brasil, dos desastres naturais que ocorrem no país, as inundações ocorrem com maior frequência e causam os maiores prejuízos, sejam materiais ou de vidas humanas. Estas absorvem 1/3 de todos os recursos referentes à realocação humana e para a recuperação de infra-estruturas destruídas. Constituem-se num dos principais impactos sobre a sociedade.

A Agência Nacional das Águas (ANA) elaborou um mapa apresentando os municípios atingidos por inundações ou enchentes, no Brasil, entre os anos de

1998 - 1999 (**Figura 02**). Observando este mapa percebe-se que os municípios mais atingidos estão localizados na Região Sudeste, Sul e Região Litorânea e que se constituem nas regiões com maior densidade demográfica. Isto não significa que não ocorram inundações de grandes proporções em outras regiões do país. Em virtude de não haver população atingida e não haver prejuízos financeiros diretos, não são registradas inundações em áreas de baixa densidade populacional. O registro e a repercussão da magnitude das inundações geralmente é dada pelos prejuízos e danos causados à população (TUCCI & BERTONI, 2003).

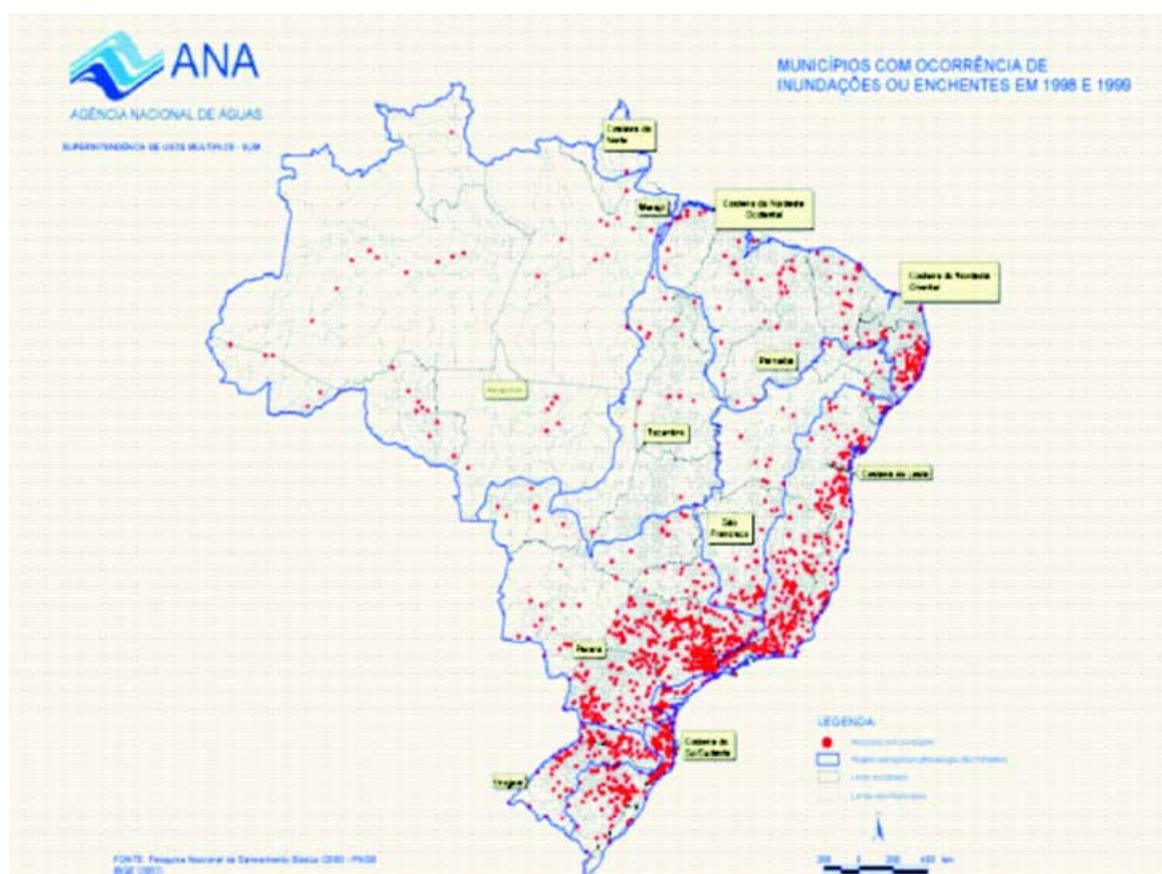


Figura 02 - Municípios atingidos por inundações ou enchentes no Brasil entre os anos de 1998 e 1999 (TUCCI & BERTONI, 2003)

Segundo a Defesa Civil de Santa Catarina, as **enchentes** consistem na elevação do nível de água de um rio, acima de sua capacidade natural de escoamento, em períodos de alta precipitação pluviométrica, que pode ou não causar uma inundação. Por sua vez, **inundação**   o termo utilizado para o excesso do volume de água que não consegue ser drenado pelo canal principal (leito menor), inundando as áreas ribeirinhas (leito maior ou planície de

inundação), de acordo com a topografia e que abrigam vias de circulação e transporte, áreas residenciais, recreativas, comerciais e industriais (**Figura 03**).

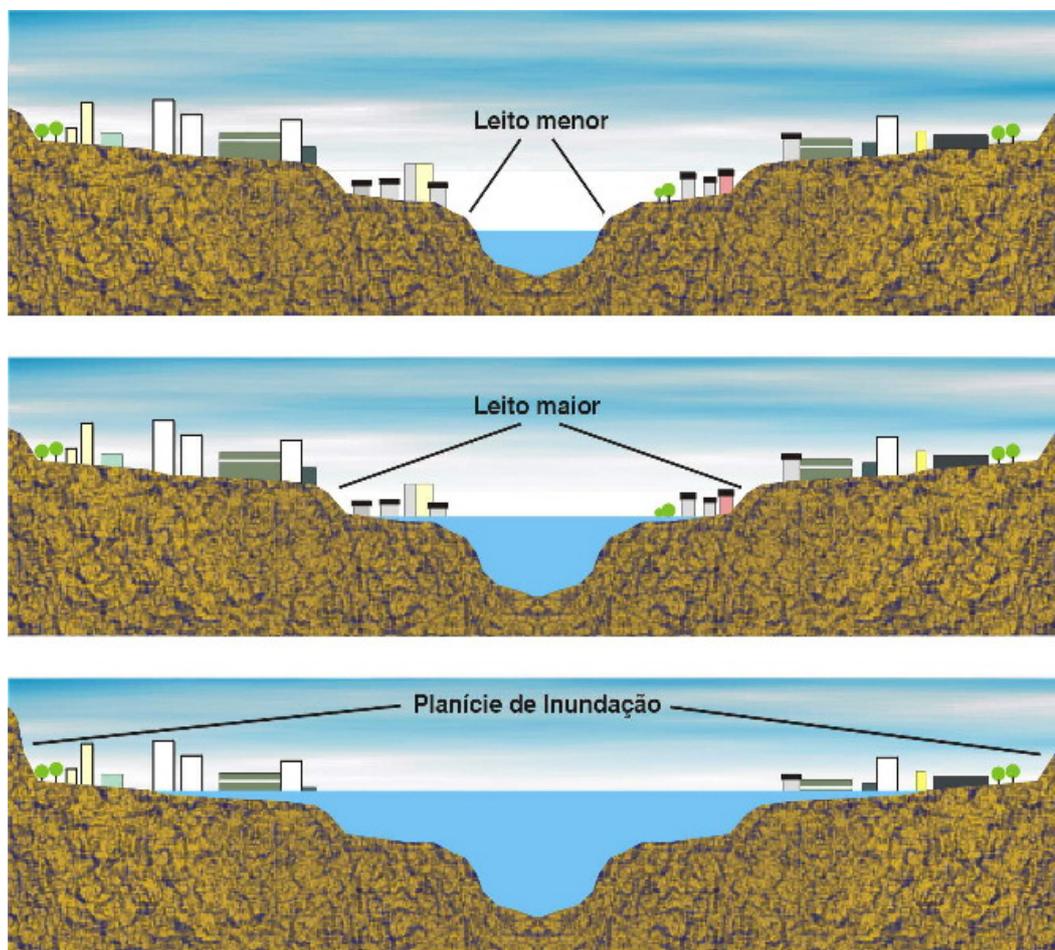


Figura 03 - Representação das inundações em ambiente urbano

Os rios nos períodos chuvosos saem do seu leito menor e ocupam o leito maior, em média, a cada dois anos, dentro de um processo natural (TUCCI *et al.*, 1995). Como isto ocorre de forma irregular ao longo do tempo, a população tende a ocupar o leito maior, ficando sujeita ao impacto das inundações (TUCCI & BERTONI, 2003). Uma vez que as áreas de risco de inundação são ocupadas com moradias, pela população de baixa renda, a situação urbana e social é agravada. De acordo com o Plano de Preservação do Ambiente Natural de Porto Alegre (PORTO ALEGRE, 1975), nada ou quase nada pode o homem fazer contra as inundações, mas para evitá-las é simples a solução: “Não habitar os lugares perigosos”.

As inundações estão relacionadas a dois processos, que ocorrem isoladamente ou de forma integrada: inundações devido à urbanização ou

inundações naturais da várzea ribeirinha, podendo ocorrer em ambiente urbano ou rural. Enquanto em áreas urbanas as inundações promovem danos materiais e até perda de vidas, em ambiente rural são fenômenos hidrológicos importantes na morfodinâmica dos ambientes fluviais, promovendo grandes mudanças na mata ciliar e no comportamento da fauna ribeirinha e aquática (TUCCI *et al.*, 1995).

Em ambiente rural, o fluxo de água é retido pela vegetação, infiltra-se no subsolo e, o que resta, escoar sobre a superfície de forma gradual, produzindo um hidrograma com variação lenta de vazão e com picos de enchentes moderados (TUCCI *et al.*, 1995). Neste ambiente, a planície de inundação geralmente é ocupada por usos antrópicos, relacionados com a pecuária, agricultura e silvicultura, mas em geral não são utilizadas com finalidade de moradia. Desta forma, os impactos diretos sobre a população são menores em comparação com ambientes urbanos, sendo desta forma menor a repercussão (TUCCI *et al.*, 1995).

2.1.2 Inundações no Vale do Taquari

Segundo FERREIRA & BOTH (2001), as inundações que ocorrem no Vale do Taquari, assim como na cidade de Lajeado, são decorrência de fatores naturais existentes na Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas, tais como hidrografia, pedologia, geomorfologia, clima, vegetação, entre outros. Esta bacia constitui-se em uma das sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Guaíba (**Figura 04**). O Rio das Antas nasce no Planalto Meridional, passando a chamar-se Taquari na confluência com o Rio Guaporé, na altura do município de Muçum. A intensidade da água precipitada nas cabeceiras da Bacia tem contribuição fundamental para a ocorrência de inundações na região do Vale do Taquari.

Ao contrário do que se poderia pensar, as inundações que ocorrem ao longo do Rio Taquari não são geradas pelas ações antrópicas, como o desmatamento, a impermeabilização do solo, as obras no canal fluvial, entre outros, porém estas ações tendem a intensificar o alcance das cotas de inundação, agravando os problemas causados pelas enchentes (FERREIRA & BOTH, 2001).

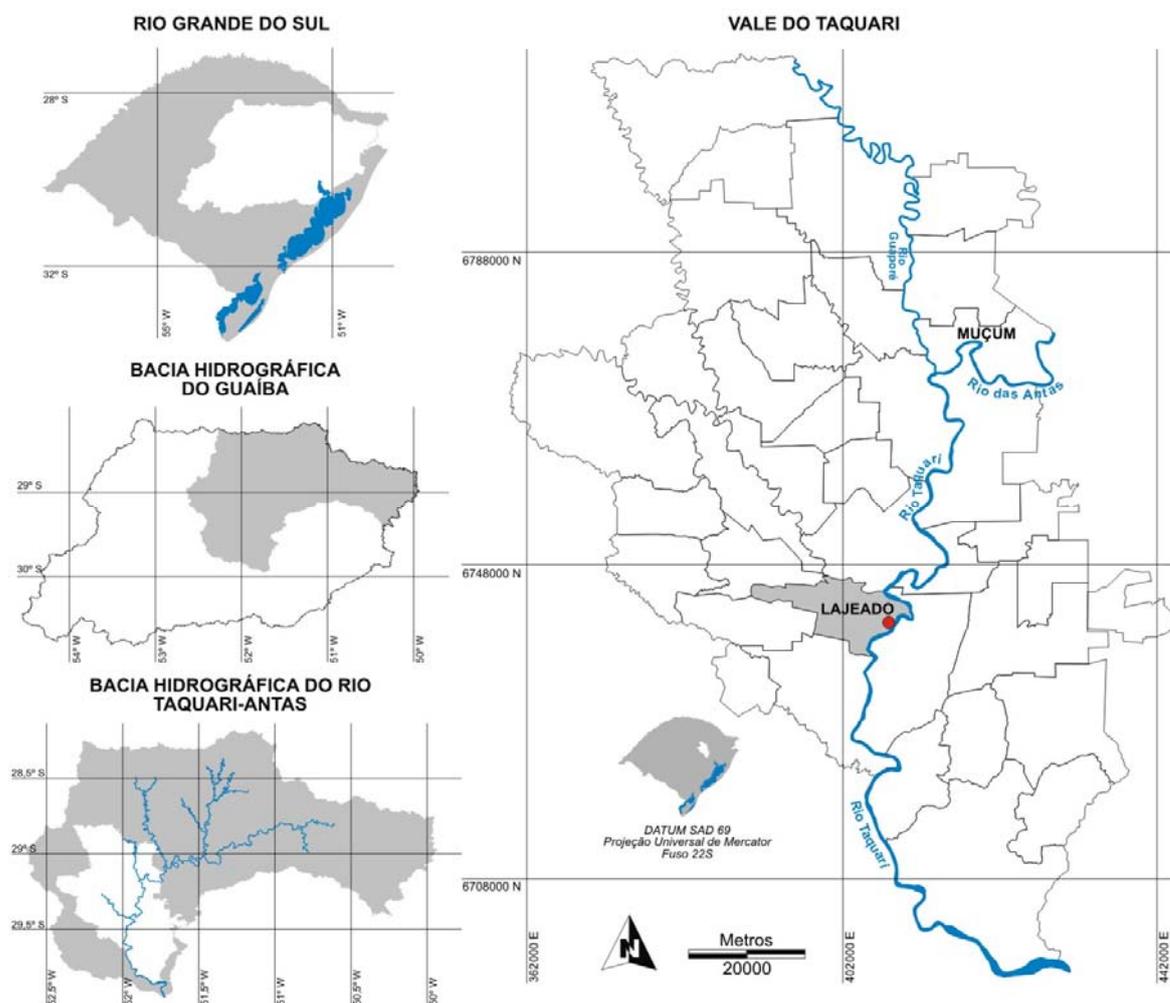


Figura 04 - Localização da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas e divisão política do Vale do Taquari

A partir da análise dos índices pluviométricos medidos na Bacia Hidrográfica Taquari-Antas com os níveis alcançados pelo rio nas cidades do Vale do Taquari, constatou-se que precipitações com duração mínima de dois dias e intensidade média superior a 80 mm em um desses dias na referida bacia hidrográfica, provocam as primeiras inundações na cidade de Lajeado (FERREIRA *et al.*, 2007).

Em 22 de julho e 03 de outubro de 2001, o Vale do Taquari foi atingido por duas inundações de grande magnitude. Segundo estatísticas obtidas junto às Defesas Civas Municipais, nos 10 municípios do Vale do Taquari localizados às margens do Rio Taquari, 4.680 famílias foram atingidas por estes dois eventos, correspondendo a 16.796 pessoas que precisaram ser desalojadas. Os prejuízos diretos em função dos danos somaram um valor aproximado equivalente a R\$ 18 milhões (CIH, 2007).

A última inundação registrada no Vale do Taquari ocorreu em 24 de setembro de 2007. A inundação foi precedida por quatro dias de chuva, período em que foi medida uma precipitação média acumulada de 246,50 mm na Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas. Na cidade de Lajeado, esta quantidade de chuva resultou na elevação do nível da água do rio em 12,97 m, acima do nível de referência, inundando áreas até a cota topográfica de 25,97 m.

2.1.2.1 Sistema de Previsão e Alerta de Enchentes (SPAЕ)

Um programa que está em fase de implantação no Vale do Taquari é o Sistema de Previsão e Alerta de Enchentes (SPAЕ). O SPAЕ, em linhas gerais, avalia a quantidade de água precipitada na Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas, avalia o nível da água do Rio, projeta a possibilidade e o alcance de uma determinada inundação e aciona os Conselhos Municipais da Defesa Civil.

Este sistema opera em tempo real, disponibilizando as informações de hora em hora na internet. É gerenciado pelo Centro Universitário UNIVATES e pela Administração das Hidrovias do Sul - AHSUL. Uma importante etapa, a qual simula as áreas de risco de inundação e a característica de ocupação destas, será implementada a partir dos resultados advindos da presente dissertação. Na seqüência é apresentado o organograma ideal da estrutura e do funcionamento do SPAЕ (**Figura 05**). Na seqüência são detalhadas todas as cinco etapas que permitem o funcionamento do SPAЕ.

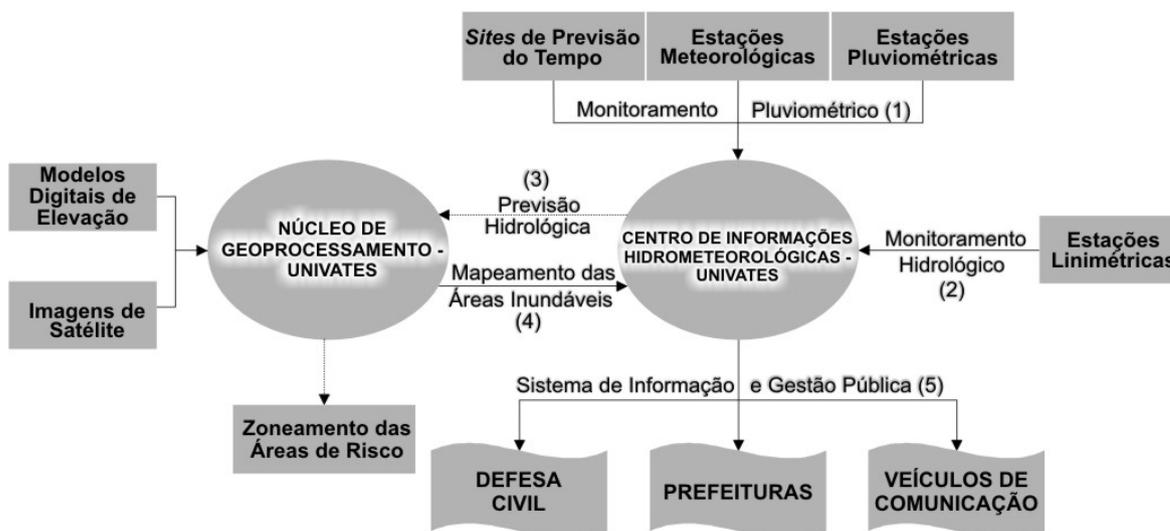


Figura 05 - Organograma ideal apresentando, de forma esquemática, a estrutura e o funcionamento do SPAЕ do Vale do Taquari

1. Monitoramento Pluviométrico: Consiste no monitoramento da precipitação pluviométrica, na Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas. Os dados de precipitação são obtidos através das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e por pluviômetros da rede estadual de monitoramento da Defesa Civil.

2. Monitoramento Hidrológico: Uma vez constatado que o volume de chuva ocorrido na bacia representa risco de inundações, inicia-se a fase do monitoramento hidrológico. Este monitoramento consiste no acompanhamento da elevação do nível da água no Rio Taquari-Antas e principais afluentes, através de 11 estações linimétricas. Estes dados são disponibilizados na internet, em intervalos de uma hora. Na home-page <http://www.univates.br/enchentes/> pode ser visualizada a localização das estações linimétricas instaladas na bacia hidrográfica e o nível da água dos rios.

3. Previsão Hidrológica: Quando constatada uma elevada precipitação na bacia (1) e indicada a elevação no nível da água do rio pelo monitoramento hidrológico (2), principalmente nas cabeceiras, começa a ser realizada a projeção do nível da água para as cidades localizadas a jusante. Com as séries históricas de inundações, modelos matemáticos são utilizados para estimar, a partir da medida do nível da água do rio da estação linimétrica localizada a montante, o nível da água do rio e o alcance das cotas de inundação a jusante. Este sistema de previsão é conhecido como correlação cota-cota e permite estimar o alcance das cotas de inundação com tempo médio de 6 horas de antecedência para a cidade de Lajeado (FERREIRA *et al.*, 2007).

4. Mapeamento das Áreas Inundáveis: Consiste na utilização de modelos digitais de elevação (MDE) e imagens de satélite de alta resolução espacial, com o objetivo de simular o avanço da lâmina da água sobre o terreno, uma vez previsto que determinada inundação alcançará certa cota (3). A integração das técnicas de geoprocessamento com as imagens de satélite permite o conhecimento exato dos locais que serão atingidos, bem como a característica de ocupação destas áreas. Esta etapa do SPAE será implementada a partir dos resultados advindos da presente dissertação. A

intenção futura é que esta etapa sirva como ferramenta para o reordenamento territorial das áreas de risco e / ou atingidas periodicamente por inundações.

5. Sistema de Informação e Gestão Pública: Uma vez prevista a ocorrência eminente de uma enchente para os municípios localizados no VT, os Conselhos Municipais de Defesa Civil são informados sobre a magnitude da inundação e a estimativa do alcance desta, permitindo antecipar a ação destes nas áreas de maior risco, estabelecendo um plano de evacuação eficiente. Os veículos de comunicação também são informados, por serem canais abertos de informação que atingem elevado número de ouvintes e telespectadores.

2.1.2.2 Inundações na Cidade de Lajeado

O município de Lajeado localiza-se na região central do Vale do Taquari, distando 117 km de Porto Alegre, capital do estado do Rio Grande do Sul - Brasil (**Figura 06**). Por estar localizado em posição intermediária à borda do Planalto Meridional e da Depressão Central Gaúcha apresenta relevo aplainado a levemente ondulado. A cidade está localizada na margem direita do Rio Taquari, entre as coordenadas UTM SAD69, Fuso 22, 6736000 - 6748000 N e 390000 - 412000 E. O município apresenta 67.474 habitantes (IBGE, 2007) e área territorial de 90,42 km² (IBGE, 2004). A densidade demográfica é de 746 hab./ km².

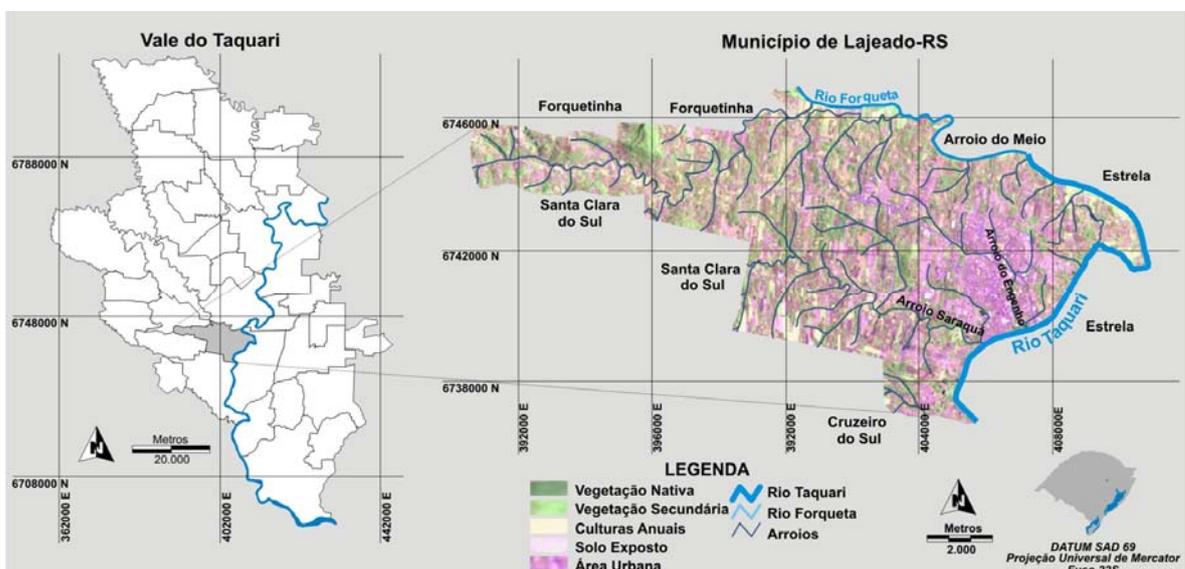


Figura 06 - Localização do município de Lajeado

No município de Lajeado as inundações são fenômenos que ocorrem freqüentemente, causando grandes impactos ao meio ambiente e ao meio antrópico. O **Gráfico 03** apresenta a série histórica das principais inundações ocorridas nos últimos 67 anos e os respectivos níveis atingidos. Estes registros foram organizados por José Luiz Fay de Azambuja, coordenador da AHSUL (Administração das Hidrovias do Sul) e pelo Centro de Informações Hidrometeorológicas da UNIVATES, a partir de leituras efetuadas no Porto Fluvial de Estrela, pelo DENAEE, pela CODESP e a partir do ano 2003, por medidas realizadas no linígrafo de pressão automático, instalado junto ao Porto Fluvial de Estrela.

Os níveis máximos das inundações estão relacionados à cota topográfica de 13 m, utilizada como referência de nível (RN) oficial para o Rio Taquari, na cidade de Lajeado (AHSUL, 2007).

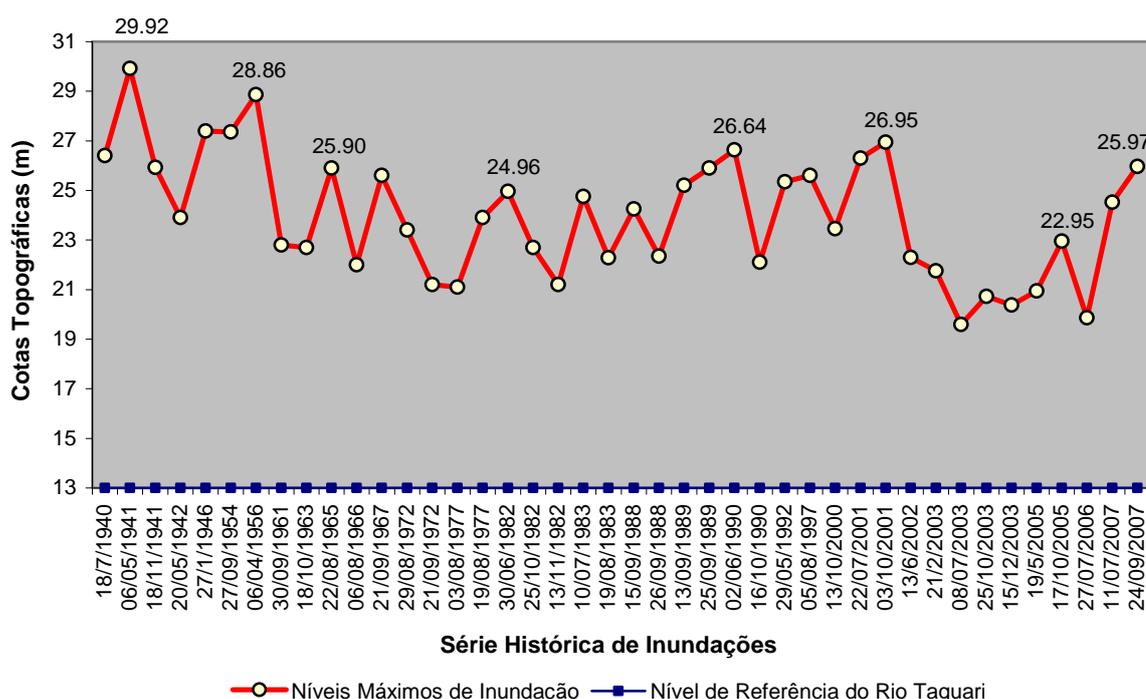


Gráfico 03 - Série histórica de inundações registradas na cidade de Lajeado (AHSUL, 2007)

Conforme pode ser observado no gráfico acima, até a cota topográfica de 19 m, elevações no nível do rio não foram registradas, em virtude de não provocarem inundações. A partir da cota topográfica de 19 m, ou seja, quando o rio eleva-se 6 m acima do nível de referência, começa a ocorrer extravasamento da água do rio em áreas com ocupação urbana, com impactos e prejuízos associados.

A maior inundação já registrada ocorreu em 06 de maio de 1941, quando o Rio Taquari atingiu a cota topográfica de 29,92 m em Lajeado. A última inundação foi registrada no dia 24 de setembro de 2007, quando o rio elevou-se 12,97 m acima do nível de referência, atingindo a cota topográfica de 25,97 m.

Com relação aos impactos e prejuízos diretos à população e ao poder público em decorrência das inundações, pode-se exemplificar com as duas inundações ocorridas nos meses de julho e outubro de 2001, eventos que atingiram respectivamente, as cotas topográficas de 26,30 e 26,95 m na cidade de Lajeado.

Segundo informações obtidas junto à Defesa Civil e à Prefeitura Municipal de Lajeado, estas duas inundações causaram prejuízos diretos da ordem de R\$ 196.000,00 e R\$ 396.000,00, respectivamente (CIH, 2007). As **Figuras 07, 08 e 09** apresentam locais atingidos pelas inundações ocorridas em 2001 e 2007, exemplificando alguns dos impactos sócio-ambientais e econômicos resultantes.



Figura 07 - Vista panorâmica da inundação ocorrida em 03 outubro de 2001



Figura 08 - Marca do nível alcançado pela inundação de 03 outubro de 2001



Figura 09 - Interrupção do tráfego pela inundação de 24 de setembro de 2007

2.2 Geoprocessamento em Recursos Hídricos

O final do século XX, sem sombra de dúvidas, foi consagrado como a era do gerenciamento disciplinado de informações. As inter-relações entre as organizações sociais estão se tornando cada dia mais complexas, e os mecanismos de coexistência harmoniosa com o planeta Terra são freqüentemente questionados, independentemente do grau de desenvolvimento da sociedade e do posicionamento geográfico do país (SILVA, 1999).

À medida que as regiões se desenvolvem, mais intensa é a utilização dos recursos hídricos, elevando-se o potencial de conflito entre os diversos usos do solo e os riscos de degradação ambiental gerados pelas atividades antrópicas. O rio é o destino final da trajetória da água na bacia hidrográfica e, segundo esta ótica, reflete qualquer ação que ocorra e que altere de forma significativa o equilíbrio natural do território. Em última análise, o rio pode ser considerado um indicador do estado de equilíbrio da área drenada, caracterizando ou não o nível de sustentabilidade da região (MENDES & CIRILO, 2001).

Para a gestão de recursos hídricos, a interação dos processos de análise com o geoprocessamento, sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas representa um avanço inequívoco, na geração de informações mais precisas e com uma enorme redução do trabalho de aquisição, organização e processamento de dados (MENDES & CIRILO, 2001). Segundo WILKINSON (1996) estas tecnologias podem ser complementares em muitos aspectos, devendo-se mencionar a utilização recíproca de dados e métodos, especialmente na modelagem e na análise ambiental.

