

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

Cartographic model applied to mapping the urban areas reached by floods in the Lajeado city / RS

Rafael Rodrigo Eckhardt^{1 e 2}
Dejanira Luderitz Saldanha¹
Ronaldo dos Santos da Rocha¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS
Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia - CEP SRM
Avenida Bento Gonçalves, 9500, Campus do Vale, Caixa Postal: 15044, Porto Alegre / RS, CEP: 91501-970
rafaeckhardt@yahoo.com.br; {dejanira.saldanha, ronaldo.rocha}@ufrgs.br

²Centro Universitário UNIVATES
Núcleo de Geoprocessamento
Rua Avelino Tallini, 171, Bairro Universitário, Caixa Postal: 155, Lajeado / RS, CEP: 95900-000
rafare@univates.br

RESUMO

O estudo de eventos extremos, como as inundações, é imprescindível, 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 Rio Grande do Sul, historicamente e de forma periódica, é atingida por inundações decorrentes das enchentes do Rio Taquari. O presente estudo objetiva desenvolver um modelo cartográfico para proceder ao mapeamento da área urbana inundável e diagnosticar a ocupação do solo das áreas sujeitas às inundações na cidade de Lajeado. A utilização conjunta das geotecnologias e as técnicas de representação e análise espacial mostraram-se fidedignas na simulação, mapeamento e diagnóstico do uso do solo das áreas sujeitas às inundações. Os resultados alcançados contribuem, no curto prazo, para estabelecer um eficiente plano de remoção e realocação da população atingida pelas inundações, e no médio e longo prazo, para readequar a utilização das áreas em função do risco de inundação que apresentam.

Palavras chaves: Inundações, SIG, Sensoriamento Remoto, Simulação, Mapeamento.

ABSTRACT

The study of extreme events, as floods, it's indispensable, mainly in urban areas, due to amount of lives, sanitation, material goods and infrastructures involved in the process. The Lajeado city, located in center at Rio Grande do Sul state, historically and in a periodic way, is reached by inundations decurrently of Taquari River's floods. This paper aims to develop a cartographic model for mapping the urban area and for diagnose the land use of the areas reached by floods in the Lajeado city. The joint use of the geotechnologies and the spatial analysis and representation techniques revealed up trustworthy in simulation, mapping and land use diagnostics of the areas reached by floodings. The results obtained contribute, in short term, to establish an efficient removal and relocation plan of the population reached by the floods, and in medium and long term, to readapt the land use in function of the flood risk they present.

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

1. 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 & ZAIDAM, 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).

Desde os primórdios da humanidade, a possibilidade dos rios serem utilizados como fonte de água para o consumo humano e para a agricultura, via de transporte de cargas e fonte de energia e lazer, estimulou a instalação de assentamentos humanos ribeirinhos (TUCCI *et al.*, 1995).

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).

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 inundação de média e grande magnitude, os efeitos negativos associados são significativos. Geralmente ocorre necessidade de remoção e realocação da população atingida, danificação de edificações e infra-estruturas, perda de bens materiais, perda de veículos, interrupção e alteração do tráfego, problemas de saneamento, proliferação de doenças de veiculação hídrica e até perda de vidas.

Na cidade de Lajeado, localizada no nordeste do Rio Grande do Sul, as inundações são fenômenos que ocorrem freqüentemente, causando grandes impactos ao meio ambiente e ao meio antrópico. Como a maioria das cidades brasileiras, a evolução da ocupação humana não foi planejada no ambiente urbano. Esta se desenvolveu 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.

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 e 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 espaciais e, portanto, oferece, ao ser implementada, alternativas para o entendimento da ocupação e utilização do meio físico (SILVA, 1999).

O conhecimento preciso das áreas urbanas sujeitas às inundações e o padrão de ocupação do solo destas áreas, permite estabelecer alternativas e implementar ações que visem minimizar os efeitos negativos associados com as inundações, uma vez que é difícil a solução completa do fenômeno.

