

PROCESSO HIERÁRQUICO ANALÍTICO NO MAPEAMENTO DE RISCO À INUNDAÇÃO EM PELOTAS/RS

Alan da Costa Viegas^{1} & Fabrício da Silva Terra² & Marcio Pagano Aragona³*

Resumo – As inundações ocorrem quando a água excedente que não infiltra no solo e que escorre superficialmente não consegue ser drenada pelos canais ou não podem ser retidas por reservatórios. Além dos danos econômicos, as inundações podem provocar também prejuízos humanos irreparáveis. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema de informações geográficas (SIG) baseado no método do Processo Hierárquico Analítico (AHP) a fim de modelar, identificar e mapear áreas com diferentes níveis de risco à inundação no município de Pelotas/RS. As variáveis utilizadas foram: classes de solo, capacidade de uso das terras, altitude, declividade, densidade de fluxo e índice espectral de água. Essas foram reclassificadas pelo risco potencial de 0 a 10 e comparadas par a par usando a escala de Saaty para definir o peso de cada uma na modelagem. Os valores de potenciais variaram de 0,86 a 9,89, sendo 10 o maior potencial. Pode-se observar que a distribuição das susceptibilidades à inundação obedeceu às características geomorfológicas da área de estudo, onde áreas mais onduladas e mais altas apresentaram menores potenciais, enquanto que áreas de baixada (planícies) com relevo plano apresentaram os maiores riscos. O método AHP é efetivo na modelagem da inundação produzindo mapa verossímil à realidade local.

Palavras-Chave – Sistema de Informações Geográficas, Geoprocessamento, Eventos Extremos.

ANALYTICAL HIERARCHICAL PROCESS IN THE FLOOD RISK MAPPING IN PELOTAS/RS

Abstract – Floods happen when excess water, that does not infiltrate into the soil and flows superficially, cannot be drained by canals or be retained by reservoirs. In addition to economic destructions, floods can also cause irreparable human damages. The aim of this work was to develop a geographic information system (GIS) based on the Hierarchical Analytical Process (AHP) method in order to model, identify, and map areas with different levels of flood risk in Pelotas/RS. The variables used were: soil classes, land use capacity, altitude, slope, flow density, and water spectral index. These variables were reclassified from 0 to 10 according to the potential risk and were compared in pairs using the Saaty's scale to define the weight of each one in the flood modeling. Potential values ranged from 0.86 to 9.89, where 10 has been the highest potential. It could be observed that the distribution of the flood susceptibility followed the geomorphological characteristics of the study area, where higher and more wavy areas presented lower potentials while lowland areas (plains) with flat relief showed higher risks. The AHP method is effective in flood modeling producing a plausible map to the local reality.

Keywords – Geographic Information System, Geoprocessing, Extreme Events.

INTRODUÇÃO

¹ Estudante de graduação, Engenharia Hídrica, Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), alancviegas@gmail.com

² Professor, Engenharia Hídrica, Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), fabricio.terra@ufpel.edu.br

³ Estudante de graduação, Engenharia Hídrica, Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), marcio.aragona@gmail.com

* Autor Correspondente.

A inundação conceitua-se como o transbordamento das águas em canais de drenagem, diques, barragens ou reservatórios atingindo áreas marginais, tais como planícies de inundação e áreas de várzea, provocando efeitos diretos e indiretos na sociedade e nas atividades econômicas urbanas e rurais trazendo com isso prejuízos nos setores da saúde pública, da construção civil e da agropecuária com transtornos para toda a população do local atingido (O'Connor e Costa, 2004). Em eventos extremos de precipitação, as inundações ocorrem quando, principalmente, o solo já saturado ou, de certa forma, impermeabilizado não consegue absorver todo o grande volume de água precipitado. Assim, a água excedente que não infiltra no solo escorre superficialmente para regiões de cotas mais baixas em quantidades tão grandes que não conseguem ser drenadas pelos canais (naturais ou artificiais), excedendo sua capacidade de vazão máxima, ou não podem ser retidas por reservatórios (naturais ou artificiais) por exceder a cota máxima de armazenamento. Além dos danos econômicos provados pelas destruições de bens materiais, obras e plantações em geral, as inundações podem provocar também prejuízos humanos irreparáveis através de mortes diretas e da proliferação de doenças epidêmicas provocadas por ratos, insetos e animais peçonhentos.

