

MODELAGEM DE SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÃO UTILIZANDO PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO (AHP) E LÓGICA FUZZY

Raimundo Almir Costa da Conceição¹, Patrícia Mara Lage Simões²

¹Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) – SUREG/BE, Av. Dr. Freitas, 3645, Bairro do Marco, Belém-PA; ² Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) – SUREG/BH, Av. Brasil, 1731 – Funcionários, Belo Horizonte-MG.

RESUMO

O presente trabalho mostra a construção de um modelo de suscetibilidade à inundação gerado com a aplicação da técnica AHP e da Lógica *Fuzzy* à metodologia e aos insumos já utilizados pelo o Serviço Geológico nas modelagens de inundação. Como resultado, no modelo do município de Presidente Kennedy-ES, obteve-se uma melhora importante na classificação (Alta, Média e Baixa suscetibilidade), principalmente em áreas de alto curso de drenagem, onde a suscetibilidade à inundação é bastante reduzida devido ao relevo íngreme e elevado. Nas áreas de baixada, as classes de alta e média suscetibilidade foram espacialmente mais bem representadas devido à diminuição das ilhas de polígonos. Outros avanços importantes são a aplicação de um grau de importância às variáveis utilizadas, tendo em vista que naturalmente as suas influências são diferentes; e a consideração de um grau de incerteza inerente à suscetibilidade do terreno ao processo de inundação.

Palavras-chave — suscetibilidade, inundação, fuzzy, modelagem, processo analítico hierárquico.

ABSTRACT

The present article shows the construction of a flooding susceptibility model, engendered with the application of AHP technique and the fuzzy logic to the methodology and the inputs already used by the Geological Survey in the flooding modeling. As a result, a significant improvement in the classification (High, Medium and Low Susceptibility) was obtained in the Presidente Kennedy-ES municipality, especially in high drainage course areas, where flooding susceptibility is significantly reduced due the inclined and high relief. In the lowland areas, the high and medium susceptibility classes were spatially better represented due to the decrease of polygon islands. Other important advances are the application of a magnitude of importance to the used variables, given that their influences are naturally different; and a significance of an uncertainty degree intrinsic to the susceptibility of the land to a flooding process.

Keywords - susceptibility, flood, fuzzy, modeling, hierarchical analytical process.

1. INTRODUÇÃO

A modelagem de inundação realizada pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) faz parte de um conjunto de produtos elaborados, desde o ano de 2012, no âmbito do Projeto Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações, destinado a auxiliar os municípios brasileiros na identificação e avaliação de áreas suscetíveis aos processos mencionados, contribuindo para melhorar o planejamento do uso e ocupação do solo, o controle da expansão urbana, a avaliação de potenciais riscos e ainda auxiliar na elaboração de zoneamentos ecológico-econômicos [1].

A metodologia de modelagem utilizada, que foi elaborada em parceria técnica do SGB/CPRM com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) [1] vem sendo constantemente melhorada, a partir da necessidade de buscar um processo de execução que possa ser aplicável aos diversos regimes geomorfológicos e hidrológicos existentes no território nacional e, além disso, ser produzido em curto prazo com dados disponibilizados gratuitamente e/ou cedidos por instituições parceiras.

Considerando o exposto, atualmente os principais temas (variáveis) utilizados na modelagem de inundação são o Modelo normalizado de terreno HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) [2], derivado do Modelo Digital de Elevação (MDE) ALOS PALSAR (15 m de resolução espacial) e os padrões de relevo presentes na unidade municipal, extraídos através de fotointerpretação de imagens de satélite e MDE's.

Os dois temas recebem pesos de 1 a 3 (3-Alta, 2-Média e 1-Baixa suscetibilidade a inundação) de acordo com suas características, sendo que os padrões de relevo são classificados em termos de suscetibilidade a inundação, conforme a biblioteca de padrões de relevo do SGB/CPRM [3], juntamente com informações de trabalhos que relatam o comportamento dessas formas de relevo diante dos processos hidrológicos [4]; [5] e [6]. O modelo HAND é recortado com base nos padrões de relevo suscetíveis e classificado segundo o método do desvio quartílico, no qual, neste caso, cada classe é composta por, aproximadamente, 33% dos valores apresentados. Posteriormente esses temas classificados são somadas (álgebra de mapas) segundo uma lógica booleana (verdadeiro ou falso), reclassificados e pós-processados, resultando no modelo de suscetibilidade a inundação [7].