Um dos grandes ganhos da integração dos Sistemas de Informações Geográficas nos estudos de recursos hídricos diz respeito ao suporte que os mesmos podem proporcionar na obtenção e na análise de informações espaciais, suprimento de dados para modelos de simulação e sistemas de suporte à decisão. Uma interação bastante desenvolvida diz respeito à simulação hidrodinâmica do escoamento fluvial. A simulação do que poderá ocorrer ao longo de um rio durante uma enchente, com os impactos sobre a região de entorno, é prática corrente em diversos lugares, como nos Estados Unidos (MENDES &

CIRILO, 2001). No Brasil, experiências desse tipo têm sido feitas em alguns estados como Paraná (SUDERHSA, 1998, 1999), (CARVALHO *et al.*, 1999), (KRÜGER *et al.*, 1999) e Pernambuco (ALCOFORADO, 2000; ALCOFORADO & CIRILO, 2001).

2.2.1 Mapeamento das Áreas Inundáveis

O mapeamento das áreas inundáveis é obtido pela elaboração da carta de inundação, na qual são representadas as áreas inundadas quando determinado nível de água é atingido em uma seção fluviométrica de referência. Os mapas podem ser realizados em mais de uma escala, com diferentes níveis de detalhamento (SANTOS, 2007).

O mapeamento das áreas de inundação em grandes áreas, como em bacias hidrográficas, é realizado em diversas partes do mundo. Nestes estudos, em virtude da elevada nebulosidade associada aos eventos de inundação, é comum o uso de imagens de radar para delinear a área inundada. SIPPEL *et al.* (1998) delinearão a área inundada da Bacia do Amazonas utilizando dados dos sensores *Scanning Multichannel Microwave Radiometer Sensor* (SMMS) a bordo do satélite Nimbus 7. Observaram que a área inundada alcança seu máximo durante o período de maio a agosto.

BRIVIO *et al.* (2002) mapearam as áreas inundáveis da Bacia do Rio Tanara, na Itália, utilizando duas imagens de radar do ERS 1 (*European Remote Sensing Satellite*), uma imagem antes da inundação e outra, três dias após a inundação. A área inundada estimada pela imagem foi de 20% da área observada, devido à imagem ter sido adquirida nos três dias seguidos ao pico da inundação. Com a implementação de um SIG, o avanço espacial da água foi ponderado, além do mapeamento com a imagem de radar, em função da distância e da elevação do terreno. Os resultados demonstraram que, com a utilização do SIG, a estimativa das áreas inundáveis alcançou 96,7% de acurácia em relação ao observado. Os autores sugeriram que para melhorar a acurácia do mapeamento das áreas inundáveis com imagens SAR, estas devem ser adquiridas no dia do pico da inundação.

ROSENQVIST & BIRKETT (2002) estimaram a extensão máxima de inundação da Bacia do Rio Congo usando imagens de radar do JERS 1 (*Japanese Earth Resource Satellite*). Os dados de cota máxima e mínima foram consultados para adquirir as imagens de radar. Usaram também dados de altímetros do radar TOPEX/POSEIDON para complementar a falta de dados históricos da cota. Concluíram que as imagens do JERS 1 serviam bem para estimar a extensão máxima da inundação, mas não no monitoramento dinâmico e na variabilidade da área inundada na Bacia do Rio Congo. Sugeriram que a utilização de dados de elevação, adquiridos por radar, para o monitoramento das cotas de inundação em grandes bacias hidrográficas, pode ser uma alternativa atrativa, principalmente se for buscada acurácia nos resultados.

Estudos de mapeamento de áreas inundáveis, utilizando imagens obtidas na faixa do infravermelho próximo foram realizados por FLORENZANO *et al.* (1988), na Bacia do Rio Parnaíba. Bandas no infravermelho próximo destacam a água e áreas de solo úmido. Em seus estudos, compararam uma imagem do canal 4 do sensor TM LANDSAT em uma situação em que o rio estava no nível normal, com uma imagem do canal 4, do mesmo sensor, após uma grande inundação. A partir da interpretação destas imagens, foi possível identificar e mapear os limites máximos das áreas inundadas.

A utilização de imagens obtidas pelos satélites de observação da Terra, para proceder ao mapeamento das áreas de inundação, conforme abordado no parágrafo acima, na teoria é de fácil implementação. Porém, o mapeamento das áreas inundáveis pode ser inviabilizado, em virtude do pico do evento apresentar curta duração, geralmente havendo elevada nebulosidade associada, inclusive nos dias subseqüentes ao evento e, pela não passagem do sensor durante ou mesmo dias após o evento.

Em virtude do uso de imagens de radar ainda não ser muito difundido e as duas situações descritas no parágrafo acima ocorrerem simultaneamente, na prática, o uso de imagens orbitais para realizar o mapeamento das áreas de inundação é de difícil implementação. Ao mesmo tempo, esta técnica permite o conhecimento da área inundada de determinado evento, não sendo possível conhecer a área inundável caso o evento seja de magnitude superior ou inferior. Estas são limitações do uso de imagens de satélite. Com isso, reforça-se a idéia

de utilizar modelos digitais de elevação para mapear as áreas de inundação e utilizar as imagens de satélite para avaliar as características ocupação do solo das áreas afetadas.

Para áreas urbanas, SCHULT & PINHEIRO (2003), em seus estudos, elaboraram cartas de inundação para o município de Blumenau utilizando um mapa plani-altimétrico na escala de 1:2.000, com curvas de nível de 1 em 1 metro e um mapa cadastral na escala 1:10.000. O método adotado em Blumenau consistiu em levantar as cotas de inundação das marcas observadas de uma enchente ocorrida em agosto de 1984 em 879 pontos da cidade. Os pontos escolhidos corresponderam aos cruzamentos de ruas, de maneira a cobrir toda a área sujeita à inundação. Na seqüência, sobre o mapa na escala 1:2.000 foi realizado o traçado da superfície de inundação (**Figura 10**).

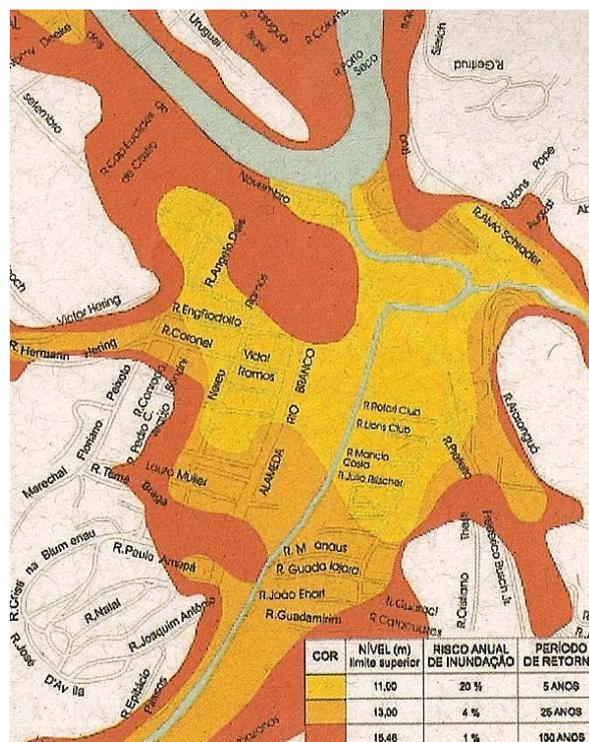


Figura 10 - Zonas de inundação de Blumenau (SCHULT & PINHEIRO, 2003)

No traçado da carta de inundação são considerados os perfis da linha de água, definidos pelos níveis máximos observados no curso de água durante a passagem da onda de cheia. Segundo esta ótica, cota de inundação corresponde ao nível máximo da inundação, ao longo do rio, referenciada a uma estação fluviométrica. Corresponde a um plano inclinado com inclinação igual ao da linha de água. É diferente da cota topográfica que corresponde a uma linha plana (SANTOS, 2007).

O represamento do Rio Taquari pela barragem eclusa de Bom Retiro do Sul, localizada a jusante de Lajeado, permite navegabilidade até o Porto Fluvial de Estrela e influencia no nível da água do rio até o município de Arroio do Meio, localizado a montante de Lajeado. A barragem, em condições normais de operação, mantém o nível normal da água do Rio Taquari constante na cota topográfica de 13 m em toda a sua extensão em Lajeado (AHSUL, 2007). Em função desta situação, as cotas de inundação em Lajeado serão consideradas como uma linha plana, inundando desta forma, áreas de acordo com a cota topográfica do terreno.

Outras experiências de elaboração de cartas de inundação foram realizadas no município de Gaspar, para níveis com período de retorno de 10 e 100 anos (DESCHAMPS, 1987) e nos municípios de Apiuna, Blumenau, Brusque, Ibirama, Indaial, Rio do Sul, Taió e Timbó, para os níveis de inundação com período de retorno de 5, 25 e 100 anos (DNAEE, 1987).

O conhecimento das cotas de inundação, além de auxiliar na ação de planejamento no que diz respeito à definição dos riscos de ocupação para as faixas e a tipologia adequada das construções, também contribui para a atuação dos órgãos de Defesa Civil nos momentos de ocorrência destes eventos (SCHULT & PINHEIRO, 2003).

2.3 Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

Embora os sistemas de informação geográfica (SIG) fossem desenvolvidos originalmente como uma ferramenta para os cartógrafos, nos últimos anos, eles ganharam uso difundido nos projetos e análises das engenharias, em especial nos campos da qualidade de água, da hidrologia e da hidráulica. Muito esforço tem sido investido em conectar os SIG com os modelos matemáticos, para uma visualização facilitada dos dados. Isto permite que os SIG funcionem como uma ferramenta do planejamento, fazendo com os dados hidráulicos sejam mais facilmente utilizados em estudos de simulação hidrológica, mapeamento das áreas inundáveis, sistemas de alerta, análise econômica do impacto e seguro de inundações (ENOMOTO & MINE, 2004).

O significado de SIG, tradução de GIS (*Geographic Information System*) já gerou muita discussão no meio científico. Entre as diferentes traduções usadas em português, pela força do hábito e pela orientação comercial, pois foi esta a primeira tradução utilizada, há a preferência pela utilização do termo “Sistemas de Informação Geográfica”.

Entende-se como SIG, com base nos pontos em comum do conjunto de definições apresentadas por SILVA (1999): **um banco de dados georreferenciados, em meio digital, com controle de erro, com os quais podem ser realizados processamentos e análises espaciais. Uma grande vantagem é que os SIG permitem a exibição dos dados e dos resultados das análises na forma numérica e gráfica (mapas).**

Os SIG são uma convergência de campos tecnológicos e disciplinas tradicionais. Em cada simulação ou modelagem, aparecem algumas das técnicas que servem de base para a implementação dos SIG. Estes, para atenderem às expectativas dos usuários e à demanda da sociedade, necessitam do apoio de vários campos do conhecimento humano. Segundo SILVA (1999), são eles: ciência da computação, gerenciamento das informações, cartografia, geodésia, fotogrametria, topografia, processamento de imagens digitais e geografia.

Os SIG representam uma potente ferramenta de apoio à decisão, através da integração de dados para análise, provenientes de diferentes fontes (sensores orbitais, GPS, mapas temáticos analógicos, informação alfanumérica) e da modelagem de diversos processos que ocorrem no mundo real. BURROUGH (1986) resume a utilidade da modelagem espacial como “ferramenta para acrescentar valor à informação”. Ou seja, gerar novos dados, por meio de um processo estabelecido, a partir de dados primários e modelos que descrevam o comportamento do mundo real em determinadas condições, obtendo, assim, resultados ou soluções para problemas espaciais complexos.

2.3.1 Dados Espaciais

Os fenômenos relacionados ao mundo real podem ser descritos de três maneiras: espacial, temporal e temática. **Espacial:** quando o mesmo tema em um mesmo intervalo de tempo varia no espaço (ex: declividade, altitude). **Temporal:**

quando o mesmo tema em um mesmo local muda ao longo do tempo (densidade demográfica, ocupação do solo). **Temática:** o tempo e o local não mudam, mas são detectadas variações nos temas (geologia, cobertura vegetal). Estas três maneiras de se observar os fenômenos que ocorrem na superfície da terra são, coletivamente, denominadas dados espaciais (SINTON, 1978).

O que distingue os dados espaciais dos demais, de uma maneira geral, é o fato destes estarem relacionados a superfícies contínuas, como por exemplo, a superfície topográfica, a variação da temperatura, a pressão etc., e cada ponto contém as coordenadas X, Y, Z, podendo ter precisão ilimitada (SILVA, 1999). Outra particularidade é a sua dependência espacial, ou seja, a tendência da vizinhança influenciar uma determinada localização e possuir atributos similares (ANSELIM, 1989). Finalmente, os dados espaciais estão distribuídos sobre a superfície curva da Terra. Embora tenham sido desenvolvidas diversas projeções cartográficas, existe muito pouco conhecimento de métodos de análise de dados sobre uma esfera e muito menos de como modelar processos sobre uma superfície curva (SILVA, 1999).

A realidade espacial é contínua e sujeita às estruturas complexas de dependência espacial. Os processos de discretização correspondem a limitações da observação quantificada, implicando em generalizações, abstrações e aproximações, contendo incertezas e imprecisões, que precisam ser consideradas e analisadas para evitar a propagação de erros através das manipulações disponíveis, como também a precisão dos produtos resultantes (SILVA, 1999).

Segundo SILVA (1999), a definição apropriada para dados espaciais é que são elementos definidos pelas variáveis X, Y e Z, possuem localização no espaço e estão relacionados a determinados sistemas de coordenadas, e que a eles podem estar associadas infinitas características ou atributos.

Os objetos ou feições do mundo real podem ser representados, discretamente por pontos, nós, linhas ou arcos, cadeias e polígonos, embora estas abstrações não existam no mundo real. Estes objetos ou feições são coletivamente denominados dados espaciais (SILVA, 1999).

Os dados espaciais são representados em mapa, cuja principal característica é redução das dimensões reais em uma proporção fixa. Para que as entidades espaciais reproduzam a realidade, em termos de dimensões, introduziu-se o conceito de escala. A escala representa a razão entre o comprimento ou área apresentada em mapa e o verdadeiro comprimento ou área existente na superfície da terra (SILVA, 1999).

Outro conceito importante a ser fixado quando se trabalha com dados espaciais é a resolução espacial. Esta pode ser entendida como o conteúdo do domínio geométrico dividido pelo número de observações, normalizadas pela dimensão espacial. O domínio geométrico representa a área coberta pelas observações. A alta resolução está associada à maior discriminação dos elementos, portanto a um número maior de observações. E, ao contrário, a baixa resolução está associada a uma pobre discriminação dos elementos, estando associada a um número menor de observações (SILVA, 1999).

Os dados espaciais, em diferentes escalas e resoluções podem ser codificados em representações analógicas ou digitais. A representação analógica é a disposição das entidades espaciais em papel, enquanto a representação digital é a codificação das entidades espaciais em linguagem binária, portanto em formato adequado para serem armazenados em computadores. Com relação à forma de armazenagem dos dados espaciais, estes podem ser armazenados na forma vetorial ou raster. Na vetorial, a unidade fundamental é um par de coordenadas X, Y. Na armazenagem matricial ou raster, a unidade fundamental é um polígono regular, geralmente um quadrado denominado pixel, cujo posicionamento é dado por linha / coluna (SILVA, 1999).

2.3.2 Modelo Cartográfico

Uma variedade de modelos pode ser desenvolvida em um ambiente SIG para representar dados espaciais, simular processos, expressar julgamentos ou fornecer uma descrição efetiva de um fenômeno (SOARES FILHO, 2000).

A modelagem cartográfica é uma forma de resolver um problema em SIG, através da representação gráfica dos dados e dos procedimentos analíticos

usados no estudo. O seu objetivo é ajudar o utilizador a identificar os dados necessários e estruturar os procedimentos metodológicos a serem adotados.

De acordo com TOMLIN (1990), a modelagem cartográfica envolve mapas e modelos expressos em mapas. Segundo esta visão, um modelo cartográfico pode ser simplificado a uma coleção de mapas ou camadas de mapas pertencentes a uma área comum e operações entre seus elementos, devendo refletir a preocupação com a qualidade gráfica, a manutenção das propriedades topológicas, a exatidão e a precisão posicional.

A combinação de diversas camadas de informação, através de um conjunto de operações de análise espacial, permite a obtenção da carta de inundação, retratando na área de estudo, as áreas sujeitas às inundações. À luz destes procedimentos metodológicos podem ser então realizados estudos similares em outros locais que apresentam problemas similares.

2.4 Sensoriamento Remoto

Sensoriamento remoto pode ser definido como qualquer processo através do qual é coletada informação a respeito de um objeto, área ou fenômeno, sem entrar em contato com ele. O termo sensoriamento remoto está associado, mais especificamente, com as interações entre os materiais da superfície terrestre e a energia eletromagnética. Os equipamentos que medem a radiação eletromagnética são genericamente denominados radiômetros, isto é, são instrumentos sensíveis à radiação eletromagnética.

Os radiômetros são dispositivos capazes de detectar e registrar a radiação eletromagnética, em determinada faixa do espectro eletromagnético, e gerar informações que possam ser transformadas num produto passível de interpretação, ou seja, na forma de imagem, na forma gráfica ou qualquer outro produto. Segundo NOVO (1993), o sensoriamento remoto é a utilização conjunta de modernos sensores, equipamentos para processamento de dados, aeronaves, entre outros, desenvolvidos com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta. A **Figura 11** apresenta, de forma esquemática o processo de aquisição de dados por sensoriamento remoto.

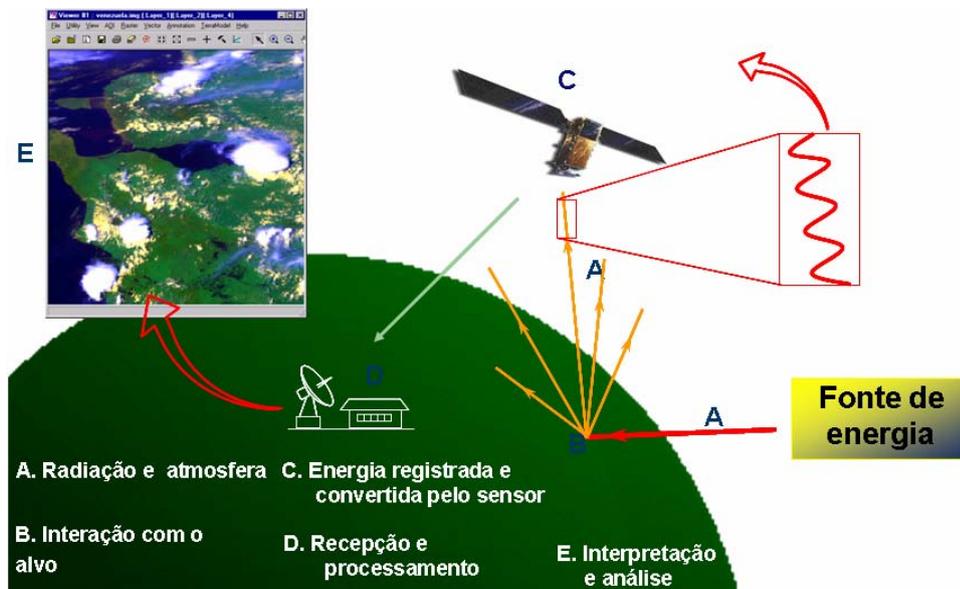


Figura 11 - Esquemática do processo de aquisição de dados por sensoriamento remoto

A evolução do sensoriamento remoto através de sensores mais potentes, proporcionando imagens com resoluções cada vez melhores, associadas com as técnicas de extração de informação oriundas do processamento de imagens, ampliou sua aplicabilidade a diversas áreas do conhecimento: Levantamento de Recursos Ambientais, Análise Ambiental, Geologia, Agricultura, Florestas, Estudos Urbanos, são algumas áreas diretamente afetadas.

Com a disponibilidade de dados de sensores tanto aerotransportados como orbitais, a importância do sensoriamento remoto é ainda maior. Em função de melhoria da resolução espacial e, em parte, também da resolução temporal, resultam novas ou aprimoradas opções de aplicações em muitos setores, como para áreas urbanas (JENSEN & COWEN, 1999).

A disponibilidade cada vez maior de dados, rotinas de análise e plataformas SIG abre também novas opções e potenciais para avaliação de dados de sensoriamento remoto (EHLERS *et al.*, 1989).

2.4.1 Imagens do Satélite QuickBird

Atualmente, diversos sensores remotos em nível orbital fornecem imagens com características adequadas para estudos urbanos e regionais. Entre eles há os de resolução espacial apropriada para monitorar as modificações intra-

urbanas, como os que estão a bordo dos satélites SPOT - 5, CBERS - 2B, IKONOS II, QuickBird 2 e WorldView. A viabilidade da utilização destes sensores depende também das peculiaridades do ambiente a ser estudado e dos objetivos propostos. COSTA *et al.* (2005), consideram que uma das maiores dificuldades encontradas na utilização de dados de sensoriamento remoto em estudos de áreas urbanas é a complexidade de feições encontradas neste ambiente, que por vezes, são menores que a resolução do pixel da imagem.

Os sistemas do QuickBird foram construídos para obterem uma alta resolução espacial, uma apurada precisão em geoposicionamento, uma extensa área de imageamento e a disponibilização de um quadro flexível de horários de imageamento. O QuickBird II foi lançado no dia 18 de outubro de 2001, tornando-se o sensor ótico com a maior resolução espacial disponível comercialmente (LIU, 2007). A **Tabela 01** apresenta as características e a **Tabela 02** apresenta os principais instrumentos sensores do satélite QuickBird II.

Tabela 01 - Principais características do satélite Quickbird II.

Lançamento	18/10/2001
Veículo Lançador	Boeing Delta II
Local de Lançamento	Vandenberg Air Force Base, Califórnia /USA
Altitude	450 km
Inclinação da Órbita	97,2º graus, síncrono-solar
Velocidade	7,1 quilômetros por segundo
Hora em que Cruza o Equador	10:30 a.m. (modo descendente)
Tempo de Duração da Órbita	93,4 minutos
Tempo de Revisita	1-3,5 dias dependendo da latitude (30º <i>off-nadir</i>)
Faixa Imageada	16,5 quilômetros ao <i>nadir</i>
Precisão Métrica	23 metros horizontal (CE90%)
Digitalização	11 bits
Resolução	Pan: 61 cm (<i>nadir</i>) até 72 cm (25º <i>off-nadir</i>) MS: 2,44 m (<i>nadir</i>) até 2,88 m (25º <i>off-nadir</i>)

Fonte: DIGITALGLOBE (2007)

Tabela 02 - Principais instrumentos sensores do satélite Quickbird II.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral (λ médio)
QuickBird II	Pancromática	725,0 nm
	Azul	479,5 nm
	Verde	546,5 nm
	Vermelho	654,0 nm
	Infravermelho Próximo	814,5 nm

Fonte: DIGITALGLOBE (2007)

O satélite QuickBird possui sensores do tipo *Charge Coupled Device* (CCD), que realizam varredura eletrônica em fileira linear (*pushbroom linear array*) flexíveis para visadas *off-nadir* de até 30°, ao longo do terreno imageado (*along-track*). A visada *off-nadir* permite a cobertura mais freqüente do terreno e permite que sejam adquiridas imagens com estereoscopia (DIGITALGLOBE, 2007).

As imagens QuickBird são comercializadas em três diferentes níveis de correção, Básica (*Basic*), Padrão (*Ortho Ready Standard*) e Ortorretificada (*Orthorectified*). Os dois primeiros produtos podem ser submetidos a um processamento geométrico feito pelo usuário, enquanto que o último já é ortorretificado pela DigitalGlobe (DIGITALGLOBE, 2007).

2.4.2 Correção Geométrica

As imagens digitais advindas de satélites de observação da Terra estão sujeitas a uma série de distorções geométricas. Dentre as principais fontes de distorções, TOUTIN (2004) considera as seguintes (**Tabela 03**):

Tabela 03 - Principais fontes de distorções geométricas das imagens de satélite.

Categoria	Subcategoria	Descrição da Fonte de Erro
Sistema de Aquisição	Plataforma	Variação de Movimento Variação de Altitude
	Sensor	Variação na mecânica do sensor Ângulos de visada lateral IFOV/ EIFOV
	Instrumento de medição	Variações de tempo Sincronia de tempo
Observado	Atmosfera	Refração Turbulência
	Terra	Curvatura Rotação Topografia
	Mapa	Geóide para elipsóide Elipsóide para mapa

Fonte: Adaptada de TOUTIN (2004)

As distorções encontradas em imagens digitais assumem maior relevância hoje do que no passado. Este fato deve-se aos tipos de dados e procedimentos utilizados atualmente. Anteriormente, eram usadas imagens de

média a baixa resolução espacial (quando comparadas com as atuais) com visada ao *nadir*, os produtos gerados eram analógicos e a interpretação dos produtos finais era feita visualmente. Atualmente, são usadas imagens digitais com resolução inferior a um metro, obtidas com visada lateral e a sua interpretação é feita no próprio computador (TOUTIN, 2004).

A correção geométrica de imagens de satélite pode ser realizada através de um modelo físico que reflita a modelagem das distorções inerentes à formação da imagem (correção geométrica interna ou geometria orbital), por meio de pontos de controle medidos no sistema de coordenadas da imagem (correção geométrica externa ou registro) ou por uma combinação de ambos.

A correção geométrica interna depende do conhecimento dos dados de efemérides e de atitude do satélite, além dos parâmetros do sistema de imageamento, que são normalmente transmitidos junto com os dados da imagem. A posição e a direção de visada definem uma reta que intercepta o elipsóide de referência. Ficam então definidas as coordenadas geodésicas correspondentes ao *pixel* adquirido naquele instante. Desta forma, a maioria das imagens orbitais já é fornecida com uma pré-correção geométrica e georeferenciamento, o que não é suficiente para aplicações que exijam qualidade posicional.

A correção geométrica externa ou registro utiliza pontos de controle e modelos matemáticos (modelos polinomiais de 1º e 2º grau) para a transformação geométrica. Os modelos polinomiais fazem o vínculo entre as coordenadas da imagem (linha, coluna) e as coordenadas de terreno (X,Y; ϕ,λ ; E,N) por meio de pontos de controle.

Os pontos de controle são feições bem definidas na imagem a ser corrigida geometricamente e em mapa de referência, em escala adequada. Em áreas onde não existem mapas, a alternativa é medir precisamente no terreno a posição geográfica de alguns pontos identificáveis nas imagens utilizando métodos de topografia clássica ou com uso de Sistema de Posicionamento Global. Este método estabelece as diferenças do posicionamento de pontos na imagem a ser corrigida com pontos correspondentes no mapa de referência ou no terreno. A partir dessas diferenças, a natureza da distorção presente na imagem pode ser estimada e uma transformação adequada pode ser computada, no sentido de corrigir a geometria e o posicionamento da imagem.

2.4.2.1 Ortorretificação

O uso de todo o potencial das imagens orbitais de alta resolução espacial requer um modelo matemático adequado ou uma função de interpolação tridimensional baseada na geometria e orientação do sensor (BÜYÜKSALIH *et al.*, 2004). Além disso, a correção geométrica de imagens digitais é necessária para a integração de dados de diferentes origens e formatos. Segundo TOUTIN (2004), imagens orbitais originais contêm tantas e significativas distorções que não podem ser sobrepostas diretamente a dados de origem cartográfica num sistema de informações geográficas. O processo de ortorretificação trabalha pixel-por-pixel para prover a sua correta localização ortogonal no solo e corrige distorções decorrentes da topografia do terreno, motivo pelo qual é necessário um modelo digital de elevação com precisão adequada (**Figura 12**).

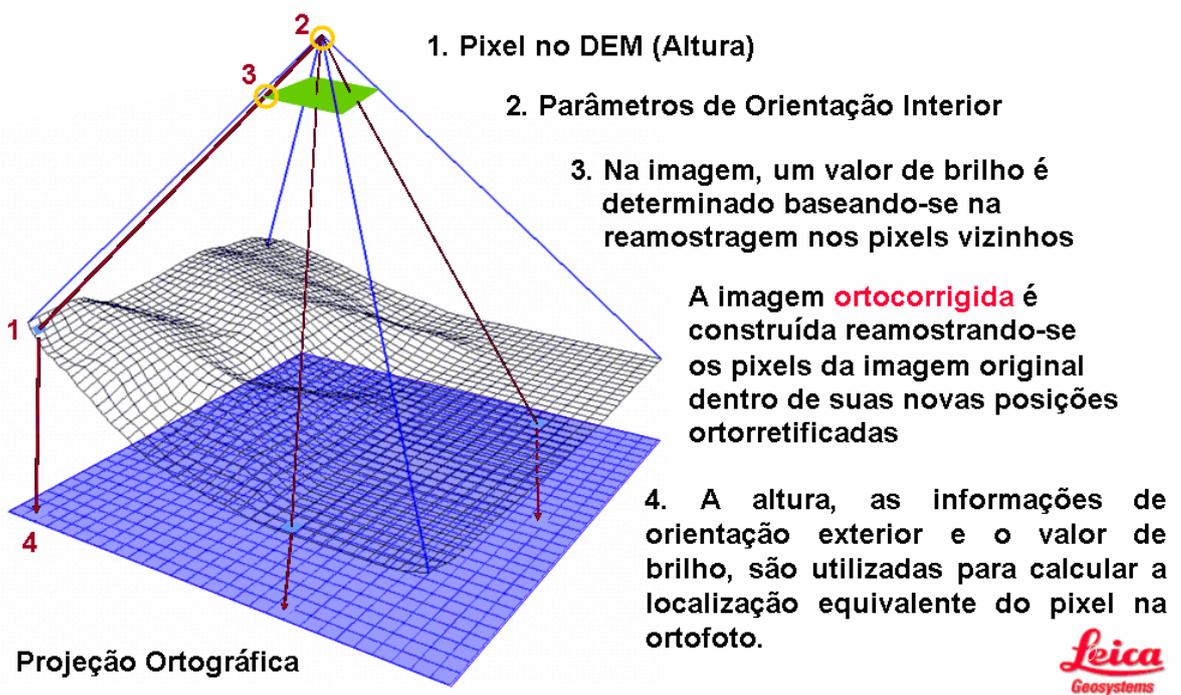


Figura 12 - Esquemática do processo de ortorretificação (IMAGEM, 2007)

Segundo TOUTIN (2004), para corrigir todas as distorções geométricas das imagens de alta resolução é necessário o uso de um modelo ou função matemática, sendo estes, modelos empíricos polinomiais 2D/3D, funções racionais 3D ou modelos físicos e determinísticos 2D/3D.

Segundo CHENG *et al.* (2003), dentre os diversos métodos tridimensionais de correção geométrica, três deles podem ser utilizados em imagens Quickbird: o racional polinomial com os parâmetros matemáticos introduzidos pelo usuário, o racional polinomial com parâmetros fornecidos pelos metadados da imagem e o rigoroso.