2. OBJETIVO

Este estudo visa desenvolver um modelo cartográfico aplicado à simulação e mapeamento da área urbana inundável da cidade de Lajeado / RS e diagnosticar a ocupação do solo das áreas sujeitas às inundações.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 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 freqüentes 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).

Observando a distribuição dos principais desastres naturais que ocorreram na América do Sul entre 1975 - 1999, nota-se que as inundações correspondem a cerca de 50% do total de desastres na maioria dos países (Fig. 1).



Fig. 1 - Desastres naturais na América do Sul entre os anos de 1975 e 1999. Fonte: <http://www.cred.be>

A Fig. 2 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 (SANTOS, 2007).

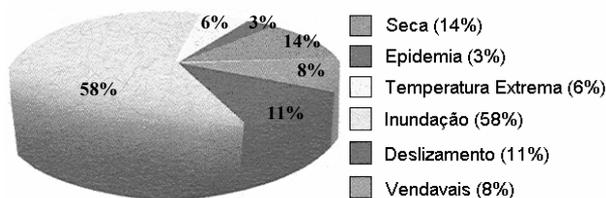


Fig. 2 - Panorama dos desastres naturais no Brasil entre 2000 e 2007 (SANTOS, 2007)

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** é 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, entre outros (Fig. 3).

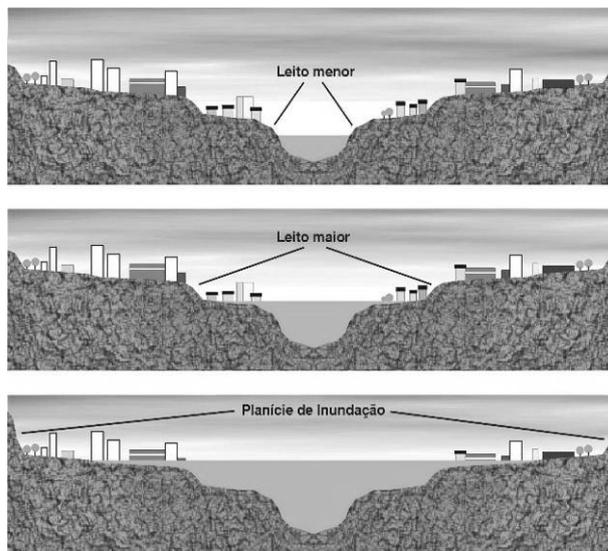


Fig. 3 - Esquemática das inundações urbanas

3.2 Inundações na Cidade de Lajeado / RS

Lajeado localiza-se na região central do Vale do Taquari, distando 117 km de Porto Alegre (Fig. 4). 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.

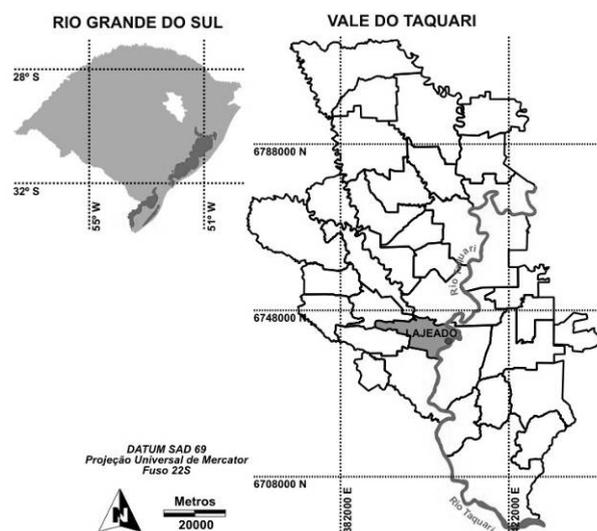


Fig. 4 - Localização do município de Lajeado

No município de Lajeado as inundações são fenômenos que ocorrem frequentemente, causando grandes impactos. A Fig. 5 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).