Os modelos gerados a partir desta metodologia têm demonstrado resultados satisfatórios na espacialização das classes de suscetibilidade a inundação para a escala de trabalho (1:25.000), ainda assim, carecem de aperfeiçoamentos, pois nas regiões de alto e médio curso das drenagens, há uma superestimação da classe de alta suscetibilidade.

Em virtude da natureza incerta das áreas que podem ser, de fato, afetadas por inundações (mesmo considerando os ambientes de planície de inundação e outros tipos de relevo suscetíveis); considerando os limites de classes que também não apresentam limites claros e a modelagem julgar todos os temas utilizados como tendo a mesma influência (peso) sobre o processo natural, entende-se que a utilização de Lógica *Fuzzy* como método de análise espacial e do AHP como um instrumento de tomada de decisões que busca relativizar a influência das variáveis, possa propiciar resultados mais coerentes em termos de espacialização das classes de suscetibilidade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

A área de estudo compreende o município de Presidente Kennedy, localizado no extremo sul do estado do Espírito Santo (Figura 1), e foi selecionada por apresentar grande variedade de padrões de relevo suscetíveis a inundação, compreendendo uma extensa área a ser modelada de aproximadamente 162.000 km².



Figura 1. Localização do Município de Presidente Kennedy, Espírito Santo.

2.2. Lógica *Fuzzy*

A Lógica *Fuzzy* pode ser definida como a parte da lógica matemática dedicada aos princípios formais do raciocínio incerto ou aproximado, portanto mais próxima do pensamento humano e da linguagem natural [8]. Ao contrário da lógica Booleana, que possui os estados verdadeiro ou falso, a Lógica *Fuzzy* trata de valores verdade que variam continuamente de 0 a 1 [9]. De outro modo, esses valores indicam o grau de pertinência de um dado elemento a um determinado conjunto. O grau de pertinência pode ser

dado por diversar funções dependendo do conceito que se deseja representar e do contexto que estão inseridas [10].

Em Sistemas de Informação Geográfica, este método de inferência espacial transforma os valores dos dados de entrada, indicando a força de uma associação em um conjunto, com base em um algoritmo de fuzzificação (função) especificado. O valor 0 é atribuído àqueles locais que definitivamente não são membros do conjunto especificado e 1 é atribuído àqueles valores que são definitivamente membros do conjunto, e todo o intervalo de possibilidades entre 0 e 1 é atribuído a algum nível de possível adesão (quanto maior o número, maior a possibilidade) [11].

A aplicação de lógica *fuzzy* é particularmente importante na delimitação das classes de suscetibilidade do HAND, tendo em vista a complexidade e as incertezas presentes na definição de seus limites, já que dados de série histórica de chuva e outros parâmetros climáticos e hidrológicos não são utilizados. Além disso, de acordo com [12], variáveis linguísticas como “alto”, “médio” e “baixo” (também utilizados para atribuir qualidade as áreas suscetíveis a inundação) são considerados como termos *fuzzy*, pois admitem vagueza nas informações.

4.2. Processo Analítico Hierárquico (AHP)

O Processo Analítico Hierárquico (*Analytic Hierarchy Process* - AHP) desenvolvido por Saaty na década de 1970 consiste na criação de uma hierarquia de decisão, composta por níveis ou classes de importância que permitem uma visão global das relações inerentes ao processo [13]. A hierarquia de importância é criada por uma matriz quadrada $n \times n$ de comparação pareada, onde as linhas e colunas correspondem aos critérios, sendo o resultado igual à importância relativa do critério da linha face ao critério da coluna. Os critérios de importância na comparação pareada são definidos por uma escala de julgamento que vai de 1 a 9, onde o valor 1 equivale ao mínimo, e 9 o máximo de importância de um fator sobre o outro (Tabela 1). De cada comparação são extraídos seus *autovetores* que correspondem ao grau de importância relativa de cada tema considerado [14].