O primeiro método computa os coeficientes polinomiais racionais (tradução de RPC - *Rational Polynomial Coefficients* ou *Rapid Positioning Coordinates*) usando pontos de controle terrestres (GCP - *Ground Control Points*) adquiridos pelo usuário. O segundo método, desenvolvido pela empresa DigitalGlobe, usa um modelo empírico e estatístico que aproxima o modelo físico do sensor. Este método permite a ortorretificação com ou sem GCP. O terceiro método é considerado o mais tradicional de todos e segundo diversos autores é o processo de correção mais preciso disponível. Este modelo, também chamado de modelo físico, modela todas as distorções decorrentes do movimento da plataforma, do sensor, da Terra e da projeção cartográfica (TOUTIN, 2004).

Considerando as características das imagens do satélite Quickbird adquiridas para esta pesquisa, três métodos podem ser aplicados para a correção geométrica: corrigir imagens *Ortho Ready Standard* usando os RPC fornecidos, corrigir os produtos *Ortho Ready Standard* pelo modelo rigoroso ou construir os RPC a partir de GCP para então proceder a correção geométrica nas imagens *Ortho Ready Standard*. O modelo rigoroso não foi avaliado em virtude de estar implementado somente no software PCI Geomática, o qual não está disponível para este trabalho.

O procedimento de ortorretificação usando os RPC fornecidos pela DigitalGlobe é o mais utilizado na prática e apresenta resultados satisfatórios de precisão e acurácia. Uma dificuldade encontrada na execução deste procedimento é que, necessariamente, a ortorretificação terá que ser feita na cena inteira, não se podendo utilizar recortes. Segundo ITT (2007), a construção de RPC a partir de GCP, permite a ortorretificação de recortes e apresenta resultados de acurácia superior aos obtidos com os RPC disponibilizados pela DigitalGlobe, em virtude de serem utilizados pontos de controle, ao invés das efemérides, para calcular os parâmetros dos RPC.

2.4.2.1.1 Construção dos *Rational Polynomial Coefficients* (RPC)

Os RPC são computados usando técnicas de fotogrametria digital que usa a equação de colinearidade para construir a geometria do sensor, onde o ponto do objeto, a perspectiva central e o ponto da imagem estão todos no mesmo espaço da linha. A técnica envolve uma série de transformações, que envolvem o pixel, câmera, espaço da imagem e o sistema de coordenadas do solo (ITT, 2007).

Para a ortorretificação de uma simples imagem, a técnica inclui duas etapas de pré-processamento para construir a geometria do sensor: orientação interior (transforma o sistema de coordenadas do pixel para o sistema de coordenadas da câmera); orientação exterior (determina a posição e os parâmetros da orientação angular associado com a imagem). Imagens de sensores tipo *pushbroom* usam projeções de linha central. Cada linha imageada tem sua própria projeção central, como mostra a **Figura 13** (ITT, 2007).

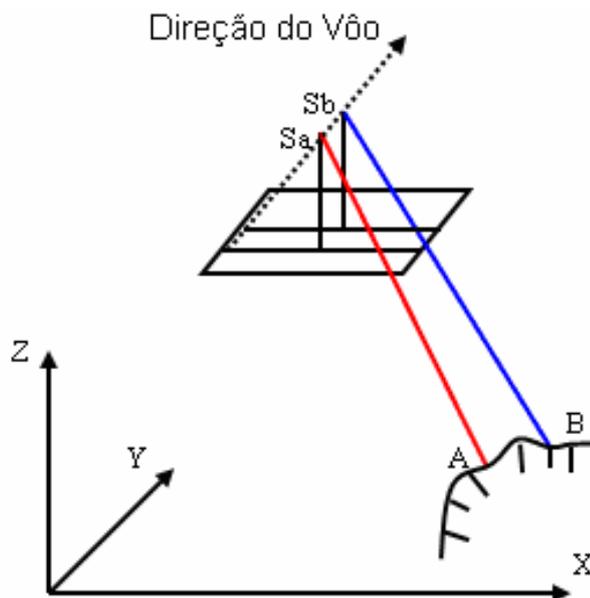


Figura 13 - Projeção de linha central das imagens do sensor orbital QuickBird (ITT, 2007)

Para construir os RPC, vários parâmetros são requeridos, dentre os quais a distância focal do sensor, as coordenadas do ponto principal, o tamanho do pixel, o ângulo incidente ao longo da trajetória e o ângulo incidente transversal à trajetória. Estes parâmetros modelam a orientação interior (ITT, 2007).

A orientação exterior é calculada a partir de seis parâmetros (XS, YS, ZS, Omega, Phi, e Kappa), junto com as unidades dos ângulos de rotação e o sistema de rotação usado. A matriz de rotação associado com XS, YS e ZS é calculada de três ângulos de rotação: Omega, Phi e Kappa. Enquanto os ângulos de rotação são diferentes entre os sistemas de rotação, as matrizes de rotação são as mesmas (ITT, 2007).

Omega é uma rotação sobre o eixo de X, Phi é uma rotação sobre o eixo de Y e Kappa é uma rotação sobre o eixo de Z. Estes parâmetros são calculados com os GCP (ITT, 2007). A **Figura 14** indica as direções de todos os ângulos de rotação.

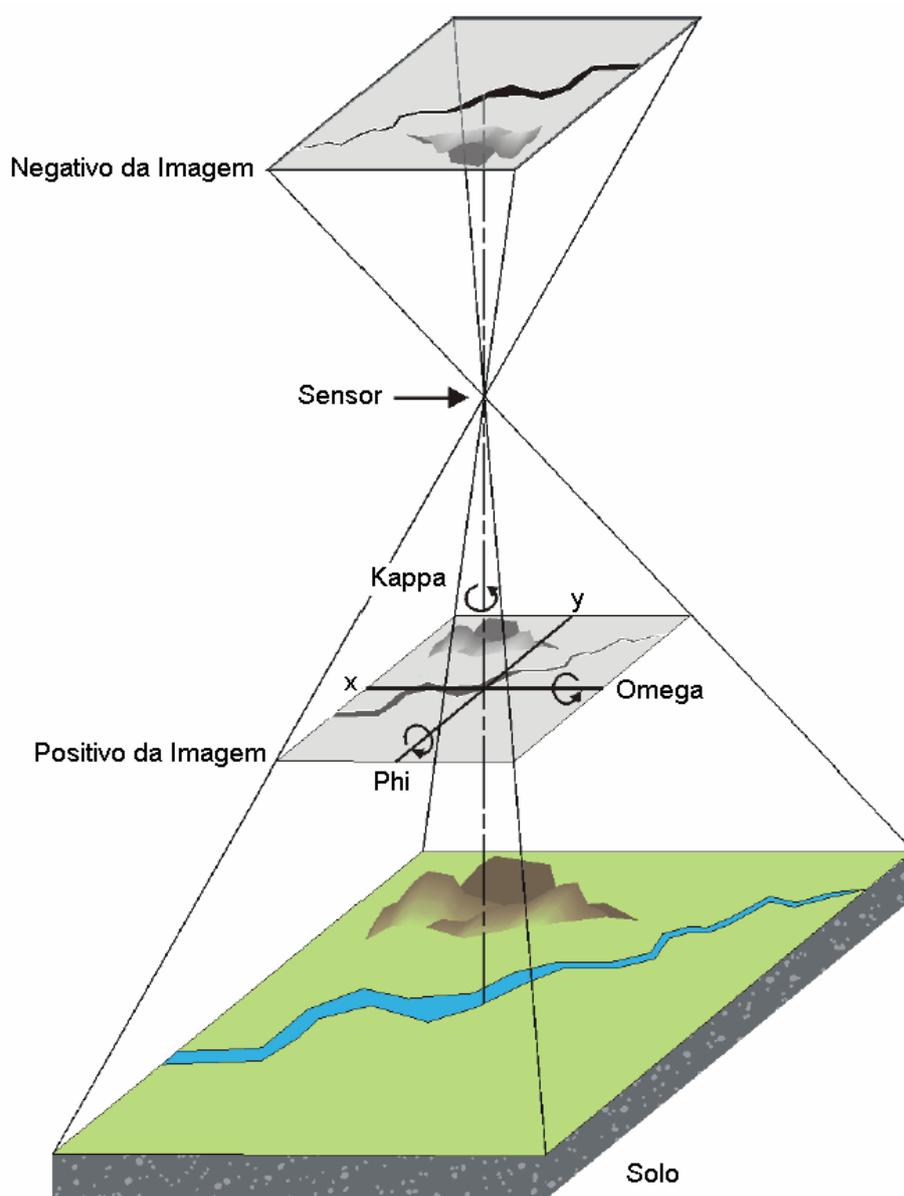


Figura 14 - Sistema de rotação angular de Omega, Phi, Kappa (PCI, 2003)

A geração do modelo RPC depende, sobretudo, da quantidade, da acurácia e da distribuição dos GCP (ITT, 2007). Segundo PCI (2003), para gerar os RPC para imagens QuickBird a partir de GCP, são necessários no mínimo 5 GCP, sendo recomendado 19 GCP.

2.4.2.1.2 GCP e GPS em Modo Diferencial

Todos os trabalhos que procuram bons resultados para a produção de ortoimagens utilizam pontos de controle terrestres para auxiliar neste processo. Segundo CRÓSTA (1999), os GCP devem ser feições bem definidas, geralmente de grande contraste espectral em relação aos seus arredores na imagem, facilmente reconhecíveis e que podem ser precisamente localizados tanto no solo quanto na imagem. Tais feições podem ser encontradas em interseções de retas, linhas suficientemente longas ou centros de gravidade de feições circulares. Os GCP são usados para determinar a relação entre a imagem original e o solo pela associação das colunas (C) e linhas (L) na imagem com as coordenadas X, Y, e Z (Figura 15).

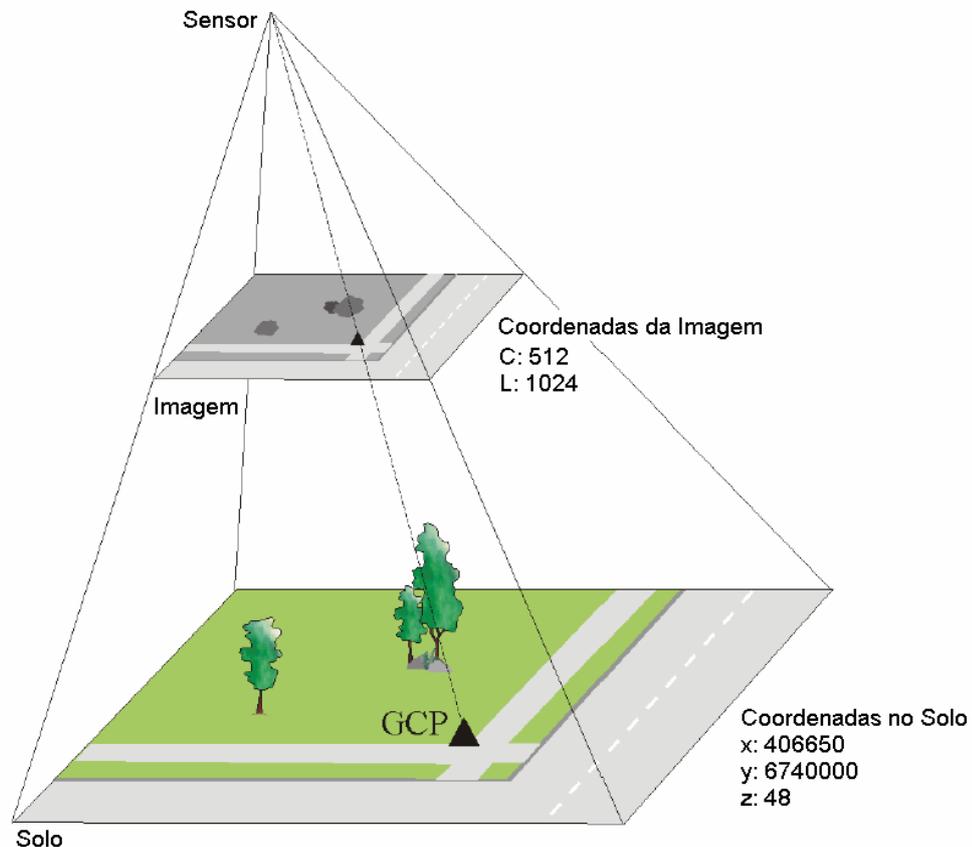


Figura 15 - Relação entre o sistema de coordenadas no solo e o sistema de coordenadas da imagem (PCI, 2003)

Segundo TOUTIN (2004), há necessidade de poucos pontos de controle para a geração de ortoimagens. Cerca de seis a nove pontos são necessários dependendo dos dados disponíveis, da qualidade dos GCP e do tamanho da área estudada. Estes pontos devem ser bem distribuídos na imagem, sendo dispostos nas bordas e no centro da área de interesse. ROCHA (2002) recomenda que cada quadrante da imagem receba 20% dos GCP. Devem também, preferencialmente, cobrir toda a variação altimétrica do terreno, desde as cotas mais baixas até as mais altas.

Para saber com maior exatidão o número necessário de pontos a serem coletados deve-se conhecer a área, a imagem, o aparelho receptor GPS a ser utilizado e a precisão pretendida. Se estas informações não forem reunidas *a priori*, cerca de 50% dos pontos podem ser inutilizados e caso tenham sido analisados, este valor cai para cerca de 20-30% (TOUTIN, 2004).

O Sistema de Posicionamento Global, conhecido por GPS, é um sistema de posicionamento terrestre por satélite, formado por uma rede composta por 24 satélites e 5 estações terrestres de monitoramento, utilizado para determinação da posição geográfica de um receptor na superfície da Terra. Esta posição geográfica é expressa em latitude, longitude e altura geométrica ou elipsoidal em função das coordenadas cartesianas X, Y e Z em relação ao centro de massa da Terra, denominado *World Geodetic System* de 1984 (WGS84) (SEGANTINE, 1999).

O aparelho receptor GPS usa a constelação de satélites como pontos de referência para calcular posições na superfície terrestre com precisão de metros, centímetros ou até mesmo de milímetros, servindo como uma ótima fonte para a coleta de GCP. São necessários pelo menos 4 satélites para se obter a posição de um ponto no espaço. A medida da posição pode ser absoluta (em tempo real e com baixa precisão) ou relativa (pós-processado com elevada precisão) (TECHGEO, 2007).

O uso do GPS em modo diferencial (*Differential Global Positioning System* - DGPS) tem sido utilizado como base para a coleta de coordenadas em estudos que demandam alta precisão de resultados. No método DGPS, posiciona-se um receptor na posição conhecida (base ou referência) e com outro receptor (*rover*) faz-se a medição de posições desconhecidas. A partir da

comparação dos valores obtidos com os valores teóricos da base, pode-se calcular os erros para corrigir as medições naquele ponto. Estes erros poderão ser usados também na correção das medições dos outros receptores que estão em pontos desconhecidos (**Figura 16**) (BERNARDI & LANDIM, 2002).

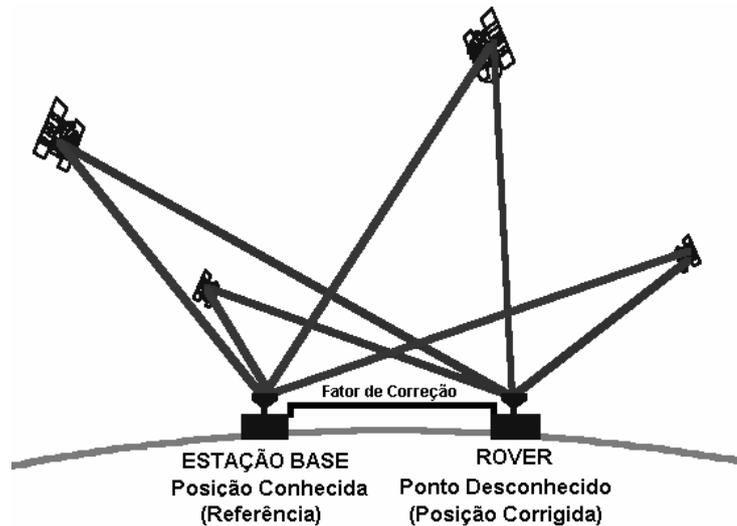


Figura 16 - Método de posicionamento com GPS Diferencial

2.5 Modelos Numéricos do Terreno

Conforme já abordado anteriormente, algo em comum de todos os métodos de aquisição de dados espaciais é o fato destes serem obtidos como entidades pontuais, enquanto o mundo real é descrito geometricamente como uma superfície contínua e sujeito às estruturas complexas de dependência espacial. Em geral, amostras da variável em questão são coletadas pontualmente no terreno sendo então assumido, através de uma análise estatística, por exemplo, que elas têm uma distribuição uniforme no terreno. De acordo com SILVA (1999) e MENDES & CIRILO (2001), a geração de superfícies contínuas é muito útil no entendimento da distribuição dos dados espaciais e na representação do mundo real.

Um Modelo Numérico de Terreno (MNT) é uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre (FELGUEIRAS & CÂMARA, 2004). Quando o MNT expressa as alturas topográficas de um terreno, o termo usado é **Modelo Digital de Elevação (MDE)**, no qual cada elemento da matriz está associado uma determinada altitude topográfica.

Um MDE apresenta estrutura *raster* ou matricial, correspondendo, desta forma, a uma representação de superfície contínua. Cada pixel ou célula do arquivo armazena, além das coordenadas X e Y, a informação Z, que neste caso corresponde à altitude do terreno em relação ao nível do mar. Segundo (FELGUEIRAS & CÂMARA, 2004), o processo de geração de um MDE pode ser dividido em 3 etapas: aquisição das amostras ou amostragem, a geração do modelo propriamente dito ou interpolação e a aplicação do MDE.

2.5.1 Amostragem

As variações da altitude determinam a morfologia da superfície do terreno. A amostragem compreende a aquisição de um conjunto de amostras representativas do fenômeno de interesse. As fontes mais comuns de amostras para a geração de MDE são: arquivos digitais, bases topográficas com isolinhas e pontos notáveis e levantamentos de campo transformados em informação digital. Podem também ser fontes de dados de altimetria, levantamentos de campo com GPS, restituição fotogramétrica e ainda pares estereoscópicos de imagens de sensoriamento remoto (FELGUEIRAS & CÂMARA, 2004).

Segundo ZHU *et al.* (2001) linhas de contorno, isolinhas ou ainda curvas de nível são usadas como um método universal para a representação da topografia em mapas de papel. As curvas de nível são linhas imaginárias que unem pontos de mesma altitude, destinadas a retratar no mapa, de forma gráfica e matemática, o comportamento do terreno (**Figura 17**).

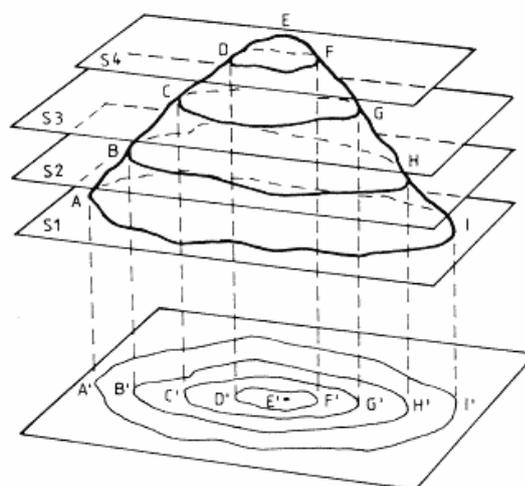


Figura 17 - Representação gráfica da altitude do terreno por curvas de nível (CORDINI, 2004)

Para a presente dissertação foram disponibilizadas, pela Prefeitura Municipal de Lajeado, 41 cartas topográficas analógicas, em escala 1:2.000. Este produto foi gerado por restituição fotogramétrica, pela empresa Engefoto, no ano de 1989. Além das informações altimétricas, a hidrografia, a malha rodoviária e as edificações também integram as cartas topográficas da área de estudo.

Importante esclarecer que a técnica de restituição fotogramétrica não gera uma interpolação no traçado das curvas de nível. Por esta técnica, as curvas de nível são traçadas tangenciando o terreno de todos os pontos de igual altitude. Segundo FELGUEIRAS & CÂMARA (2004), a transformação das isolinhas, para o formato digital, pode ser efetuada por meio de digitalização manual em tela, com uso de uma mesa digitalizadora, ou através de um processo automático por meio de *scanner*. A digitalização manual consiste no processo de captura de dados através do mouse (SILVA, 1999), no qual o operador identifica uma isolinha ou ponto, o respectivo valor altimétrico e segue a linha ao longo mapa.

2.5.2 Interpolação e Modelagem do MDE

A disponibilidade de dados pontuais, de uma determinada grandeza, permite estimar o valor desta em locais não amostrados, por meio do processo de interpolação. A estimativa realizada para pontos ou regiões fora dos limites da área é chamada de extrapolação. A racionalidade destes procedimentos é que, na média, pontos mais próximos no espaço são mais prováveis de ter valores similares de uma propriedade de interesse do que pontos mais afastados, ou seja, a correlação entre dois pontos diminui com o aumento da distância entre eles. Desta forma, deve existir no processo de interpolação uma ponderação em função da distância ao ponto interpolado (MENDES & CIRILO, 2001).

A interpolação envolve a criação de estruturas de dados e a definição de superfícies de ajuste para se obter uma representação contínua do fenômeno a partir das amostras. Essas estruturas são definidas de forma a possibilitar uma manipulação conveniente e eficiente dos modelos pelos algoritmos interpolantes e de análise contidos nos SIG. As estruturas de dados dos modelos digitais de terreno mais utilizados na prática são os modelos de grade regular retangular

(Figura 18) e os modelos de malha irregular triangular (triangulação) (Figura 19) (PEUCKER *et al.*, 1979; FELGUEIRAS & CÂMARA, 2004).

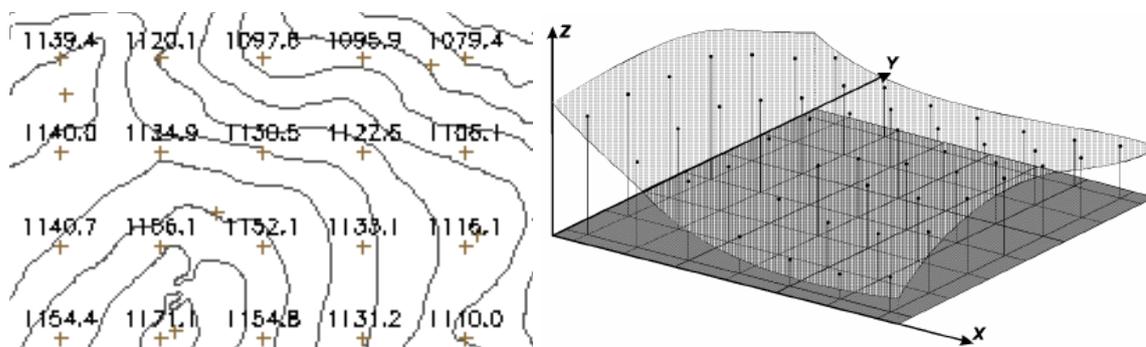


Figura 18 - Modelo de grade regular retangular: poliedros de faces retangulares

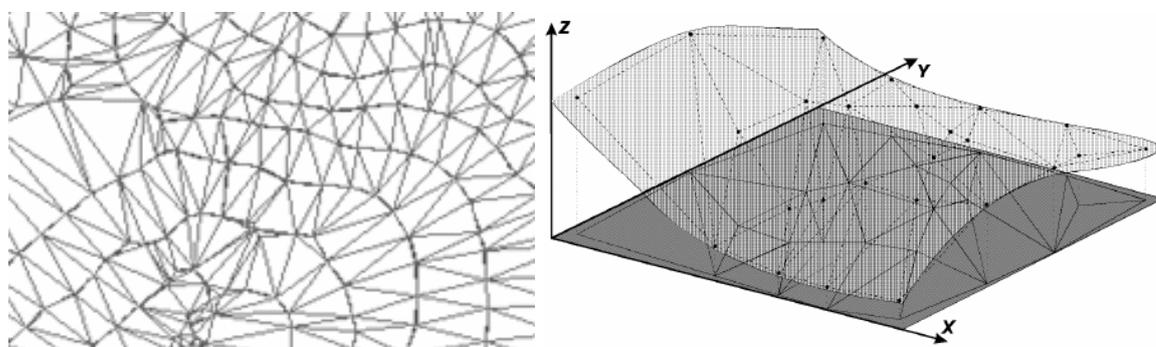


Figura 19 - Modelo de malha irregular triangular: poliedros de faces triangulares

Dentre os principais métodos de interpolação têm-se o inverso do quadrado da distância (IQD), a *krigagem*, a curvatura mínima, os métodos multiquadráticos e a triangulação de *Delaunay*. A escolha de um determinado método de interpolação é uma decorrência da disposição geográfica dos pontos e da utilização de critérios estatísticos. A triangulação de *Delaunay* (Figura 20) é um interpolador exato, muito eficiente para expressar relevos acentuados e baseia-se em um algoritmo que cria triângulos através da ligação de pontos (SILVA, 1999).

Nesta dissertação será utilizado um tipo especial de triangulação, desenvolvida por PEUCKER *et al.* (1979) e baseada na triangulação de *Delaunay*. Esta triangulação é conhecida por Rede Irregular de Triângulos (RIT, ou TIN - *Triangular Irregular Network*) e se constitui em um modelo vetorial com estruturação topológica, no qual o banco de dados consiste em três conjuntos de registros, denominados lista de nós, lista dos apontadores e lista de triângulos (SILVA, 1999).

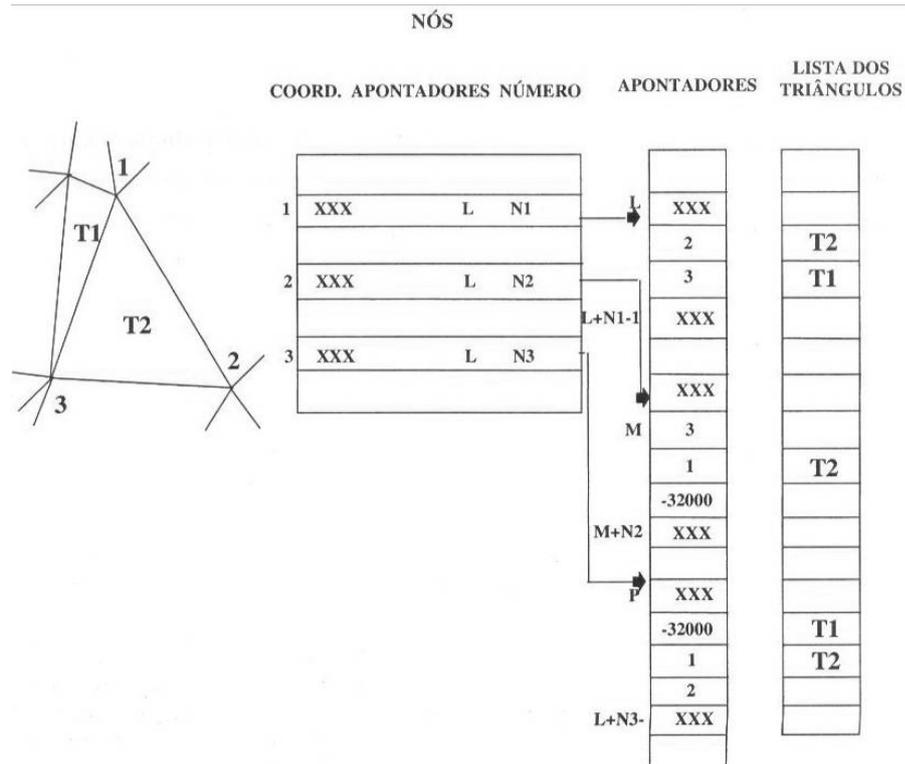


Figura 20 - Estrutura da Rede Irregular de Triângulos (BURROUGH, 1986)

Esta estrutura permite que informações morfológicas importantes como as discontinuidades, representadas por feições lineares de relevo (cristas) e drenagem (vales), sejam consideradas durante a geração do MDE. Estas discontinuidades do terreno são inseridas no MDE por meio de *breaklines* ou linhas de quebra. As linhas de quebra são linhas que durante o processo de criação da triangulação devem ser obrigatoriamente arestas dos triângulos (FELGUEIRAS & CÂMARA, 2004). A **Figura 21** apresenta uma exemplificação da interpolação de curvas de nível a partir de pontos amostrais, pelo método da rede irregular de triângulos (TIN).

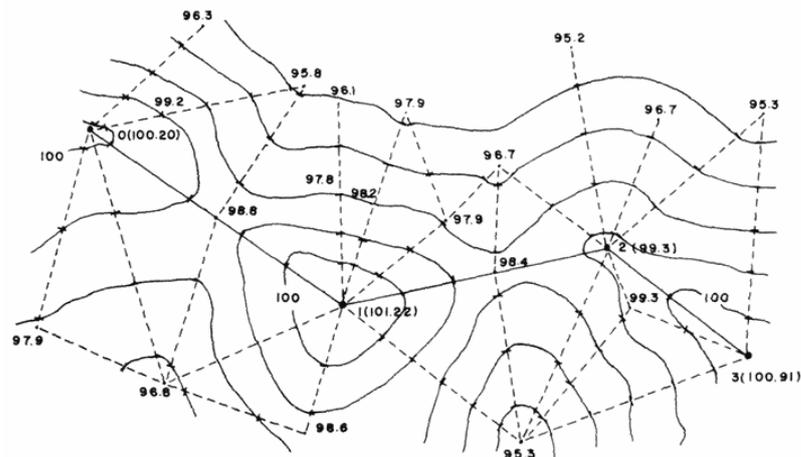


Figura 21 - Curvas de nível obtidas por interpolação (CORDINI, 2004)

A geração da superfície contínua da altitude do terreno é finalizada com a transformação dos valores interpolados para um determinado valor de nível de cinza, que pode variar de 0 (menor altitude) a 255 (maior altitude) (**Figura 22**). Cada elemento da matriz apresenta, além das coordenadas X e Y, o valor de Z, que consiste na altitude do terreno (**Figura 23**). Em função da escala de entrada da informação original e da imagem de satélite a ser utilizada neste estudo, foi definida a resolução espacial de 0,60 metros para o MDE.