Com uma altitude média de 7 m acima do nível do mar, o município de Pelotas, na região sul do estado do Rio Grande do Sul, sofre frequentemente com eventos de inundação. Pelotas encontra-se na região fisiográfica da Encosta do Sudeste estendendo-se desde as ondulações mais baixas da encosta oriental da Serra dos Tapes, de maiores cotas, até a planície sedimentar da margem ocidental do Canal São Gonçalo, com cotas extremamente baixas onde encontra-se extensas áreas de várzea (banhados) e o território urbano (Silva, 2007). O município possui uma área de 1.609 km² e uma população de 343.651 habitantes com 92 % dos residentes na zona urbana e 8 % na zona rural (IBGE, 2016). A economia de Pelotas gira em torno do comércio e do agronegócio onde destaca-se a produção de arroz e gado de corte e leite.

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), entre outras aplicações, visam modelar o meio físico e seus fenômenos por meio da integração de planos de informação que caracterizam as variáveis, ambientais ou não, envolvidas no processo com o uso de técnicas e ferramentas de geoprocessamento (Câmara, 2001). Assim, é possível prever e identificar situações problemáticas nas quais o meio ambiente pode estar exposto (Barros et al., 2007). Neste sentido, os SIGs veem sendo utilizados na identificação e no mapeamento de áreas susceptíveis à inundação (Wang et al., 2011; Oriola e Bolaji, 2012; Orewole et al., 2015). O mapeamento dessas áreas torna-se uma informação estratégica a partir do momento que possibilita indicar áreas de leitos de cheias que não devem ser ocupadas, áreas que não devem ser desflorestadas nem terem seus solos impermeabilizados, áreas que devem ser reflorestadas, áreas de leitos de inundação que devem ser limpos e desobstruídos, áreas que devem ser protegidas por sistemas de drenagem ou construção de barragens (diques), além de áreas que devem ser sempre monitoradas pela defesa civil. O Processo Analítico Hierárquico (AHP - *Analytical Hierarchical Process*) vem sendo utilizado como uma técnica de geoprocessamento em SIGs, onde a tomada de decisão sobre um problema complexo é feita com base em múltiplos critérios através de uma hierarquia de solução a partir das variáveis utilizadas (Saaty, 1986).

Baseado na hipótese de que o AHP permite, através de planos de informações que caracterizam o fenômeno estudado, construir cenários e modelar o meio físico de forma mais verossímil à realidade, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema de informações geográficas (SIG) baseado em AHP a fim de modelar, identificar e mapear áreas, do perímetro urbano e zonas rurais, com diferentes níveis de risco à inundação no município de Pelotas/RS.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo, correspondente ao município de Pelotas, extremo sul do Brasil, localiza-se entre as latitudes 31°13'S e 31°41'S e longitudes 52°00'W e 52°37'W. O clima da região é subtropical, ou temperado, com temperatura e precipitação média anual de 17,6°C e 1.200mm, respectivamente. Pelotas distribui-se sobre duas principais formações geológicas, sendo o Batólito Pelotas composto por granitos e migmatitos, correspondente às áreas onduladas, e a formação derivada de sedimentos argilosos e arenosos do período quaternário, oriundo do batólito, misturados com sedimentos de origem marinha (formações Graxaim, Chuí e Itapoã), correspondente às áreas planas (Phillip e Machado, 2002). Os solos correspondentes ao município de Pelotas distribuem-se entre: neossolos (litólicos e rególicos) e argissolos vermelho-amarelo, nas maiores altitudes, e planossolos, gleissolos, organossolos e neossolos (quartzênicos e flúvicos), nas menores altitudes (Cunha e Silveira, 1996).