Tabela 1: Escala de Julgamento [15]

| Valor | Definição |
|------------|--|
| 1 | Elementos iguais |
| 3 ou 1/3 | Fraca importância de um elemento sobre outro |
| 5 | Importância forte de um elemento sobre outro |
| 7 | Importância muito forte de um elemento sobre outro |
| 9 | Importância extrema de um elemento sobre outro |
| 2, 4, 6, 8 | Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes |

Neste trabalho foram utilizados os temas HAND (*Height Above the Nearest Drainage*), que é indicativo da distância horizontal a drenagem mais próxima e é importante para demonstrar as cotas de inundação no terreno [2]; os padrões de relevo suscetíveis à inundação extraídos por

fotointerpretação das planícies de inundação, planícies fluviolacustres (brejos), planícies fluviomarinhas (brejos e mangues), rampas de alúvio-colúvio, terraços fluviais e terraços marinhos; a declividade, pois as áreas mais aplainadas (baixa declividade) são mais suscetíveis à inundação; e a altimetria, já que há uma forte tendência das áreas mais baixas serem mais suscetíveis a inundação.

Os temas foram fuzzyficados através da ferramenta *Fuzzy Membership*, do software ArcGis 10.6, tendo como função de pertinência a função MS Small, a qual atribui maior pertinência aos valores mais baixos do conjunto de dados, ou seja, aos menores valores de HAND, declividade e altimetria, foram atribuídos maior possibilidade de inundação. O tema padrões de relevo foi fuzzyficado manualmente. Atribuiu-se valores de 1 a 10 aos mesmos, considerando a suscetibilidade a inundação de cada um, sendo 10 atribuído ao padrão mais suscetível. Então os valores obtidos foram divididos por 10, obtendo-se uma escala de 0 a 1, conforme ocorreu com a fuzzificação dos demais temas.

Através do *AHP Calculator*¹ foi possível estimar a importância relativa dos temas utilizados (Tabela 2), obtendo-se o peso de 0,478 para o HAND, 0,314 para os padrões de relevo, 0,139 para a altimetria e 0,069 para declividade.

Tabela 2: Matriz de comparação pareada

| Variáveis/Temas | HAND | Relevo | Altimetria | Declividade |
|-----------------|------|--------|------------|-------------|
| HAND | 1 | 2 | 3 | 7 |
| Relevo | 1/2 | 1 | 4 | 3 |
| Altimetria | 1/3 | 1/4 | 1 | 3 |
| Declividade | 1/7 | 1/3 | 1/3 | 1 |

O resultado final foi obtido através da álgebra de mapas, na qual todos os temas foram somados de acordo com a equação 1.

$$S = (HAND_{fuzzy} \times 0,478) + (Rel_{fuzzy} \times 0,314) + (Alt_{fuzzy} \times 0,139) + (Decliv_{fuzzy} \times 0,069) \quad (1)$$

No raster resultante foi aplicada a ferramenta *filter* (*filter type low*) para reduzir a presença de pixels espúrios. Posteriormente, o mesmo foi classificado através do desvio quartílico em classes de alta, média e baixa suscetibilidade a inundação e finalmente, convertido em polígonos (vetores), aos quais aplicou-se a ferramenta *smooth polygon*, com tolerância de 15 m para suavização das bordas.

3. RESULTADOS

A Figura 2 demonstra do resultado final da modelagem de suscetibilidade a inundação.

Observa-se na Figura 2A que a cabeceira das drenagens, áreas onde naturalmente há uma baixa suscetibilidade a inundação, devido à presença de elevadas amplitudes, relevos com encostas íngremes e planícies de inundação

mais encaixadas, o modelo obteve êxito na representação, diminuindo consideravelmente a classe de alta suscetibilidade. A Figura 2B mostra a propagação da alta e média suscetibilidade nas regiões de baixa amplitude com declividades suaves e nas grandes baixadas formadas, formadas por planícies fluviomarinhas, fluviolacustres e de inundação.