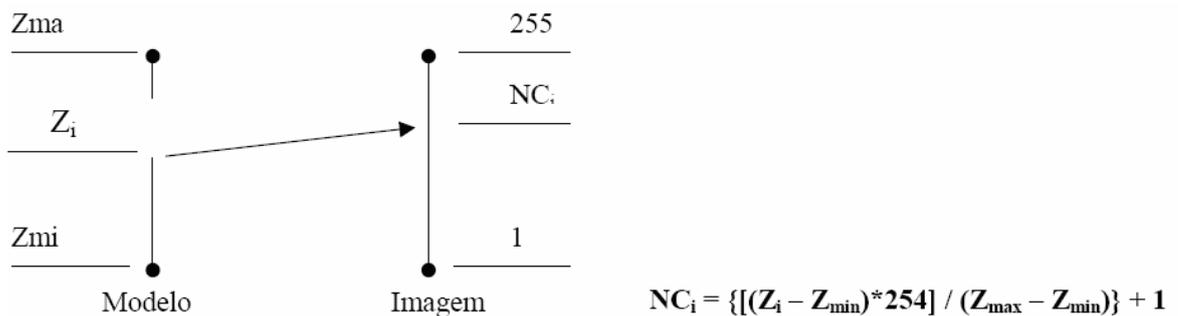


Figura 22 - Equação de mapeamento da altitude para nível de cinza (FELGUEIRAS & CÂMARA, 2004)

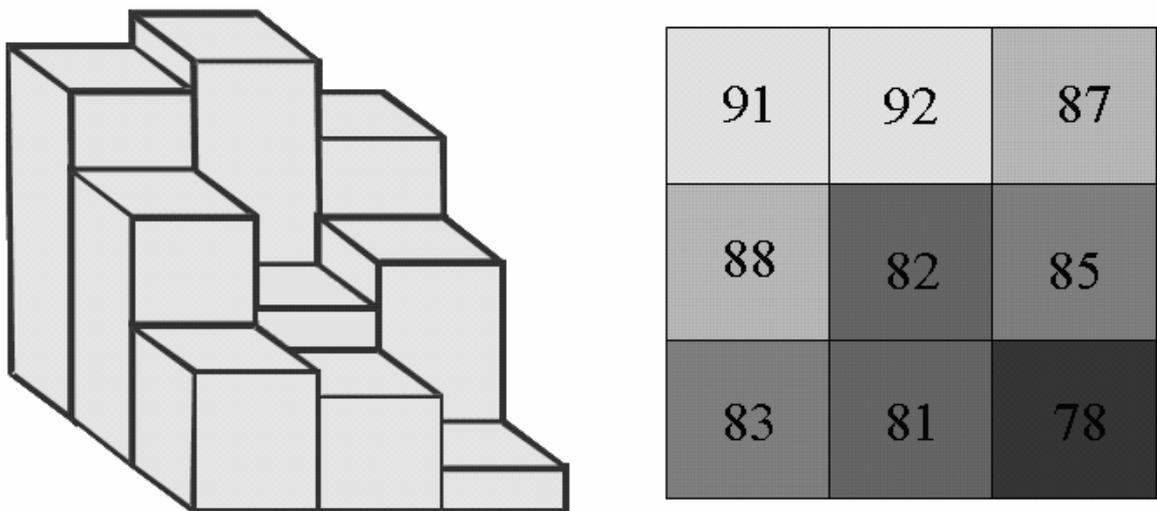


Figura 23 - Representação da altitude do relevo na forma de uma matriz

2.5.3 Declividade do Terreno

A declividade em uma parcela da superfície do terreno é definida por um plano tangente àquela posição da superfície modelada pelo MDE, representando fisicamente a um gradiente de inclinação da superfície do solo. O valor de declividade de determinada célula é obtida com base na resolução e no valor da altitude (Z) das células imediatamente vizinhas acima, abaixo, à

esquerda e à direita da célula em questão. A declividade é calculada como um vetor resultante da declividade em X e da declividade em Y (EASTMAN, 2006). A formulação geral para o cálculo da declividade é dada a seguir:

$$\text{Tan_Declividade} = \sqrt{\left(\frac{\text{Direita} - \text{Esquerda}}{\text{Resolução} \cdot 2}\right)^2 + \left(\frac{\text{Acima} - \text{Abaixo}}{\text{Resolução} \cdot 2}\right)^2} \quad (I)$$

onde: Tan_Declividade é a tangente do ângulo que tem o máximo gradiente de declividade;
Direita, Esquerda, Acima, Abaixo são os atributos (Z) das células vizinhas;
Resolução consiste na resolução espacial da célula.

As declividades são geradas em graus decimais ou em percentual. Gradientes de declividade em percentual representam a tangente do ângulo multiplicado por 100. Desta forma, um ângulo de 45 graus corresponde a 100% de declividade (EASTMAN, 2006).

CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

A área de estudo é representada pela área urbana da cidade de Lajeado - RS (**Figura 24**). Está localizada à margem direita do Rio Taquari, sendo que os arroios do Engenho e Saraquá perpassam a área urbana e deságuam neste. A área física corresponde a 30 km² e é limitada pelas seguintes coordenadas UTM22-SAD69: 6737000 - 6742000 N e 403000 - 409000 E. Na região central da área de estudo está localizado o centro comercial e administrativo da cidade, enquanto as regiões nordeste e sudoeste consistem de áreas residenciais. A densidade populacional é superior a 746 hab./ km².

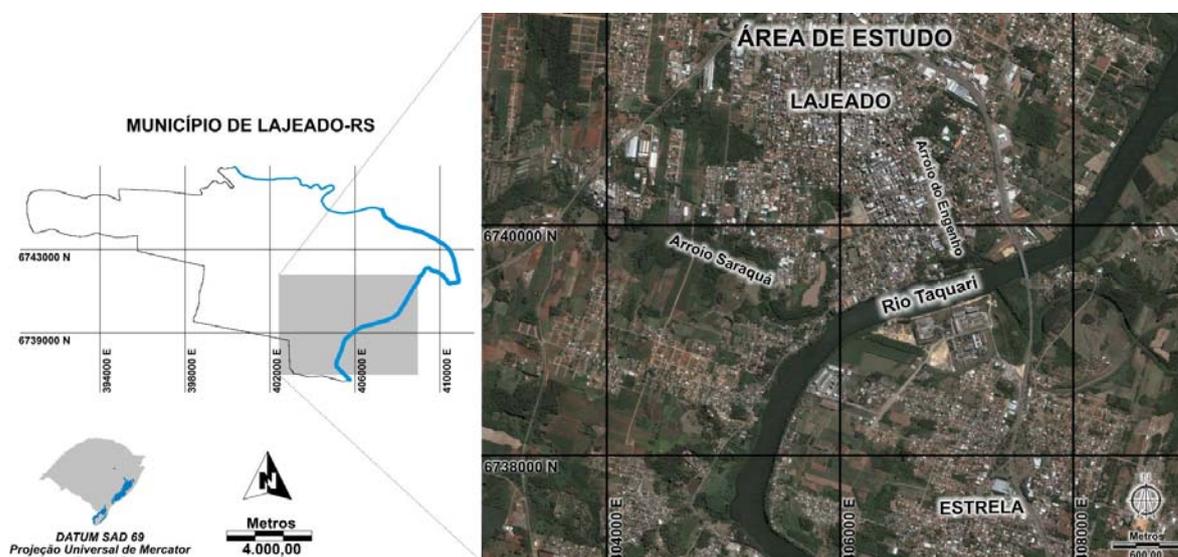


Figura 24 - Localização da área de estudo

Esta área de estudo foi escolhida, como já visto no capítulo anterior, por apresentar uma extensa série histórica de inundações com danos decorrentes e, principalmente, pelo fato de existirem disponíveis informações altimétricas de alta precisão e imagem de satélite de alta resolução espacial.

Importante salientar que a cidade de Estrela, localizada na margem oposta a da cidade de Lajeado, não será alvo de estudo desta dissertação. Apesar da área também ser alvo de inundações periódicas e ter-se disponível a imagem de satélite de alta resolução espacial, a ausência de dados altimétricos com a escala equivalente a Lajeado, não permite a simulação, o mapeamento e a validação das áreas atingidas por determinada inundação. Por este motivo, os procedimentos metodológicos e resultados apresentados na seqüência estarão relacionados somente a margem direita do Rio Taquari, da cidade de Lajeado.

3.2 Materiais e Equipamentos

Neste capítulo são apresentados todos os materiais e equipamentos utilizados como fontes primárias de dados e para a geração de informações não disponíveis. Também são relacionados os softwares utilizados.

3.2.1 Dados Cartográficos

Os dados altimétricos da área de estudo, necessários para a simulação e o mapeamento das áreas sujeitas às inundações, foram obtidos a partir de uma base cartográfica analógica, gerada em 1989 a partir de ortofotos em escala 1:8.000, com restituição fotogramétrica para a escala 1:2.000. Esta base cartográfica foi elaborada pela Engefoto, empresa localizada no Paraná e cedida pela Prefeitura Municipal de Lajeado para o desenvolvimento da dissertação. Além de apresentar as curvas de nível com equidistância de um metro, contém as estradas, a hidrografia e as edificações.

3.2.2 Dados de Sensoriamento Remoto

O diagnóstico do padrão de uso e cobertura da terra das áreas sujeitas às inundações foi realizado a partir da imagem QuickBird, gerada em 28/02/2006, às 13:55:07 e disponibilizada pela DigitalGlobe como um composição RGB Pan-Sharpned, com resolução espacial de 0,60 m. Esta composição consiste de uma fusão entre as 4 bandas multiespectrais com a banda pancromática. A **Tabela 04** apresenta as demais características da imagem utilizada.

Tabela 04 - Características da imagem QuickBird utilizada.

Produto	Ângulo de Elevação Solar	Azimute	Visada lateral	Composição
ORStandard - 2A	54,4°	143,5°	10° <i>off-nadir</i> , sendo: -7,3° <i>in track</i> ; 6,8° <i>across track</i> .	GEOTIF RGB Pan-Sharpened

3.2.3 GPS Diferencial GTR-A e GTR-A BT

O GTR-A consiste de uma GPS geodésico estático. Este aparelho foi utilizado como base. O GTR-A BT (**Figura 25**) é um GPS topográfico e geodésico. O GTR-A BT quando utilizado em conjunto com o PocketPC e o software ColetorBT permite a coleta de feições nos métodos estático, cinemático contínuo, *Stop&Go* e código C/A. Este aparelho foi utilizado como *rover* para a coleta dos pontos de controle (TECHGEO, 2007).



Figura 25 - Equipamento DGPS GTR-A BT

Abaixo são apresentadas as especificações técnicas do GTR-A e BT:

- Recepção e gravação do código C/A e portadora L1;
- 12 canais paralelos para sintonia de até 12 satélites simultaneamente;
- Memória interna de quatro mega bytes;
- Bateria recarregável com autonomia de 11 horas de operação contínua;
- Indicação por LED do número de satélites sintonizados, memória disponível e estado da bateria;
- Precisão diferencial de 0,5 cm + 1 ppm no modo estático para distâncias de até 20 km;
- Precisão diferencial de 0,5 cm + 2 ppm no modo estático para distâncias de até 100 km.

3.2.4 Softwares

Para o desenvolvimento dos procedimentos operacionais foram utilizados os seguintes softwares e módulos associados (**Tabela 5**):

Tabela 05 - Softwares utilizados e respectivas aplicações.

Software	Versão	Aplicação
LabFit	7.2.15	Método matemático de previsão das cotas de inundação
ColetorBT	1.07.0301	Coleta dos GCP
Útil	2.07.0118	Descarregar dados do DGPS para o PC
EZSurv Post Processor	2.23	Pós-processamento dos GCP
ENVI	4.4	Georreferenciamento e Ortorectificação
AutoCAD MAP 3D	2005	Digitalização das curvas de nível
Idrisi Andes	15.00	Geração do MDE e Declividade
Erdas Imagine Virtual GIS	9.1	Simulação das áreas sujeitas às inundações
SPRING	4.3.3	Vetorização do uso e cobertura da terra
CorelDRAW	X3	Organização dos mapas temáticos

3.3 Procedimentos Metodológicos

A metodologia será abordada como duas etapas distintas, mas relacionadas. A primeira etapa consiste na descrição dos métodos relacionados com o desenvolvimento do modelo matemático relacionado ao prognóstico da ocorrência de uma inundação. A segunda etapa consiste na simulação das áreas que serão inundadas, com base nos resultados da previsão na primeira etapa e o diagnóstico do uso e cobertura da terra.

3.3.1 Modelo Matemático de Previsão das Cotas de Inundação

Pesquisas que se relacionam à Hidrologia referenciam-se em séries históricas, isto é, do conhecimento que resulta da observação sistemática no decorrer de um determinado intervalo de tempo. Muitos dos dados hidrológicos, como, por exemplo, a ocorrência das precipitações atmosféricas e os níveis atingidos por inundações, em determinada área, são elementos de natureza

histórica, pois cada um deles constitui um evento que não pode ser repetido na prática sob o controle de um experimentador. Os dados experimentais podem ser verificados e comparados por meio da repetição do experimento. Os dados históricos, ao contrário, não podem ser confirmados por repetição do fenômeno em laboratório, tornando-se necessária observação continuada para que possa fazer sua completa análise, comparação e verificação (GARCEZ, 1967).

Considerando que as inundações são fenômenos naturais imprevisíveis quanto a sua ocorrência, o estudo da previsão de cheias através de cálculos de probabilidade de ocorrência e do período de retorno é importante para quem planeja o uso das áreas sujeitas às inundações. O período de retorno ou intervalo de recorrência de um evento hidrológico consiste no tempo médio, geralmente expresso em anos, que esse evento é igualado ou superado pelo menos uma vez. O período de retorno é calculado pela seguinte equação:

$$I_r = 1 / P \quad (II)$$

onde: I_r = Intervalo de Recorrência e P = Probabilidade de Ocorrência

TUCCI & REZENDE (1979) apud FLINTSCH (2002), realizaram os cálculos da probabilidade de ocorrência e do período de retorno de diversos níveis de inundação para as cidades de Lajeado e Estrela. Em função disto e por possíveis inconsistências que a série histórica de inundações de Lajeado possa apresentar, optou-se por não refazer estes cálculos. Ao mesmo tempo, em função de já estarem transcorridos quase 30 anos desde a realização destes cálculos, indica-se que estes cálculos sejam revisados e atualizados em algum estudo posterior.

A disponibilidade de dados de precipitação e do nível dos rios ao longo do seu curso permite o prognóstico da ocorrência ou não de uma determinada inundação e até estimar a magnitude e o alcance da lâmina de água sobre as áreas inundadas. A correlação entre o nível da cota de inundação na cidade de Lajeado e cidades localizadas a montante (Encantado, por exemplo) permite encontrar uma ou mais funções matemáticas que modelem o fenômeno. Para encontrar o melhor ajuste da curva matemática da série histórica de inundações foi utilizado o software LABFIT (SILVA, 2003). A cada leitura das cotas máximas de cheias a montante (Encantado), a equação modelada estima um valor correspondente de cota máxima de inundação para jusante (Lajeado) (**Figura 26**).

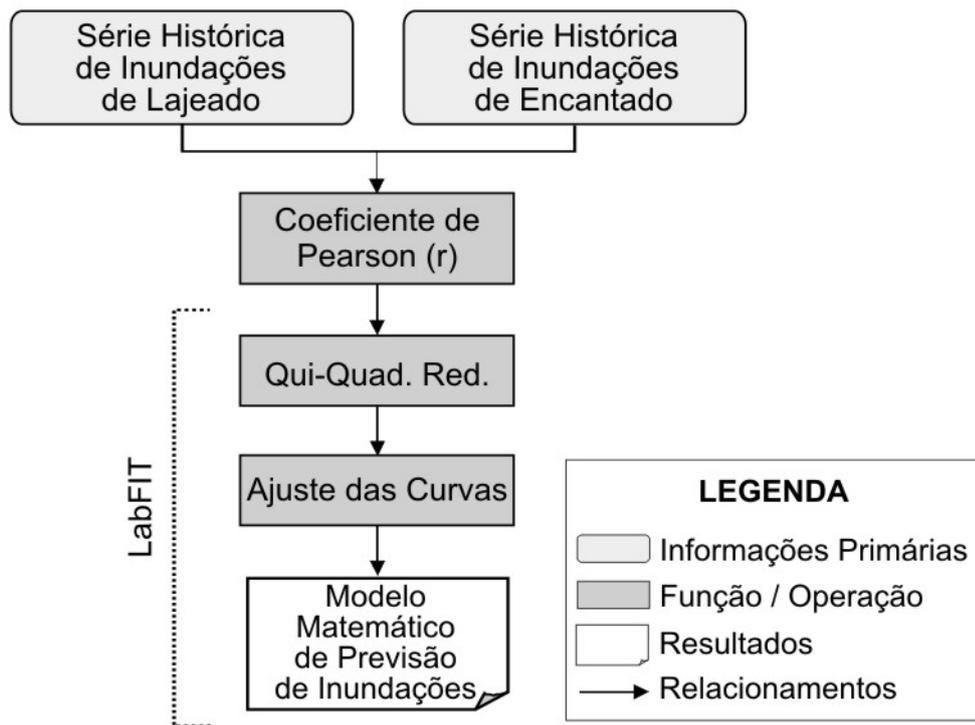


Figura 26 - Fluxograma do modelo matemático de previsão das cotas de inundação para Lajeado

3.3.2 Simulação e Mapeamento das Áreas Sujeitas às Inundações

A segunda etapa consiste da utilização de dados de sensoriamento remoto, modelos digitais de elevação, dados de DGPS e sistemas de informações geográficas para proceder à simulação e ao mapeamento das áreas, com as respectivas características de uso e cobertura da terra, sujeitas às inundações periódicas.

Importante salientar que os procedimentos operacionais utilizados no tratamento dos dados e nas simulações foram desenvolvidos em uma grande gama de plataformas, objetivando otimizar o tempo despendido e as funcionalidades que apresentam. Foram utilizados o software ENVI (georreferenciamento e ortorretificação), AutoCAD MAP (digitalização), Idrisi (geração do MDE e do mapa de declividade), EZSurv (pós-processamento dos GCP), SPRING (vetorização do uso e cobertura da terra) e o Erdas Imagine Virtual GIS (simulação das cotas de inundação). A **Figura 27** apresenta o fluxograma metodológico detalhando o modelo cartográfico de mapeamento das áreas sujeitas às inundações na área de estudo.

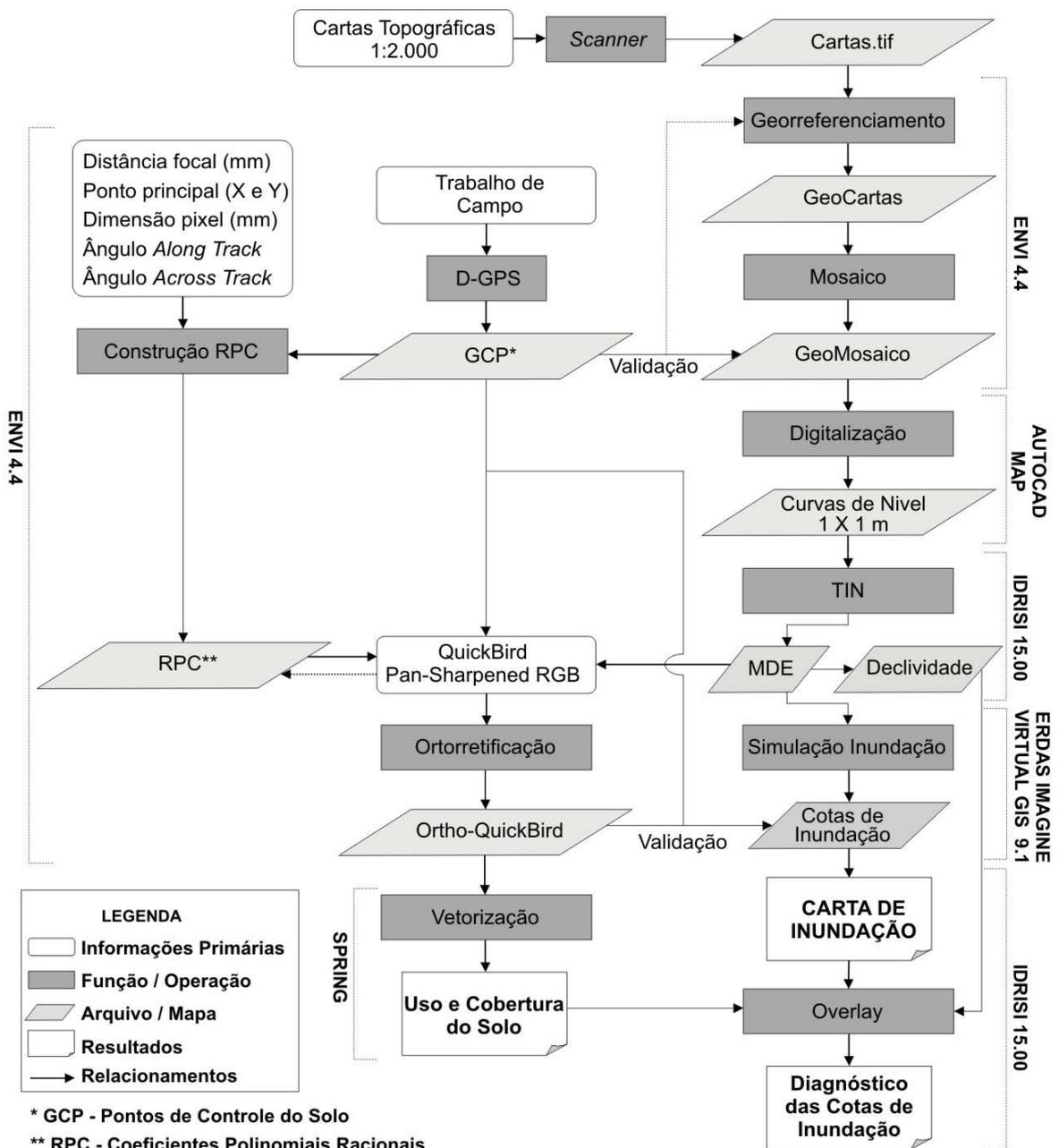


Figura 27 - Fluxograma metodológico detalhado do modelo cartográfico de mapeamento das áreas sujeitas às inundações

3.3.2.1 Coleta dos Pontos de Controle com DGPS

O roteiro do trabalho de campo e a distribuição dos GCP, na área de estudo, foram previamente planejados, objetivando a sua boa distribuição e a correspondência destes no solo, na imagem de satélite e na base cartográfica. A distribuição destes pontos foi realizada de modo que cada quadrante da área de estudo recebesse, pelo menos, 20% do total de pontos de controle.

Os trabalhos de campo, para a coleta dos GCP, foram realizados em três campanhas (04 de agosto, 11 de agosto e 15 de setembro de 2007). A estação-base utilizada foi a Estação Geodésica do IBGE (91998), que integra a Rede Estadual de Pontos GPS do Rio Grande do Sul e foi ocupada com o aparelho GTR-A. O relatório desta estação geodésica pode ser acessado em <http://www.ibge.gov.br> e está apresentada no **Anexo 1**. A **Figura 28** apresenta a localização dos 21 GCP medidos com o GPS Diferencial GTR-A BT e a localização da estação-base.

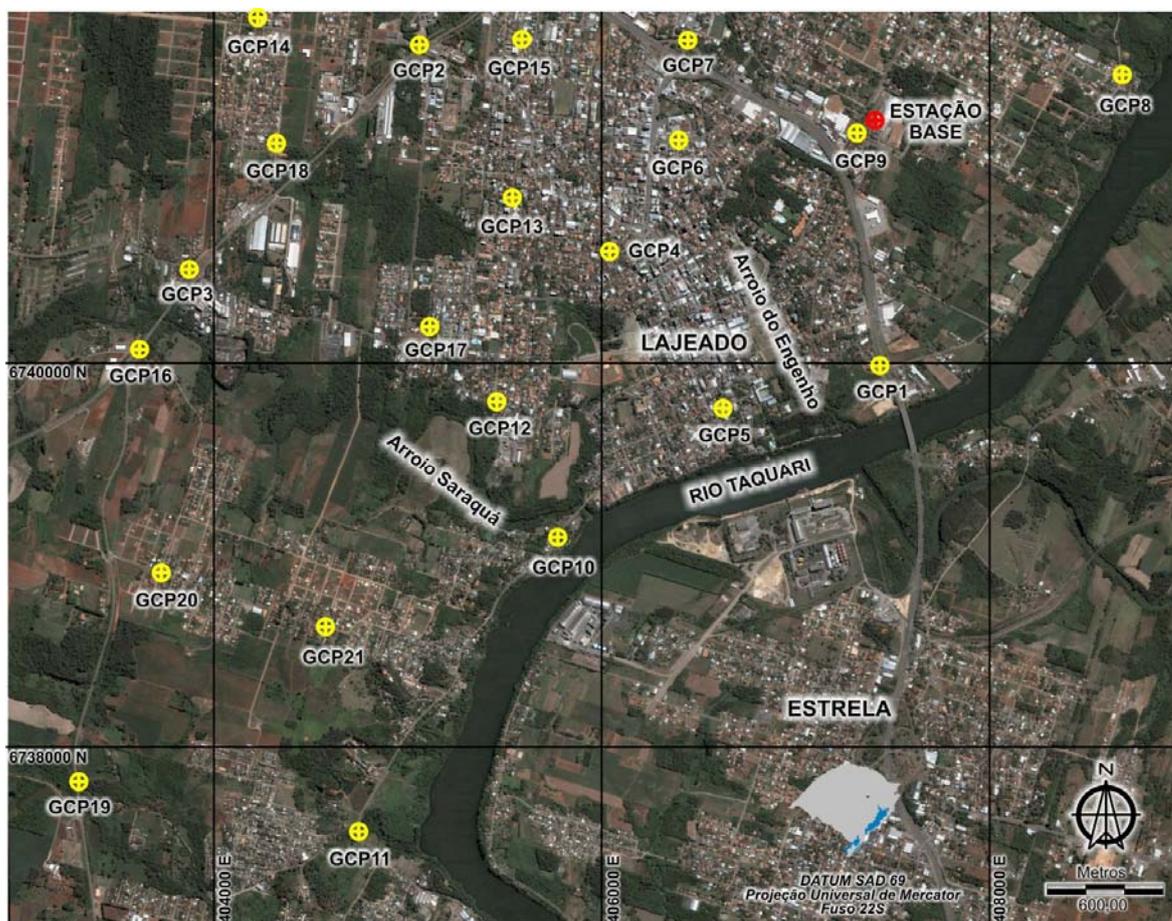


Figura 28 - Distribuição dos GCP e localização da estação-base

Todos os GCP foram coletados na forma de marcos estáticos. Como a distância do aparelho móvel (*rover*), de todos os pontos de controle, em relação ao aparelho base era de no máximo 5,5 quilômetros, a primeira campanha de campo teve permanência de 15 minutos em cada ponto, enquanto a segunda e terceira campanha tiveram permanência de 20 minutos para cada ponto. A configuração padrão do GTR-A e GTR-A BT para a coleta dos GCP exigia sinais de pelo menos 5 satélites, com ângulo do satélite em relação ao horizonte

superior a 10^º e com PDOP (*dilution of precision*) inferior a 5 (TECHGEO, 2007). A **Figura 29** exemplifica a coleta do GCP 16 com o DGPS GTR-A BT e a **Figura 30** apresenta o mesmo GCP na imagem Quickbird.



Figura 29 - Coleta do GCP16 com o DGPS GTR-A BT

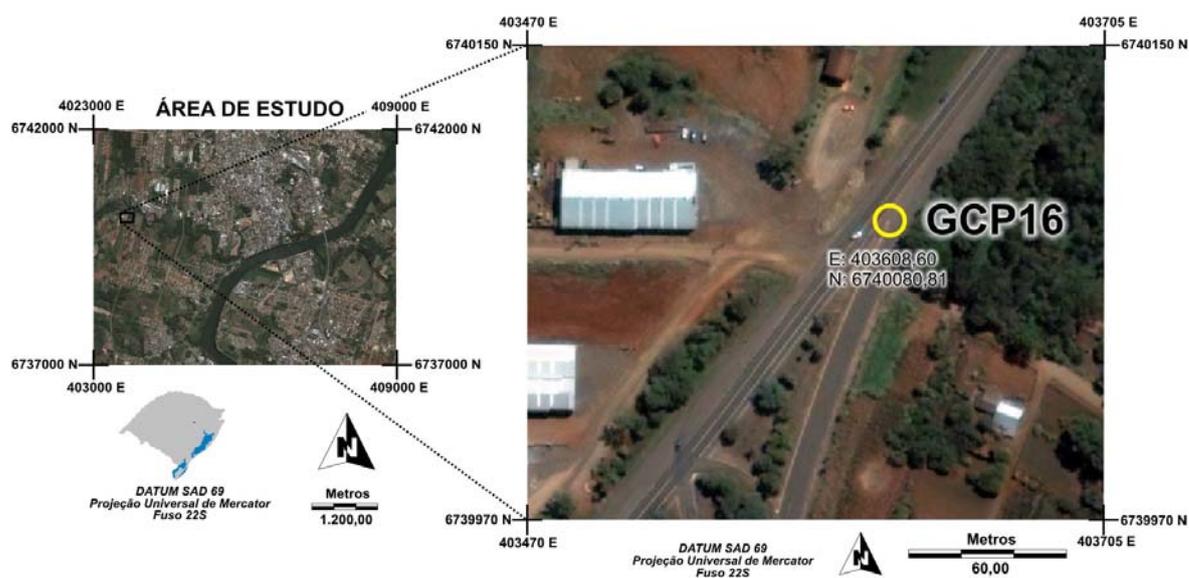


Figura 30 - Localização do GCP 16 na imagem QuickBird

O pós-processamento dos dados foi realizado no software EZSurv 2.23, para o elipsóide WGS84 e SAD69. Encontrou-se solução fixa L1 em 19 GCP e flutuante em 2 GCP. Com relação à precisão, o erro médio quadrático (*root-mean-square* - RMS) de todos os GCP ficou em 9 mm, sendo 16 mm o de menor precisão e 6 mm o de maior precisão. O relatório resumido de todos os GCP medidos encontra-se no **Anexo 2**.

O GPS obtém, além das coordenadas X e Y, a elevação do terreno com base no elipsóide. Para que as altitudes elipsoidais ou geométricas (h) (referidas ao elipsóide), oriundas de levantamentos com DGPS, possam ser utilizadas, é necessário que elas sejam convertidas em altitudes "ortométricas" (H), referidas ao geóide e que apresentem significado físico (**Figura 31**). Para isso, precisa-se conhecer a altura ou ondulação geoidal (N), ou seja, a separação entre as duas superfícies de referência, o geóide e o elipsóide (IBGE, 2005).

$$H = h - N \quad (\text{III})$$

onde N é a ondulação geoidal, h é a altitude elipsoidal e H é a altitude ortométrica.



Figura 31 - Esquemática da relação entre o elipsóide e do geóide da Terra

Conforme o **Anexo 1**, no local onde está localizada a estação geodésica, a separação entre o elipsóide e o geóide é de 2,46 metros. Em virtude da ondulação geoidal variar cerca de um centímetro a cada quilômetro e a área de estudo ter extensão máxima de seis quilômetros, dos valores da elevação obtidos pelo DGPS (h) deve ser subtraído o valor de 2,46 metros (N). Valores positivos de N indicam que o geóide está localizado acima do elipsóide. A utilização de um N fixo não afetará a precisão da elevação medida.

3.3.2.2 Georreferenciamento da Base Cartográfica

As cartas topográficas analógicas, originalmente em formato A0, foram escaneadas em tamanho A4 com resolução de 300 DPI (pixel com 25 cm). Cada carta A0, após escaneada, resultou em oito cartas A4, no formato TIF. Estas cartas foram georreferenciadas no software ENVI, utilizando a grade original de coordenadas que apresentavam, de modo que para cada carta foram utilizados 9 pontos de controle (**Figura 32**). O georreferenciamento de todas as cartas foi controlado de modo que o RMS ficasse abaixo de um pixel, ou seja, com no máximo 25 cm de erro. Após o georreferenciamento de todas as cartas, estas foram *mosaicadas* no ENVI, gerando um arquivo único.