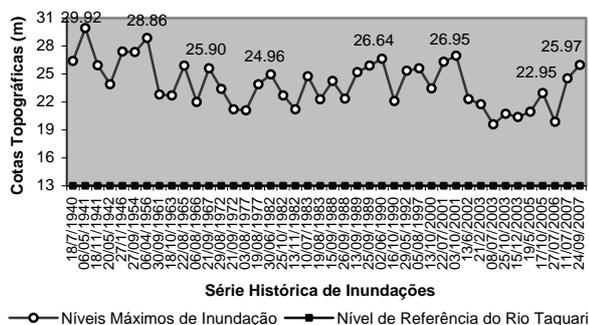


Fig. 5 - Série histórica de inundações de Lajeado

A Fig. 6 apresenta uma vista panorâmica parcial da cidade de Lajeado durante a inundação ocorrida em 03 de outubro de 2001.



Fig. 6 - Vista panorâmica da inundação ocorrida em 03 de outubro de 2001 na cidade de Lajeado

3.3 Mapeamento das Áreas Inundáveis

O mapeamento das áreas inundáveis é realizado quando determinado nível de água é atingido em uma seção fluviométrica de referência. O mapeamento é representado pela carta de inundação, podendo ser realizados em mais de uma escala, com diferentes níveis de detalhamento (SANTOS, 2007).

Para o mapeamento das áreas inundáveis, 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).

O mapeamento das áreas de inundação em grandes áreas, como em bacias hidrográficas, é realizado em diversas partes do mundo (SIPPEL *et al.*, 1998; BRIVIO *et al.*, 2002; ROSENQVIST & BIRKETT, 2002; FLORENZANO *et al.*, 1988). 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. De forma geral, os estudos acima apontados utilizaram uma imagem de satélite antes e outra após o evento de inundação. Em função da resposta espectral e das marcas e cicatrizes presentes na imagem posterior ao evento, mapearam os limites máximos das áreas inundadas.

Os procedimentos acima descritos permitem 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 com equidistância de 1 m, 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. Na seqüência, sobre o mapa na escala 1:2.000 foi realizado o traçado da superfície de inundação.

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).

3.3.1 Modelo Cartográfico

De acordo com TOMLIN (1990), 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 modelagem cartográfica é uma forma de resolver um problema em SIG, através da representação gráfica dos dados e dos procedimentos analíticos usados

no estudo. Visa auxiliar o utilizador a identificar os dados e estruturar os procedimentos metodológicos a serem adotados em determinado estudo.

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 com problemas similares.

4. METODOLOGIA

A cidade de Lajeado foi escolhida como área de estudo, 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.

4.1 Materiais e Equipamentos

- Base Topográfica analógica em escala 1:2.000;
- Imagem do satélite QuickBird *ORStandard* RGB Pan-Sharpned, de 28/02/2006;
- GPS Diferencial GTR-A e GTR-A BT
- Softwares: ENVI, AutoCAD MAP 3D, Idrisi Andes, Erdas Imagine Virtual GIS e SPRING.

4.2 Procedimentos Metodológicos

A Fig. 7 apresenta o fluxograma metodológico do modelo cartográfico de mapeamento das áreas sujeitas às inundações na área de estudo.

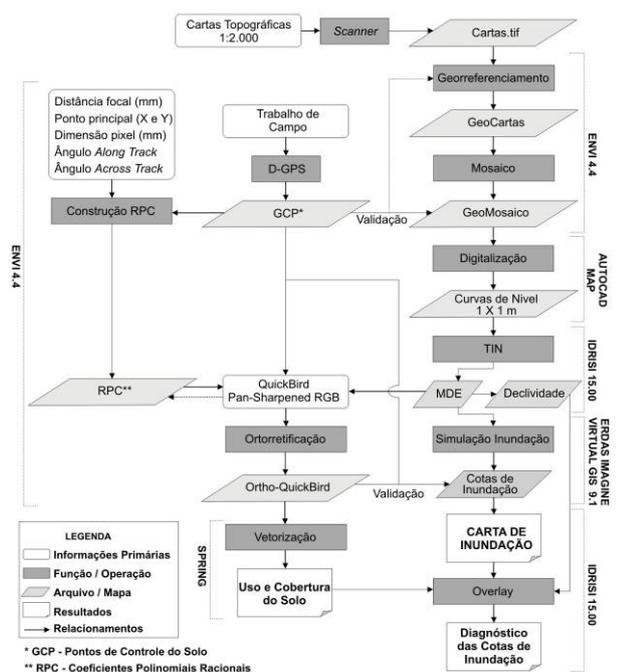


Fig. 6 - Fluxograma metodológico do modelo cartográfico de mapeamento das áreas sujeitas às inundações