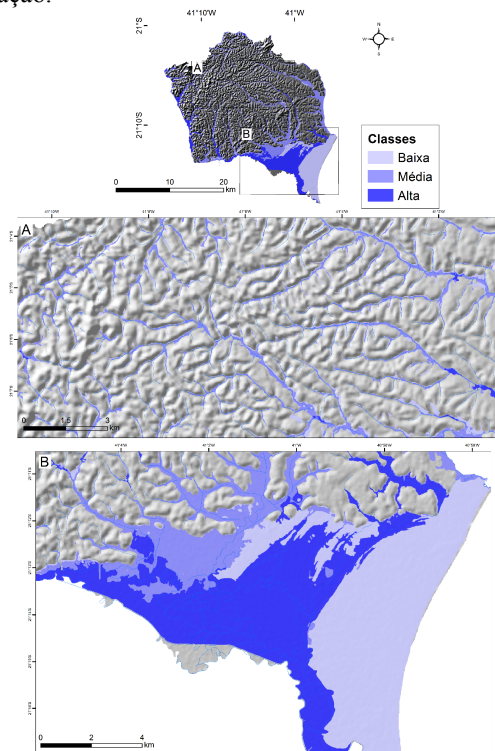


Figura 2: Modelagem de suscetibilidade a inundação.

4. DISCUSSÃO

Os resultados demonstraram que a representação da suscetibilidade do terreno a inundações foi mais coerente em comparação à metodologia aplicada atualmente nas cartas de suscetibilidade, diminuindo substancialmente a necessidades de edições manuais. As áreas suscetíveis no alto curso de drenagem (cabeceira) foram mais bem classificadas e as áreas de médio e baixo curso que já eram satisfatoriamente representadas, foram levemente melhoradas.

A lógica *fuzzy* proporcionou uma melhor distribuição das classes, se comparada à análise espacial utilizando lógica booleana, já que a incerteza dos limiares de classe do HAND, dos padrões de relevo, da altimetria e da declividade, quanto à suscetibilidade a inundação é levada em consideração.

A utilização do AHP proporcionou a inclusão de pesos ponderados aos temas utilizados, melhorando a distribuição espacial das classes de suscetibilidade, auxiliando também na classificação das áreas mais próximas a drenagem, mais baixas e planas como de alta suscetibilidade.

O avanço observado na modelagem realizada neste trabalho defronta-se com falhas causadas por pixels espúrios

¹ Disponível em https://bpmg.com/academic/ahp_calc.php

observados, influência da vegetação e de áreas urbanizadas nos MDE's ALOS PALSAR, ainda assim, após correções nos dados, o produto resultante é bastante satisfatório para a escala de trabalho do projeto (1:25.000).

Ressalta-se que em nenhuma das bibliografias analisadas, a variável (tema) padrões de relevo foi utilizada. Conforme demonstrado por [3], os padrões de relevo analisados em conjunto com outros dados do meio físico, compõem um importante instrumento para subsidiar os estudos de suscetibilidade a inundação.

5. CONCLUSÕES

A aplicação da teoria da Lógica *Fuzzy* e do Processo Analítico Hierárquico (AHP), além da inclusão das variáveis altimetria e declividade, demonstraram uma forte contribuição no sentido aperfeiçoar os procedimentos de modelagem de inundação, já que foram exitosos em qualificar com mais eficiência, as regiões de alto curso de drenagem quanto a sua baixa suscetibilidade inundação. Notadamente, nas regiões de baixada, as áreas de alta e média suscetibilidade foram espacialmente melhor homogeneizadas, já que a presença de ilhas de polígonos foi bastante reduzida devido aos efeitos da inclusão de uma sistemática de pesos e de novas variáveis.