Na seqüência, os GCP foram utilizados para validar a base cartográfica. A base cartográfica, georreferenciada com a grade original de coordenadas, apresentou deslocamento (translação em X e Y) da ordem de 11 metros em relação aos GCP medidos com DGPS e pós-processados em SAD69. A alternativa foi refazer o georreferenciamento da base cartográfica utilizando os GCP. O RMS resultante foi de 1,75 pixels (1 pixel = 25 cm), correspondendo, em termos reais, a um RMS de 0,44 metros. O **Anexo 3** apresenta o relatório do georreferenciamento do mosaico da base cartográfica utilizando os GCP.

Uma vez realizado o procedimento acima descrito, foram digitalizadas as curvas de nível da área de estudo (**Figura 33**). Este procedimento foi realizado no software AutoCAD MAP 2005. Todo o procedimento de digitalização foi realizado em tela e de forma manual, não se optando por digitalização semi-automática ou mesmo automática.

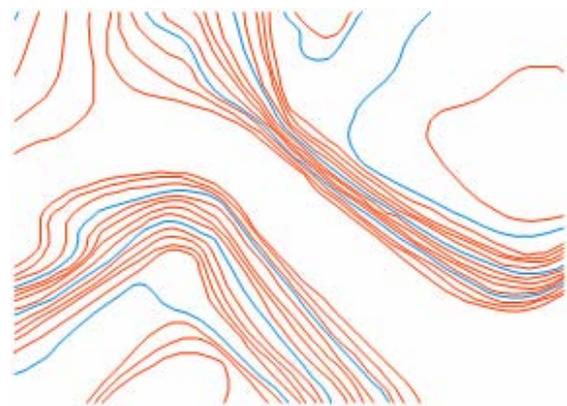


Figura 32 - Carta topográfica original georreferenciada 1:2.000 **Figura 33** - Digitalização das curvas de nível georreferenciadas

3.3.2.3 Geração do MDE

Conforme visto anteriormente, na cidade de Lajeado, a cota topográfica de 13 metros é utilizada como nível de referência para o nível do Rio Taquari, em condições normais. Estes nível foi confirmado pelos dados altimétricos da base cartográfica, em escala 1:2.000, elaborada pela Engefoto e cedida pela Prefeitura Municipal de Lajeado para o desenvolvimento desta dissertação. O nível do Rio Taquari poderá diminuir abaixo da cota de 13 metros em períodos de baixa precipitação pluviométrica ou em função da abertura das comportas da eclusa de Bom Retiro do Sul, situada a jusante. Nestas situações, apesar de não haver nenhum estudo conclusivo, o Rio Taquari poderá diminuir o nível da água até a cota topográfica de 12 metros (AHSUL, 2007).

O modelo digital de elevação é necessário para a ortorretificação da imagem do satélite QuickBird e para a simulação das áreas sujeitas às inundações. As curvas de nível com equidistância de 1 metro, digitalizadas das cartas topográficas, georreferenciadas em UTM SAD69, em escala 1:2.000, foram importadas no software Idrisi Andes para a geração do MDE.

O MDE foi gerado pelo método da interpolação baseada em uma rede triangular irregular (TIN - *Triangular Irregular Network*), com todos os vértices das curvas de nível sendo utilizados. Foi empregada uma função parabólica para ajustar as quebras de relevo e eliminar os efeitos de “ponte” e de “túnel” (estima a altitude do fundo dos vales e do topo de elevações). De forma prática, esta técnica adiciona pontos críticos nas curvas de nível que representam o topo de uma colina e nas curvas de nível paralelas com o mesmo valor de cota (que podem compreender um curso de água ou vale). No ajuste do TIN, com a utilização destes pontos críticos, novos triângulos são introduzidos no TIN. A vantagem desta técnica está no fato de se obter um MDE aperfeiçoado, que descreve melhor a superfície topográfica do terreno (ZHU *et al.*, 2001).

A resolução espacial do MDE gerado foi igualada à resolução da imagem QuickBird, ou seja, 0,60 metros. Desta forma, não há perda (ou esta será reduzida) de informação por degradação da resolução espacial ao se fazer a reamostragem do MDE no processo da ortorretificação da imagem QuickBird.

Após o término da geração do MDE, este foi associado ao arquivo de cabeçalho (*header*) da imagem QuickBird. Esta associação foi realizada pelo software ENVI.

3.3.2.4 Construção dos RPC e Ortorretificação da Imagem QuickBird

Como último pré-requisito para a realização do processo de ortorretificação da imagem Quickbird, foram construídos os coeficientes polinomiais racionais (RPC) com os pontos de controle medidos com o DGPS. A construção dos RPC foi realizada utilizando 14 pontos de controle (**Anexo 4**). Este procedimento foi executado no software ENVI, estando implementado somente a partir da versão 4.3.

A **Figura 34** apresenta a janela de construção dos RPC do ENVI, com os respectivos valores do imageamento do sensor Quickbird (orientação interna) e os valores calculados de Omega, Phi e Kappa (orientação externa). O RMS dos GCP foi de 1,217 pixels, correspondendo a um RMS de 0,73 metros. A **Figura 35** apresenta a matriz de rotação associada com XS, YS e ZS, enquanto a **Figura 36** apresenta o RMS individual de cada GCP.

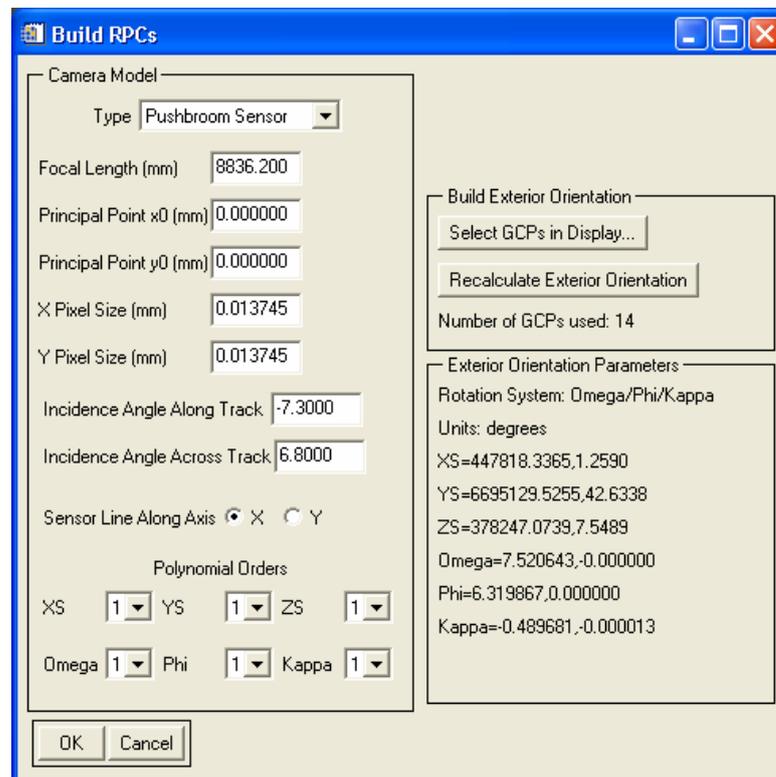


Figura 34 - Janela de construção dos RPC

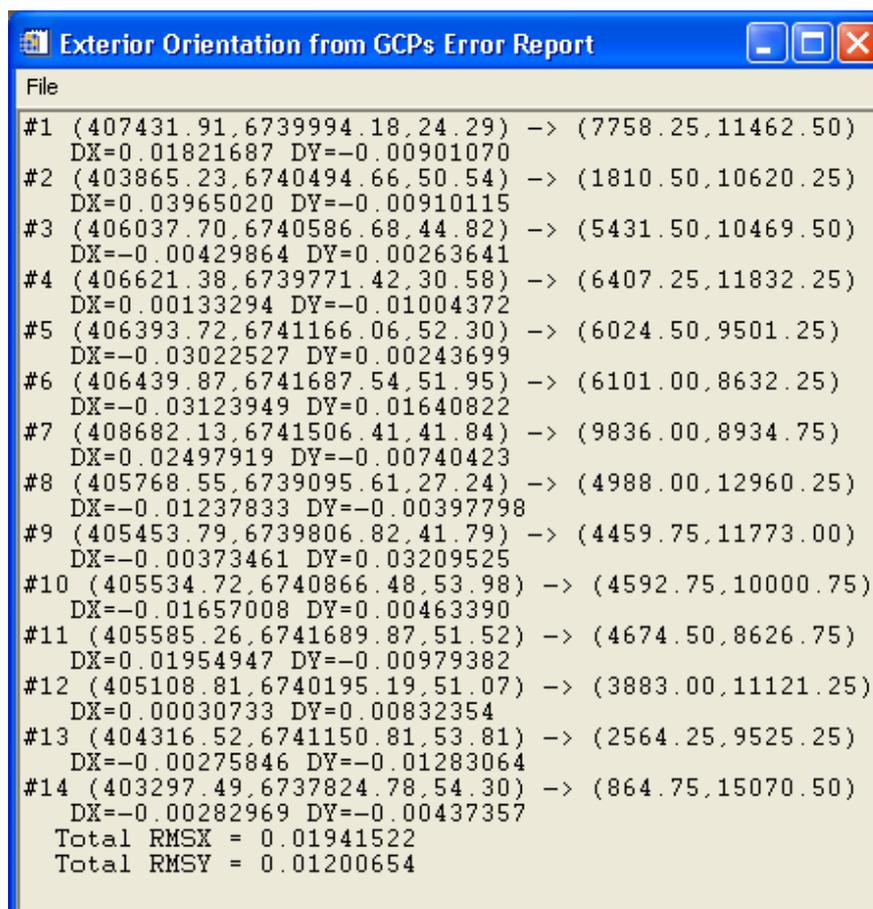


Figura 35 - Matriz de rotação associada com XS, YS e ZS

	Map X	Map Y	Elev	Image X	Image Y	Predict X	Predict Y	Error X	Error Y	RMS
#12+	405453.79	6739806.82	41.79	4460.75	11774.00	4461.2684	11772.062	0.5184	-1.9375	2.0057
#7+	406439.87	6741687.54	51.95	6102.00	8633.25	6100.6054	8631.8618	-1.3946	-1.3882	1.9677
#18+	404316.52	6741150.81	53.81	2565.25	9526.25	2563.5450	9526.7134	-1.7050	0.4634	1.7668
#17+	405108.81	6740195.19	51.07	3884.00	11122.25	3885.3825	11122.849	1.3825	0.5993	1.5068
#10+	405768.55	6739095.61	27.24	4989.00	12961.25	4987.6687	12960.705	-1.3313	-0.5449	1.4385
#15+	405585.26	6741689.87	51.52	4675.50	8627.75	4676.8034	8627.6725	1.3034	-0.0775	1.3057
#6+	406393.72	6741166.06	52.30	6025.50	9502.25	6025.0934	9503.1865	-0.4066	0.9365	1.0209
#13+	405534.72	6740866.48	53.98	4593.75	10001.75	4594.1794	10002.671	0.4294	0.9215	1.0167
#5+	406621.38	6739771.42	30.58	6408.25	11833.25	6408.4121	11834.062	0.1621	0.8121	0.8281
#4+	406037.70	6740586.68	44.82	5432.50	10470.50	5433.1574	10470.721	0.6574	0.2210	0.6936
#3+	403865.23	6740494.66	50.54	1811.50	10621.25	1811.8595	10620.816	0.3595	-0.4331	0.5629
#19+	403297.49	6737824.78	54.30	865.75	15071.50	865.6658	15071.813	-0.0842	0.3135	0.3246
#1+	407431.91	6739994.18	24.29	7759.25	11463.50	7759.2715	11463.601	0.0215	0.1016	0.1039
#8+	408682.13	6741506.41	41.84	9837.00	8935.75	9837.0874	8935.7622	0.0874	0.0122	0.0882

Figura 36 - RMS dos GCP utilizados na construção dos RPC

Uma vez que os RPC são computados, a informação é adicionada ao cabeçalho do arquivo de entrada, ou seja, à imagem QuickBird. Assim pode-se utilizar os RPC genéricos para proceder à ortorretificação da imagem, com a opção de ainda utilizar GCP (ITT, 2007).

A qualidade da ortorretificação é altamente dependente da topografia do terreno e do número, exatidão e distribuição dos pontos de controle terrestres. O processo de ortorretificação foi realizado no software ENVI e três métodos foram avaliados, com o objetivo de obter a melhor ortorretificação possível. O primeiro método utilizou somente os RPC fornecidos com a imagem. O segundo método utilizou os RPC fornecidos com a imagem e os GCP coletados com o DGPS. O terceiro e último método fez uso dos RPC construídos e ainda os GCP medidos com o DGPS. Nos três métodos foi utilizado o MDE da área de estudo. Foi utilizado o método de ortorretificação que apresentou o menor erro RMS na geração da ortoimagem.

3.3.2.5 Simulação das Inundações

Pelo módulo Virtual GIS, do software Erdas Imagine, o MDE da área de estudo foi integrado com a imagem QuickBird ortorretificada, como imagem de superfície, representando a área de estudo em ambiente computacional.

Este módulo do software Erdas Imagine permite ainda a inclusão de uma camada virtual de água sobre o MDE e a ortoimagem. Esta camada de água foi fixada na cota topográfica de 12 m, consistindo no nível mais baixo do Rio Taquari. Em períodos de alta precipitação pluviométrica, quando previsto que o Rio Taquari terá uma determinada elevação no nível da água, em função do volume de água precipitado na bacia, a camada de água é ajustada, simulando as áreas que serão inundadas.

As cotas de inundação foram mapeadas com eqüidistância de 1 metro, a partir da cota topográfica de 13 metros até a cota topográfica de 30 metros (a maior inundação já registrada alcançou a cota topográfica de 29,92 metros).

Para fins de validação foi simulada a área inundada pela última inundação registrada na área de estudo, ocorrida em 24 de setembro de 2007 e que atingiu a cota topográfica de 25,97 m. Como verdade terrestre foram utilizados pontos de controle medidos no momento de “pico” da inundação com DGPS, com GPS de navegação e fotografias tomadas ao chão e por aeronave. Para fins de validação foi estimado o erro médio altimétrico (ϵ_a) da cota de inundação simulada em relação à área de inundação observada no solo (erro

inerente á base topográfica) e o respectivo erro médio horizontal (ϵ_d). Estas duas medidas indicam a precisão do modelo cartográfico.

3.3.2.6 Declividade

A declividade foi gerada a partir do MDE da área de estudo e calculada em percentual, pelo software Idrisi Andes. As declividades foram reclassificadas de acordo com as orientações de RAMALHO-FILHO & BEEK (1995), apresentando as seguintes características (**Tabela 06**):

Tabela 06 - Classes de declividade ou classes clinográficas.

Classe de Declividade (%)	Característica do Terreno
0 - 3 %	Plano
3 - 8 %	Suave Ondulado
8 -13 %	Moderado Ondulado
13 - 20 %	Ondulado
20 - 45 %	Forte Ondulado
45 - 100 %	Montanhoso
Mais de 100 %	Escarpado

Fonte: RAMALHO-FILHO & BEEK (1995)

3.3.2.7 Uso e Cobertura da Terra

Segundo MEYER & TURNER (1994), o termo cobertura da terra (do Inglês - *Land Use and Cover Change* - LUCC) se refere ao tipo de cobrimento da superfície terrestre (vegetação, recursos hídricos, rochas), mas se expandiu subsequentemente para incluir estruturas humanas (edificações e obras viárias), e outros aspectos do ambiente físico, como solos, biodiversidade, águas subterrâneas.

Por sua vez, uso da terra diz respeito à finalidade para a qual a terra é usada pela população humana local e pode ser definida como as atividades

humanas que estão diretamente relacionadas à terra, fazendo uso de seus recursos ou tendo um impacto sobre elas (FAO/IIASA, 1993).

Uso e cobertura da terra consistem de mudanças quantitativas na extensão em área (aumento ou diminuição) de um dado tipo de cobertura ou uso do solo (BRIASSOULIS, 2000). Segundo esta ótica, mesmos usos podem apresentar diferentes coberturas e vice-versa.

Os dados de uso e cobertura da terra da área de estudo foram mapeados diretamente sobre a ortoimagem que tiver apresentado o menor erro RMS no processo de ortorretificação. A técnica utilizada para geração do uso e cobertura da terra foi a vetorização manual (também conhecida como digitalização). Optou-se por não utilizar técnicas de classificação orientada ao objeto pelo fato da área de estudo não ser muito extensa, apresentar elevada dinâmica e, principalmente, para obter um controle sobre as feições a serem designadas para cada classe temática.

A vetorização foi realizada no software SPRING. Por esta técnica foram digitalizados os arcos que delimitam determinada feição ou objeto geográfico utilizando-se o mouse. Paralelamente à vetorização foi necessária uma etapa de ajuste. O ajuste consistiu em fazer com que os arcos estejam com suas extremidades, isto é, os nós conectados. Uma vez que todas as linhas foram ajustadas, foi efetuada a etapa de poligonalização, que criou a relação topológica entre os polígonos.

Ao término destas três etapas, cada polígono foi associado a uma classe temática, refletindo o seu uso e/ou cobertura da terra. Na seqüência estão apresentadas as 12 classes temáticas que representam o padrão de uso e cobertura da terra da área de estudo: Floresta Nativa (Floresta Estacional Decidual - FED), Floresta em Regeneração Inicial, Floresta em Regeneração Média, Floresta em Regeneração Avançada, Floresta Industrial (Exótica), Pastagens / Gramíneas, Agricultura, Uso Misto (Residencial / Comercial), Uso Industrial, Áreas de Lazer / Recreação, Estradas e Água.

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Probabilidade de Ocorrência e Período de Retorno das Inundações

Conforme as considerações apresentadas no capítulo anterior, optou-se por utilizar os cálculos da probabilidade de ocorrência e do período de retorno, para diversos níveis de inundação na cidade de Lajeado e Estrela, realizados pelos Engenheiros Hidrólogos Bruno Rezende e Carlos Tucci (**Tabela 07**). Porém, cabe novamente a ressalva, que há a necessidade destes cálculos serem atualizados, visto que muitos outros eventos de inundação ocorreram nos 29 anos transcorridos desde a realização desses cálculos.

Tabela 07 - Probabilidade e Período de Retorno calculado para diversos níveis de inundação na cidade de Lajeado.

Cota de Inundação (m)	Probabilidade de Ocorrência (%)	Período de Retorno (anos)
20,00	49,00	2,04
21,00	41,00	2,44
22,00	33,00	3,03
23,00	25,00	4,00
24,00	20,00	5,00
25,00	15,00	6,66
26,00	10,00	10,00
27,00	7,70	13,00
28,00	5,30	19,00
29,00	3,70	27,00
30,00	2,50	40,00
31,00	1,60	63,00
32,00	32,00	100,00

Fonte: REZENDE & TUCCI (1979) apud FLINTSCH (2002)

Pelas análises que serão apresentadas na seqüência, quando o Rio Taquari alcança a cota topográfica de 19 metros, este começa a extravasar suas

águas em áreas além do leito menor, configurando-se o estado de inundação. Assim sendo, e pelos cálculos realizados por REZENDE & TUCCI (1979) apud FLINTSCH (2002) considera-se que a cidade de Lajeado é afetada por inundações com uma periodicidade média inferior a 2 anos. O **Gráfico 04** apresenta a série histórica dos níveis máximos de inundação acoplada com diversos períodos de retorno calculados para a cidade de Lajeado.

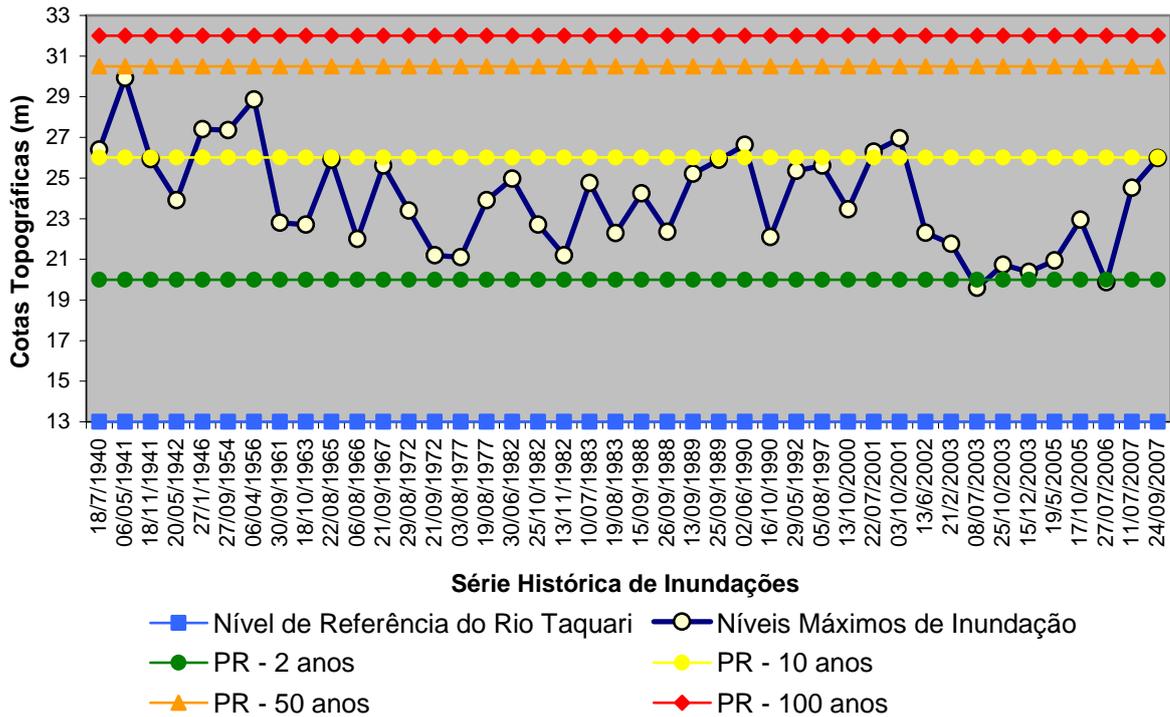


Gráfico 04 - Série histórica dos níveis máximos de inundação acoplada ao período de retorno (PR) calculado para Lajeado

A partir da análise do gráfico acima, constata-se que a maioria dos eventos de inundação, registrados na cidade de Lajeado, apresenta período de retorno inferior a 10 anos, indicando ser alto o risco destas áreas serem atingidas por inundações. Ao mesmo tempo, permite considerar que a existência de imóveis, edificações e infra-estruturas, localizadas abaixo da cota topográfica de 26 metros, apresenta alto risco de sofrerem danos e impactos decorrentes das inundações.

O conhecimento do período de retorno para diversos níveis de inundação permite que os planejadores, administradores e investidores avaliem a viabilidade de investimentos e a necessidade de ordenamento territorial em função do risco de inundação que cada área apresenta.

4.2 Previsão das Cotas de Inundações para Lajeado

O Centro de Informações hidrometeorológicas da UNIVATES organizou, para o período de 1940 a 2007, uma série histórica dos níveis máximos atingidos por diversas enchentes em diversos pontos da bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas. Correlacionando, de forma pareada, os níveis máximos de inundação registrados em Lajeado com os registrados em Encantado, foi possível encontrar uma função matemática que permite modelar o alcance de uma enchente na cidade de Lajeado em função do nível medido em Encantado. O **Gráfico 05** e **Tabela 08** apresentam as cotas topográficas atingidas, simultaneamente em Lajeado e Encantado, por diversos eventos de inundação.

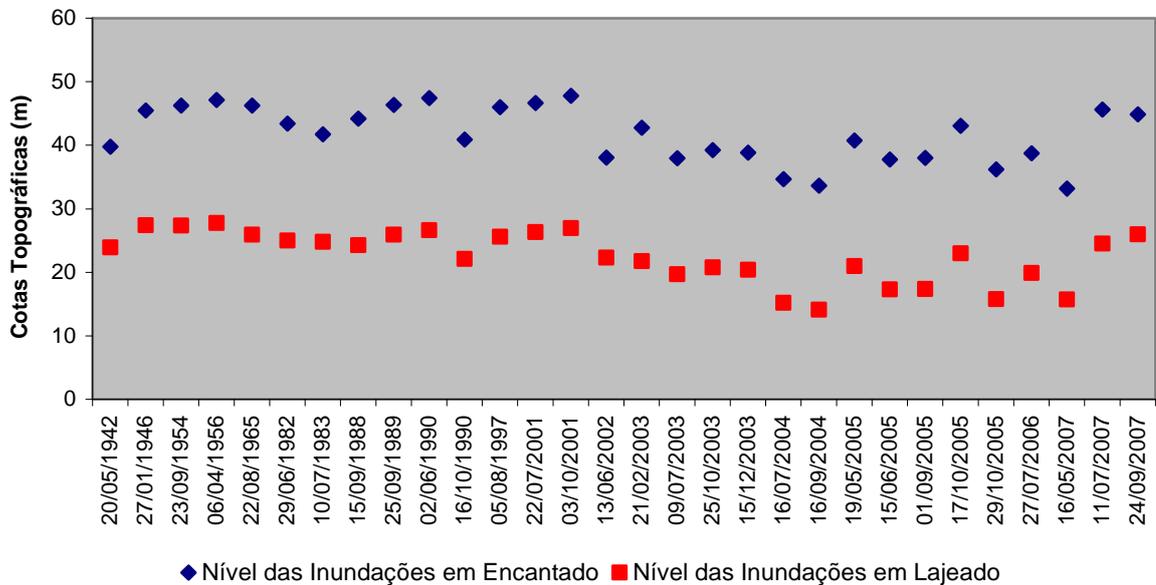


Gráfico 05 - Série histórica pareada de inundações de Encantado e Lajeado

Para a presente dissertação, foi calculada a correlação entre o nível atingido pela água do Rio Taquari na cidade de Encantado (x = valores independentes) e de Lajeado (y = valores dependentes). Encontrou-se um coeficiente de *Pearson* (r) de 0,9452, indicando que há uma elevada relação linear entre os dois conjuntos de dados. Uma vez confirmada esta associação, pelo *software* LabFit, foi obtido o modelo matemático que representasse a melhor curva de ajuste para o conjunto de dados. Este software simula, a partir de uma lista com 500 funções previamente selecionadas, aquelas que melhor se adequam aos dados originais, baseando-se menor valor de Qui-Quadrado Reduzido.

De acordo com o software LabFit, em função do Qui-Quadrado Reduzido (1,74), o modelo matemático que apresenta o melhor ajuste é uma hipérbole: $y = \frac{-1450,39}{x} + 57,6062$. Os **Gráficos 06 e 07** apresentam o ajuste do modelo matemático ao conjunto de dados.

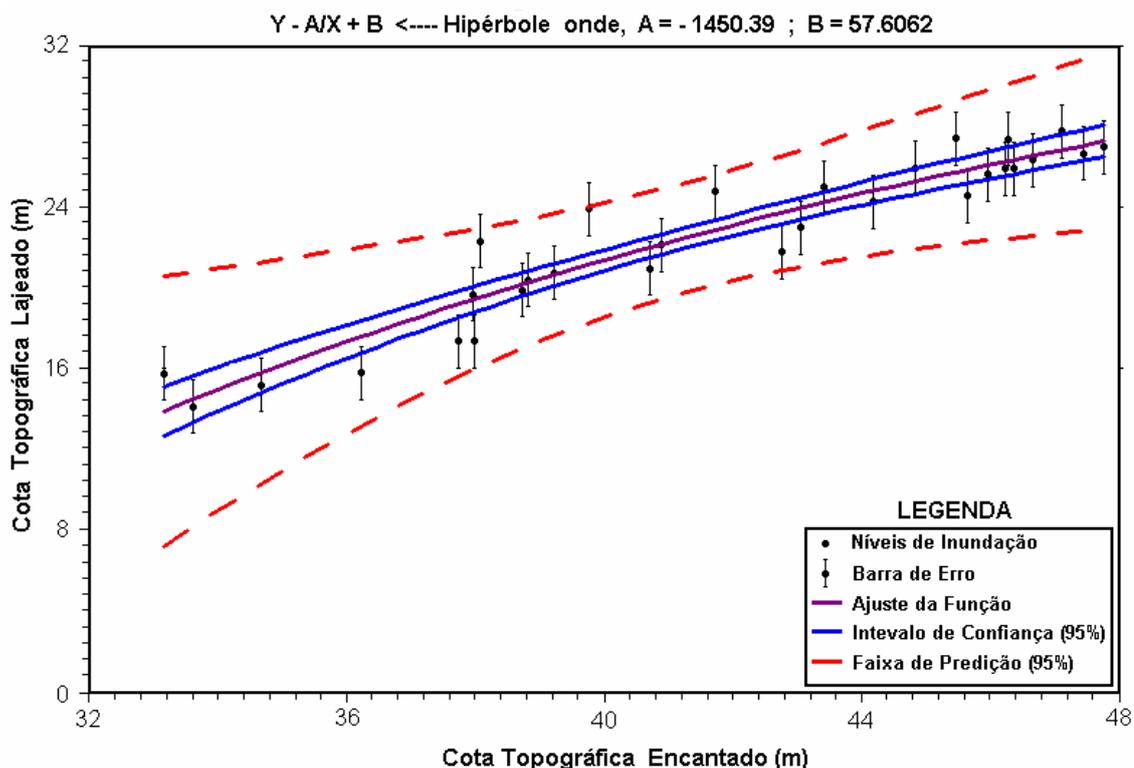


Gráfico 06 - Ajuste do modelo matemático de previsão das cotas de inundação para Lajeado em função das cotas de inundação de Encantado

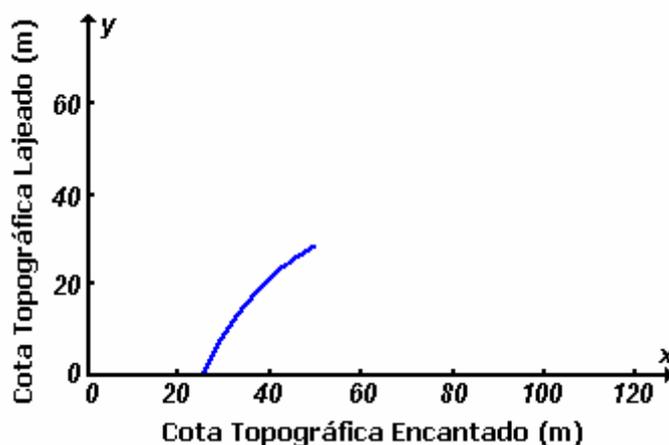


Gráfico 07 - Modelagem da cota de inundação de Lajeado (y) em função da cota de inundação de Encantado (x)

A **Tabela 08** apresenta as cotas topográficas atingidas pelos principais eventos de inundação ocorridos em Encantado e Lajeado, a estimativa da cota de

inundação para Lajeado em função da cota de inundação de Encantado, utilizando o modelo matemático e o ajuste do modelo matemático.

Tabela 08 - Ajuste do modelo matemático para a previsão das cotas de inundação da cidade de Lajeado em função da cota de inundação de Encantado.