Os planos de informação (variáveis de entrada) utilizados na elaboração do SIG e modelagem da susceptibilidade à inundação foram os seguintes: classes de solo, capacidade de uso das terras, altitude, declividade, densidade de linhas de fluxo d'água e índice espectral de água por diferença normalizada (*Normalized Difference Water Index* - NDWI) (McFeeter, 1996). O SIG foi ambientado no software ArcGIS 10.1 e o sistema referência utilizado foi o UTM Fuso 22S datum SIRGAS 2000. Os mapas de solo e capacidade de uso das terras, obtidos de Cunha e Silveira (1996) em escala 1:100.000, foram digitalizados, georreferenciados, vetorizados e, posteriormente, transformados para o formato matricial (*Polygon to Raster*) com tamanho de pixel de 30 m. Para as informações topográficas (altitude e declividade) foi utilizado o modelo digital de elevação (MDE) oriundo da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com resolução espacial 1 arco-segundo (± 30 m). A declividade foi obtida através da ferramenta *Slope*. A rede de drenagem foi obtida com base no MDE obedecendo os seguintes passos: a) preenchimento de depressões espúrias (*Fill*), b) determinação das direções de fluxo (*Flow Direction*), c) determinação dos fluxos acumulados (*Flow Accumulation*) e d) reclassificação hierárquica dos canais de drenagem conforme Strahler (*Stream Link*, *Stream Order* e *Stream to Feature*). Através rede de drenagem, a densidade de linhas de fluxo d'água foi calculada utilizando a ferramenta *Line Density* (pixel = 30 m). Para o cálculo do NDWI ($[\text{verde} - \text{infravermelho}]/[\text{verde} + \text{infravermelho}]$), foram utilizadas as imagens correspondentes às bandas verde (530-590 nm) e infravermelho próximo (850-880 nm) do sensor OLI/Landsat-8. As imagens foram datadas de 12/10/2015, levando em consideração um período de 6 dias anteriores à aquisição com acúmulo de precipitação de 164,3mm e 137,1mm conforme os sites do Laboratório de Agrometeorologia/EMBRAPA e HidroWeb, respectivamente.

Para a aplicação do AHP, todos os planos de informação, em formato matricial (raster), precisaram ser reclassificados com base nas notas atribuídas às diferentes classes de uma mesma variável de entrada. As notas variam em função da susceptibilidade à inundação em uma escala de 0 (menos) a 10 (mais) e foram dadas com base na literatura e experiência do grupo de pesquisa e alguns pesquisadores convidados, conforme segue na Tabela 1. Para o cálculo dos pesos de cada variável de entrada, foi utilizada a matriz de comparação "par a par" (matriz de decisão) com base na seguinte escala hierárquica de importância conforme Saaty (1986): 1 (mesma importância), 3 (moderada importância), 5 (forte importância), 7 (fortíssima importância) e 9 (extrema importância), onde sempre deve-se comparar a coluna da esquerda com a linha superior, conforme observado na Tabela 2. A escolha dos valores de comparação também se baseou nos mesmos princípios comentados anteriormente para as notas de susceptibilidade. O peso de cada plano de informação (linha) foi calculado somando-se, entre os diferentes planos de informação (coluna), a razão entre o valor do comparador pelo somatório dos valores do comparador de uma mesma

variável (final de cada coluna). A equação final resultante utilizada na modelagem da susceptibilidade à inundação, utilizando a ferramenta *Raster Calculator*, foi:

$$\text{Inundação} = 0,028 * \text{Solo} + 0,051 * \text{Capacidade} + 0,049 * \text{Altitude} + 0,336 * \text{Declividade} + 0,173 * \text{Densidade} + 0,363 * \text{NDWI}$$

Tabela 1. Notas de potencial de risco à inundação atribuídas aos planos de informação. O significado das siglas nas colunas “Solo” e “Uso” encontra-se em Cunha e Silveira (1996)

Solo	Nota	Capacidade	Nota	Altitude (m)	Nota	Declividade (%)	Nota	Densidade (m.km ⁻¹)	Nota	NDWI	Nota
Rd	10	VIII sd	10	0	10	0-3	10	0,0-0,45	1	s/ água	0
HGs	10	VI sd	9	1-10	9	4-8	9	0,46-1,23	1	c/ água	10
HO	10	VII sd	9	11-20	8	9-20	5	1,24-1,96	1		
SK	10	III sd	6	21-30	7	21-45	3	1,97-2,64	1		
HPd1	10	II sd	5	31-40	6	46-75	1	2,65-3,33	6		
HPd2	10	IV se	3	41-50	5	76-100	1	3,34-4,06	7		
A	9	III se	2	51-100	4			4,06-4,92	8		
HGe1	9	VIII se	1	101-150	3			4,93-6,20	9		
HGe2	9			151-200	2			6,21-11,62	10		
PBd2	8			201-520	1						
HGPe1	8										
HGPe2	8										
HGPs	8										
Ae	8										
PBd1	7										
PLe3	7										
PLe4	7										
PLe5	7										
PLe1	6										
PLe2	6										
PVd2	5										
PVd1	4										
AQd	1										