4.2.1 Coleta dos Pontos de Controle com DGPS

Foram realizadas 3 campanhas de campo para a coleta de pontos de controle (GCP), necessários para a etapa de ortorretificação da imagem do satélite QuickBird. A estação geodésica base foi ocupada com o aparelho GTR-A e como rover foi utilizado o aparelho GTR-A BT. Foram medidos 21 GCP, na forma de marcos estáticos, com permanência de 20 minutos.

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.

4.2.1 Georreferenciamento da Base Topográfica

A base topográfica, composta por 41 cartas topográficas, gerada por restituição fotogramétrica pela empresa Engefoto em 1989, foi escaneada e georreferenciada com a grade original de coordenadas que esta apresentava. O georreferenciamento foi validado com os 21 GCP, coletados para a etapa de ortorretificação. Como houve deslocamento (translação em X e Y) da ordem de 11 m em relação aos GCP medidos com DGPS e pós-processados em SAD69, o georreferenciamento foi refeito utilizando os 21 GCP.

Na seqüência, foram digitalizadas as curvas de nível da base topográfica, com equidistância de 1 m, utilizando o software AutoCAD MAP 2005.

4.2.3 Geração do Modelo Digital de Elevação (MDE)

O MDE é necessário para a ortorretificação da imagem do satélite QuickBird, para obtenção da declividade e para a simulação das áreas sujeitas às inundações. As curvas de nível digitalizadas foram importadas no software Idrisi 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”. 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 m. 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.

4.2.4 Ortorretificação da Imagem QuickBird

As imagens de satélite, de forma geral, apresentam uma série de distorções decorrentes do

movimento da plataforma, do sensor e da Terra. Porém, especialmente em imagens de alta resolução espacial, em função do imageamento em visada lateral, as variações de altitude do terreno promovem as distorções mais significativas. Para que estas imagens possam ser integradas com dados de diferentes origens e formatos e ser utilizadas nas mais diferentes aplicações para as quais se destinam, é necessário que seja realizado o processo de ortorretificação. A ortorretificação trabalha pixel-por-pixel para prover a sua correta localização ortogonal no solo, criando uma imagem planimetricamente correta.

O processo de ortorretificação foi realizado no software ENVI 4.4 utilizando 14 dos 21 GCP medidos, o MDE gerado e os coeficientes polinomiais racionais (RPC) disponibilizados com a imagem QuickBird. O RMS do processo de ortorretificação foi de 1,53 pixels, correspondendo a 0,92 m, compatível com a escala 1:2.000.

4.2.5 Simulação das Inundações

Em condições normais, o Rio Taquari, ao longo da cidade de Lajeado, apresenta o nível da água constante na cota topográfica de 13 m (AHSUL, 2007). Em função desta situação, as cotas de inundação em Lajeado foram consideradas como uma linha plana, inundando as áreas de acordo com a topografia.

O MDE e a ortoimagem QuickBird foram integrados no módulo Virtual GIS, do software Erdas Imagine. Este módulo ainda permitiu a inclusão de uma camada virtual de água, sobre o MDE e a ortoimagem, fixada na cota topográfica de 12 m, consistindo no nível mais baixo possível do rio. Em períodos de alta precipitação pluviométrica, quando previsto que o Rio Taquari terá uma determinada elevação no nível da água (FERREIRA *et al.*, 2007), a camada virtual de água é ajustada, simulando as áreas que serão inundadas.

As cotas de inundação foram simuladas com equidistância de 1 m, da cota topográfica de 13 m até a de 30 m (a maior inundação já registrada alcançou a cota topográfica de 29,92 m).