Eventos de Inundação	Nível Medido Encantado (X) *	Nível Medido Lajeado (Y) *	Lajeado Modelado	Resíduo (m)
20/05/1942	39,77	23,90	21,14	-2,76
27/01/1946	45,47	27,40	25,71	-1,69
23/09/1954	46,27	27,35	26,26	-1,09
06/04/1956	47,10	27,75	26,81	-0,94
22/08/1965	46,23	25,90	26,23	0,33
29/06/1982	43,41	24,96	24,19	-0,77
10/07/1983	41,73	24,75	22,85	-1,90
15/09/1988	44,17	24,25	24,77	0,52
25/09/1989	46,36	25,90	26,32	0,42
02/06/1990	47,44	26,64	27,03	0,39
16/10/1990	40,89	22,10	22,14	0,04
05/08/1997	45,97	25,60	26,06	0,46
22/07/2001	46,67	26,30	26,53	0,23
03/10/2001	47,77	26,95	27,24	0,29
13/06/2002	38,07	22,30	19,51	-2,79
21/02/2003	42,77	21,75	23,69	1,94
09/07/2003	37,97	19,65	19,41	-0,24
25/10/2003	39,22	20,73	20,63	-0,10
15/12/2003	38,81	20,38	20,23	-0,15
16/07/2004	34,68	15,17	15,78	0,61
16/09/2004	33,62	14,09	14,47	0,38
19/05/2005	40,72	20,94	21,99	1,05
15/06/2005	37,74	17,32	19,18	1,86
01/09/2005	37,99	17,35	19,43	2,08
17/10/2005	43,06	22,95	23,92	0,97
29/10/2005	36,22	15,77	17,56	1,79
27/07/2006	38,73	19,86	20,16	0,30
16/05/2007	33,16	15,72	13,87	-1,85
11/07/2007	45,64	24,52	25,83	1,31
24/09/2007	44,84	25,97	25,26	-0,68

* Série histórica dos níveis de inundação medidos em Encantado e Lajeado (CIH, 2007)

O **Gráfico 08** apresenta o ajuste das cotas de inundação modeladas para a cidade de Lajeado em relação aos valores observados em Lajeado e

Encantado. Os valores das cotas de inundação modelados não diferem significativamente em relação aos valores observados para a cidade de Lajeado ($X^2 = 2,381$), indicando que o modelo matemático apresenta um ajuste muito bom dentro do intervalo do conjunto de dados disponíveis. O **Gráfico 09** apresenta o erro dos valores modelados em relação aos valores esperados.

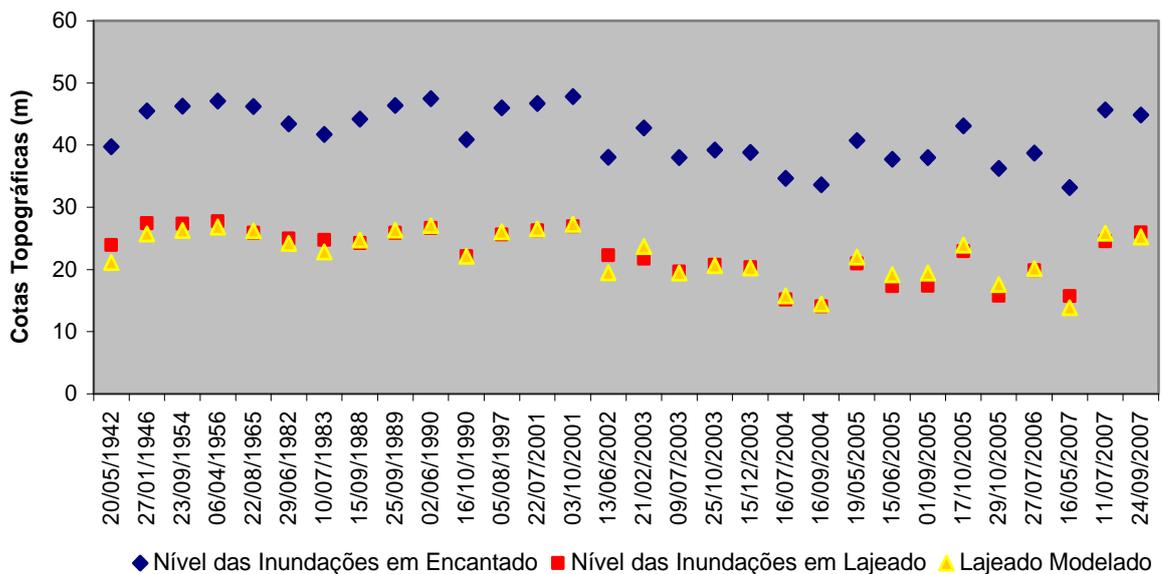


Gráfico 08 - Ajuste das cotas de inundação modeladas para Lajeado em relação aos valores observados em Lajeado e Encantado

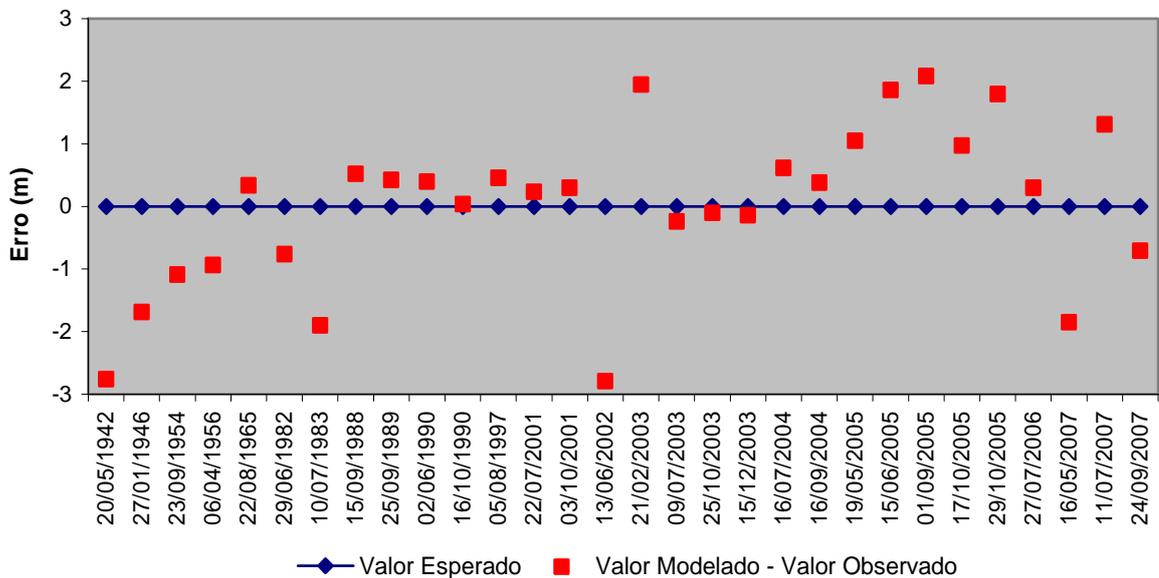


Gráfico 09 - Ajuste dos valores modelados em relação aos valores esperados

Com base no modelo matemático apresentado acima, conhecendo a cota de inundação em Encantado, é possível estimar a cota de inundação em Lajeado. Desta forma, não se precisa, necessariamente, da cota **máxima** de

inundação em Encantado, senão apenas a **cota** de cheia quando do instante de verificação da leitura, uma vez que o modelo matemático nos dá a respectiva cota em Lajeado. Por conseguinte, em tempo hábil, é possível prever-se em que momento e com qual magnitude a área de estudo estará sendo atingida pelo extravasamento da água do Rio Taquari, ocasionando inundações. Por conseguinte, pode-se proceder à identificação das áreas a serem atingidas por determinada cota de inundação e assim, tomar decisões estratégicas de desocupação temporária das áreas inundáveis com maior antecedência.

Para fins de exemplificação, é apresentada na **Tabela 09** a modelagem da inundação ocorrida em 24 de setembro de 2007. Para esta situação, apesar do resíduo da modelagem ser baixo (0,71 m), o intervalo de confiança, em função do r do modelo, reduz a precisão da previsão da cota de inundação para Lajeado.

Tabela 09 - Previsão da cota de inundação de Lajeado em função de Encantado.

Encantado Medido	Lajeado Medido	Lajeado Modelado	Resíduo (Erro)	Intervalo de Confiança	Precisão Modelo
44,84 m	25,97 m	25,26 m	0,71 m	23,88 - 26,64 m	2,76 m

4.3 Ortorretificação da Imagem QuickBird

A disponibilidade dos GCP (**Anexo 4**), dos RPC e do MDE da área de estudo permitiu o desenvolvimento da ortorretificação da imagem QuickBird. Inicialmente foi verificado o deslocamento absoluto da imagem QuickBird em relação aos GCP, sendo este da ordem de 74 m (**Figura 37 - a**). Este elevado valor está relacionado com o fato da imagem QuickBird ser disponibilizada em WGS84, enquanto os GCP foram pós-processados em SAD69.

O processo de ortorretificação foi desenvolvido de três formas:

- a) Ortorretificação utilizando os RPC originais disponibilizados com a imagem QuickBird e o MDE da área de estudo. Este procedimento foi realizado na cena inteira, sendo recortada a área de estudo, após a finalização do procedimento (**Figura 37 - b**);
- b) Ortorretificação utilizando os RPC originais disponibilizados com a imagem QuickBird, o MDE e 14 GCP. Neste procedimento houve a necessidade de ortorretificar toda a cena e após finalizar o

procedimento, recortar a área de estudo (IMAGEM, 2007). O RMS da ortorretificação, utilizando esta técnica, foi de 1,53 pixels, correspondendo a 0,92 metros (**Figura 37 - c**);

c) Utilização dos RPC calculados a partir do GCP, o MDE e os 14 GCP. Neste procedimento houve a possibilidade de recortar previamente a área de estudo e após proceder à ortorretificação. O RMS da ortorretificação, utilizando esta técnica, foi de 1,21 pixels, correspondendo a 0,73 metros (**Figura 37 - d**).

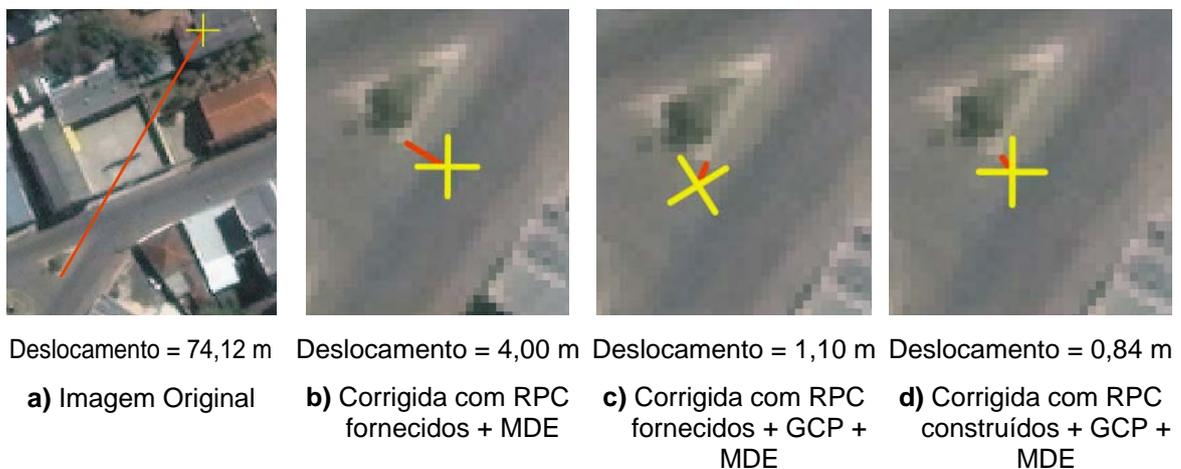


Figura 37 - Exemplos dos resultados obtidos na ortorretificação

Conforme pode ser observado na figura acima, os deslocamentos diminuem à medida que melhoram os dados de entrada da ortorretificação. Pelos erros médios quadráticos é válido dizer que as ortoimagens geradas somente com os RPC não apresentam qualidade posicional compatível com a base cartográfica. Por sua vez, ortoimagens geradas utilizando os RPC originais e os RPC calculados a partir de GCP, juntamente com o MDE e GCP, apresentam um resultado compatível com a escala 1:2.000, da base cartográfica. Cabe a ressalva que o procedimento de ortorretificação utilizando RPC calculados apresenta resultados cerca de 25% superiores aos obtidos com os RPC disponibilizados com a imagem.

4.4 Modelo Digital de Elevação

Conforme descrito no Capítulo III, o MDE da área de estudo foi gerado a partir das curvas de nível, em escala 1:2.000, pelo método da Triangulação de

Delaunay, com a remoção do efeito de “túnel” e “ponte”. A resolução das células do MDE foi igualada à resolução da imagem QuickBird, ou seja, 0,60 metros. A menor altitude registrada na área de estudo corresponde à cota topográfica de 13 metros e a maior altitude consiste da cota topográfica de 109 metros, ambas em relação ao nível do mar. A **Figura 38** apresenta o MDE da área de estudo.

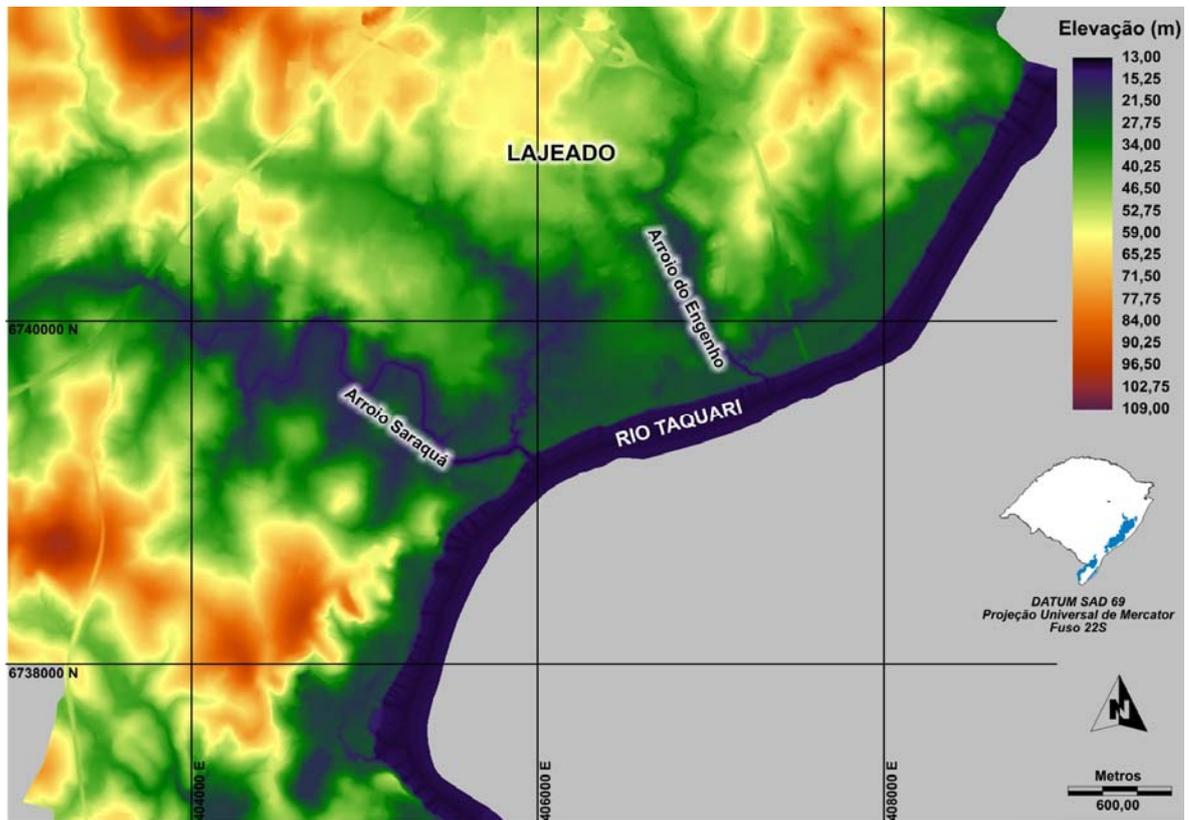


Figura 38 - Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo

4.5 Simulação e Mapeamento das Cotas de Inundação

Como visto anteriormente, o nível de referência do Rio Taquari na cidade de Lajeado, corresponde a cota topográfica de 13 metros. Em épocas de inundações, a amplitude máxima de elevação do nível da água do Rio Taquari, já registrada, foi de aproximadamente 17 metros, quando alcançou a cota topográfica de 29,92 m. Os primeiros impactos e prejuízos começam a ocorrer a partir da elevação do nível da água do rio acima da cota topográfica de 19 metros (6 metros acima do nível de referência do rio). Foram simulados os níveis de inundação, com equidistância de um metro, da cota topográfica de 13 m até a cota topográfica de 30 m. A **Figura 39 - a a g**, apresenta a simulação das áreas sujeitas às inundações, com equidistância de 3 em 3 metros.



Figura 39 - a - Nível de referência do Rio Taquari (13 metros)

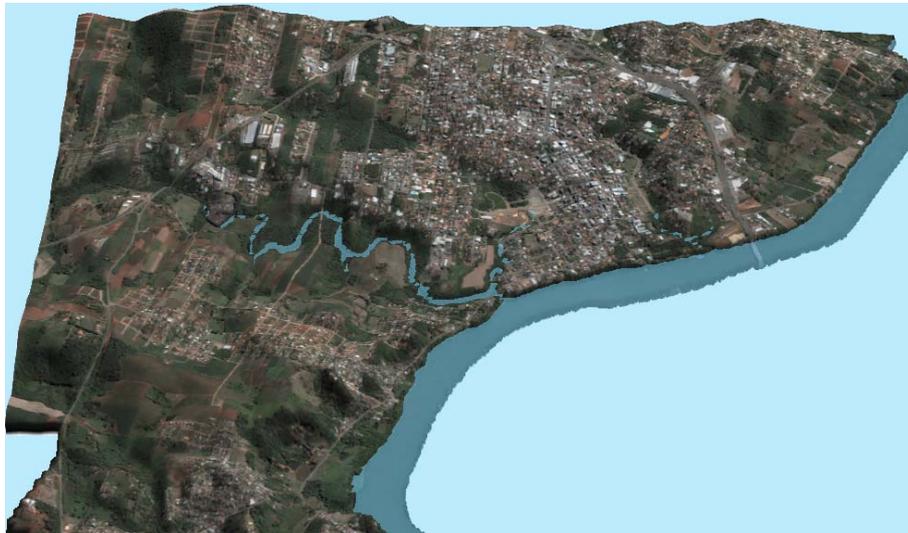


Figura 39 - b - Cota de inundação de 16 metros

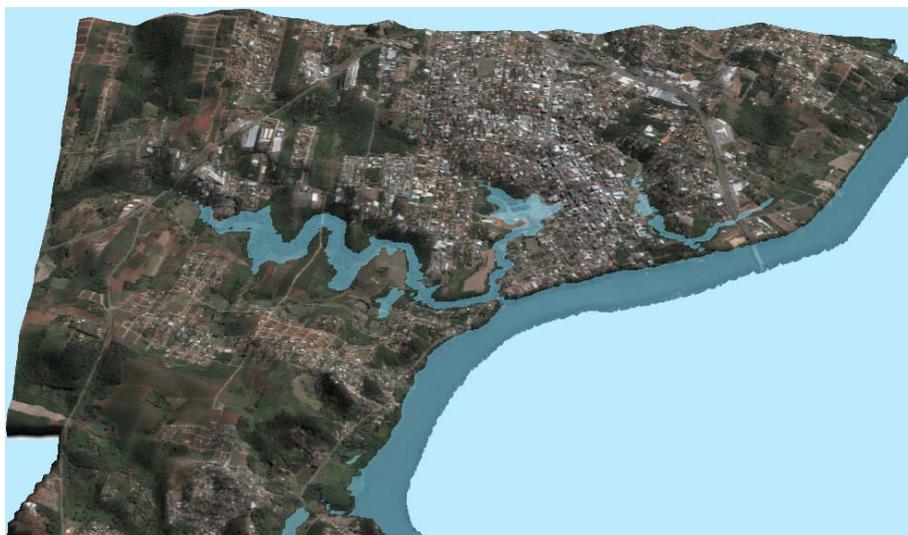


Figura 39 - c - Cota de inundação de 19 metros

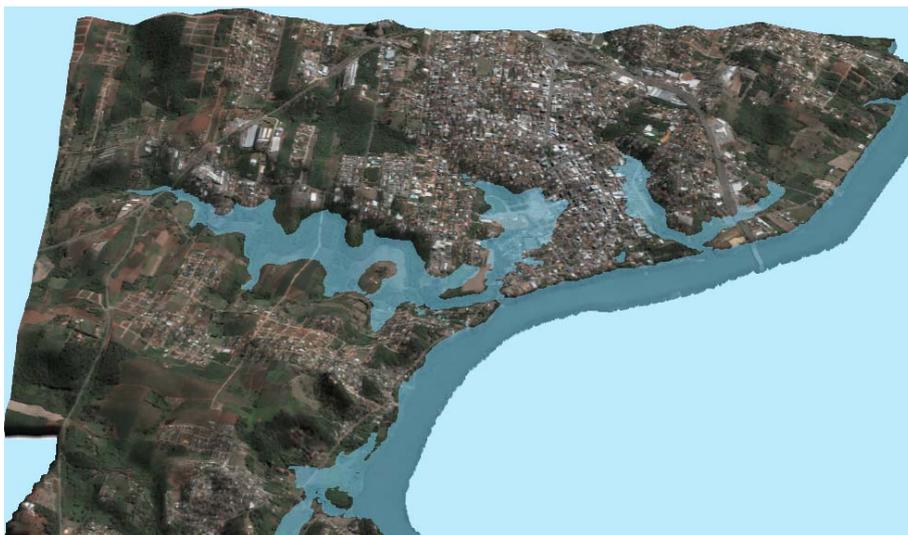


Figura 39 - d - Cota de inundação de 22 metros



Figura 39 - e - Cota de inundação de 25 metros



Figura 39 - f - Cota de inundação de 28 metros



Figura 39 - g - Cota de inundação de 30 metros

A Figura 40 apresenta a carta de inundação da cidade de Lajeado, sintetizando a simulação das áreas sujeitas às inundações. O Anexo 5 apresenta a carta de inundação da cidade de Lajeado com maior detalhe.

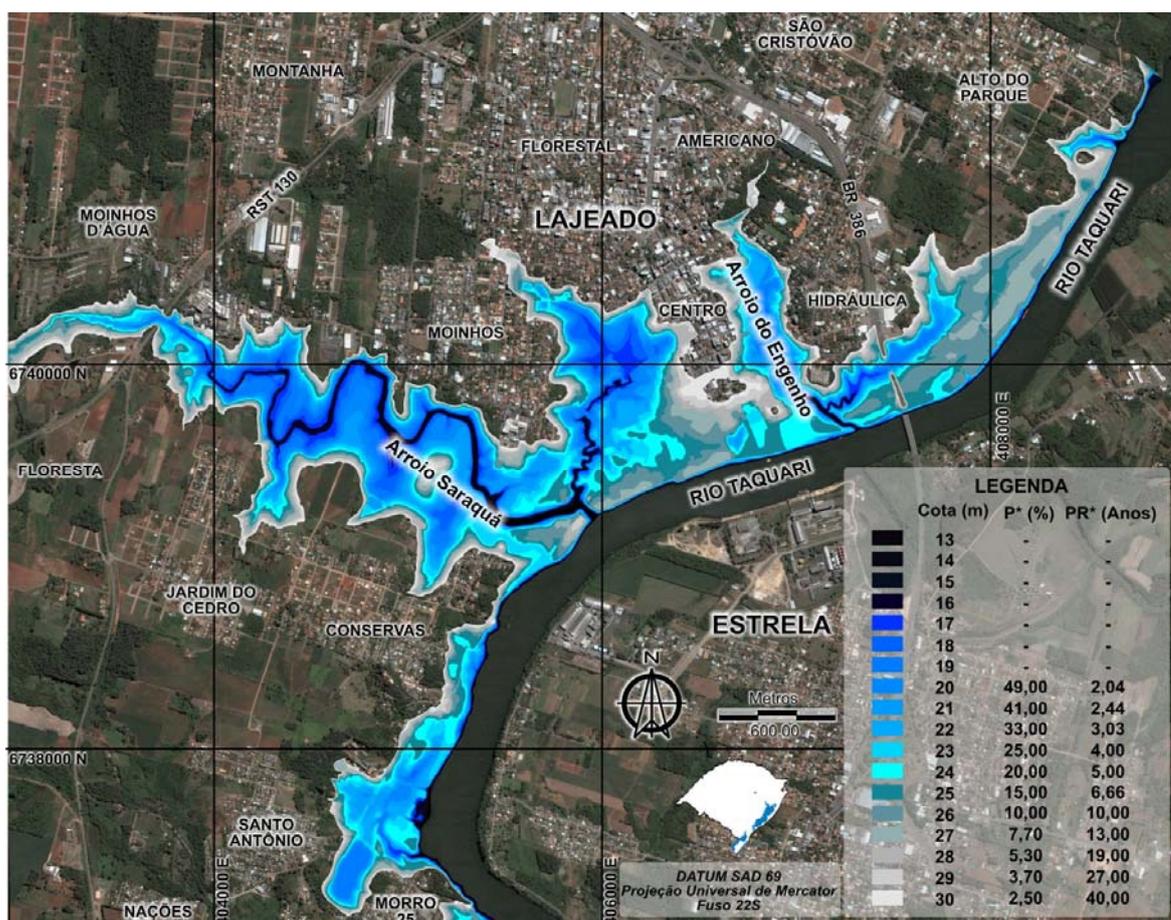


Figura 40 - Carta de inundação da cidade de Lajeado

* Cálculos da probabilidade do risco anual de inundação e do período de retorno realizados, para os diferentes níveis de inundação, por REZENDE & TUCCI (1979) apud FLINTSCH (2002).

Na área de estudo, a área total sujeita às inundações corresponde a 416,81 ha. A **Tabela 10** apresenta a área inundada por cada cota de inundação.

Tabela 10 - Área inundada por cada cota de inundação na área de estudo.

Cota (m)	Área (ha)	%	Cota (m)	Área (ha)	%
13	6,58	1,58	22	163,68	39,27
14	10,04	2,41	23	194,01	46,55
15	14,01	3,36	24	231,43	55,52
16	20,15	4,83	25	274,34	65,82
17	33,69	8,08	26	319,38	76,63
18	52,40	12,57	27	354,33	85,01
19	79,93	19,18	28	376,98	90,44
20	104,64	25,10	29	397,41	95,35
21	132,80	31,86	30	416,81	100,00

Observando a **Tabela 10**, nota-se que a elevação do nível da água do Rio Taquari em até 6 m acima do nível de referência, i.e., quando alcança a cota topográfica de 19 m, a área inundada corresponde a 19,18% da área total sujeita às inundações. No intervalo considerado, a área inundada tem incremento médio de 13,32 ha/cota de inundação. Por sua vez, da cota de inundação de 20 m até 30 m, o incremento médio da área inundada por cada cota de inundação é de 30,63 ha. Esta diferença apresenta relação direta com a declividade do terreno e será abordada no Capítulo 4.5.2. O **Gráfico 10** ilustra a área inundada em função da cota de inundação.

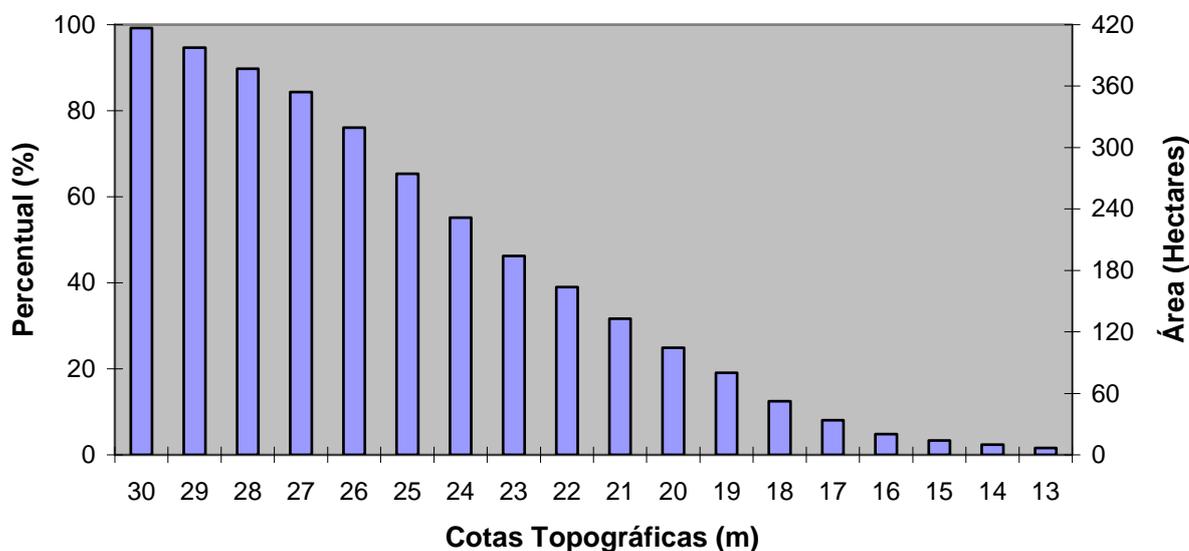


Gráfico 10 - Área inundada em função da cota de inundação

4.5.1 Validação das Cotas de Inundação Simuladas

A validação da simulação das cotas de inundação foi realizada de forma heurística e matemática, utilizando pontos de controle marcados durante o pico da inundação com DGPS, GPS de navegação e fotografias aéreas e tomadas ao solo. Importante destacar que para fins de quantificação matemática, os registros fotográficos foram transformados em pontos de controle. A validação foi realizada para a cota de inundação simulada de 25,97 m, pois este nível representa a última inundação registrada na área de estudo (**Figura 41**).



Figura 41 - Vista área da inundação de 24 de setembro de 2007 ao longo do Arroio Saraquá

Na validação foi medida a discrepância vertical e horizontal da cota de inundação simulada com a área de inundação observada do solo, representada pelos pontos de controle. Para cada ponto de controle foi medido o erro altimétrico (ϵ_a) em relação ao MDE (erro inerente à base topográfica) e o erro horizontal (ϵ_d), relacionado com a diferença entre a área de inundação simulada e a observada no solo. As **Figuras 42 e 43** apresentam a localização dos 26 pontos de controle utilizados para validar a cota de inundação simulada de 25,97 m, respectivamente sobre o MDE e sobre a imagem QuickBird ortorretificada.