Tabela 2. Matriz de comparação pareada e determinação dos pesos para cada plano de informação. Nota-se que cada célula contém o valor do comparador atribuído dividido pelo somatório da coluna

	Solo	Capacidade	Altitude	Declividade	Densidade	NDWI	Peso
Solo	1/30,0	(1/3)/23,3	(1/3)/25,5	(1/9)/2,7	(1/5)/7,5	(1/9)/2,7	0,028
Capacidade	3/30,0	1/23,3	1/25,3	(1/7)/2,7	(1/5)/7,5	(1/9)/2,7	0,051
Altitude	3/30,0	1/23,3	1/25,3	(1/7)/2,7	(1/7)/7,5	(1/9)/2,7	0,049
Declividade	9/30,0	7/23,3	7/25,3	1/2,7	3/7,5	1/2,7	0,336
Densidade	5/30,0	5/23,3	7/25,3	(1/3)/2,7	1/7,5	(1/3)/2,7	0,173
NDWI	9/30,0	9/23,3	9/25,3	1/2,7	3/7,5	1/2,7	0,363
Somatório	30,0	23,3	25,3	2,7	7,5	2,7	1,000

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 podem-se observar os diferentes planos de informação utilizados na modelagem do risco à inundação após o processo de reclassificação no formato matricial para os valores estabelecidos (Tabela 1). Para a maioria das variáveis estudadas, exceto para as classes de solo (Figura 1), observou-se uma diferenciação bem clara e sequencial da espacialização das notas de susceptibilidade conduzida pela geomorfologia da área de estudo que apresenta uma transição

gradual das regiões (noroeste - NO) de maior altitude com relevo mais acidentado para as regiões (sudeste - SE) de menor altitude com relevo plano (sudeste).

A influência das classes de solo em relação ao potencial de inundação foi determinada pela sua capacidade de drenagem, sendo assim solos rasos próximos ao contato litológico ou afloramentos rochosos, de áreas mais altas, e solos de várzea com lençol freático próximo à superfície, nas partes mais baixas da planície, receberam a mesma nota de potencial (Figura 1f). A capacidade de uso das terras também foi considerada um agente responsável pela redução do escoamento superficial e posterior drenagem de determinado terreno, onde diferentes tipos de capacidade, associados às culturas a serem cultivadas, receberam diferentes notas (Figura 1b). A declividade foi o plano de informação que apresentou o maior peso (Tabela 2) por ser imprescindível para a investigação de acúmulo de água no local, onde quanto mais íngreme for o terreno maior será o escoamento superficial e vice-versa (Figura 1d). Pelo fato de parte do município de Pelotas estar localizado em uma região muito baixa, próxima a mananciais e corpos hídricos expressivos, esta variável tornou-se também importante na modelagem (Figura 1a). Em função do NDWI identificar corpos de água e áreas de banhado existentes no terreno, a partir dos quais o processo de extravasamento e, conseqüente, inundação pode se dar de forma bastante intensa, a esta informação foi atribuído o segundo maior peso (Tabela 2 e Figura 1e). A densidade de linhas de fluxo de água apresentou o terceiro maior peso, onde regiões de maior concentração de canais de drenagem apresentaram maior confluência de águas convergindo para os locais mais baixos (Figura 1c).