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 GCP medidos no momento de pico da inundação com DGPS, com GPS e fotografias tomadas ao chão e por aeronave. Foi calculado o erro médio altimétrico (ϵ_a) da cota de inundação simulada em relação à área de inundação observada no solo (erro inerente à base topográfica) e o respectivo erro médio horizontal (ϵ_d).

4.2.6 Uso e Cobertura da Terra

Os dados de uso e cobertura da terra, das áreas sujeitas às inundações, foram vetorizados manualmente sobre a ortoimagem QuickBird, no software SPRING.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Pelas análises que serão apresentadas na seqüência, quando o Rio Taquari alcança a cota topográfica de 19 m, na cidade de Lajeado, 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. A Fig. 7 apresenta a série histórica dos níveis máximos de inundação acoplada com diversos períodos de retorno calculados para a cidade de Lajeado.

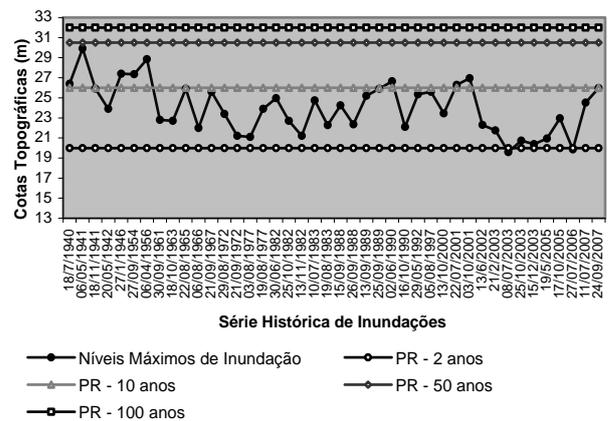


Fig. 7 - Série histórica dos níveis máximos de inundação acoplada ao período de retorno (PR) calculado para a cidade de Lajeado

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 m, apresenta alto risco de sofrerem danos e impactos decorrentes das inundações.

A Fig. 8 apresenta o MDE da área de estudo e as Fig. 9, 10 11 e 12 apresentam a simulação das áreas sujeitas às inundações, com equidistância de 6 em 6 m.

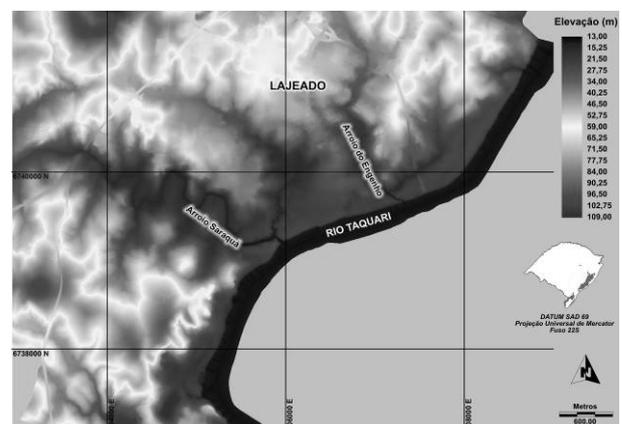


Fig. 8 - Modelo Digital de Elevação da área de estudo

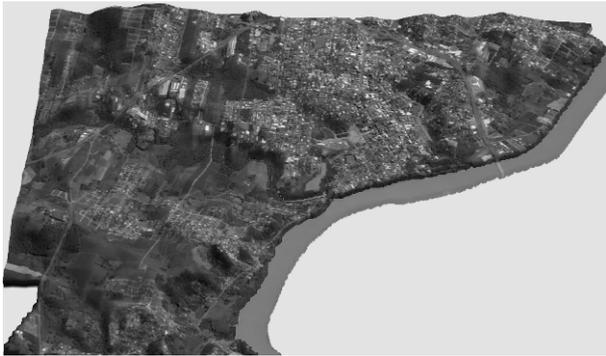


Fig. 9 - Nível de referência do Rio Taquari (13 m)