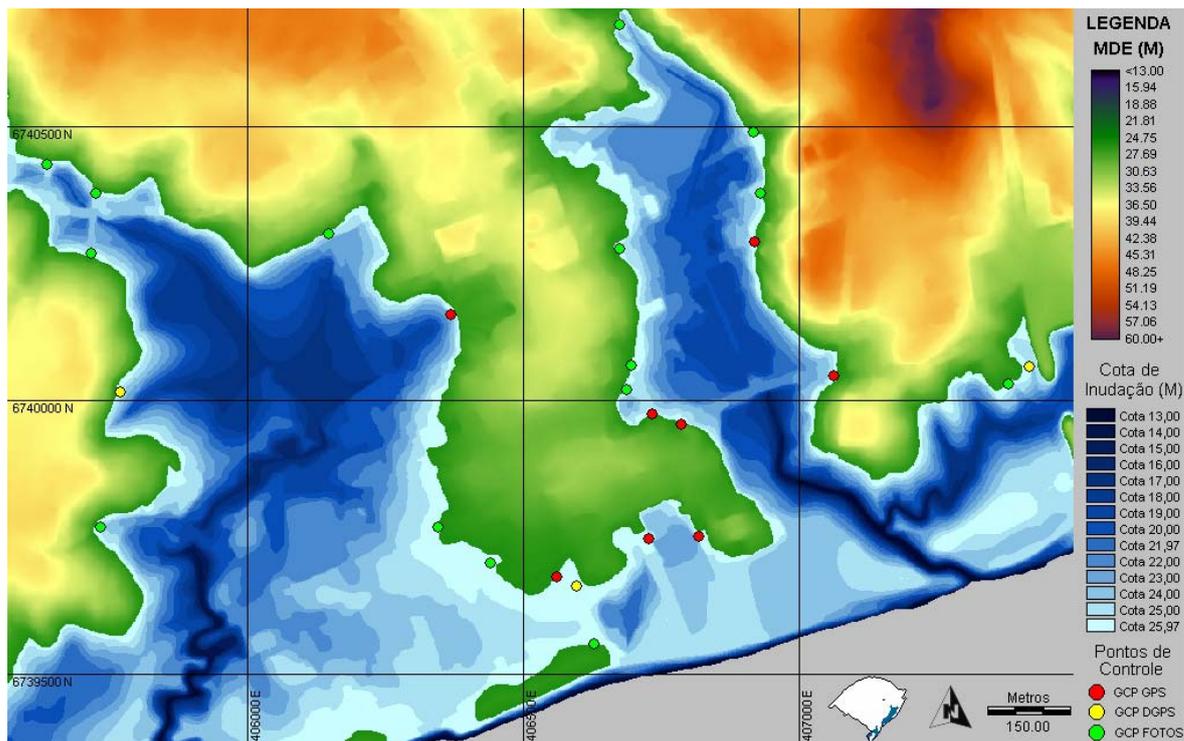


Figura 42 - Validação altimétrica da cota de inundação simulada de 25,97 m



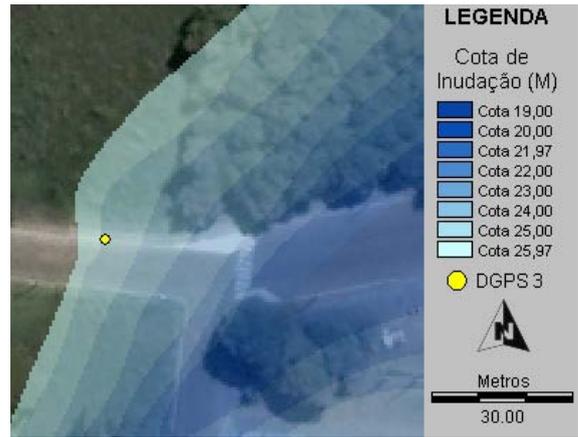
Figura 43 - Validação horizontal da cota de inundação simulada de 25,97 m

A Tabela 11 apresenta a medida das discrepâncias altimétricas (ϵ_a) e horizontais (ϵ_d) da cota de inundação simulada de 25,97 metros em relação à área inundada observada, em função da inundação de 24 de setembro de 2007.

Tabela 11 - Medida das discrepâncias altimétricas (ϵ_a) e horizontais (ϵ_d) da cota de inundação simulada de 25,97 metros, em função da inundação de 24 de setembro de 2007, registrada na área de estudo.

GCP	X (E)	Y (N)	Cota Inundação (m)	Altitude MDE (m)	ϵ_a (m)	ϵ_d (m)
DGPS 1	407416,63	6740064,00	25,97	24,67	1,33	13,77
DGPS 2	406595,98	6739664,76	25,97	25,80	0,20	13,03
DGPS 3	405771,04	6740017,32	25,97	24,90	1,10	5,50
GPS 4	406919,03	6740291,27	25,97	25,56	0,44	4,46
GPS 5	407061,88	6740048,63	25,97	25,29	0,71	6,20
GPS 6	406368,55	6740158,45	25,97	23,21	2,79	10,60
GPS 7	406785,91	6739959,11	25,97	25,82	0,18	3,51
GPS 8	406733,69	6739979,05	25,97	25,67	0,33	4,92
GPS 9	406818,91	6739755,11	25,97	25,37	0,63	8,80
GPS 10	406727,20	6739751,12	25,97	25,13	0,87	15,03
GPS 11	406561,16	6739680,78	25,97	25,97	0,03	1,63
P-Foto 12	405734,87	6739771,10	25,97	24,82	1,18	8,94
P-Foto 13	406929,02	6740381,00	25,97	25,62	0,38	3,54
P-Foto 14	406629,39	6739559,44	25,97	25,93	0,07	1,43
P-Foto 15	406674,85	6740687,86	25,97	25,66	0,34	2,73
P-Foto 16	406147,80	6740307,62	25,97	25,65	0,35	1,64
P-Foto 17	406915,99	6740492,21	25,97	25,63	0,37	3,64
P-Foto 18	405726,71	6740380,19	25,97	25,54	0,46	3,51
P-Foto 19	405718,27	6740270,91	25,97	25,12	0,88	6,58
P-Foto 20	405638,77	6740432,86	25,97	25,25	0,75	5,44
P-Foto 21	406688,21	6740022,87	25,97	25,53	0,47	4,98
P-Foto 22	406694,99	6740067,73	25,97	25,90	0,10	2,63
P-Foto 23	407378,97	6740032,55	25,97	25,49	0,51	5,45
P-Foto 24	406345,80	6739771,06	25,97	25,88	0,12	4,44
P-Foto 25	406440,81	6739707,24	25,97	25,82	0,18	13,00
P-Foto 26	406675,48	6740278,88	25,97	25,36	0,64	8,15
Média	-	-	-	25,41	0,59	6,29
Desvio Padrão				0,57	0,57	3,97

O ϵ_a esperado para cada GCP era de até 1 m e é inerente à escala 1:2.000 da base topográfica. Como pode ser visto na tabela acima, utilizando 26 GCP, o erro altimétrico médio foi de 0,59 m, com desvio padrão (σ) de 0,57 m. Para os mesmos GCP, o erro médio horizontal da cota de inundação simulada de 25,97 m, em relação à área inundada observada foi de 6,29 m e σ de 3,97 m. O coeficiente de *Pearson* (r) entre ϵ_a e ϵ_d foi de 0,47347. Apesar do r ter valor baixo, este é significativo (alfa de 0,05; P-value = 0.01396), indicando haver relação linear entre o ϵ_a e ϵ_d , isto é, à medida que aumenta o erro da base topográfica, o erro na simulação da área inundada aumenta. Como será visto na seqüência, além do ϵ_a , a declividade do terreno também está associada com ϵ_d . As **Figuras 44, 45 e 46** apresentam exemplos da área inundada simulada pela cota de inundação de 25,97 m e o ajuste dos GCP que representam a área inundada observada no solo, em função da inundação de 24 de setembro de 2007.



a) Mapeamento da área inundada com DGPS

b) Validação da simulação da cota de 25,97 m

Figura 44 - Validação da cota de inundação simulada de 25,97 m com GCP obtidos com DGPS



a) Mapeamento da área inundada com GPS

b) Validação da simulação da cota de 25,97 m

Figura 45 - Validação da cota de inundação simulada de 25,97 m com GCP obtidos com GPS



a) Mapeamento da área inundada com fotografia

b) Validação da simulação da cota de 25,97 m

Figura 46 - Validação da cota de inundação simulada de 25,97 m com GCP obtidos com fotografias aéreas e tomadas ao solo

As **Figuras 47 e 48** apresentam uma vista aérea da cidade de Lajeado, durante a inundação registrada no dia 24 de setembro de 2007.



Figura 47 - Vista área da inundação de 24 de setembro de 2007, ao longo do Arroio do Engenho



Figura 48 - Vista área em detalhe da inundação de 24 de setembro de 2007, ao longo do Arroio do Engenho

4.5.2 Inundação X Declividade

As declividades das áreas sujeitas às inundações (**Figura 49**) foram geradas a partir do MDE da área de estudo e reclassificadas. A **Tabela 12** e o **Gráfico 11** apresentam a evolução da área inundada em função da declividade.

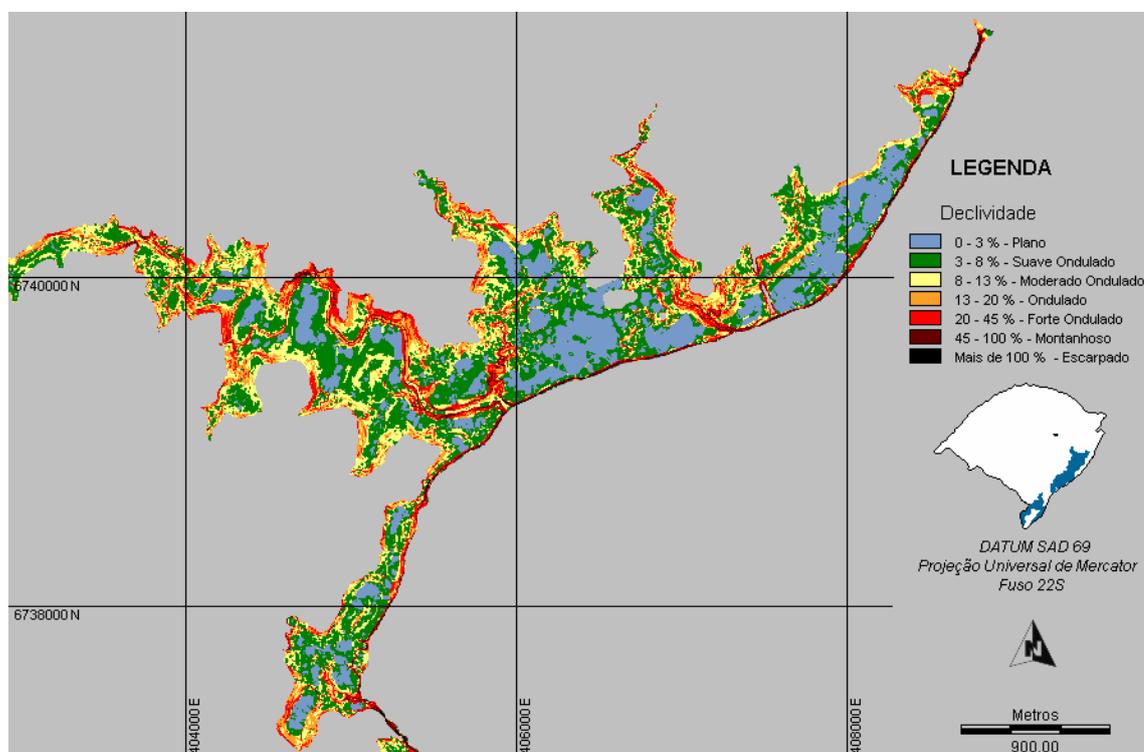


Figura 49 - Mapa da declividade da área de estudo

Tabela 12 - Área inundada em função da declividade.

Cota (m)	Declividade (%)							Área Total (Ha)
	0 - 3	3 - 8	8 - 13	13 - 20	20 - 45	45 - 100	Mais de 100	
13	0,73	0,90	1,53	1,50	1,11	0,68	0,11	6,58
14	0,74	1,02	1,82	2,37	2,13	1,65	0,30	10,03
15	0,75	1,17	2,25	3,19	3,32	2,83	0,50	14,01
16	1,04	2,15	3,28	3,95	5,10	3,92	0,70	20,14
17	3,71	6,64	5,38	5,43	6,90	4,70	0,93	33,69
18	7,45	14,98	7,62	6,88	8,75	5,55	1,16	52,40
19	14,22	27,64	11,04	8,49	10,76	6,39	1,39	79,93
20	20,06	36,41	15,38	10,71	13,18	7,34	1,56	104,63
21	25,61	46,62	20,47	14,30	15,86	8,30	1,64	132,80
22	31,32	58,32	27,03	17,54	18,69	9,07	1,71	163,68
23	34,30	71,77	33,66	21,31	21,37	9,83	1,77	194,01
24	42,96	85,92	40,86	25,30	24,12	10,45	1,82	231,43
25	55,53	101,42	47,83	29,75	26,93	11,01	1,86	274,34
26	72,58	114,89	54,48	34,23	29,85	11,46	1,89	319,38
27	82,32	126,41	60,87	38,44	32,46	11,92	1,91	354,33
28	84,33	133,31	67,19	42,76	35,06	12,40	1,93	376,97
29	85,42	139,20	73,06	47,04	37,85	12,89	1,96	397,41
30	87,32	143,64	78,06	51,40	41,03	13,39	1,97	416,81

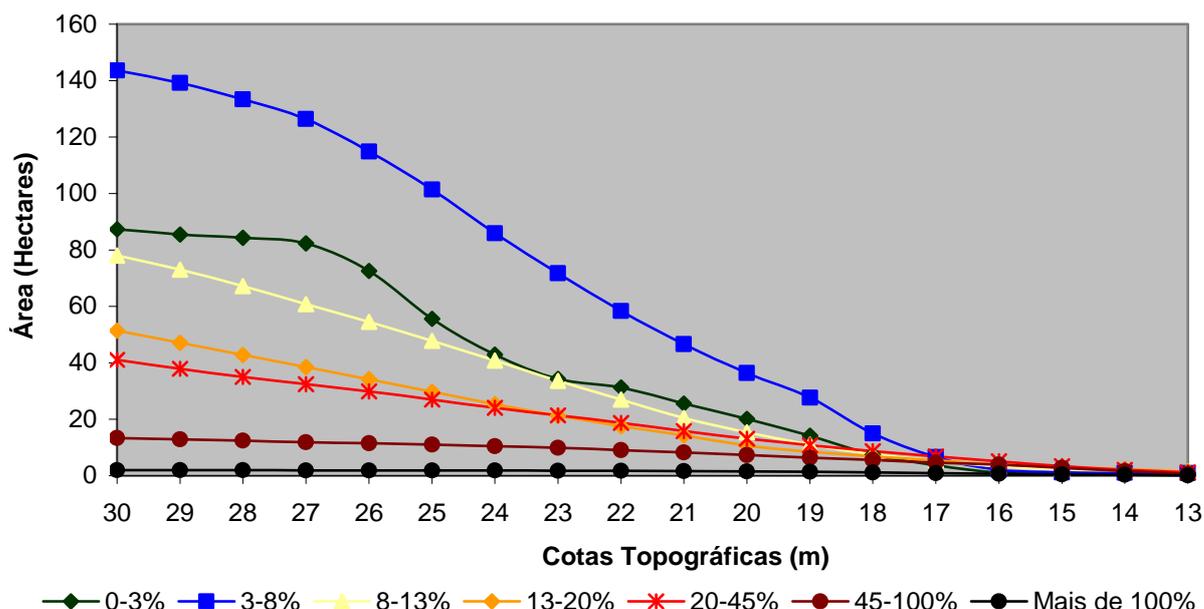


Gráfico 11 - Evolução da área inundada em função da declividade

Observando o gráfico acima e a **Figura 49** percebe-se que até a cota de inundação de 19 metros, as declividades têm características de moderado ondulado (8-13%) a escarpado (mais de 100%), caracterizando-se, portanto, como áreas de elevada declividade. Esta característica está relacionada com o aprofundamento do canal do Rio Taquari e afluentes, de modo a promover a inundação de uma área reduzida (19,18%). A partir da cota de 19 metros, o terreno passa a ter característica predominante plana (0-3%) a moderado ondulado (8-13%), correspondendo a 61,45% da área sujeita às inundações. Esta característica do relevo favorece a inundação de grandes áreas.

A pequena variação altimétrica, que caracteriza as áreas mais planas, implica em um controle maior sobre a base cartográfica. Observando a evolução das áreas inundadas em função da declividade, nota-se que nas áreas de maior declividade (cotas de inundação de 13 - 19 metros), a variação altimétrica de 1 metro resulta em uma área inundada média de 13,32 hectares, enquanto que nas áreas mais planas (cotas de 20 a 30 metros) a variação altimétrica do terreno em 1 metro resulta em uma área inundada média de 30,63 hectares.

Sintetiza-se da análise da declividade que para proceder ao mapeamento das áreas de inundação, em terrenos com característica plana, há a necessidade de utilizar dados altimétricos com precisão submétrica, sob o risco de desqualificar o mapeamento e colocar em risco planos de evacuação e remoção de pessoas nas áreas sujeitas às inundações.

4.5.3 Uso e Cobertura da Terra

Conforme descrito no capítulo da metodologia, o mapa de uso e cobertura da terra foi obtido a partir de vetorização da imagem Quickbird, de 28 de fevereiro de 2006. A **Tabela 13** apresenta a área ocupada e o percentual de cada classe de uso e cobertura da terra das áreas sujeitas às inundações, enquanto a **Figura 50** expõe o mapa temático de uso e cobertura da terra.

Tabela 13 - Uso e cobertura da terra das áreas sujeitas às inundações.

Classe	Área (Ha)	Percentual (%)
Floresta Nativa - FED*	86,99	20,87
Floresta em Regeneração Inicial	37,72	9,05
Floresta em Regeneração Média	12,76	3,06
Floresta em Regeneração Avançada	20,71	4,97
Floresta Industrial (Exótica)	14,64	3,51
Pastagens / Gramíneas	50,72	12,17
Agricultura	37,05	8,89
Uso Misto (Residencial / Comercial)	88,93	21,34
Uso Industrial	6,72	1,61
Área de Lazer / Recreação	18,02	4,32
Estradas	32,71	7,85
Água	9,84	2,36
Total	416,81	100,00

* FED - Floresta Estacional Decidual

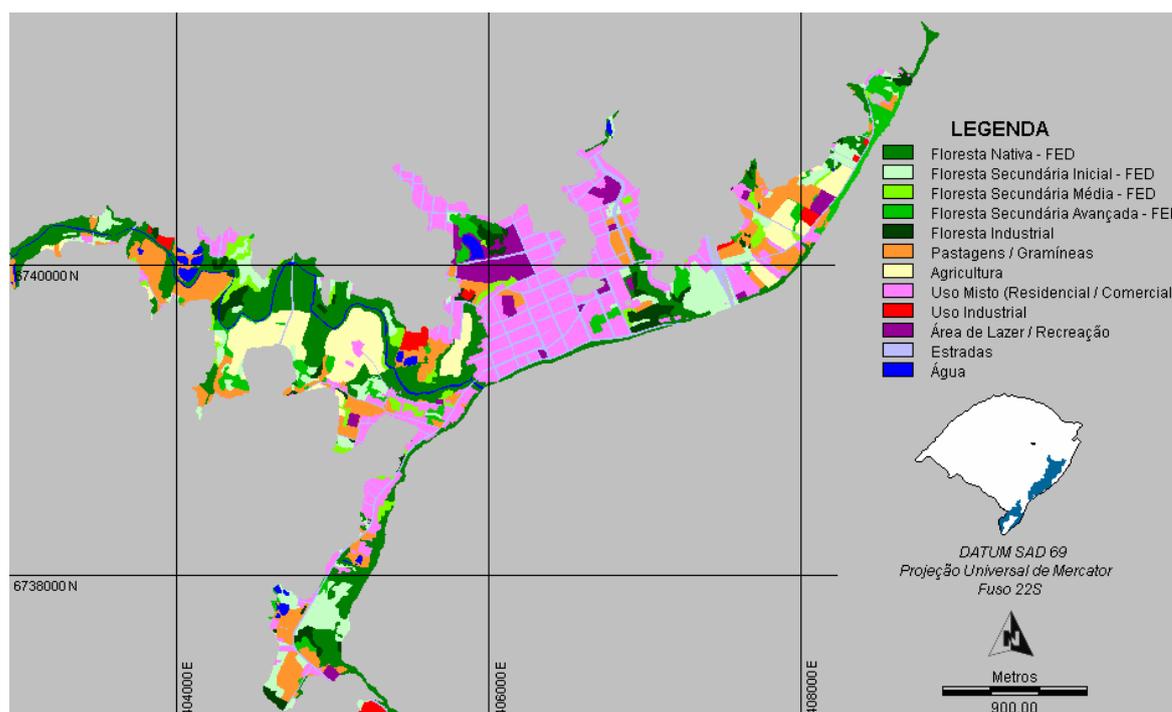


Figura 50 - Uso e cobertura da terra das áreas sujeitas às inundações

Para proceder à análise do padrão de uso da terra das áreas de inundação, optou-se por reclassificar o uso e cobertura da terra em 4 classes:

- **Uso Florestal:** (Floresta Nativa, Floresta em Regeneração Inicial, Floresta em Regeneração Média, Floresta em Regeneração Avançada e Floresta Industrial (Exótica));
- **Uso Agropecuário:** (Pastagens / Gramíneas e Agricultura);
- **Uso Urbano:** (Uso Misto (Residencial / Comercial), Uso Industrial, Área de Lazer / Recreação e Estradas);
- **Água.**

O uso florestal corresponde a 41,46%, o uso agropecuário soma 21,06%, o uso urbano corresponde a 35,12% e a água 2,36% das áreas sujeitas às inundações. Nestas áreas, quando há ocorrência de inundações, os principais danos ocorrem nas áreas de uso urbano. A **Tabela 14** apresenta a área ocupada por cada tipologia de uso e cobertura da terra em função da cota de inundação. A mesma situação é ilustrada no **Gráfico 12**.

Tabela 14 - Uso e cobertura da terra em função da cota de inundação.

Cota (m)	Uso Florestal (Ha)	Uso Agropecuário (Ha)	Uso Urbano (Ha)	Água (Ha)	Área Total (Ha)
13	4,60	0,01	0,07	1,81	6,49
14	7,32	0,02	0,09	2,52	9,94
15	10,56	0,10	0,14	3,12	13,92
16	16,21	0,21	0,26	3,37	20,05
17	25,91	1,45	2,67	3,56	33,60
18	38,41	3,84	5,54	4,51	52,30
19	52,23	12,80	9,35	5,46	79,84
20	64,86	18,99	14,66	6,03	104,54
21	78,15	27,52	20,47	6,57	132,71
22	92,08	34,46	29,95	7,09	163,58
23	105,13	41,67	39,30	7,81	193,92
24	119,87	49,49	53,90	8,08	231,34
25	132,43	57,58	75,74	8,49	274,24
26	144,87	69,82	95,93	8,67	319,28
27	153,63	77,98	113,55	9,07	354,23
28	160,34	81,81	125,38	9,34	376,87
29	166,72	84,89	136,03	9,66	397,30
30	172,82	87,77	146,38	9,84	416,81

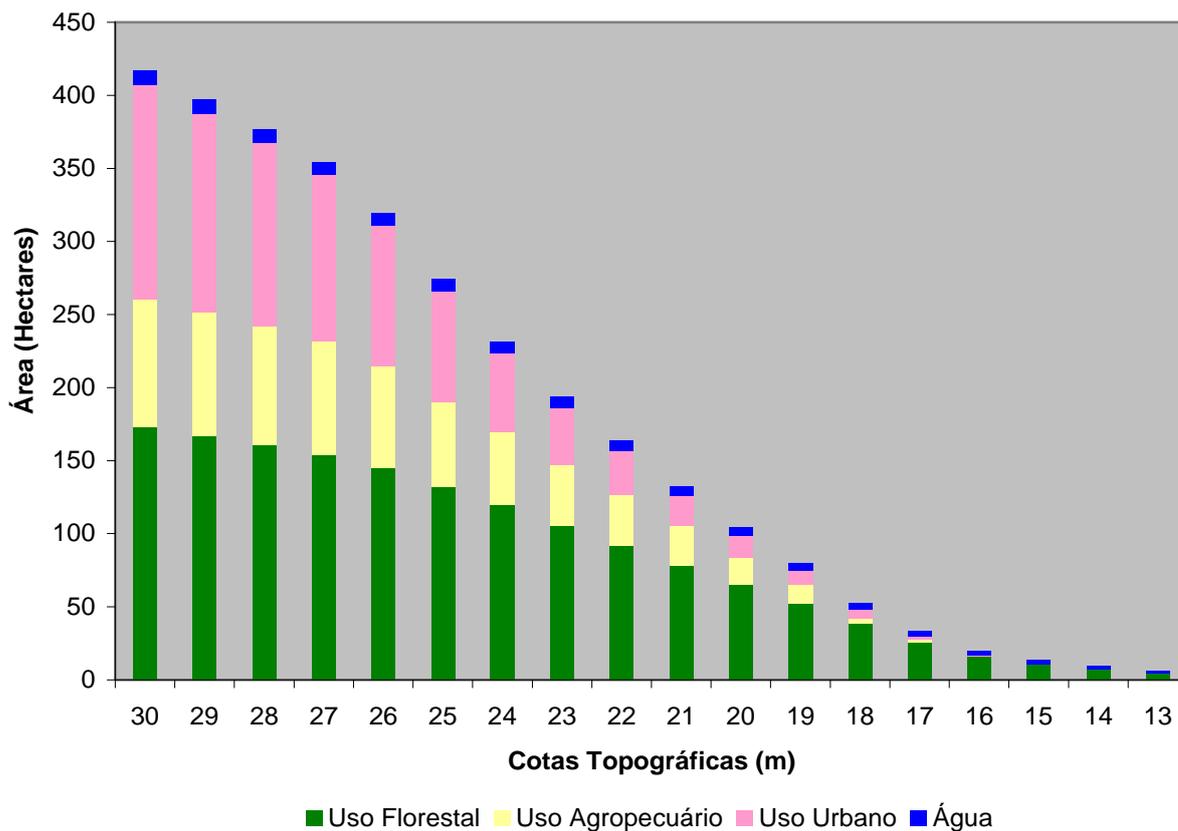


Gráfico 12 - Uso e cobertura da terra em função da cota de inundação

Observando o gráfico acima, nota-se que os usos urbanos concentram-se predominantemente a partir da cota de inundação de 19 metros. Abaixo desta cota há predomínio de cobertura florestal, compondo a vegetação ciliar do Rio Taquari e afluentes. Enfatizando a análise nos usos urbanos, nota-se que das cotas de inundação de 19 metros até a cota de 30 metros, em média, a área urbanizada inundada é de 12,46 hectares por cota de inundação.

O Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado de Lajeado estabelece que abaixo da cota topográfica 27 metros seja vedado o parcelamento do solo, para fins urbanos. A análise específica padrão de uso do solo, abaixo da cota topográfica de 27 metros, permite constatar que 95,93 hectares apresentam usos urbanos mistos e estão sujeitos aos eventos de inundação. Estas áreas de uso urbano misto consistem de áreas de recreação, estradas e áreas residenciais, comerciais, industriais e institucionais.

Como visto nos capítulos anteriores, a partir da cota topográfica de 19 metros, as inundações começam a causar danos e prejuízos econômicos em Lajeado. Desta cota topográfica até a de 26 m, a área média inundada por cada

cota de inundação é de 42,41 hectares de uso urbano misto. Considerando o período de retorno calculado para estas cotas de inundação, como sendo inferior a 10 anos, pode-se concluir que a ocupação destas áreas implica em diversos efeitos negativos associados quando da ocorrência de inundações. Dentre estes têm destaque: perda de móveis e veículos, danificação de edificações e infra-estruturas, alteração e interrupção do tráfego, danos materiais, problemas de saneamento e até perda de vidas. Indiretamente e com a mesma periodicidade, toda a sociedade tem prejuízos financeiros, da ordem de centenas de milhares de reais, decorrentes da remoção e realocação humana, limpeza de edificações e ruas e recuperação de infra-estruturas destruídas.

Importante ainda destacar que os efeitos negativos associados com as inundações continuarão sendo contabilizados na cidade de Lajeado, mantido o mesmo padrão de ocupação do solo das áreas de risco de inundação. É imprescindível que o poder executivo municipal, de forma alguma, permita a ocupação das áreas sujeitas às inundações por subabitações ou outras habitações de baixa renda, abaixo da cota topográfica de 27 metros, sob o risco de agravar ainda mais a situação.

CAPÍTULO V - CONCLUSÕES

Os problemas ambientais não atingem igualmente todo o espaço urbano. Atingem muito mais os espaços físicos de ocupação das classes sociais menos favorecidas do que os das classes mais elevadas. A distribuição espacial das primeiras está associada à desvalorização de espaço, principalmente pela proximidade dos leitos de inundação dos rios. Desta forma as inundações continuam e vitimam principalmente as classes pobres.

A previsão e o mapeamento das áreas sujeitas às inundações são a base para a implantação de um sistema de alerta. Este, por sua vez, constitui-se em uma das principais medidas para minimizar os efeitos negativos das inundações sobre a sociedade, evitando a adoção de ações isoladas que tendem apenas a transferir os problemas gerados pelas inundações. É ingenuidade do homem imaginar que poderá controlar totalmente as inundações; as medidas sempre visam minimizar as suas conseqüências.

O modelo cartográfico proposto, descrito e aplicado na cidade de Lajeado mostrou-se adequado para proceder à simulação, ao mapeamento e à caracterização do padrão de ocupação das áreas sujeitas às inundações. Pela característica altimétrica do relevo da cidade de Lajeado, a escala 1:2.000 da base topográfica mostrou-se adequada para obter a precisão altimétrica global inferior a 1 metro, estipulada empiricamente, para proceder ao mapeamento da área inundada por determinada enchente.

Apesar de não conseguir-se comprovar matematicamente, cabe a ressalva que para o intervalo de declividade de 0 - 3% (área plana), as curvas de nível em escala 1:2.000 apresentam limitações para o mapeamento das áreas urbanas atingidas por determinada inundação. Nas áreas de relevo plano, a precisão de 1 metro (ou mesmo submétrica) pode implicar em erros horizontais,

da cota de inundação simulada em relação à área inundada observada no solo, da ordem de dezenas de metros, precisão que não pode ser aceita para áreas urbanas.

O método matemático de previsão da cota de inundação para a cidade de Lajeado, por sua vez, também apresentou limitações, não alcançando a precisão de 1 metro estipulada como base para o modelo cartográfico em questão. Esta condição é devida às limitações quanto à captação dos dados, à falta de dados do nível dos tributários do Rio Taquari, além de, matematicamente não considerar dados de precipitação da bacia hidrográfica. Imagina-se que a inclusão destes dados poderia aumentar o intervalo de confiança do método matemático de previsão e desta forma compatibilizar-se com a escala do mapeamento.

Com relação ao uso do GPS Diferencial, pode-se considerar que apresenta praticidade e precisão adequada para coletar os pontos de controle utilizados para a ortorretificação da imagem QuickBird e para demarcar o local exato alcançado, quando da ocorrência de determinada inundação.

No que diz respeito às áreas atingidas pelas inundações, a utilização das imagens do satélite QuickBird mostrou-se adequada para diagnosticar as áreas urbanizadas atingidas por determinada inundação. Com estas imagens é possível identificar, com detalhe, as edificações e vias de circulação sujeitas às inundações. Além disso, permite mapear o uso e cobertura da terra nas demais áreas, permitindo a fiscalização e o planejamento do padrão de ocupação destas áreas.