O resultado final da modelagem de potencial de risco à inundação está apresentado na figura 2, onde os valores de potenciais variaram de 0,86 a 9,89, sendo 10 o valor de maior potencial. Pode-se observar que a distribuição das susceptibilidades à inundação obedeceu às características geomorfológicas da área de estudo, em que as áreas mais onduladas de cotas mais altas (quadrante NO) apresentaram potencial de risco baixo e baixo/médio. Ainda nesse quadrante, os maiores riscos ocorreram quase que exclusivamente dentro dos canais de drenagem. A partir da transição para a planície sedimentar onde o relevo torna-se plano nas menores cotas (quadrante SE), os riscos começaram a aumentar variando de médio a médio/alto, inclusive, para o perímetro urbano do município de Pelotas (Figura 2). Apesar desta metodologia não ter sido pensada nem desenvolvida para a modelagem de susceptibilidade à inundação em áreas urbanas, em função da baixa resolução espacial (30 m) dos planos de informação utilizados, algumas importantes indicações e informações de risco de caráter mais geral puderam ser observadas, principalmente em relação à parte sul da cidade. Ainda no quadrante SE, fora do perímetro urbano, os canais de drenagem e as áreas de banhados (várzeas), onde normalmente cultivam-se lavouras de arroz no sistema de “inundação” sobre solos mal drenados (Figuras 1b e 1f), também apresentaram potenciais de risco variando de médio/alto a alto. Os potenciais mais altos de risco à inundação (Figura 2) foram coincidentes com os corpos hídricos identificados pelo plano de informação NDWI (Figura 1e).