Fig. 10 - Cota de inundação de 18 m

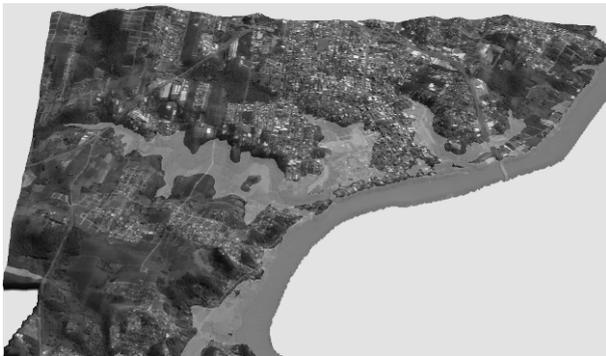


Fig. 11 - Cota de inundação de 24 m



Fig. 12 - Cota de inundação de 30 m

A validação das cotas de inundação simuladas foi realizada de forma heurística e matemática, utilizando 26 GCP marcados durante o pico da inundação com DGPS, GPS e fotografias aéreas e tomadas ao solo. 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, ocorrida em 24 de setembro de 2007. A Fig. 13 apresenta o ajuste heurístico e a Tabela 1 apresenta o ajuste matemático do referido nível de inundação.

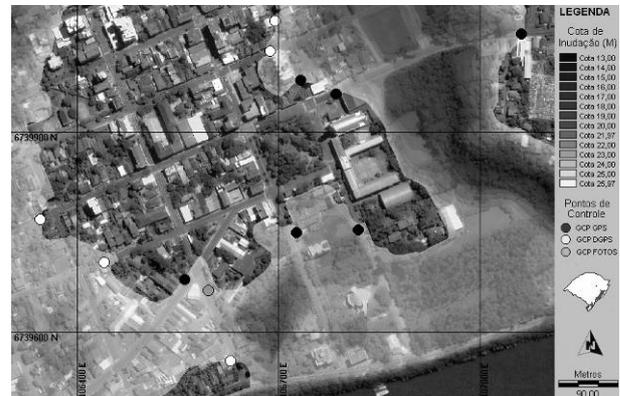


Fig. 13 - Ajuste da simulação da cota de inundação de 25,97 m

TABELA 1 - AJUSTE DA COTA DE INUNDAÇÃO SIMULADA DE 25,97 METROS, OCORRIDA EM 24 DE SETEMBRO DE 2007.

GCP	ϵ_a (m)*	ϵ_d (m)**
DGPS 1	1,33	13,77
DGPS 2	0,20	13,03
DGPS 3	1,10	5,50
GPS 4	0,44	4,46
GPS 5	0,71	6,20
GPS 6	2,79	10,60
GPS 7	0,18	3,51
GPS 8	0,33	4,92
GPS 9	0,63	8,80
GPS 10	0,87	15,03
GPS 11	0,03	1,63
P-Foto 12	1,18	8,94
P-Foto 13	0,38	3,54
P-Foto 14	0,07	1,43
P-Foto 15	0,34	2,73
P-Foto 16	0,35	1,64
P-Foto 17	0,37	3,64
P-Foto 18	0,46	3,51
P-Foto 19	0,88	6,58
P-Foto 20	0,75	5,44
P-Foto 21	0,47	4,98
P-Foto 22	0,10	2,63
P-Foto 23	0,51	5,45
P-Foto 24	0,12	4,44
P-Foto 25	0,18	13,00
P-Foto 26	0,64	8,15
Média	0,59	6,29
Desvio Padrão	0,57	3,97

* ϵ_a - Erro altimétrico inerente à base topográfica, em escala 1:2.000.

** ϵ_d - Erro horizontal da diferença entre a área inundada simulada em relação a área inundada observada no solo.

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 os 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 no solo 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. A Fig. 14 exemplifica a medida da área de inundação com DGPS e a Fig. 15 apresenta a posição atingida pela inundação no solo em relação à área inundada simulada.