A utilização conjunta das chamadas geotecnologias e técnicas de representação e análise espacial disponíveis nos SIG mostraram-se altamente promissoras na previsão e fidedignas na simulação, mapeamento e caracterização das áreas sujeitas às inundações na cidade de Lajeado.

5.1 Considerações Finais

As atenções atuais voltam-se para gerar instrumentos técnico-científicos capazes de produzir conhecimentos necessários para adoção de um

planejamento territorial que seja socialmente justo, ecologicamente sustentável e economicamente viável.

O modelo cartográfico apresentado e discutido nesta dissertação de mestrado constitui-se em uma alternativa simples para estudar inundações em áreas urbanas, decorrentes de um processo natural de inundação.

Apesar de na atualidade existirem diversos satélites de observação da Terra em órbita, obtendo dados diariamente da superfície do planeta, não foi possível obter imagens de satélite da área de estudo, no momento de ocorrência de uma inundação. A curta duração do pico de determinado evento e a associação de nebulosidade ao fenômeno, dificulta a utilização de imagens obtidas pelos satélites de observação da Terra. Desta forma, pode-se considerar que ainda há limitações e necessidade de avanços tecnológicos para permitir a avaliação de fenômenos naturais extremos, como as inundações, principalmente em áreas urbanas, com o uso imagens de satélites de observação da Terra.

A disponibilidade crescente de imagens de radar, apesar de não ter-se avaliado esta questão nesta dissertação, pode atender, satisfatoriamente, estudos de mapeamento das áreas de inundação em áreas urbanas, uma vez que para grandes áreas, o uso de imagens de radar já está consagrado.

Ressalta-se que o método matemático de previsão e o modelo cartográfico apresentado permitem o conhecimento da cota de inundação e a área urbana a ser atingida por determinada inundação, com antecedência de 5 a 6 horas na cidade de Lajeado, em função do nível do Rio Taquari a montante.

A presente dissertação contribui, diretamente, no sentido de aperfeiçoar o atual sistema de previsão e alerta de enchente (SPAEE) implantado na região do Vale do Taquari. O conhecimento antecipado da cota a ser atingida por determinada inundação, a respectiva área a ser inundada e o padrão de ocupação do solo permite estabelecer um plano de evacuação eficiente e antecipar a ação do Conselho Municipal da Defesa Civil na remoção e realocação da população atingida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHSUL - Administração das Hidrovias do Sul. **Enchentes no Rio Taquari** (informações pessoais não publicadas). Porto Alegre: José Luiz Fay de Azambuja, 2007.

ALCOFORADO, R. G. **Sistema de suporte à decisão para previsão e controle de inundações**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Área de Recursos Hídricos - Universidade Federal de Pernambuco. 2000. 156 p.

ALCOFORADO, R. G.; CIRILO, J. A. Sistema de suporte à decisão para análise, previsão e controle de inundações. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 6, n. 3, 2001.

ANSELIM, L. **What is Special about Spatial Data?** Alternative Perspectives on Spatial Data Analysis. Santa Barbara: University of California, National Center for Geographical Information and Analysis. 1989. 9p.

BERNARDI, J.V.E.; LANDIM, P.M.B. **Aplicação do Sistema de Posicionamento Global (GPS) na coleta de dados**. Rio Claro: DGA, IGCE, UNESP, jan. 2002. 31p. (Geomatemática, Texto Didático 10). Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: 26 set. de 2007.

BRANDÃO, A. M. P. M. Clima Urbano e Enchentes na Cidade do Rio de Janeiro. *In* GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da. (org) **Impactos Ambientais Urbanos no Brasil**. 2 ed., Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. 416p.

BRIASSOULIS, H. **Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches**. Lesvos, Greece. University of Aegean, 2000. Disponível em <<http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm>>. Acesso em: 31 out. 2007.

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

BURROUGH, P. A. **Principles of Geographical Information Systems: Methods and requirements for Landuse Planning**. Clarendon, Oxford, 1986.

BÜYÜKSALIH, G.; MURAT, O.; KARSTEN, J. Precise georeferencing of rectified high resolution space images. *Proceedings of International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress*, 20, 2004, Istanbul: ISPRS, 2004. v. 35, p. 184-188.

CARVALHO, M. L. C.; LASARTE, A. E.; SANTOS, E.; DOMIT, V. M. M.; MANASSÉS, E. J. Informação geográfica no Alto Rio Iguaçu na região metropolitana de Curitiba, para gerenciamento de cheias. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (XIII). Belo horizonte. 1999.

CHENG, P.; TOUTIN, T.; ZHANG, Y.; WOOD, M. QuickBird - geometric correction, path and block processing and data fusion. *Earth Observation Magazine (EOM)*, v. 12, n. 3, p. 24-30, maio de 2003.

CIH - Centro de Informações Hidrometeorológicas. **Dados sobre Enchentes no Vale do Taquari** (informações não publicadas). Lajeado: UNIVATES, 2007.

CIMA - Comissão Interministerial para a Preservação da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento. **Subsídios Técnicos para a Elaboração do Relatório Nacional do Brasil para a CNMAD**, Brasília, 1991. 171p.

COLLINS, T. **Disaster Risk for Floods: 1980 - 2000**. United Nations University. Tokyo: 2004. 6 p. Disponível em: <<http://www.unu.edu/news/ehs/floods.doc>> Acesso em: 22 jan. 2008.

CORDINI, J. **O terreno e sua representação**. Apostila didática. UFSC. 2004.

CRÓSTA, A. P.; **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: IG/UNICAMP, 1999. 170p.

COSTA, S. M. F.; FREITAS, R. N.; DI MAIO, A. C. O estudo de aspectos intra-urbanos utilizando imagens CBERS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 881-889. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.15.37/doc/881.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2007.

DESCHAMPS, L. R. A. **Carta Enchente de Gaspar**, Relatório Final Convênio PMB/FURB, 1987.

DIGITALGLOBE, Inc.. **QuickBird Imagery Products: Product Guide**. Longmont, Colorado: DigitalGlobe Inc., 2007. 78p. (Revision 4.7.3)

DNAEE. **Zoneamento de Áreas Inundáveis e do Potencial Erosivo**: Cartas de Enchentes para Cidades do Vale do Rio Itajaí-Açú - SC, Brasília: DNAEE, 1987.

EASTMAN, J. R. **Idrisi Andes Help Contents**. Worcester, MA: Clark Labs University, 2006.

EHLERS, M.; EDWARDS, G.; BEDARD, Y. Integration of remote sensing with geographic information systems: a necessary evolution. *Photogrammetric Engineering e Remote Sensing*, v. 55, n. 11, Nov. 1989. p. 1619-1627.

ENOMOTO, C. F.; MINE, M. R. M. **Método para elaboração de mapas de inundação**: estudo de caso na bacia do Rio Palmital, Paraná. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Setor de Tecnologia. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. 2004. 140 p. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/1884/645>>. Acesso em: 28 jan. 2008.

FAO/IIASA. **Agro-ecological assessments for national planning**: the example of Kenya. Rome: FAO, 1993. (FAO Soils Bul, n. 67).

FELGUEIRAS, C. A.; CÂMARA, G. Modelagem Numérica de Terreno. In: **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos, SP: INPE, 2004. Cap. 7, 36p. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf>>. Acesso em: 27 out. 2005.

FERREIRA, E. R.; BOTH, G.C. Estudo das enchentes no Vale do Taquari: causas e propostas de controle. In: MEEP, 4. Lajeado. **Anais...** Lajeado: UNIVATES, 2001. 171 p.

FERREIRA, E. R.; ECKHARDT, R. E.; HAETINGUER, C.; BOTH, G. C.; FAVA E SILVA, J.; DIEDRICH, V. L.; AZAMBUJA, J. L. F. Sistema de Previsão e Alerta de Enchentes do Vale do Taquari - RS - Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais e Tecnológicos (SIBRADEN), 2, 2007, Santos. **Anais...** São Paulo: ABGE, 2007. Artigos, p. 85. CD-ROM.

FLINTSCH, G. B. A. **Prevenção de Enchentes no Baixo Taquari, Estrela / Bom Retiro do Sul - RS**. Monografia (MBA Internacional em Gestão Ambiental). Laboratório Nacional de Computação Científica e a Proenco Brasil Ltda, Porto Alegre, 2002. 54p.

FLORENZANO, T. G.; PINTO, S. A. F.; VALÉRIO FILHO, M.; NOVO, E. M. L. M.; KUX, H. J. **Utilização de dados TM-Landsat para o mapeamento de áreas submetidas à inundação na Bacia do Rio Parnaíba**. São José dos Campos: INPE, 1988. (INPE-4570-RPE/566).

GARCEZ, L. N. **Hidrologia**. São Paulo: Edgar Blücher, 1967. 249p.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da. (org) **Impactos Ambientais Urbanos no Brasil**. 2 ed., Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. 416p.

JENSEN, J. R.; COWEN, D. C. Remote sensing of urban / suburban infrastructure and socioeconomic attributes. *Photogrammetric Engineering e Remote Sensing*, v. 65, n. 5, 1999. p. 611-622.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malha Municipal Digital do Brasil**: situação em 2001. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat>>. Acesso em: 25 jan. 2008.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Modelo de Ondulação Geoidal**. Rio de Janeiro: IBGE, 2005. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm>. Acesso em: 28 set. 2006.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Contagem da População de 2007**. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat>>. Acesso em: 25 jan. 2008.

IMAGEM. **Tutorial de Erdas Imagine Fundamentos I e Fundamentos II**. Centro de Treinamento. São José dos Campos. 2007.

ITT Visual Informations Solutions. **ENVI 4.4 Help**. Boulder, 2007.

KRÜGER, C. M.; CAMARGO, A. S. G.; GARCIA, K. S. Mapeamento automático de áreas de inundação através de geoprocessamento - aplicação à cidade de União da Vitória. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (XIII). Belo Horizonte. 1999.

LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. Campo Grande: UNIDERP, 2006. 908p.

MEYER, W. B.; TURNER, B. L. (Eds). **Changes in Use and Land Cover: A Global Perspective**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 549p.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, Integração e Aplicação**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001. 536p. (Coleção Geoprocessamento; v. 1).

MONTEIRO, C. A. F. **Clima e Excepcionalismo**. Conjecturas sobre o Desempenho da Atmosfera como Fenômeno Geográfico. Florianópolis: UFSC, 1991. 233p.

_____. **A Interação do Homem-Natureza no Futuro da Cidade**. GEOSUL. Florianópolis. Ano 8, nº. 14, 1992. p. 7 - 136.

MOURA, A. C. M. **Geoprocessamento na Gestão e Planejamento Urbano**: Belo Horizonte: Ana Clara Mourão Moura, 2003. 294p.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento Remoto**: princípios e aplicações. 2 ed., São Paulo: Edgard Blücher, 1993. 308p.

PCI. **Geomatica OrthoEngine**: User Guide Version 9.0. Ontario, Canada: PCI Geomatics Enterprises Inc, May 2003. 168p.

PEUKER, T. K.; FOWLER R. J.; LITTLE, J. M.; MARK, D. M. The Triangulated Irregular Network. *Proceedings of the International Symposium on Cartographic and Computing: Applications in Health and Environment (Auto Carto 4)*, 2, 1979. p. 96-103.

PORTO ALEGRE - Secretaria de Planejamento Municipal. **Plano de Preservação do Ambiente Natural de Porto Alegre** - Primeira Fase / Levantamento Geral Expedido. Porto Alegre, 1975.

RAMALHO-FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995. 65p.

ROCHA, R. S. **Exatidão Cartográfica para as Cartas Digitais Urbanas**. Tese (Doutorado -, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002. 128p.

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

SANTOS, R. F. (ORG.). **Vulnerabilidade Ambiental** - Desastres Naturais ou Fenômenos Induzidos? Brasília: MMA, 2007. 192p.

- SCHULT, S. I. M.; PINHEIRO, A. Ocupação e Controle das Áreas Urbanas Inundáveis. In: **Enchentes na Bacia do Itajaí: 20 Anos de Experiências**. 1 ed., Blumenau: FURB, v. 1, 2003. p. 173-190.
- SEGANTINE, P. C. L. **GPS - Sistema de Posicionamento Global**. Apostila didática da Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Transportes, 1999. 181p.
- SILVA, A. B. **Sistemas de Informações Geo-referenciadas: conceitos e fundamentos**. Campinas: Unicamp, 1999. 236p. (Coleção Livro-Texto).
- SILVA, W. P da. **LabFit Ajuste de Curvas**. Universidade Federal de Campina Grande, DF/CCT. Campina Grande, Paraíba, 2003.
- SILVA, J. X. DA; Z Aidam, R. T. (org) **Geoprocessamento & Análise Ambiental: Aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. 368p.
- SINTON, D. **The inherent structure of information as a constraint to analysis: mapped thematic data as a case study**. Harvard Papers on Geographic Information Systems, vol. 7, Ed. G. Dutton, Addison Wesley, Reading, MA. 1978.
- SIPPEL, S.; HAMILTON, S. K.; MELACK, J. M. METTS, E. M. Passive Microwave Observations of Inundations Area and Area/Stage Relation in the Amazon River Floodplain. *International Journal of Remote Sensing*, London, UK: Taylor & Francis, v. 19, n. 16, Nov. 1998. p. 3055-3074.
- SOARES FILHO, B. S. **Modelagem de Dados Espaciais**. Apostila do Curso de Especialização em Geoprocessamento. Belo Horizonte: UFMG, 2000. 17p. Disponível em: < www.cgp.igc.ufmg.br/centrorecursos/apostilas > Acesso em: 06 fev. 2008.
- SUDERHSA - Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. **Monitoramento e Modelos de Simulação em Recursos Hídricos - PEB-08**. In: Implementação módulo MIKE 11 GIS: Relatório Final, Curitiba, 1998. s.e.
- SUDERHSA - Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. **Monitoramento e Modelos de Simulação em Recursos Hídricos - PEB-08**. In: Modelo Hidrodinâmico: Relatório Final, Curitiba, 1999. s.e.
- TECHGEO, **Manual de Operações**: GTR. Minas Gerais: TechGeo, 2007. 130p.
- TOMLIN, C. D. **Geographic Information Systems and Cartographic Modelling**. Prentice-Hall: New Jersey, 1990. 249p.
- TOUTIN, T.; Review article: geometric processing of remote sensing images: models, Algorithms and Methods. *International Journal of Remote Sensing*, London, UK: Taylor & Francis, v. 25, n. 10, May 2004. p. 1893-1924.
- TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. de. **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1995. 428 p. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos)

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 3 ed. Porto Alegre: ABRH-UFRGS, 2002. 943p.

TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. L. da M. **Avaliação e Controle da Drenagem Urbana**. Porto Alegre: UFRGS, 2000. 558p.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (ORG.) **Inundações Urbanas da América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003. 471p.

ZHU, H.; EASTMAN, J. R.; TOLEDANO, J. Triangulated irregular network optimization from contour data using bridge and tunnel edge removal. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 15, n. 03, 2001. p. 271-286.

WHITE, G. **Natural hazard: Local, National, Global**. Oxford University Press, New York, 1974. 288p.

WILKINSON, G. G. A review of current issues in the integration of GIS and remote sensing data. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 10, n. 01, 1996. p. 85-101.

ANEXO 1



Relatório de Estação Geodésica

Estação :	91998	Nome da Estação :	91998	Tipo :	Estação Planimétrica - SAT
Município :	LAJEADO			UF :	RS
Última Visita:	15/05/2002	Situação Marco Principal :	Bom		

DADOS PLANIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	29 ° 27 ' 17,4215 " S	Altitude Ortométrica(m)	65,80	Gravidade(mGal)	
Longitude	51 ° 57 ' 18,3266 " W	Altitude Geométrica(m)	68,26	Sigma Gravidade(mGal)	
Fonte	GPS Geodésico	Fonte	GPS Geodésico	Precisão	
Origem	Ajustada	Data Medição	15/05/2002	Datum	
S Datum	SAD-69	Data Cálculo	16/11/2004	Data Medição	
A Data Medição	15/05/2002	Sigma Altitude Geométrica(m)		Data Cálculo	
D Data Cálculo	15/09/2002	Modelo Geoidal	MAPGEO2004	Correção Topográfica	
6 Sigma Latitude(m)	0,003			Anomalia Bouguer	
9 Sigma Longitude(m)	0,010			Anomalia Ar-Livre	
UTM(N)	6.741.229,472			Densidade	
UTM(E)	407.381,833				
MC	-51				
Latitude	29 ° 27 ' 19,1978 " S	Altitude Ortométrica(m)	65,68	Gravidade(mGal)	
S Longitude	51 ° 57 ' 20,2066 " W	Altitude Geométrica(m)	71,14	Sigma Gravidade(mGal)	
I Fonte	GPS Geodésico	Fonte	GPS Geodésico	Precisão	
R Origem	Ajustada	Data Medição	15/05/2002	Datum	
G Datum	SIRGAS2000	Data Cálculo	23/11/2004	Data Medição	
A Data Medição	15/05/2002	Sigma Altitude Geométrica(m)	0,008	Data Cálculo	
S Data Cálculo	23/11/2004	Modelo Geoidal	MAPGEO2004	Correção Topográfica	
2 Sigma Latitude(m)	0,001			Anomalia Bouguer	
0 Sigma Longitude(m)	0,001			Anomalia Ar-Livre	
0 UTM(N)	6.741.185,669			Densidade	
0 UTM(E)	407.331,973				
MC	-51				

* Último Ajustamento Planimétrico Global SAD-69 em 15/09/1996

** Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006

*** Dados Planimétricos para Fonte carta nas escalas menores ou igual a 1:250000, valores SIRGAS2000 = SAD-69

Localização

Na área do estacionamento do parque do imigrante, 30 m a sudeste do restaurante panorâmico, na cidade de Lajeado-RS.

Descrição

O marco principal é um pilar de formato com formato cilíndrico, medindo 1,15 m de altura e com 0,28 m de diâmetro. Esta assentado em uma base quadrangular de concreto medindo 1,00 m x 1,00 m. Possui no topo um dispositivo de centragem forçada. Foi cravada no marco uma chapa de metal padrão IBGE, e nela foi estampado: SAT-91998.

Itinerário

Estando na cidade de Lajeado, localizar o parque do imigrante que fica no bairro Alto do Parque.

Observação

O marco de azimute esta no trevo principal de acesso a cidade de Lajeado, no canteiro junto a saída desta para Porto Alegre, 40 m além do viaduto. O marco de azimute não esta intervisível.

Foto(s)



Mantenha-se atualizado consultando periodicamente o BDG.
Para entrar em contato conosco, utilize os recursos abaixo:
Fale conosco: 0800 216181 Email: ibge@ibge.gov.br

ANEXO 2

Marco	Latitude	Longitude	X (E)	Y (N)	Altitude Geoidal	Ondulação Geoidal	RMS (mm)
1	29° 27' 57.56542"	51° 57' 16.84360"	407431.909	6739994.176	24.293	2.46	0.009
2	29° 27' 02.78799"	51° 58' 44.53720"	405055.678	6741660.613	67.93	2.46	0.012
3	29° 27' 40.33863"	51° 59' 29.09192"	403865.233	6740494.656	50.541	2.46	0.008
4	29° 27' 37.94305"	51° 58' 08.41835"	406037.700	6740586.678	44.817	2.46	0.011
5	29° 28' 04.58524"	51° 57' 47.00156"	406621.381	6739771.418	30.582	2.46	0.006
6	29° 27' 19.21693"	51° 57' 55.02414"	406393.721	6741166.061	52.303	2.46	0.009
7	29° 27' 02.28831"	51° 57' 53.15084"	406439.870	6741687.540	51.948	2.46	0.008
8	29° 27' 08.76870"	51° 56' 29.97705"	408682.133	6741506.405	41.845	2.46	0.008
9	29° 27' 18.35050"	51° 57' 20.77250"	407316.179	6741200.337	60.586	2.46	0.008
10	29° 28' 26.30983"	51° 58' 18.87134"	405768.553	6739095.605	27.242	2.46	0.012
11	29° 29' 15.64832"	51° 58' 57.43492"	404742.726	6737568.245	26.283	2.46	0.008
12	29° 28' 03.11956"	51° 58' 30.33627"	405453.788	6739806.819	41.794	2.46	0.009
13	29° 27' 28.71691"	51° 58' 27.00287"	405534.716	6740866.483	53.985	2.46	0.007
14	29° 26' 58.14458"	51° 59' 15.33341"	404224.833	6741796.536	98.045	2.46	0.007
15	29° 27' 01.98170"	51° 58' 24.87120"	405585.262	6741689.870	51.519	2.46	0.01
16	29° 27' 53.71191"	51° 59' 38.74956"	403608.600	6740080.808	38.653	2.46	0.007
17	29° 27' 50.40888"	51° 58' 43.02195"	405108.811	6740195.188	51.071	2.46	0.01
18	29° 27' 19.14715"	51° 59' 12.13335"	404316.517	6741150.808	53.811	2.46	0.009
19	29° 29' 06.91500"	51° 59' 51.01619"	403297.492	6737824.783	54.299	2.46	0.009
20	29° 28' 31.88037"	51° 59' 34.79653"	403725.096	6738906.889	70.534	2.46	0.009
21	29° 28' 41.37448"	51° 59' 03.25548"	404577.060	6738621.872	78.833	2.46	0.008

Pós-Processamento das coordenadas dos marcos realizado em SAD69.

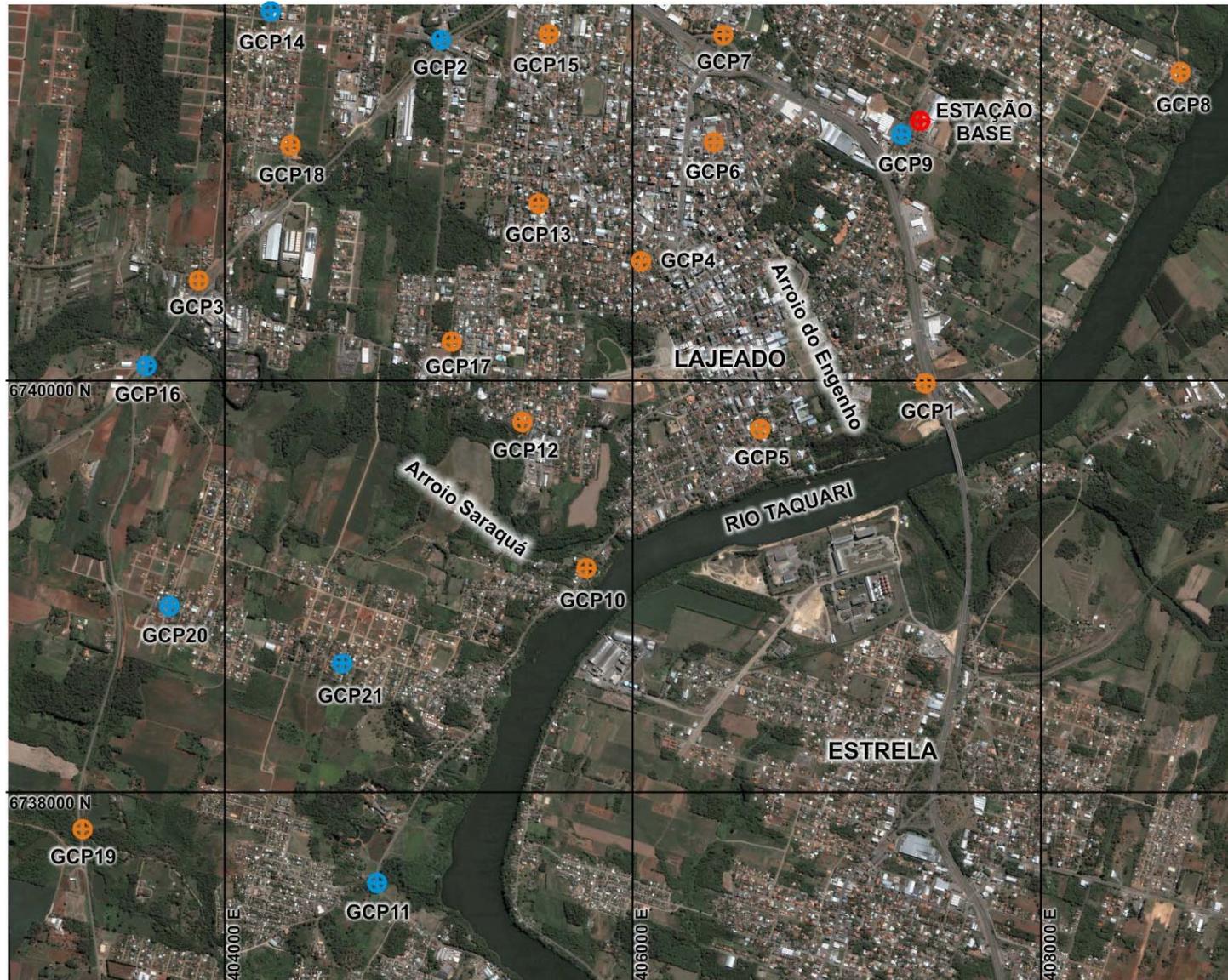
ANEXO 3

Transformação polinomial de 1º grau da Base Cartográfica, baseado em 18 pontos de controle					
Marco	X Antigo	Y Antigo	X Novo	Y Novo	RMS (Pixels)
5	406620.823	6739760.018	406621.381	6739771.418	0.794922
*	406749.394	6740586.033	406751.816	6740595.128	3.143455
6	406392.866	6741153.763	406393.721	6741166.061	0.556712
7	406438.949	6741675.419	406439.870	6741687.540	0.238310
9	407315.628	6741188.097	407316.179	6741200.337	0.593755
*	407748.246	6740041.322	407750.597	6740055.913	2.289554
10	405768.717	6739084.726	405768.553	6739095.605	1.562902
11	404739.451	6737557.204	404742.726	6737568.245	1.971706
12	405452.915	6739797.798	405453.788	6739806.819	1.926737
13	405534.417	6740855.582	405534.716	6740866.483	0.948066
14	404222.510	6741788.074	404224.833	6741796.536	2.186092
15	405583.957	6741677.807	405585.262	6741689.870	0.769352
16	403608.300	6740068.970	403608.600	6740080.808	2.514356
17	405107.372	6740183.799	405108.811	6740195.188	0.696166
18	404313.976	6741139.205	404316.517	6741150.808	1.840211
19	403294.408	6737818.297	403297.492	6737824.783	2.850329
20	403725.248	6738897.035	403725.096	6738906.889	1.724615
21	404576.341	6738610.854	404577.060	6738621.872	1.258436

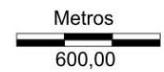
* Pontos de controle complementares medidos com o DGPS e pós-processados em SAD69.

RMS Global = 1.758506 pixels = 0.4396265 metros

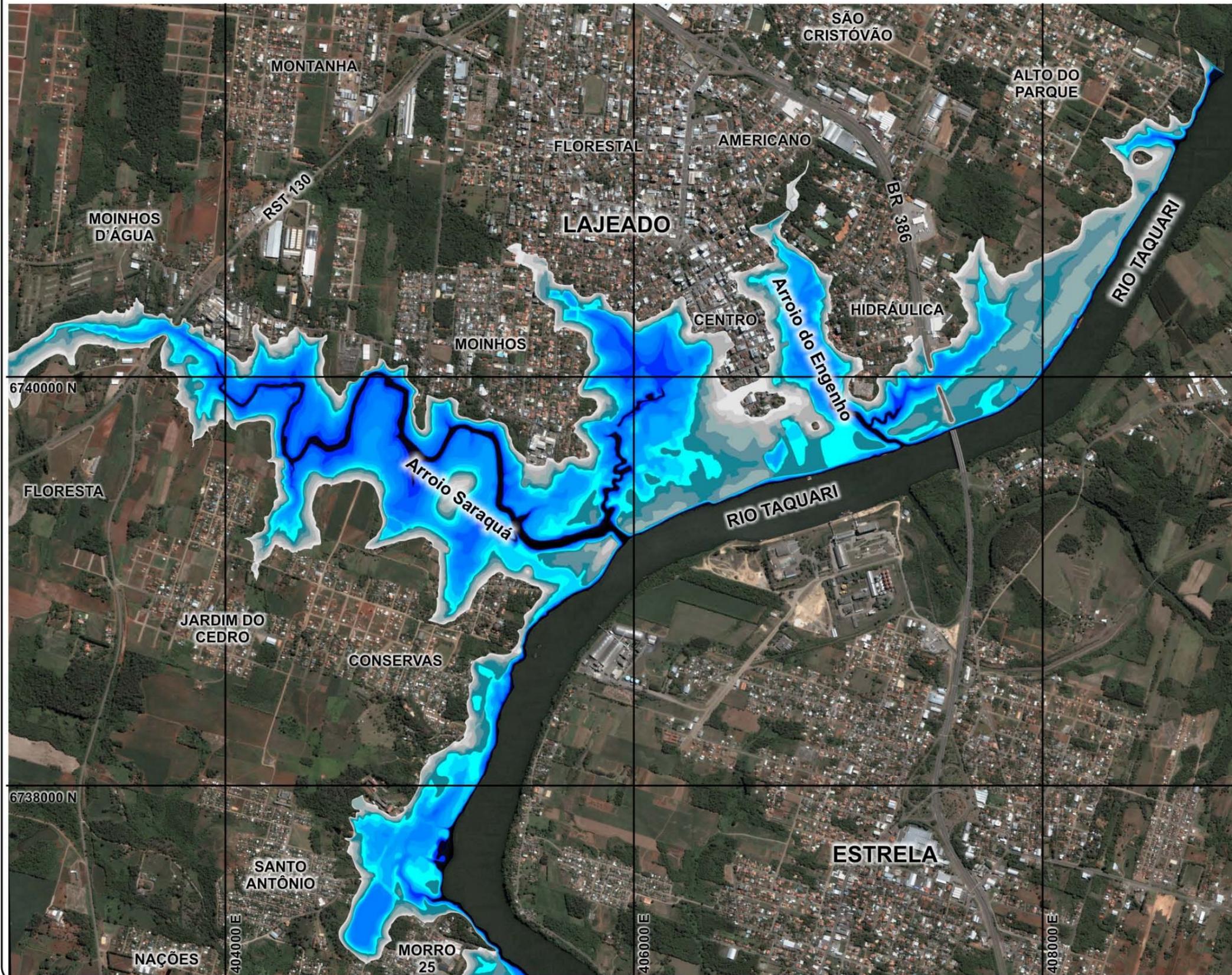
ANEXO 4



DATUM SAD 69
Projeção Universal de Mercator
Fuso 22S



CARTA DE INUNDAÇÃO DA CIDADE DE LAJEADO - RS



LEGENDA

Cota Inundação (m)	Risco Anual de Inundação* (%)	Período de Retorno* (Anos)
13	-	-
14	-	-
15	-	-
16	-	-
17	-	-
18	-	-
19	-	-
20	49,00	2,04
21	41,00	2,44
22	33,00	3,03
23	25,00	4,00
24	20,00	5,00
25	15,00	6,66
26	10,00	10,00
27	7,70	13,00
28	5,30	19,00
29	3,70	27,00
30	1,49	40,00

* Cálculos da probabilidade do risco anual de inundação e do Período de Retorno realizados, para os diferentes níveis de inundação, por REZENDE & TUCCI (1979).



DATUM SAD 69
Projeção Universal de Mercator
Fuso 22S