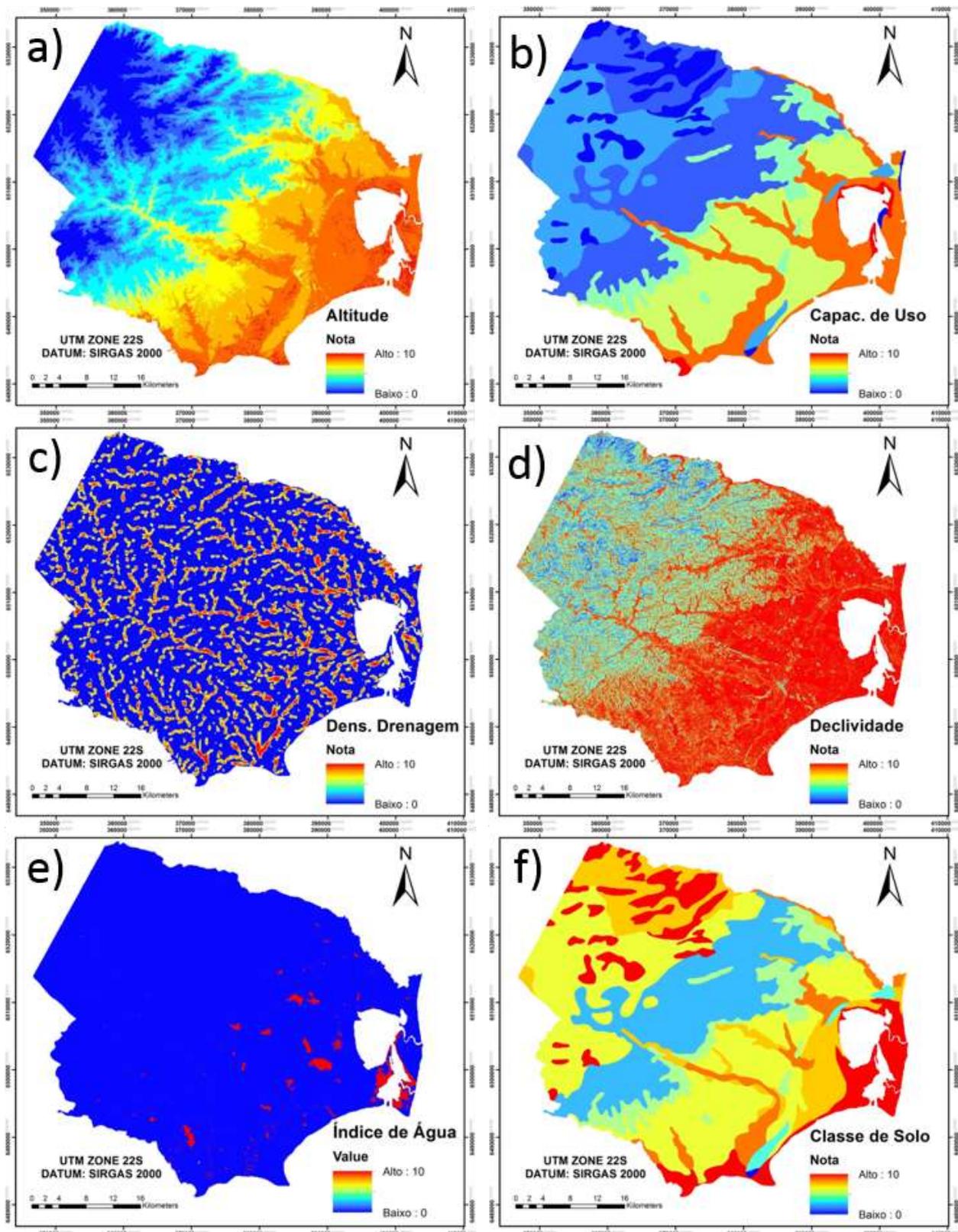


Figura 1 - Planos de informação reclassificados com base nas notas atribuídas às diferentes classes, sendo: a) altitude, b) capacidade de uso das terras, c) densidade de linhas de fluxo d'água, d) declividade, e) índice espectral de água por diferença normalizada (NDWI) e f) classes de solo