Fig. 14 - Mapeamento da área inundada pela inundação de 24 de setembro de 2007 com DGPS, que atingiu a cota topográfica de 25,97 m

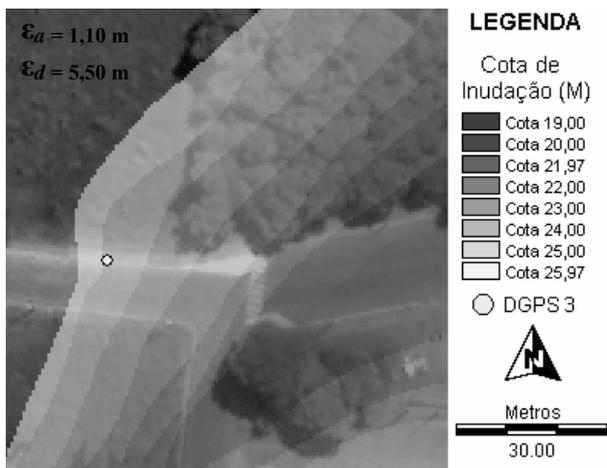


Fig. 15 - Ajuste da área inundada simulada de 25,97 m em relação à área inundada observada no solo, pela inundação de 24 de setembro de 2007

Concluída a etapa de validação, a simulação das áreas sujeitas às inundações, do nível de referência do Rio Taquari de 13 m até a cota topográfica de 30 m, foi organizada a carta de inundação da cidade de Lajeado (Fig. 15).



Fig. 16 - Carta de inundação da cidade de Lajeado

Na área de estudo, a área total sujeita às inundações corresponde a 416,81 há. 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. A Fig. 17 ilustra a área inundada em função da cota de inundação.

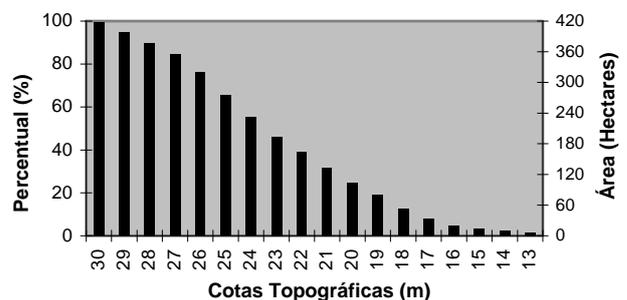


Fig. 17 - Área inundada em função da cota de inundação

A Fig. 18 apresenta a evolução da área inundada em função declividade do terreno, informação que foi gerada a partir do MDE.

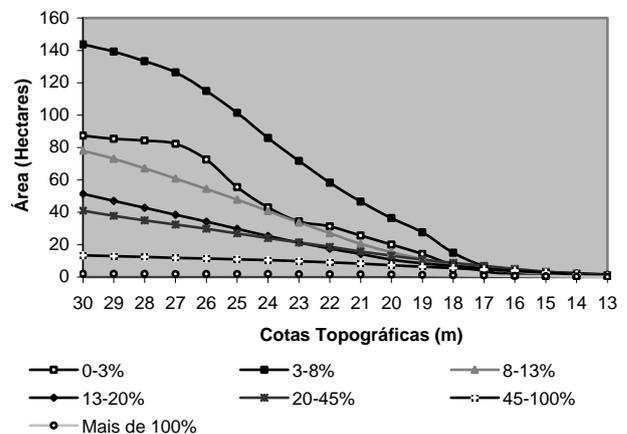


Fig. 18 - Área inundada em função da declividade

Observando o gráfico acima se percebe que até a cota de inundação de 19 m, 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 m, 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.

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 subm trica, sob o risco de desqualificar o mapeamento.

A Fig. 19 apresenta a área ocupada por cada tipologia de uso e cobertura da terra em função da cota de inundação.