Há necessidade ainda de avaliações do modelo em atividades de campo, para melhor apreciação dos resultados. Ademais, é importante posteriormente, analisar a aplicação de outras funções de pertinência e/ou outras formas de definição dos parâmetros em Lógica *Fuzzy*. E ainda, analisar modelos obtidos somente com a utilização de AHP, tanto para a definição da importância relativa entre os temas, quanto a importância relativa das características dentro de um mesmo tema. Pode-se ainda incluir em novos testes, outras variáveis como índices morfométricos e tempo de concentração das bacias hidrográficas. São importantes, por fim, testes utilizando MDE's com condicionamento hidrográfico, que por sua vez, tem se mostrado uma importante ferramenta nos estudos de bacias hidrográficas e gestão recursos hídricos, conforme [16].

REFERÊNCIAS

- [1] Bitar O. Y. (Coord.). 2014. Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações -1:25.000: Nota Técnica Explicativa. 2014. São Paulo: IPT; Brasília, DF: CPRM (Publicação IPT 3016).
- [2] Rennó, C. D. et al. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, n. 9, p. 3469–3481, set. 2008.
- [3] Dantas, M. E., Shinzato, E., Renk, J. F. C., Moraes, J. M., Machado, M. F., Nogueira, A. C. 2014. O emprego da geomorfologia para avaliação de suscetibilidade a movimentos de massa e inundação – Mimoso do Sul/ES. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*. Vol. 4. N. 2. P. 23 – 42.
- [4] Dantas M. E. 2013. Análise de padrões de relevo: um instrumento aplicado ao mapeamento da Geodiversidade. In: Bandeira I.C.N. (ed.) *Geodiversidade do Estado do Maranhão*, CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 10, Teresina/PI, p.133-140.
- [5] Dantas, M. E.; Maia, M. A. M. 2010. Compartimentação geomorfológica. In: Maria Adelaide Mansini Maia & José Luiz Marmos. (Org.). *Geodiversidade do Estado do Estado do Amazonas*. 1ed. Manaus: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, v. 1, p. 27-44.
- [6] Dantas, M. E. 2013. Análise de padrões de relevo: um instrumento aplicado ao mapeamento da Geodiversidade. In: Bandeira I.C.N. (ed.) *Geodiversidade do Estado do Maranhão*, CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 10, Teresina/PI, p.133-140.
- [7] Conceição, R. A. C.; Simões, P. M. L.; Dantas, M. E. 2018. Contribution of the characteristics of relief patterns to the methodology of modeling the susceptibility chart to a flood. *Journal of the Geological Survey of Brazil (JGSB)*. Vol. 4. N. 2 (**Para submissão**).
- [8] Katinsky, M. *Fuzzy set modeling in geographic information systems*. University of Wisconsin--Madison, 1994.
- [9] Silva, Renato Afonso Cota. *Inteligência artificial aplicada a ambientes de engenharia de software: Uma visão geral*. INFOCOMP, v. 4, n. 4, p. 27-37, 2005.
- [10] Gonçalves, A. P. *Aplicação de Lógica Fuzzy em Guerra Eletrônica*. Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2007.
- [11] ESRI. *How Fuzzy Membership Works*. Disponível em: <<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-fuzzy-membership-works.htm>>. Acesso em: 17 set. 2018.
- [12] Rignel, D. G. DE S.; Chenci, G. P.; Lucas, C. A. Uma introdução à lógica Fuzzy. *Revista eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica*, v. 01, n. 01, p. 17–28, 2011.
- [13] Pinese Júnior, J. F.; Rodrigues, S. C. O método de análise hierárquica – AHP – como auxílio na determinação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Piedade - MG. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 23, p. 4-26, 2012.
- [14] Silva, C. A. DA; Nunes, F. P. Mapeamento de vulnerabilidade ambiental utilizando o método AHP: uma análise integrada para suporte à decisão no município de Pacoti/CE. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, INPE**, p. 5435–5442, 2009.
- [15] Schmidt, A. M. A. *Processo de apoio à tomada de decisão abordagens: AHP e Macbeth*. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.
- [16] Jacon, A. D. *Condicionamento hidrográfico em Modelos Digitais de Elevação: procedimentos e importância*. Disponível em: <<http://wiki.dpi.inpe.br>>. Acesso em: 21 set. 2018.