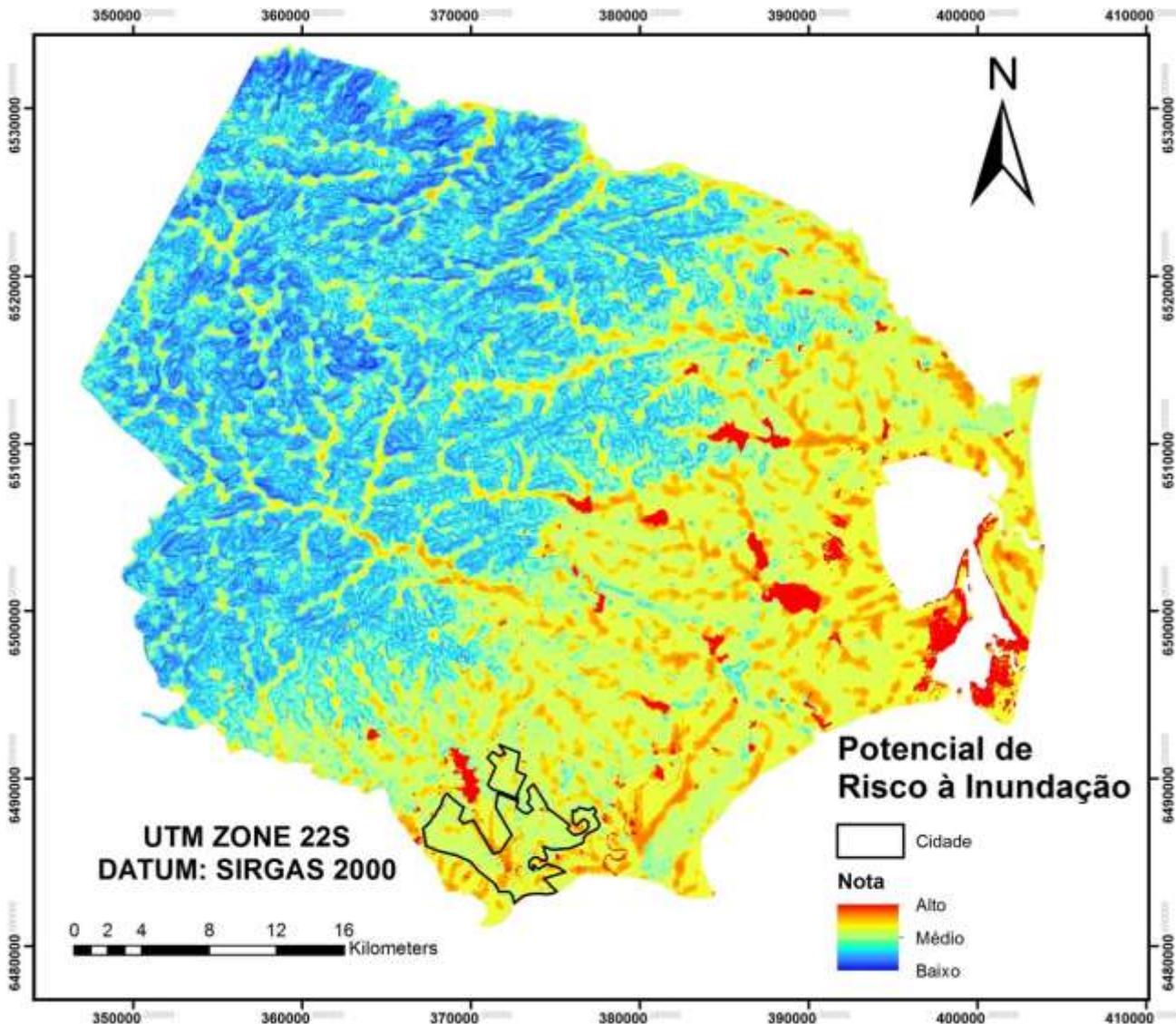


Figura 2 - Mapa de potencial de risco à inundação no município de Pelotas/RS

CONCLUSÕES

O mapa obtido de potencial de risco à inundação ainda necessita ser validado a campo e comparado com eventos históricos registrados pela defesa civil do município. Apesar disso, a hipótese do trabalho foi comprovada, onde através do método do Processo Hierárquico Analítico (AHP) foi possível modelar, identificar e mapear a ocorrência do fenômeno inundação estudado no município de Pelotas/RS de forma mais verossímil à realidade. As variáveis de entrada utilizadas mostram-se satisfatórias para tal modelagem. Esta metodologia pode ser utilizada para gerar mapas de potenciais de risco que podem ser utilizados para prevenção de desastres naturais relacionados à inundação. Ainda, é necessária uma base de dados mais completa e com maior detalhamento espacial e outros planos de informação para verificar se os resultados terão maior representatividade, principalmente para o perímetro urbano. Nesse trabalho não foi considerado como indicador de inundação, a impermeabilização do solo na região urbana de Pelotas. Isso torna a região da cidade menos próxima da realidade, pois esse fator contribui de forma significativa para o potencial de inundação.

O estudo do mapeamento do potencial de risco à inundação com o AHP será continuado através do emprego de outras metodologias para a estimativa dos pesos e de outras variáveis de entrada também adequadas, como os valores CN (curva-número) para os solos utilizados, por exemplo. Além do AHP, outros métodos de modelagem de informações geográficas também serão testados.

REFERÊNCIAS

BARROS, M. A.; MOREIRA, M. A.; RUDORFF, B. F. T. (2007). Processo Analítico Hierárquico na Identificação de Áreas Favoráveis ao Agroecossistema Cafeeiro em Escala Municipal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42(12), pp. 1769 – 1777.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M.V. (2001). *Introdução à Ciência da Geoinformação*. INPE São José dos Campos - SP, 345 p.

CUNHA, N.G.; SILVEIRA, R. J. C. (1996). *Estudo dos Solos do Município de Pelotas*. EMBRAPA/CPACT, 50 p.

MCFEETERS, S.K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 5, pp. 1425–1432.

O'CONNOR, J. E.; COSTA, J. E. (2004). *The World's Largest Floods, Past and Present: Their Causes and Magnitudes [Circular 1254]*. Washington, D.C., U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 19 p.

OREWOLE, M.O.; ALAIGBA, D. B.; OVIASU, O. U. (2015). Riparian Corridors Encroachment and Flood Risk Assessment in Ile-Ife: A Gis Perspective. *Open Transactions on Geosciences*, 2(1), pp. 2372 – 6466 (online).

ORIOLA, E.; BOLAJI, S. (2012). Urban Flood Risk Information on a River Catchment in a Part of Ilorin Metropolis, Kwara State. Nigeria. *Information and Knowledge Management*, 2(8), pp. 2224 – 896X (online).

PHILLIP, R. P.; MACHADO, R. (2002). Ocorrência e Significado dos Septos do Embasamento Encontrados nas Suítes Graníticas do Batólito Pelotas, RS, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, UFRGS, Porto Alegre - RS, 29(1), pp. 43 – 57.

SAATY, T.L. (1986). Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process. *Management Science*, 32(7) pp. 841 – 855.

SILVA, C. S. (2007). *Inundações em Pelotas/RS: O Uso de Geoprocessamento no Planejamento Paisagístico e Ambiental*. Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, 199 p.

WANG. Y.; LI, Z.; TANG, Z.; ZENG, G. (2011). A GIS-Based Spatial Multi-Criteria Approach for Flood Risk Assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China. *Water Resources Management*, 25(13), pp. 3465 – 3484.