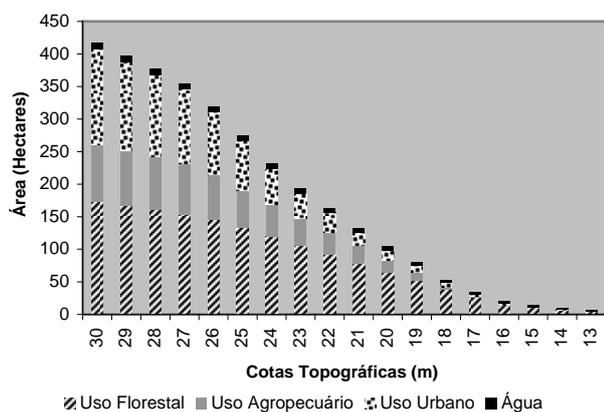


Fig. 19 - Uso da terra em função da cota de inundação

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

O Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado de Lajeado estabelece que abaixo da cota topográfica de 27 m seja vedado o parcelamento do solo, para fins urbanos. A análise específica padrão de uso do solo, abaixo da cota topográfica de 27 m, permite constatar que 95,93 hectares apresentam usos urbanos mistos e estão sujeitos aos eventos de inundação.

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.   imprescindível que o poder executivo municipal, de forma alguma, permita a ocupação das

 reas sujeitas às inundações por subabitaç es ou outras habitações de baixa renda, abaixo da cota topográfica de 27 m, sob o risco de agravar ainda mais a situação.

6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo cartográfico proposto, descrito e aplicado na cidade de Lajeado constitui-se em uma alternativa simples para estudar inundações em áreas urbanas, decorrentes de um processo natural de inundação. O modelo cartográfico mostrou-se adequado para proceder à simulação, ao mapeamento e   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% ( reas planas), 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 subm trica) da base topográfica pode implicar em erros horizontais, da cota de inundação simulada em rela o   área inundada observada no solo, da ordem de dezenas de metros, precisão que não pode ser aceita para áreas urbanas.

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   possível identificar, com detalhe, as edificações e vias de circulação sujeitas às inundações.

AGRADECIMENTOS

Este artigo apresenta resultados advindos da disserta o de mestrado em Sensoriamento Remoto, pelo CEPSSRM / UFRGS, elaborada pelo autor principal.

Cabe um agradecimento especial à CAPES, pela oportunidade da bolsa de estudos concedida durante o mestrado.

Com muita gratidão, agradecer ao Centro Universitário UNIVATES e   Funda o de Amparo   Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul - FAPERGS, que pelo edital PROCOREDES, permitiu o financiamento deste estudo.

Agradecemos   Prefeitura Municipal de Lajeado, pela disponibiliza o da base topográfica em escala 1:2.000, sem a qual o presente estudo não poderia ser realizado com a qualidade requerida e pela disponibiliza o de fotografias áreas, tomadas durante a inundação do dia 24 de setembro de 2007, que auxiliaram na validação dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHSUL - Administração das Hidrovias do Sul. **Enchentes no Rio Taquari** (informações pessoais não publicadas). Porto Alegre: José Luiz Fay de Azambuja, 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.
- 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.
- DESCHAMPS, L. R. A. **Carta Enchente de Gaspar**, Relatório Final Convênio PMB/FURB, 1987.
- DNAEE. **Zoneamento de Áreas Inundáveis e do Potencial Erosivo**: Cartas de Enchentes para Cidades do Vale do Rio Itajaí-Açú - SC, Brasília: DNAEE, 1987.
- 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).
- GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da. (org) **Impactos Ambientais Urbanos no Brasil**. 2 ed., Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. 416p.
- 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.
- MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, Integração e Aplicação**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001. 536p.
- MONTEIRO, C. A. F. **Clima e Excepcionalismo**. Conjecturas sobre o Desempenho da Atmosfera como Fenômeno Geográfico. Florianópolis: UFSC, 1991. 233p.
- MOURA, A. C. M. **Geoprocessamento na Gestão e Planejamento Urbano**: Belo Horizonte: Ana Clara Mourão Moura, 2003. 294p.
- 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.
- SILVA, A. B. **Sistemas de Informações Georeferenciadas: conceitos e fundamentos**. Campinas: Unicamp, 1999. 236p. (Coleção Livro-Texto).
- SILVA, J. X. DA; Z Aidam, R. T. (org) **Geoprocessamento & Análise Ambiental: Aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. 368p.
- 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.
- TOMLIN, C. D. **Geographic Information Systems and Cartographic Modelling**. Prentice-Hall: New Jersey, 1990. 249p.
- 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.; 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.